
Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos
Departamento de Producción Vegetal. Fitotecnia

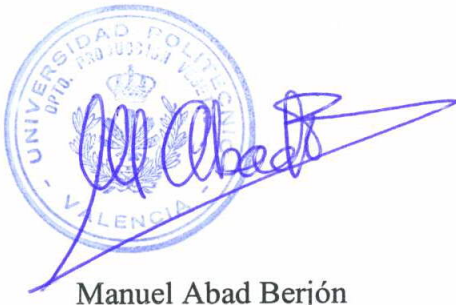
**Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo
como base para el control del riego.
Metodología de laboratorio y modelización**

**Memoria presentada por
Valentín Terés Terés
para optar al grado de
Doctor Ingeniero Agrónomo
Madrid, julio de 2001**

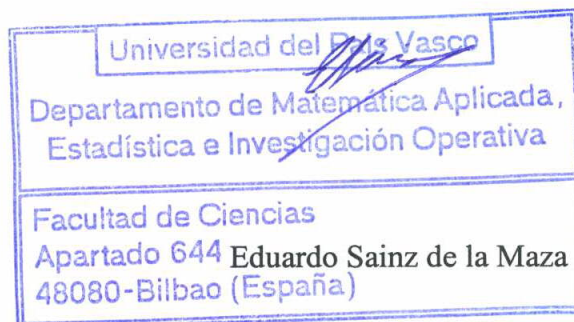
MANUEL ABAD BERJÓN, PROFESOR TITULAR NUMERARIO DE UNIVERSIDAD ADSCRITO AL DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Y EDUARDO SAINZ DE LA MAZA, PROFESOR TITULAR NUMERARIO DE UNIVERSIDAD ADSCRITO AL DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA Y ESTADÍSTICA E INVESTIGACIÓN OPERATIVA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO,

CERTIFICAN: Que la memoria de Tesis Doctoral titulada “Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización”, que presenta D. Valentín Terés Terés en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid para aspirar al Grado de Doctor Ingeniero Agrónomo, ha sido realizada bajo nuestra dirección, y por ello autorizamos su presentación.

Y para que conste, expedimos el presente certificado en Valencia y en Leioa (Vizcaya), a doce de julio de dos mil uno.



Manuel Abad Berjón



Universidad del País Vasco
Departamento de Matemática Aplicada,
Estadística e Investigación Operativa
Facultad de Ciencias
Apartado 644 Eduardo Sainz de la Maza
48080-Bilbao (España)

AGRADECIMIENTOS

De bien nacidos es ser agradecidos. Son muchas las personas a las que tengo que agradecer su trabajo, colaboración y dedicación, sin las cuales no hubiera sido posible la elaboración de esta tesis. La extensión de este apartado limita la lista explícita. La lista implícita es mucho más extensa, y todos sabéis que contáis con mi más sincero agradecimiento.

A Manuel Abad – Manolo-, además de director de tesis, mi primer contacto con el mundo de los sustratos.

A Eduardo Saínz de la Maza, también director, y a Mikel Lezaun, que han hecho que vuelva a disfrutar del, para mí, siempre apasionante mundo de las matemáticas. A Gloria Pérez, que nos ha aclarado no pocos conceptos estadísticos.

A José Ramón Lissarrague, tutor compañero y sobre todo amigo.

A Martín Mancho, Ana del Barrio, Hugo Macía, Javi Elorrieta, José Landeta y Agustín Landeta, compañeros de alegrías y sinsabores durante todo el desarrollo de los trabajos experimentales de esta tesis. A Emilio Cuesta, amigo y compañero, y que junto a José Landeta y mi padre, nos contemplan desde su lugar privilegiado.

A todos y todas, que no han sido pocas, los que han dedicado gran parte de su trabajo, en el Servicio de Investigación y Mejora Agraria del Gobierno Vasco, a esta tesis: Verónica, Marta, Matere, Aitor y Anabel, los alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra y de la Facultad de Ciencias de la Universidad del País Vasco -que han desarrollado trabajos fin de carrera estrechamente relacionados con esta tesis-, a los becarios del departamento de Agricultura del Gobierno Vasco.

A Julio Muro de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra, director de muchos de los trabajos fin de carrera mencionados.

A todos los compañeros del Servicio de Investigación y Mejora Agraria (SIMA) del Gobierno Vasco, Margari, Carmen, Natxo, Ana A., Arsenio, Iñaki, Yoli, Marta, Gerardo, Merche, Mirian, Carlos, JoseAn, Luis O., Marivi, Lorenzo, Ramón, Ana G., Luís C., Juan, José Angel, Tere, y un largo etcétera, a los que he incordiado continuamente para que me echaran una mano.

A Gloria Osacar y Ester Bacaicoa, bibliotecarias del Departamento de Agricultura, que han hecho auténticas maravillas para poder conseguir las separatas.

Es justo hacer constar mi agradecimiento a D. José María Ceberio y a D. Luis Javier Tellería, directores de Investigación del Departamento de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco. A los directores de SIMA, Mercedes Kobeaga, Pedro Guerrero, y muy especialmente a Goyo Alonso, en cuya etapa de director del SIMA se desarrollo el grueso de la parte experimental.

A Xavier Martínez, Silvia Burés, Alberto Masaguer, Jon Zabaleta, Pepe Ordovás, Carmen Ortega, y todos los compañeros del Grupo de Sustratos de la SECH, muy especialmente a Maite Aguado, que además es compañera, desde los tiempos gloriosos, y buena amiga.

A los compañeros del Laboratorio Agrario de Fraisoro, Javier Ansorena, Domingo Merino y Eugenio Batalla, y a Patricia Noguera de la ETSI Agrónomos de Valencia, cuya colaboración ha sido de gran utilidad.

No puedo terminar sin un recuerdo muy especial para quien fue mi primer Maestro, D. Roberto Sanz de Galdeano. Quiero personificar en él mi agradecimiento a todos los maestros y profesores que han hecho posible que llegue hasta aquí.

Muchas gracias a todos.

Un elefante que se exhibía por las ciudades y los pueblos quedó alojado en el establo de un lugar donde nadie había visto jamás a un animal de su especie. Cuatro curiosos, enterados de la existencia de aquella maravilla, pretendieron verla antes que los demás. Pero ocurrió que en el establo no había luz y su investigación tuvo que realizarse en la oscuridad.

Al palparle la trompa, uno de ellos se dijo que el animal debía de ser parecido a una manguera. El segundo, tocándole una oreja, llegó a la conclusión de que se asemejaba a un abanico. El tercero, al dar con una pata, lo calificó de columna viviente. El cuarto le puso una mano en el lomo y aseguró que era una especie de trono. Ninguno pudo formar la imagen completa; y la parte que cada uno tocó solo pudieron expresarla mediante referencia a cosas que ya conocían. El resultado fue una confusión total. Cada cual quería tener razón, y cuando lo contaron a los demás, nadie pudo saber qué era lo que en realidad habían experimentado los investigadores.

Relato Sufi tradicional
Los Sufis
Idries Shah.

A Eladio y Ramira, mis padres
A Begotxu, mi mujer
A Jon y Goizalde, mis hijos
¿Es necesario decir por qué?

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL

1 ARTÍCULOS

- Arrieta V, Terés V, 1993. Programa de investigación en sustratos de cultivo. Departamento de Producción Vegetal. Resultados de Investigación 1992. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 48:281-301 (A). ISBN 84-457-0262-9
- Arrieta V, Terés V, 1993. Posibilidades de aprovechamiento de la corteza de pino (*Pinus radiata*) como sustrato de cultivo. Resultados preliminares. Actualidad Forestal de Galicia. Suplemento de la revista El Campo del BBV. nº 127-130:8-14 (A)
- Arrieta V, Terés V, 1994. Escoria cristalizada de Horno Alto como sustrato de cultivo. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 57 51p (R). ISBN 84-457-0424-9
- Arrieta V, Terés V, 1994. Utilización de diversos materiales como sustrato para cultivo en contenedor de *Pelargonium*. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1993. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 59(2):411-416 (A). ISBN 84-457-0456-7
- Terés V, Arrieta V, Batiz J, Aparicio L, 1994. Utilización de tensiómetros como sensores de riego para sustratos. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1993. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 59(2):417-424 (A). ISBN 84-457-0456-7
- Terés V, Arrieta V, Ritter E, Lucas M, Sanchez J, 1994. Metodología para la caracterización de sustratos de cultivo: medida de la densidad real. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1993. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 59(2):425-432 (A). ISBN 84-457-0456-7
- Terés V, Arrieta V, Rozas M, 1994. Control de riego en sustratos de cultivo mediante el uso de tensiómetros. Sustrai, Revista Agropesquera nº 35:36-39. (A)
- Terés V, Arrieta V, Sanchez J, Lucas M, Ritter E, 1995. Evaluación de la densidad real de sustratos de cultivo por el método de inmersión. (A). Investigación Agraria Serie Producción y Protección Vegetales Vol 10 (2): 231-244
- Terés V, Arrieta V, 1995. Metodología para la evaluación del volumen de aire en sustratos. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1994. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 63(2):63-70 (A). ISBN 84-457-0584-9
- Terés V, Aretxaga Lm, 1995. Medida de la humedad en sustratos de cultivos. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1994. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 63(2):71-83 (A). ISBN 84-457-0584-9
- Rozas M, Terés V, Uriarte A, 1995. Ensayo comparativo de diferentes sustratos en *Hydrangea macrophylla* (Hortensia). Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1994. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 63(2):85-91 (A). ISBN 84-457-0584-9
- Terés V, Domingo M, Artetxe A, Beunza A I, 1996. Medida de la densidad real en sustratos de cultivo. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II).

-
- Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):79-88 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Terés V, Artetxe A, Beunza A I, Ansorena J, Batalla E, 1996. Medida de la curva de retención de agua en sustratos de cultivo. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):89-97 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Artetxe A, Terés V. 1996. Diseño de picnómetro de gas de doble cámara para la medida de volúmenes en sustratos de cultivo. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):99-108 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Terés V, Beunza A I, Artetxe A, 1996. Riego en sustratos. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):65-78 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Terés V, Beunza A I, Artetxe A, Blázquez E, 1996. Ensayo comparativo de diferentes sustratos en *Hydrangea Macrophylla* (Hortensia). Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):129-133 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Zabala A, Terés V, 1996. Utilización de lodos de depuradora como sustratos de cultivo. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):109-128 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Terés V, Beunza A I, Artetxe A, 1996. Ensayo comparativo de sustratos en *Cupressocyparis leylandii* (ciclo largo) 1995-1997. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1995 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 72 (2):135-136 (A). ISBN: 84-457-1061-3
- Terés V, Beunza A I, Artetxe A, 1997. Riego en sustratos (A). Horticultura: Revista de hortalizas, flores, plantas ornamentales y vivero. Nº 120 Abril 1997. p. 49-52.
- Terés V, Artetxe A, Beunza A I, 1997. Caracterización física de los sustratos de cultivo (A). Horticultura: Revista de hortalizas, flores, plantas ornamentales y vivero. Nº 125 Diciembre 1997. p. 38-41.
- Bernal J, Terés V, Beunza A, Artetxe A, 1998. Utilización de la corteza de pino como sustrato de cultivo. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1996 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 79 (2):71-77 (A). ISBN: 84-457-1158-X
- Llona I, Terés V, Beunza A, Artetxe A, 1998. Ensayo de diferentes sustrato en cultivo de Cyclamen. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1996 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 79 (2):79-84 (A). ISBN: 84-457-1158-X
- Terés V, Beunza A, Artetxe A, 1998. Saturación de sustratos mediante aplicación de vacío. Departamento de Producción Vegetal. Resultados Investigación 1996 (II). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Infomes Técnicos nº 79 (2):95-103 (A). ISBN: 84-457-1158-X
- Artetxe A, Beunza A I, Terés V, 1998. Subirrigación de cultivos en sustratos (A). Horticultura: Revista de hortalizas, flores, plantas ornamentales y vivero. Nº 127 Marzo 1998. p. 38-40.
- Terés V, Artetxe A, Beunza A I, 2000. Lapton control de riego en sustratos de cultivo. Agrícola Vergel Nº 219 Marzo 2000. P 200-206.
- Terés V, 2000. Riego en sustratos de cultivo (A). Horticultura: Revista de hortalizas, flores, plantas ornamentales y vivero. Nº 147 septiembre 2000. p. 16-30.

2 COMUNICACIONES A CONGRESOS

- Arrieta V, Terés V, Olabarria I, Esnaola I, 1992. Relación entre granulometría y algunas propiedades físicas de la corteza de pino (*Pinus insignis*). I Reunión Científica sobre Aprovechamiento Agrícola y Forestal de Residuos Industriales de Carácter Orgánico. Universidad de Valladolid, Escuela Politécnica Agraria de Palencia. (A)
- Arrieta V, Terés V, Esnaola I, Olabarria I, 1992. Utilización de la corteza de pino (*Pinus insignis*) como sustrato para cultivo de *Pelargonium*. I Reunión Científica sobre Aprovechamiento Agrícola y Forestal de Residuos Industriales de Carácter Orgánico. Universidad de Valladolid, Escuela Politécnica Agraria de Palencia. (A)
- Arrieta V, Terés V, Domingo M, 1992. Utilización de la corteza de pino (*Pinus insignis*) Como sustrato de cultivo. Reunión Ibérica Grupo de Sustratos de Cultivo. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 46:43-45 (A). ISBN 84-457-0175-4
- Terés V, Arrieta V, Olabarria I, Esnaola I, 1993. Comparación de métodos para medida de densidad real en corteza de pino de diferentes granulometrías. II Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas. Zaragoza. Actas de Horticultura. 10:1152-1156. (A)
- Arrieta V, Terés V, 1993. Caracterización física de mezclas de sustratos a base de escoria cristalizada de horno alto, corteza de pino y turba. I Jornadas de Sustratos de la S.E.C.H., celebradas en Villaviciosa en 1992. Actas de Horticultura. 11:77-82. (A)
- Arrieta V, Terés V, 1993. Caracterización física y química, y manejo agronómico de la corteza de pino (*Pinus radiata*) como sustrato de cultivo. I Congreso Forestal Español. Pontevedra. Tomo II:227-232. (A)
- Terés V, Arrieta V, Rozas M, 1995. A method for evaluation of air volumes in substrates. (A). Acta Horticulturae 401: Growing Media & Plant Nutrition, p. 41-48. ISBN 90-6605-847-1
- Terés V, Artetxe A, Beunza A I, 1995. Relaciones Agua-Aire en sustratos de cultivo. Avances en la investigación en Zona no Saturada. De.: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco: 365-407 (A). ISBN 84-457-0635-7.
- Terés V, Artetxe V, Beunza A I, 1996. Caracterización física de sustratos. XIV Congreso Nacional de Riegos p. 48-56. ISBN 84-87564-54-2
- Beunza A I, Terés V, Artetxe V, Arétxaga L M, 1996. Medida de la humedad en sustratos de cultivo. XIV Congreso Nacional de Riegos p. 132-140. ISBN 84-87564-54-2.
- Terés V, Beunza A I, Artetxe A, 1997. Substrate saturation by vacuum application (A). Acta Horticulturae 450: Growing Media & Plant Nutrition in Horticulture p. 381-388. ISBN 90-6605-988-5
- Terés V, 1998. Utilización de la corteza de pino como sustrato en horticultura. Jornadas sobre utilización de residuos agrarios, urbanos y escorias de siderurgia en agricultura. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Informes Técnicos nº 81: 131-141 (A). ISBN 84-457-1265-9
- Terés V, Sainz De La Maza E, Lezaun M, Beunza A, Artetxe A, Zabala A, 1998. Caracterización física de distintos sustratos en base a compost de lodo de depuradora. I Congreso Ibérico y III Nacional de fertirrigación. Murcia. Actas de Horticultura. 19(1):338-348. (A). ISBN 84-87440-24-X.
- Terés V, Artetxe A, Beunza A I, Cerveto R, Majada J, 2000. Irrigation control on substrates with the laptometron. International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current trends for Sustainable Technologies. Cartagena (Spain) 7-11 march 2000 (en prensa)

-
- Terés V, Artetxe A, Sainz De La Maza E, Beunza A I, Lezaun M 2000. Physical properties of the substrates. International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current trends for Sustainable Technologies. Cartagena (Spain) 7-11 march 2000 (en prensa)
- Terés V, 2000. Riego en sustratos de cultivo (A). Horticultura: Revista de hortalizas, flores, plantas ornamentales y vivero. Nº 147 septiembre 2000. p. 16-30.
- Terés V, Abad M, Sainz de la Maza E, Lezaun M. 2001. Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro en sustratos de cultivo. IV Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas. Cáceres 7-11 mayo de 2001. Actas de Horticultura (en prensa).

RESUMEN

La sustitución del suelo agrícola por un sustrato de cultivo reduce considerablemente la capacidad tampón del medio en el que se desarrollan las raíces. Esto presenta la ventaja de facilitar el control del cultivo, y el inconveniente de hacerlo más vulnerable a la incidencia de factores no controlados. El conocimiento preciso de las propiedades físicas del sustrato, junto con el manejo del agua de riego, proporcionan las herramientas adecuadas para potenciar el control del cultivo mediante el control de las relaciones aire-agua, y para minimizar las repercusiones negativas derivadas de la incidencia inevitable de factores no controlados.

El estudio de las propiedades físicas de los sustratos se plantea como un modelo de cultivo, que a su vez consta de dos submodelos. El primero relaciona las variables medidas en laboratorio con las condiciones físicas creadas en el entorno radicular. El segundo relaciona estas condiciones físicas con la respuesta del cultivo. En este trabajo se aborda el primero de estos dos submodelos.

El valor predictivo de un modelo es tanto mayor cuanto mayor sea la fiabilidad de las mediciones efectuadas, y cuanto más fiable sea el modelo de simulación empleado.

La obtención de medidas fiables requiere el empleo de una metodología adecuada a las características del material sometido a análisis. Se han analizado cuatro metodologías de laboratorio: la descrita por De Boodt y colaboradores, el "Método de Referencia" de la International Society for Horticultural Science (ISHS), la metodología aplicada por el Agricultural Development and Advisory Service (ADAS) del Reino Unido, y la aplicada por el Laboratorio de Horticultura de la Universidad del Estado de Carolina del Norte. A partir de este análisis, se han planteado algunas modificaciones, y se han hecho nuevas propuestas. Las mediciones de laboratorio deben informar sobre su fiabilidad, es decir, sobre la exactitud y la precisión. Todas las metodologías empleadas hasta el momento informan adecuadamente sobre la precisión, pero ninguna lo hace sobre la exactitud. La picnometría de gases proporciona una determinación independiente del volumen ocupado por aire, y constituye una vía de solución a este problema. La saturación de las muestras por vacío, y la aplicación del principio de Arquímedes para evaluar el volumen ocupado por el material sólido, constituyen unas alternativas adecuadas al estudio de las variables relacionadas con la disponibilidad de aire y agua para el sistema radicular de la planta. El desarrollo metodológico se completa con un estudio del origen y la magnitud de los errores de medida en la metodología de laboratorio.

Para la simulación del comportamiento hídrico del sustrato se plantea un modelo logarítmico normal, basado en la hipótesis de la distribución normal del logaritmo del diámetro de poro. La ley de capilaridad de Jurin relaciona la distribución del tamaño de poro con la distribución de aire y agua. El modelo se completa con dos parámetros de modulación. Se obtiene -de esta forma- un modelo totalmente conceptual, definido por cuatro parámetros: media, desviación estándar, desplazamiento y escalado, correspondiendo cada uno de ellos a una variable física concreta. El comportamiento de este modelo se compara con otros modelos -tanto experimentales (polinomios de tercer grado) como semi-experimentales (Van Genuchten)- empleados en la bibliografía para describir la curva de retención de agua.

Tanto en el desarrollo de la metodología de laboratorio como en el estudio del modelo se ha empleado una gama de sustratos de características muy diferentes -naturales y sintéticos,

orgánicos y minerales, granulares y fibrosos, con mayor o menor porcentaje de porosidad interna, etc-, que proporcionan información sobre la fiabilidad de la metodología y del modelo en condiciones muy diversas.

Las variantes metodológicas introducidas –saturación por vacío y determinación de volúmenes por inmersión- proporcionan medidas más ajustadas de las variables, para informar sobre la disponibilidad de aire y agua en el medio poroso.

La pérdida de sustrato durante la saturación representa, en algunos sustratos, una importante fuente de error. El factor que más influye en esta pérdida es la propia naturaleza del sustrato. La incidencia del tipo de cierre del contenedor portamuestras y del método de saturación es mínima. Se han ensayado distintas variantes de la rutina de laboratorio, que han permitido establecer una metodología con una incidencia escasa de errores de medida.

Se ha planteado la picnometría de gases como método alternativo para obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire en la muestra de sustrato tensionada. Se ha conseguido un control elevado del proceso de medida, pero, sin embargo, es necesario modificar la metodología, ya que la magnitud del error experimental se encuentra en el límite del intervalo admisible.

El modelo logarítmico normal se ha comparado con el modelo de Van Genuchten, y con dos modelos polinómicos. El resultado es claramente ventajoso para el modelo propuesto. Su carácter conceptual le proporciona mayor capacidad de simulación que el modelo de Van Genuchten. El ajuste de los modelos polinómicos es claramente inferior a los otros dos.

En el análisis de sensibilidad se ha estudiado la incidencia de los errores de estima de los parámetros del modelo en el valor calculado por el mismo. El valor de la media de la distribución normal incide en el valor de la tensión a la que se produce el error máximo, pero no en su magnitud. La magnitud del error es tanto mayor cuanto menor es el valor de la desviación estándar de esta distribución. La magnitud del error es función, además, de la magnitud de los errores de la media ($\Delta\mu$) y de la desviación estándar ($\Delta\sigma$).

Finalmente, se ha estudiado la incidencia de los errores de medida. La falta de valores de referencia absolutos y relativos, limita la posibilidad de conocer la exactitud de las mediciones efectuadas. En esta situación, el estudio comparativo de los residuos, y de sus valores absolutos, proporciona una estimación de la incidencia relativa de errores sistemáticos (exactitud) y de errores aleatorios (precisión). La precisión muestra variaciones importantes de unos sustratos a otros. Respecto a las tensiones, la mayor variabilidad se presenta a valores bajos (de 0 a 30 cm de columna de agua), disminuyendo considerablemente para valores más elevados (50 a 100 cm de columna de agua).

La variabilidad de las medidas tiene una componente debida a la heterogeneidad del sustrato y otra, a los propios errores de medida. Las metodologías aplicadas no discriminan estas dos componentes. La magnitud de la primera tiene una fuerte incidencia en el manejo del riego, por lo que es importante desarrollar rutinas metodológicas que permitan su evaluación.

SUMMARY

Replacing agricultural land for a culture substratum noticeably reduces the buffer capacity of the environment where roots develop. This measure has the advantage of facilitating culture control, and the disadvantage of making it more vulnerable to the incidence of uncontrolled factors. A precise knowledge of the substratum's physical properties, together with the handling of irrigation water, provide the appropriate tools both to promote culture control through the control of air-water ratio, and to minimise negative effects derived from the inevitable incidence of uncontrolled factors.

The study of the substratum's physical properties presents itself as a culture model, which consists, in turn, of two submodels. The first connects the variables measured in the laboratory to the physical conditions created in the root environment. The second connects these conditions to their effect on the culture. This dissertation focuses on the first of these submodels.

The higher the reliability of the measures taken and of the simulation model, the higher the model's predictive value. In order to obtain reliable measures, a methodology suitable for the characteristics of the analysed material is required. Four laboratory methodologies have been analysed: the one described by De Boodt and collaborators, the "Reference Method" from the International Society for Horticultural Science (ISHS), the methodology applied by the Agricultural Development and Advisory Service (ADAS) in the United Kingdom, and the one applied by the Horticulture Laboratory at the North Carolina State University. The analysis of these has given rise to several modifications and new proposals. The measures obtained in the laboratory have to provide information about their reliability; that is, about their exactness and their precision. All the methodologies used to the present give accurate information about precision, but they fail to provide the same type of information about exactness. Gas pycnometry offers an independent determination of the volume of air, and constitutes a means of solving this problem. Sample saturation by vacuum, and the application of Archimedes' principle to evaluate the solid material's volume constitute more appropriate alternatives to the study of the variables related to air and water availability for the plant's radicular system. The methodological development is completed with the study of the origin and magnitude of measurement errors in the laboratory's methodology.

In the simulation of the substratum's hydric behaviour, a normal logarithmic model arises, based on the hypothesis of the logarithmic normal distribution of the pore's diameter. Jurin's Law of Capillarity connects the pore's size distribution to air and water distribution. Two modulation parameters complete the model. A fully conceptual model is thus obtained, defined by four parameters: measurement, standard deviation, displacement, and scaling. Each parameter corresponds to a specific physical variable. This model is analysed in comparison with experimental models (third grade polynomial), as well as with semi-experimental models (Van Genuchten), used in the bibliography to describe the water retention curve.

In order to obtain information on the methodology's and the model's reliability in very diverse conditions, a wide range of substrata of very different characteristics has been used, both in the development of laboratory methodology, and in the study of the model: natural and synthetic, organic and mineral, granular and fibrous, with a higher or lower percentage of internal porosity, etc.

The methodological variables included — saturation through vacuum, and volume determination through immersion — provide better-adjusted variable measurements, in order to give information about air and water availability in the porous environment.

Loss of substratum during saturation represents, in several substrata, an important cause of error. The most influential factor in this loss is the substratum's own nature. The incidence of the sample-carrying container's lock type, and of the saturation method is minimal. The different laboratory routine variants tried have established a methodology that bears a low incidence of measurement errors.

Gas pycnometry has been considered as an alternative method, in order to obtain an independent measurement of the air volume in the tensed substratum sample. A high measuring process control has resulted from this method, although it still needs modification, because the experimental error's magnitude reaches the admissible interval limit.

The normal logarithmic model has been compared to Van Genuchten's model and to two other polinomic models. The result clearly favours the proposed model. Its conceptual character gives it a better simulation capacity than Van Genuchten's model. The polynomic models' adjustment proves clearly inferior to the other two.

The sensitivity analysis includes a study of the incidence of estimate errors of the model parameters in the value calculated by the model itself. The value of the normal distribution measurement influences the value of pressure at maximum error level, but it does not influence this pressure's magnitude. The error's magnitude increases when the standard deviation value of this distribution is lower. The error's magnitude is also function of the magnitude of measurement errors ($\Delta\mu$), and of the standard deviation ($\Delta\sigma$).

Finally, the incidence of measurement errors has been studied. The lack of absolute and relative reference values reduces the possibility of knowing the exactness of the measures taken. Under these circumstances, the comparative analysis of residues, as well as of their absolute values, provides an estimation of the relative incidence of systematic errors (exactness), and of random errors (precision). Precision shows important variations among substrata. Regarding tensions, the greatest variability appears at low values (0-30 cm-water column), noticeably diminishing at higher values (50-100 cm-water column).

Measurements' variability is due in part to the substratum's heterogeneity, in part to the measurement errors themselves. The methodologies applied do not differentiate between these two components. The magnitude of the first has a strong incidence in the use of irrigation. For this reason, it is important to develop methodological routines that allow for their evaluation.

RÉSUMÉ

Le remplacement d'un sol agricole par un substrat de culture réduit considérablement la capacité tampon du milieu dans lequel poussent les racines. Ceci présente l'avantage de faciliter le contrôle de la culture et l'inconvénient de la rendre plus vulnérable à l'incidence de facteurs non-contrôlés. La connaissance précise des propriétés physiques du substrat ainsi que la conduite de l'irrigation fournissent les outils appropriés afin de favoriser la conduite de la culture grâce au contrôle du rapport air-eau et pour minimiser les conséquences négatives dérivées de l'incidence inévitable de facteurs non-contrôlés.

L'étude des propriétés physiques des substrats est présentée comme un modèle de culture composé de deux sous-modèles. Le premier met en rapport les variables mesurées au laboratoire avec les conditions physiques créées dans l'environnement racinaire. Le deuxième met en rapport ces conditions physiques avec la réponse de la culture. Dans ce travail, nous abordons le premier de ces deux sous-modèles.

La valeur de prédiction d'un modèle augmente en fonction de la fiabilité des mesures effectuées et du modèle de simulation utilisé.

L'obtention de mesures fiables exige l'emploi d'une méthodologie adéquate aux caractéristiques du matériau analysé. Nous avons analysé quatre techniques de laboratoire: celle décrite par De Boodt et ses collaborateurs, la méthode de référence présentée l'*International Society for Horticultural Science (ISHS)*, la méthode utilisée par l'*Agricultural Development and Advisory Service (ADAS)* du Royaume-Uni et celle employée par le *Laboratoire d'Horticulture de l'Université de l'État de Caroline du Nord*. À partir de cette analyse, nous avons effectué quelques modifications et présenté de nouvelles propositions. Les mesures de laboratoire doivent renseigner sur la fiabilité, c'est à dire, sur l'exactitude et la précision. Toutes les méthodologies employées jusqu'à présent informent convenablement sur la précision mais aucune ne le fait sur l'exactitude. La pycnométrie des gaz fournit une détermination indépendante du volume occupé par l'air et donc présente une possible solution à ce problème. La saturation des échantillons par le vide et l'emploi du principe d'Archimède pour évaluer le volume occupé par le matériau solide sont des alternatives plus adéquates à l'étude des variables concernant la disponibilité d'air et d'eau pour le système racinaire de la plante. Le développement méthodologique est complété par une étude de l'origine et de l'amplitude des erreurs de mesure dues à la méthode de laboratoire.

Pour la simulation du comportement hydrique du substrat, nous avons employé un modèle logarithmique normal, basé sur l'hypothèse suivant laquelle le logarithme du diamètre du pore suit une loi de distribution normale. La loi de la capillarité de Jurin met en rapport la distribution de la taille du pore avec la distribution de l'air et de l'eau. Pour construire le modèle il a été nécessaire d'effectuer un changement de référence, volume total versus porosité totale. Nous avons obtenu ainsi un modèle totalement conceptuel, défini par quatre paramètres: moyenne, déviation standard, déplacement et changement d'échelle, correspondant chacun d'entre eux à une variable physique concrète. Le comportement de ce modèle est comparé avec d'autres modèles - aussi bien expérimentaux (polynômes de troisième degré) que demi-expérimentaux (Van Genuchten) - employés dans la bibliographie pour décrire la courbe de rétention d'eau.

Autant pour le développement de la méthodologie de laboratoire que pour l'étude du modèle, nous avons utilisé une gamme de substrats possédant des caractéristiques très différentes - naturels et synthétiques, organiques et minéraux, granulés et fibreux, avec un pourcentage plus ou moins élevé de porosité interne, etc., qui fournissent des renseignements sur la fiabilité de la méthode et du modèle dans des conditions très diverses.

Les variantes méthodologiques introduites - saturation par le vide et détermination des volumes par immersion - nous fournissent des mesures plus exactes des variables, afin de nous informer sur la disponibilité d'air et d'eau dans le milieu poreux.

La perte du substrat pendant la saturation représente, pour certains substrats, une source d'erreur importante. Le facteur le plus important dans cette perte est la nature même de ce substrat. L'incidence du type de fermeture du conteneur porte-échantillon et de la méthode de saturation est minime. Nous avons essayé différentes variantes de la technique de laboratoire qui nous ont permis d'établir une méthodologie avec une incidence très faible des erreurs de mesure.

Nous avons proposé la pycnométrie des gaz comme méthode alternative pour obtenir une mesure indépendante du volume occupé par l'air dans un échantillon de substrat sous tension. Nous avons obtenu un contrôle élevé du processus de mesure, cependant, il faut encore modifier la méthodologie car l'amplitude de l'erreur expérimentale se trouve dans les limites de l'intervalle admissible.

Le modèle logarithmique normal a été comparé avec le modèle de Van Genuchten et avec deux modèles représentés par des polynômes. Les résultats sont clairement avantageux pour le modèle proposé. Son caractère conceptuel lui procure une capacité de simulation plus grande que celle du modèle de Van Genuchten. L'ajustement des modèles polynomiaux est clairement inférieur à ceux des deux autres.

Dans l'analyse de sensibilité, nous avons étudié l'incidence des erreurs d'estimation des paramètres du modèle pour les valeurs estimées. La valeur de la moyenne de la distribution normale est en rapport avec la valeur de la tension à laquelle se produit l'erreur maximale, mais non avec son amplitude. L'amplitude de l'erreur augmente lorsque la valeur de la déviation standard de la distribution diminue. L'amplitude de l'erreur est également fonction de l'amplitude des erreurs de la moyenne ($\Delta\mu$) et de la déviation standard ($\Delta\sigma$).

Finalement, nous avons étudié l'incidence des erreurs de mesure. L'absence de valeurs de références absolues et relatives limite la possibilité d'approcher l'exactitude des mesures effectuées. Étant donnée cette situation, l'étude comparative des résidus et de leurs valeurs absolues fournit une estimation de l'incidence relative des erreurs systématiques (exactitude) et des erreurs aléatoires (précision). La précision a mis en évidence des variations importantes entre certains substrats. En ce qui concerne les tensions, la variabilité la plus importante est apparue avec les valeurs les plus faibles (entre 0 et 30 cm de colonne d'eau), diminuant progressivement avec les valeurs les plus élevées (de 50 à 100 cm de colonne d'eau).

La variabilité des mesures présente une composante qui est due à l'hétérogénéité du substrat et une autre due aux erreurs propres à la mesure. Les méthodes appliquées ne différencient pas ces deux composantes. L'amplitude de la première a une forte incidence dans la conduite de l'irrigation, c'est pourquoi il est important de développer des routines méthodologiques qui permettent son évaluation.

LABURPENA

Nekazaritzan, lurraren orde z substratua erabiltzeak, sustraiak errotzen diren gunean aldaketak sortzen ditu, eta bertako oreka mantentzeko gaitasuna nabarmen gutxitzen da. Horrela, landareen hazibidea hobeto eta errazago zaintzen da, baina, era berean, beste hainbat alderdi kontrolagaitz sortzen dira. Horregatik, behar-beharrezkoa da, batetik substratuen ezaugarri fisikoak zehatz-mehatz ezagutzea, eta bestetik ur-beharrak ondo neurtzea, landareei hazibiderik sendoena emateko ura eta airearen arteko erlazioa kontrolatuz. Horrela, gainera, alderdi kontrolagaitzak ere asko murrizten dira.

Substratuen ezaugarri fisikoen ezagutza, landarearen hazibide-eredu bezala planteatzen da. Eredu horrek bi adar ditu. Batak, laborategian neurtutako aldagaien eta landarearen sustrai inguruan sortutako egoera fisikoaren arteko zerikusia aztertzen du. Bigarrenak, ordea, egoera fisiko horren eta landarearen hazkuntzaren artekoa. Gure lan honetan, hazibide-ereduko lehen adarra aztertzen da.

Zenbat eta handiagoa izan egindako neurketen eta erabilitako ereduaren zehaztasuna, orduan eta handiagoa izango da ereduaren eta gertakarien arteko antzekotasuna.

Neurketa zehatzak egiteko, ikergaiaren ezaugarrietara egokituko den metodologia aukeratu behar da. Lau metodologia ezberdin azertu dira: De Boodt eta laguntzaileena; 'International Society for Horticultural Science'aren (ISHS) erreferentzi eredu; Britainia Handiko 'Agricultural Development and Advisory Service'-k (ADAS) erabilitakoa; eta Ipar Karolinako Unibertsitateko Ikerketa Sailekoena. Azterketa hau egin ondoren aldaketa batzuk planteatu dira eta proposamen berriak egin dira. Metodologia batek neurketen fidagarritasuna zenbatekoa den adierazi behar du, hau da, betetik neurketen arteko zehaztasuna (doitasuna) eta bestetik neurketen eta egiazko balioaren arteko zehaztasuna (zehaztasuna). Orain arteko metodologiek neurketen arteko zehaztasuna edo doitasuna adierazten dute, baina ez neurketen eta egiazko balioaren arteko zehaztasunik. Gasen piknometria aireak betetzen duen bolumena neurtzeko bide independente bat da, eta arazo hau gainditzeko aukera bat. Bestalde, substratuginen hustuketa bidezko saturazioa eta Arkimederen legea erabiltzea gai solidoak betetzen duen bolumena jakiteko aukera onak dira ura eta airearen arteko erlazioan ikusi behar duten aldagaiak ikertzeko. Iker-bidea osatzeko, laborategiko metodologian egiten diren hutsak eta neurketa-errakuntzak aztertuko dira.

Substratuak hartzen duen uraren portaera azaltzeko, eredu logaritmiko normala erabiliko da, xuloen diametroen banaketa logaritmiko normalaren hipotesian oinarritua. Jurinen kapilaritate legeak, xuloen neurri-banaketa eta aire eta ur kopuruarena elkarlotzen ditu. Eredua bi modulazio parametroren bidez osatzen da. Horrela, eredu guztiz kontzeptuala sortzen da, lau neurketaren bitartez: batez bestekoa, zehardura estandarra, alborapena eta zenbatekoa; horietako bakoitza aldagai fisiko jakin bati dagokio. Eredu horren portaera, beste eredu batzuekin alderatzen da, bibliografian aipatzen diren eredu esperimentalekin (hirugarren mailako polinomikoak) eta erdi-esperimentalekin (Van Genuchten), uraren atxikitzearen kurba neurtzeko.

Hainbat substratu erabili izan dira, bai laborategiko metodologia garatzeko, bai eredu aztertzeko. Substratuak, denak ezaugarri ezberdinetakoak izan dira (naturalak eta sintetikoak, organikoak eta mineralak, zuntzdunak eta granularrak, barne-aroltasun gehiago edo gutxiagokoak,...) fidegarritasun maila zenbatekoa den jakiteko.

Metodologian egindako aldaketek –hustuketa bidezko saturazioa eta Arkimederen legea-substratuan den aire-ur erlazioa jakiteko neurri zehatzagoak eta egokiagoak emango dizkigute.

Substratu batzuetan, saturazioa egitean galera bat sortzen da eta hori errakuntza-sorburu izaten da. Galera hori, substratuaren osagaien pentzutan dago, batez ere. Lagin eroangailuaren itxidurak eta saturazioerak ez dute galera horretan ia eraginik. Laborategiko lan arruntan, azterbide ezberdinak landu dira, eta errakuntza urriko metodologia garatu da.

Substratu-lagin tentsionatuan, aireak hartzen duen bolumena bereiziturik neurtzeko, gasen piknometria erabiltzea erabaki da, neurbide alternatibo bezala. Horrela, neurketa nahikoa zehatzak egin izan dira, baina oraindik ez da erabateko onarpena emateko besteko neurketa-ondorio zehatzik atera, errakuntza esperimentalen zenbatekoa dela eta.

Eredu logaritmiko arrunta Van Genuchten-en ereduarekin eta beste bi eredu polinomikorekin alderatu da. Horren emaitza, inongo zalantzarik gabe, proposaturiko ereduaren aldekoa da. Izaera kontzeptuala hartzen duenez gero, Van Genuchten-en ereduak baino simulazio-gaitasun handiagoa dauka. Eredu polinomikoak oso atzera geratzen dira.

Sentsibilitate azterketan, ustezko errakuntzek ereduko parametroetan duten eragina aztertu da. Banaketa normaleko batz-bestekoak, errakuntza maximoa gertatzen deneko tentsioaren zenbatekoan du eragina, eta ez errakuntzarenean. Zenbat eta txikiagoa izan zehardura estandarra, orduan eta handiagoa izango da errakuntza. Azken honen zenbatekoa, batez-besteak dituen errakuntzaren ($\Delta\mu$), eta zehardura estandardaren ($\Delta\sigma$) eraginpean dago.

Azkenik, neurketako errakuntzen eragina aztertu da. Erreferentziatzko balorerik ez dagoenez gero, ez berekikorik ez bereizikorik, egindako neurketen zehaztasuna jakitea mugatuta dago. Hori horrela, hondakinen azterketa konparatiboak, eta euron berekiko baloreenak, errakuntza sistematikoen (zehaztasuna) eta errakuntza aleatorioen (doitasuna) eragin berezia emango digute. Errakuntza aleatorioetan (doitasunari dagokionez) gora-behera handiak izaten dira substratu batzuetatik beste batzuetara. Tentsioei dagokionez, aldagarritasunik handiena beheko baloreetan ematen da (0-30 zm ur-zutabe). Goiko baloreetan, ordea, asko jaisten da (50-100 zm ur-zutabe).

Neurrien aldagarritasuna, substratuaren heterojenitateak eragiten du batetik, eta neurketako errakuntzek bestetik. Orain arte erabilitako metodologiek, ez dituzte banatzen alderdi bi horiek. Ureztatze orduan, substratuaren heterojenitatea dela eta, oso garrantzitsua da, beraz, lan-egikera egokiak burutzea horren eragina zehazteko.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1.	<i>Sustratos</i>	3
1.1.1	Sustrato hortícola. Cultivo sin suelo. Conceptos	3
1.1.2	Importancia económica de los cultivos sin suelo.....	4
1.1.3	Materiales utilizados como sustratos o componentes de sustratos.....	6
1.1.3.1	Cultivo hidropónico	6
1.1.3.2	Cultivo de planta en maceta	7
1.1.4	Criterios para la elección de un sustrato	8
1.1.5	Propiedades de los sustratos de cultivo	9
1.1.5.1	Propiedades físicas.....	9
1.1.5.2	Propiedades físico-químicas y químicas	11
1.1.5.3	Propiedades biológicas	15
1.1.6	Clasificación de los materiales	16
1.1.6.1	Materiales Orgánicos	16
1.1.6.2	Materiales Inorgánicos (Minerales)	16
1.1.7	Nuevos materiales utilizados como sustratos o componentes de los sustratos en el cultivo sin suelo. Materiales alternativos y/o sustitutivos.....	17
1.1.7.1	Cultivo en sustrato de plantas ornamentales	17
1.1.7.2	Cultivo hidropónico	18
1.2	<i>Modelización</i>	19
1.2.1	Introducción	19
1.2.2	Sistema.....	20
1.2.2.1	Definición	20
1.2.2.2	Límites del sistema	20
1.2.2.3	Complejidad del sistema	21
1.2.3	Modelos.....	22
1.2.3.1	Definición	22
1.2.3.2	Simplificación.....	22
1.2.3.3	Limitaciones en el uso de modelos	37
1.2.3.4	Diferencia entre valores observados y calculados.....	43
1.2.3.5	Factores limitantes a considerar en la aplicación de modelos	46
1.3	<i>La caracterización física de sustratos como modelo de cultivo</i>	49
1.3.1	Introducción	49
1.3.2	Relación entre metodología de laboratorio e interpretación de los resultados.....	50
1.3.2.1	Modelo de cultivo	51
1.3.2.2	Metodología de laboratorio.....	52
1.3.3	Metodologías de caracterización física de sustratos de cultivo	52
1.3.4	Complejidad/simplicidad metodológica	53
1.3.5	Incidencia de los factores limitantes de los modelos en las metodologías de caracterización física.	54
1.3.5.1	Factor limitante 1: Variables no consideradas en la metodología	54
1.3.5.2	Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo	55
1.3.5.3	Factor limitante 3: Errores de medida	56
1.3.6	Incidencia de los factores limitantes de los modelos en las medidas.....	61
1.3.6.1	Primer factor limitante: Incidencia en la variable dependiente de procesos no considerados en el modelo	61
1.3.6.2	Segundo factor limitante: Intervalos de validez del modelo	62
1.3.6.3	Tercer factor limitante: Errores de medida	63
2	ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS ACTUALES	65
2.1	<i>Metodología de De Boodt</i>	68
2.1.1	Introducción	68
2.1.2	Desarrollo metodológico	68
2.1.2.1	El sustrato según De Boodt.....	69
2.1.2.2	Propiedades importantes	69
2.1.2.3	Características a determinar	69
2.1.2.4	Clasificación del espacio poroso.....	70
2.1.3	Determinaciones necesarias para el estudio de la distribución de fases	72

2.1.3.1	Determinación de la densidad aparente.....	72
2.1.3.2	Determinación de la porosidad total	73
2.1.3.3	Distribución de fases.....	74
2.1.4	Metodología de laboratorio	74
2.1.4.1	Determinación de la densidad aparente.....	75
2.1.4.2	Determinación de la porosidad total	75
2.1.4.3	Determinación del porcentaje de humedad de la muestra de laboratorio	76
2.1.4.4	Tensionado y medida del reparto volumétrico	76
2.1.5	Aplicación de la teoría de modelos	77
2.1.5.1	Definición del modelo	77
2.1.5.2	Factores limitantes para su aplicación.....	79
2.1.6	Análisis de sensibilidad.....	81
2.1.6.1	Cálculo de volúmenes en función de las medidas de laboratorio.....	82
2.1.6.2	Incidencia de los errores de la densidad aparente	84
2.1.6.3	Incidencia de los errores de la densidad real.....	87
2.1.6.4	Incidencia de los errores del porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio (%S).....	88
2.1.6.5	Incidencia de los errores del peso tensionado	90
2.1.6.6	Incidencia de los errores del peso de la muestra con la humedad de la muestra de laboratorio (Ph) 91	
2.1.6.7	Análisis de las expresiones de error obtenidas.....	92
2.1.6.8	Exactitud y precisión de las medidas indirectas obtenidas.....	101
2.1.7	Recapitulación.....	102
2.2	<i>Metodología de Agricultural Development and Advisory Service (ADAS) del Reino Unido.....</i>	<i>106</i>
2.2.1	Introducción	106
2.2.2	Norma BS 4156:1990 Recommendations for Peat for horticultural and landscape use	107
2.2.3	Desarrollo metodológico	107
2.2.4	Aplicación de la teoría de modelos	107
2.2.4.1	Definición del modelo	107
2.2.4.2	Metodología de laboratorio.....	108
2.2.5	Factores limitantes para su aplicación.....	109
2.2.5.1	Factor limitante 1: variables no consideradas en el modelo.....	109
2.2.5.2	Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo.....	109
2.2.5.3	Factor limitante 3: Errores de medida.....	109
2.3	<i>Metodología de referencia de la International Society for Horticultural Science</i>	<i>110</i>
2.3.1	Origen	110
2.3.2	Desarrollo cronológico.....	112
2.3.3	Evolución del método.....	113
2.3.4	Desarrollo metodológico	114
2.3.4.1	Medios disponibles	114
2.3.4.2	Objetivos.....	114
2.3.5	Aplicación de la teoría de modelos	115
2.3.5.1	Metodología de laboratorio.....	115
2.3.5.2	Factores limitantes para su aplicación.....	116
2.3.6	Análisis de sensibilidad.....	117
2.3.6.1	Cálculo de volúmenes en función de las medidas de laboratorio.....	118
2.3.6.2	Incidencia de los errores de la densidad aparente, densidad real y peso de agua	120
2.3.6.3	Incidencia de los errores del peso seco	120
2.3.6.4	Análisis de las expresiones de error.....	123
2.3.6.5	Exactitud y precisión del reparto volumétrico	127
2.4	<i>Metodología del Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte (EEUU)</i>	<i>129</i>
2.4.1	Principios básicos.....	129
2.4.2	Propiedades físicas e hidráulicas.....	129
2.4.2.1	Conceptos físicos tomados de metodologías previamente desarrolladas	130
2.4.2.2	Conceptos básicos en la metodología de Fonteno.....	131
2.4.2.3	Modelo de variables de capacidad en equilibrio	133
2.4.3	Metodología de laboratorio	134
2.4.4	Relación entre las propiedades del sustrato y la respuesta del cultivo.....	135
2.4.4.1	Criterios a seguir.....	135
2.4.4.2	Desarrollo de una estructura mecanicista basada en la modelización	136
2.4.5	Propuesta metodológica (Descripción del estatus hídrico).....	137
2.4.6	Aplicación de la teoría de modelo	138
2.4.7	Factores limitantes en la aplicación de modelos.....	139
2.4.7.1	Factor limitante 1: Variables no consideradas en la metodología	139

2.4.7.2	Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo	139
2.4.7.3	Factor limitante 3: Errores de medida	139
3	DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUSTRATOS DE CULTIVO ...	141
3.1	<i>Introducción</i>	143
3.2	<i>Disponibilidad de aire y agua</i>	144
3.2.1	Relación sustrato – planta	144
3.2.1.1	Funciones del sustrato.....	144
3.2.1.2	Relaciones hídricas sustrato – planta: Disponibilidad de agua.....	145
3.2.2	Relaciones energéticas	146
3.2.2.1	Fundamentos.....	146
3.2.2.2	Unidades	147
3.2.2.3	Componentes del potencial.....	148
3.2.2.4	Aplicaciones	150
3.2.3	Características del espacio poroso.....	152
3.2.3.1	Dimensión de los poros.....	153
3.2.3.2	Forma de los poros: Accesibilidad de los poros al intercambio aire - agua	154
3.2.4	Aplicación a la modelización del comportamiento hídrico del sustrato	157
3.3	<i>Errores de medida: Análisis de procedimientos</i>	157
3.3.1	Incidencia de errores en las metodologías de laboratorio.....	158
3.3.2	Saturación del sustrato	158
3.3.2.1	Métodos de saturación	159
3.3.2.2	Problemática que se presenta	160
3.3.3	Incidencia de la instrumentación en los errores de medida	161
3.4	<i>Estrategias de medida</i>	161
3.4.1	Errores experimentales.....	161
3.4.1.1	Precisión	161
3.4.1.2	Exactitud.....	162
3.4.2	Alternativa propuesta	167
3.5	<i>Picnometría de gases: Fundamento, diseño y desarrollo del picnómetro de gas de doble cámara para medida de volúmenes en sustratos de cultivo</i>	167
3.5.1	Introducción	167
3.5.2	Tipos de picnómetros de gases.....	168
3.5.2.1	Picnómetros de un cámara (Kummer y Cooper, 1945; Page, 1947; Vomocil 1965; Danielson y Sutherland, 1986; Baver et al., 1991a).....	168
3.5.2.2	Picnómetro de gas de doble cámara (Biolders et al., 1990).....	169
3.5.3	Características de la medida por picnometría de gases.....	170
3.5.3.1	Ventajas	170
3.5.3.2	Control de temperatura	170
3.5.3.3	Adsorción de gases	170
3.5.4	Fundamento de la medición de volumen en picnómetro de doble cámara	171
3.5.4.1	Selección del picnómetro de doble cámara.....	171
3.5.4.2	Desarrollo de las ecuaciones a aplicar para el cálculo de volúmenes.....	172
3.5.4.3	Variables a medir para el cálculo de volúmenes en el picnómetro de gas de doble cámara.....	174
3.5.4.4	Condiciones de aplicación	174
4	OBJETIVOS DE LA TESIS.....	175
5	EXPERIMENTACIÓN.....	179
5.1	<i>Introducción</i>	181
5.2	<i>Trabajo experimental: Accesibilidad</i>	182
5.2.1	Introducción	182
5.2.1.1	Antecedentes.....	182
5.2.1.2	Trabajo experimental	182
5.2.2	Comparación de métodos para la determinación de la Densidad Real (I)	184
5.2.2.1	Introducción.....	184
5.2.2.2	Objetivo	184
5.2.2.3	Materiales y métodos.....	184
5.2.2.4	Resultados y discusión.....	189
5.2.2.5	Conclusiones del ensayo.....	193
5.2.3	Comparación de métodos para la determinación de la Densidad Real (II).....	193

5.2.3.1	Introducción.....	193
5.2.3.2	Objetivos.....	194
5.2.3.3	Material y métodos.....	194
5.2.3.4	Resultados y discusión.....	197
5.2.3.5	Conclusiones del ensayo.....	201
5.2.4	Comparación de métodos para la determinación de la Densidad Real (III).....	202
5.2.4.1	Introducción.....	202
5.2.4.2	Objetivos.....	203
5.2.4.3	Materiales y métodos.....	203
5.2.4.4	Resultados y discusión.....	205
5.2.4.5	Conclusiones del ensayo.....	208
5.2.5	Incidencia del vacío aplicado durante la saturación en la densidad real.....	209
5.2.5.1	Introducción.....	209
5.2.5.2	Objetivos.....	209
5.2.5.3	Material y métodos.....	209
5.2.5.4	Resultados y discusión.....	210
5.2.5.5	Conclusiones del ensayo.....	211
5.2.6	Factores que inciden en la eficacia de la saturación por vacío: nivel de vacío, saturación lenta y saturación doble.....	212
5.2.6.1	Introducción.....	212
5.2.6.2	Objetivos.....	212
5.2.6.3	Material y métodos.....	212
5.2.6.4	Resultados y discusión.....	214
5.2.6.5	Conclusiones del ensayo.....	222
5.2.7	Incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación doble por vacío.....	223
5.2.7.1	Introducción.....	223
5.2.7.2	Objetivo.....	223
5.2.7.3	Material y métodos.....	224
5.2.7.4	Resultados y discusión.....	224
5.2.7.5	Conclusiones del ensayo.....	250
5.2.8	Recapitulación.....	251
5.2.8.1	Conceptos aplicados en el desarrollo metodológico.....	251
5.2.8.2	Rutinas de laboratorio.....	252
5.2.8.3	Equipamiento.....	253
5.3	<i>Trabajo experimental: Errores de medida</i>	255
5.3.1	Introducción.....	255
5.3.1.1	Antecedentes.....	255
5.3.1.2	Trabajo experimental.....	255
5.3.2	Pérdida de material durante la saturación.....	255
5.3.2.1	Primer ensayo: Comparación entre distintos tipos de cierre.....	256
5.3.2.2	Segundo ensayo: Pérdidas de fracción soluble y fracción en suspensión.....	260
5.3.2.3	Tercer ensayo: Incidencia de la luz de malla del cierre en las pérdidas de sustrato.....	262
5.3.2.4	Cuarto ensayo: Incidencia del método de saturación en las pérdidas de sustrato.....	265
5.3.2.5	Discusión general.....	269
5.3.2.6	Recapitulación.....	272
5.3.3	Incidencia de la instrumentación en los errores de medida.....	272
5.3.3.1	Materiales.....	272
5.3.3.2	Métodos.....	275
5.3.3.3	Resultados y discusión.....	281
5.3.3.4	Discusión general.....	291
5.3.3.5	Magnitud de los errores.....	294
5.3.3.6	Recapitulación de incidencia de la instrumentación en los errores de medida.....	298
5.3.4	Recapitulación de errores de medida.....	299
5.4	<i>Trabajo experimental: Estrategia de medida</i>	301
5.4.1	Evaluación del error en la medida del volumen ocupado por aire.....	301
5.4.1.1	Introducción.....	301
5.4.1.2	Objetivo.....	302
5.4.1.3	Materiales y métodos.....	302
5.4.1.4	Resultados y discusión.....	305
5.4.1.5	Conclusiones del ensayo.....	309
5.4.2	Recapitulación.....	310
5.5	<i>Desarrollo del picnómetro de doble cámara para medición de volúmenes en sustratos de cultivo</i>	311
5.5.1	Introducción.....	311
5.5.1.1	Antecedentes.....	311

5.5.1.2	Condicionantes	311
5.5.1.3	Objetivo	311
5.5.1.4	Trabajo desarrollado	312
5.5.2	Diseño	312
5.5.2.1	Elementos básicos.....	312
5.5.2.2	Soluciones técnicas adoptadas	313
5.5.3	Metodología de medida	316
5.5.4	Calibrado del picnómetro	317
5.5.4.1	Material y métodos	318
5.5.4.2	Resultados y discusión.....	322
5.5.5	Incidencia de la temperatura y de la adsorción de gases	326
5.5.5.1	Materiales y métodos	326
5.5.5.2	Resultados y discusión.....	328
5.5.6	Recapitulación.....	331
6	MODELO DE POROSIDAD LOGARÍTMICO NORMAL.....	333
6.1	<i>Descripción y desarrollo del modelo.....</i>	335
6.1.1	Definición del modelo	335
6.1.2	Hipótesis del modelo.....	335
6.1.2.1	Modelo logarítmico normal de distribución del tamaño de poro	335
6.1.2.2	Capilaridad: Ley de Jurin.....	336
6.1.3	Curva de retención de agua: Relación con la distribución del tamaño de poro	337
6.1.3.1	Relación entre capilaridad y potencial matricial	337
6.1.3.2	Relación entre curva de retención de agua y distribución del tamaño de poro.....	338
6.1.3.3	Gradiente decreciente del contenido de humedad.....	339
6.1.4	Desarrollo matemático del modelo.....	340
6.1.4.1	Distribución del tamaño de poro. Cambio de variable a tensión de humedad.....	340
6.1.4.2	Parámetros de modulación de la curva de retención de agua: Escalado y desplazamiento	341
6.1.5	Formulación del modelo.....	342
6.1.5.1	Curva de retención de agua.....	342
6.1.5.2	Generalización de la ecuación para una maceta o muestra de altura finita	342
6.1.6	Agrupación de los parámetros que definen el modelo.....	343
6.1.6.1	Representación en el plano normal	344
6.1.6.2	Representación en el plano de porosidad.....	344
6.2	<i>Aplicación del modelo</i>	345
6.2.1	Porosidad total.....	345
6.2.2	Relación S(h) entre sección y tensión de humedad	346
6.2.3	Caracterización física de sustratos. Cálculo de los parámetros del modelo a partir de los datos experimentales	347
6.2.3.1	Modelo completo para muestras de sección constante.....	347
6.2.3.2	Sustitución del valor medio integral por el valor de la integral en el punto medio	348
6.3	<i>Evaluación del modelo</i>	349
6.3.1	Introducción	349
6.3.2	Objetivos	349
6.3.3	Materiales y métodos	350
6.3.3.1	Obtención de datos para la comparación de modelos	350
6.3.3.2	Análisis de datos.....	357
6.3.4	Resultados.....	363
6.3.4.1	Sensibilidad de los valores obtenidos a los valores iniciales del ajuste en el modelo logarítmico normal.....	363
6.3.4.2	Comparación de modelos.....	367
6.3.5	Discusión.....	398
6.3.5.1	Sensibilidad de los valores obtenidos a los valores iniciales del ajuste en el modelo logarítmico normal.....	398
6.3.5.2	Comparación de modelos.....	399
6.4	<i>Análisis de sensibilidad.....</i>	413
6.4.1	Introducción	413
6.4.2	Fundamentos	414
6.4.3	Objetivo.....	415
6.4.4	Material y métodos.....	415
6.4.4.1	Intervalos de valores de los parámetros del modelo.....	415
6.4.4.2	Cálculo del error inducido en la proporción de agua por los errores de la media y de la desviación estándar	416
6.4.4.3	Medida de la incidencia del error.....	417

6.4.5	Resultados y discusión	417
6.4.5.1	Forma de la curva de retención de agua	417
6.4.5.2	Incidencia en la proporción de agua de los errores de la media y desviación estándar de la distribución normal. Evolución en función de la tensión de humedad	419
6.4.5.3	Evolución de la diferencia máxima (ΔL) en función del valor de la media, desviación estándar, error de la media y error de la desviación estándar	422
6.4.5.4	Incidencia del error estándar de los parámetros del modelo en el cálculo del reparto volumétrico de fases	424
6.5	<i>Recapitulación</i>	426
6.5.1	Modelo logarítmico normal	426
6.5.1.1	Definición del modelo	426
6.5.1.2	Aplicación y simplificaciones	427
6.5.2	Evaluación del modelo	427
6.5.3	Resultados	427
6.5.3.1	Incidencia de los valores iniciales del proceso de ajuste	427
6.5.3.2	Comparación entre modelos: Ajuste entre datos experimentales y modelo	428
6.5.3.3	Incidencia del factor sustrato	428
6.5.3.4	Incidencia de la simplificación del modelo en el ajuste de los datos experimentales	428
6.5.3.5	Incidencia del empleo del valor de la porosidad total experimental como dato en el programa de ajuste	429
6.5.3.6	Comparación con el modelo de Van Genuchten	429
6.5.3.7	Comparación con los modelos polinómicos	430
6.5.4	Análisis de sensibilidad	430
6.5.4.1	Fundamentos	430
6.5.4.2	Resultados	430
7	ERRORES DE MEDIDA	433
7.1	<i>Introducción</i>	435
7.2	<i>Objetivos</i>	436
7.3	<i>Material y Métodos</i>	436
7.3.1	Precisión	436
7.3.2	Exactitud	436
7.3.3	Análisis de los residuos y sus valores absolutos: incidencia de exactitud y precisión	438
7.3.3.1	Relación entre valores de los residuos y sus valores absolutos	438
7.3.3.2	Distribución discreta de datos	439
7.3.3.3	Distribución continua de datos	441
7.3.3.4	Componentes de la Suma de Cuadrados del error (SC_E)	442
7.3.3.5	Evaluación de los componentes de la SC_{EA}	443
7.4	<i>Resultados</i>	445
7.4.1	Precisión	445
7.4.2	Exactitud	447
7.4.3	Análisis de los residuos y sus valores absolutos: incidencia de exactitud y precisión	448
7.5	<i>Discusión</i>	449
7.5.1	Factores que inciden en la variabilidad	450
7.5.1.1	Componentes de la Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error (RCME)	450
7.5.1.2	Factores que inciden en el proceso de medida	451
7.5.2	Errores experimentales	454
7.5.2.1	Precisión y exactitud de las medidas	454
7.6	<i>Recapitulación</i>	461
7.6.1	Fundamentos	461
7.6.2	Resultados	461
7.6.2.1	Precisión y exactitud	461
7.6.2.2	Incidencia relativa de exactitud y precisión	462
7.6.2.3	Variabilidad de las mediciones	462
7.6.2.4	Incidencia de la metodología en la exactitud y en la precisión	462
8	CONCLUSIONES	463
9	BIBLIOGRAFÍA	469

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evolución de la producción de planta ornamental en maceta (en miles de plantas) durante los últimos años	4
Tabla 2: Evolución de la superficie (en áreas) dedicada a la producción de planta ornamental en maceta durante los últimos años	5
Tabla 3: Materiales residuales y subproductos orgánicos generados en diferentes actividades de producción y consumo, susceptibles de ser utilizados como sustratos o componentes de los sustratos de cultivo.....	17
Tabla 4: Modelización: Incidencia de los factores limitantes de los modelos en la exactitud y precisión de las medidas indirectas.....	64
Tabla 5: Metodología de De Boodt: Relación entre los signos de los errores de la medida de laboratorio y de la variable calculada.	94
Tabla 6: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 10. La columna <i>mínimo</i> corresponde a los valores que proporcionan menor error en la variable calculada. La columna <i>máximo</i> corresponde a los valores que proporcionan mayor error en la variable calculada.	97
Tabla 7: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico, aplicando las expresiones de la Tabla 10 y los intervalos de la Tabla 6.	97
Tabla 8: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 11. La columna <i>mínimo</i> corresponde a los valores que proporcionan menor error en la variable calculada. La columna <i>máximo</i> corresponde a los valores que proporcionan mayor error en la variable calculada.	98
Tabla 9: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico aplicando las expresiones de la Tabla 11 y los intervalos de la Tabla 8	99
Tabla 10: Metodología de De Boodt: Cálculo de la incidencia de los errores de las mediciones de laboratorio en las variables calculadas	104
Tabla 11: Metodología de De Boodt: Expresión de la incidencia de errores de las variable calculadas en función del porcentaje de volumen	105
Tabla 12: Metodología de Referencia ISHS: Cálculo de la incidencia de los errores de las mediciones de laboratorio en las variables calculadas	121
Tabla 13: Metodología de Referencia ISHS: Cálculo de la incidencia de los errores del porcentaje volumétrico en las variables calculadas.....	122
Tabla 14: Metodología de Referencia ISHS: Relación entre los signos de los errores de la medida de laboratorio y de la variable calculada.....	123
Tabla 15: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 12	124
Tabla 16: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico aplicando las expresiones de la Tabla 12 y los	

intervalos de la Tabla 15. *Estos valores corresponden a los máximos y mínimos de una serie de cálculos, en los que se han considerado todas las combinaciones posibles para los valores %Vag=80% - 95%, Da=0,1 – 0,3 g*cm ⁻³ , Vt=200 – 400 cm ³).	124
Tabla 17: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 13	125
Tabla 18: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico aplicando las expresiones de la Tabla 13 y los intervalos de la Tabla 17.....	125
Tabla 19: Comparación de métodos utilizados para medir la densidad real: incineración y picnometría. Análisis de varianza de los valores obtenidos por incineración y picnometría de agua y alcohol, en diferentes cortes granulométricos de corteza de pino.....	190
Tabla 20 : Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Valor medio (gr*cm ⁻³) y coeficiente de variación (%) obtenidos para la densidad real determinada por picnometría, inmersión hirviendo e inmersión a temperatura ambiente	197
Tabla 21 : Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Análisis de varianza de los valores obtenidos por picnometría y saturando por ebullición, con 6 sustratos diferentes.	199
Tabla 22 : Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Análisis de varianza de los valores obtenidos por picnometría y saturando por ebullición, considerando los dos tipos de sustrato: orgánico y mineral.	200
Tabla 23: Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Estudio de la interacción sustrato*método en la comparación de picnometría y saturación por ebullición: Parámetros estadísticos de los análisis de varianza para cada uno de los tipos de sustratos: orgánico y mineral.	200
Tabla 24 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Valores de la densidad real (gr*cm ⁻³) y coeficientes de variación (%), obtenidos picnometría e inmersión con tres sistemas de saturación	205
Tabla 25 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Análisis de varianza del valor de densidad real determinada por picnometría, e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío, con 6 sustratos diferentes.	206
Tabla 26: Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Análisis de varianza -incluyendo como variable el tipo de sustrato- del valor de la densidad real determinada por picnometría e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío.....	206
Tabla 27: Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Estudio de la interacción	

sustrato*método en el ensayo de densidad real, determinada por picnometría e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío: Parámetros estadísticos de los análisis de varianza para cada uno de los tipos de sustratos.	207
Tabla 28: Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Estudio de la interacción sustrato*método en el ensayo de densidad real, determinada por picnometría e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío: Parámetros estadísticos de los análisis de varianza para cada sustrato.	207
Tabla 29 : Saturación de sustratos por vacío. Incidencia del nivel de vacío aplicado durante la saturación: Análisis de varianza del valor de densidad real determinado por inmersión sobre muestras saturadas a distintos niveles de vacío, con 7 sustratos diferentes.	210
Tabla 30: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Valores de la densidad real ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y coeficientes de variación (%) obtenidos.	215
Tabla 31: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Análisis de varianza del valor de densidad real para todas las variantes de saturación consideradas en el ensayo, con 6 sustratos diferentes.	215
Tabla 32: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Análisis de varianza del valor de densidad real para la saturación simple.	216
Tabla 33: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Ajuste lineal, por sustrato, de los valores obtenidos en función del vacío aplicado. Parámetros estadísticos.	217
Tabla 34 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Ajuste lineal, por sustrato, de los valores obtenidos en función del vacío aplicado. Valores del término independiente (a) y la pendiente (b), errores de estima y nivel de significación.	217
Tabla 35: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Valores medios de los residuos para cada una de las combinaciones sustrato * vacío	219
Tabla 36: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Análisis de varianza para distintos métodos de saturación por vacío. El vacío aplicado en todos los casos es de 70 cm Hg.	220
Tabla 37: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Estudio de la interacción sustrato*método de saturación: Estudio de la interacción método*sustrato. Análisis de varianza por sustratos. Parámetros estadísticos.	221
Tabla 38: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Estudio de la interacción sustrato*método de saturación: Test de Duncan de separación de medias. En la columna correspondiente a cada sustrato, los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas.	222
Tabla 39: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Valores de la densidad real y coeficientes de variación	

obtenidos en el ensayo 5.2.7. Incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación doble por vacío.....	226
Tabla 40: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Diferencias entre dos valores consecutivos de la densidad real. Los vacíos de saturación corresponden a 50, 60, 70 y 76 cm de mercurio	228
Tabla 41: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Resultado del análisis estadístico del valor obtenido para la densidad real, para las combinaciones Vacío * Sustrato para cada método de saturación.....	230
Tabla 42: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Parámetros estadísticos correspondientes a las regresiones lineales entre densidad (variable dependiente) y nivel de vacío (variable independiente), para los diferentes sustrato para los casos de saturación doble (2ª) y saturación simple.	232
Tabla 43: Saturación de sustratos por vacío. Volumen específico obtenido como valor inverso de la densidad real: Valor medio ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) y coeficiente de variación (%) obtenidos para las diferentes combinaciones método*sustrato. * El primer valor se ha obtenido con todos los datos del ensayo, en el segundo valor se ha desestimado un valor fuera de tipo.....	240
Tabla 44: Saturación de sustratos por vacío. Volumen específico obtenido como valor inverso de la densidad real: Análisis de varianza de la combinación Vacío * Sustrato para cada método de saturación	242
Tabla 45 : Saturación de sustratos por vacío. Volumen específico obtenido como valor inverso de la densidad real: Parámetros estadísticos correspondientes a las regresiones lineales entre volumen específico (variable dependiente) y nivel de vacío (variable independiente), para los diferentes sustrato para los casos de saturación doble (2ª) y saturación simple	242
Tabla 46: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Parámetros de la regresión lineal de Dr en función del vacío aplicado durante la saturación, para cada sustrato y método de saturación.....	244
Tabla 47: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Parámetros de la regresión lineal de Ve en función del vacío aplicado durante la saturación, para cada sustrato y método de saturación.....	245
Tabla 48 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Análisis de varianza de la pérdida de material en cuatro sustratos utilizando tres cierres diferentes.....	257
Tabla 49: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Porcentaje de pérdida de peso durante la saturación por ebullición para los sustratos y cierres empleados en el ensayo	257
Tabla 50 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Análisis de varianza del ensayo factorial de sustrato y cierres eliminando del análisis los datos correspondientes a la perlita	259

Tabla 51: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Pérdida de peso en la saturación por ebullición. Material perdido por disolución y en suspensión. Disolución/inicial= porcentaje de material perdido por disolución referido al peso inicial de sustrato. Dis+Sus/Pérd Peso= porcentaje de la pérdida de peso por disolución y suspensión referido a la pérdida de peso total.....	262
Tabla 52 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Análisis de varianza del ensayo factorial de sustrato con cierre de malla de nilón de distinta luz.....	264
Tabla 53: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Porcentaje de pérdida de peso durante la saturación por ebullición para los sustratos y cierre de malla de nilón de distinta luz.	264
Tabla 54 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre. Incidencia del método de saturación: Análisis de varianza de la pérdida de sustrato para seis sustratos empleando 3 métodos de saturación.....	267
Tabla 55: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre. Incidencia del método de saturación: Porcentaje de pérdida de peso durante la saturación para cada combinación sustrato*método considerados en el ensayo	268
Tabla 56 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre. Incidencia del método de saturación: Incidencia de la pérdida de sustrato en el cálculo de la densidad real. Diferencias máximas entre los valores de la densidad calculados con los valores iniciales y finales.....	268
Tabla 57 : Errores de medida: Características de los dos tipos de caucho empleados para la elaboración de las bandas elásticas de caucho. Datos tomados del informe de laboratorio elaborado por la empresa fabricante Manufacturas Técnicas del Caucho S.A. de Lezama (Bizkaia).	274
Tabla 58 : Errores de medida. Incidencia de la variación de la densidad del agua empleada para medir el volumen por desplazamiento de fluidos: Análisis de varianza de los valores obtenidos para la densidad del agua considerando tres factores de variación: patrón de volumen, momento de la evaluación (antes y después de la evaluación de volúmenes de las muestras) y “Baño” referido a la masa de agua empleada en cada caso.	282
Tabla 59 : Errores de medida. Incidencia de la variación de la densidad del agua empleada para medir el volumen por desplazamiento de fluidos: Valores máximo y mínimo de los valores medios correspondientes a los diferentes niveles de cada factor y diferencia entre ambos.....	282
Tabla 60 : Errores de medida: Peso de los anillos metálicos y volumen ocupado por la parte metálica de los mismos de las dos series utilizadas. Valores medios y variabilidad de los valores correspondientes a todos los elementos que componen cada una de las series.....	285
Tabla 61 : Errores de medida. Evaluación del peso de los discos de 140 mm de diámetro cortados con láser en malla de nilón de 75 μ m de luz empleados en el cierre de los contenedores portamuestras.....	286

Tabla 62 : Errores de medida. Control de pesos y volúmenes de las juntas tóricas de silicona. Pesos y volúmenes para las series Blanca (B) y Roja (R). Estimación del volumen conjunto de las mallas de nilón y de las juntas tóricas. .287

Tabla 63 : Errores de medida: Control de pesos en las dos series de elásticos de caucho.288

Tabla 64 : Errores de medida: Evaluación de los errores debidos a la medida directa de pesos con balanza de 0,01 g de precisión. Desviación estándar de las diferencias entre los valores obtenidos para un mismo elementos. Control realizado sobre un lote de anillos metálicos y dos lotes de bandas elásticas de caucho. Magnitud del error para diferentes intervalos de probabilidad.289

Tabla 65 : Errores de medida: Evaluación de los errores debidos a la medida directa de volúmenes por desplazamiento de fluidos. Desviación estándar de las diferencias entre los valores obtenidos para un mismo elemento. Control realizado sobre un lote de anillos metálicos. Magnitud del error para diferentes intervalos de probabilidad.290

Tabla 66 : Errores de medida: Evaluación del volumen interno de 6 anillos metálicos de la serie 500. Media, desviación estándar y amplitud de los intervalos. El valor de volumen se ha calculado a partir de las medidas lineales obtenidas con calibre de 0,1 mm de precisión.291

Tabla 67 : Errores de medida: Cálculo de errores en el peso, en el caso de emplear juntas tóricas de silicona. Valores de la desviación estándar en g. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.294

Tabla 68 : Errores de medida: Cálculo de errores en el volumen, en el caso de emplear juntas tóricas de silicona. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.295

Tabla 69 : Errores de medida: Cálculo de errores en el peso, en el caso de emplear bandas elásticas de caucho. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.296

Tabla 70 : Errores de medida: Cálculo de errores en el volumen, en el caso de emplear bandas elásticas de caucho. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.297

Tabla 71: Errores de medida: Valores de las desviaciones estándar correspondientes a la distribución de errores de los valores netos de pesos y volúmenes, empleando en el cierre juntas tóricas de silicona y bandas elásticas de caucho....	297
Tabla 72 : Errores de medida: Relación entre probabilidad y magnitud del error en la estimación de los valores netos de peso y volumen de la muestra de sustrato. Valores calculados a partir de las desviaciones estándar de la Tabla 71.....	297
Tabla 73: Errores de medida: Porcentaje que supone sobre el peso y volumen de la muestra, los intervalos obtenidos en la Tabla 72. Los valores considerados para volumen y peso de la muestra son, 215 cm ³ y 21,5 g respectivamente, que corresponden a un sustrato con densidad=0,1 g*cm ³	298
Tabla 74 : Estrategia de medida: Cálculo del reparto volumétrico de fases e incidencia del error por pérdida de sustrato. Los valores del error (ϵ) se obtienen como diferencia entre el valor observado y el verdadero (ϵ =Observado-Verdadero).....	305
Tabla 75 : Estrategia de medida: Volumen ocupado por aire, obtenido directamente a partir de los datos de cada repetición (Vaid) y a partir de los datos medios de densidades (Vaic) para los tres métodos experimentales aplicados. Corrección de valores en función del sustrato perdido durante el proceso (Método C corregido)	308
Tabla 76: Estrategia de medida: Valores obtenidos para la corrección del Método C. Valores medios y desviación estándar de Peso de sustrato perdido, Volumen total calculado y Error. El valor medio de la densidad aparente relaciona las desviaciones estándar de la pérdida de peso y del volumen total calculado, y, por lo tanto también la del error.	308
Tabla 77 : Picnometría de gases: Calibrado de los puntos fijos de la cámara de medida del picnómetro de doble cámara.	322
Tabla 78 : Picnometría de gases: Resultado del segundo ensayo de calibrado del volumen de la cámara de medida. Se emplea como patrón de volumen la diferencia entre los puntos fijos 3 y 11 del émbolo del cilindro M1 previamente calibrados.	324
Tabla 79 : Picnometría de gases: Resultado del tercer ensayo de calibrado del volumen de la cámara de medida. El volumen obtenido para K ₄ se aparta de la media, por lo que inicialmente no se ha considerado. Los estadísticos marcados con * incluyen el valor de K ₄	325
Tabla 80: Picnometría de gases: Calibrado de los valores de K _i correspondientes a los puntos fijos de la cámara de referencia.....	326
Tabla 81: Picnometría de gases: Cálculo del valor de K _{Ti} para mediciones efectuadas en laboratorio. Influencia de las variaciones de temperatura en la medida por picnometría	328
Tabla 82 : Picnometría de gases: Análisis de varianza -con tres factores- de los valores obtenidos para el volumen de aire adsorbido por la muestra referido a 100 g de peso seco.....	329
Tabla 83 : Picnometría de gases: Análisis de varianza -con dos factores- de los valores obtenidos para el volumen de aire adsorbido por la muestra referido a 100 g de peso seco.....	329

Tabla 84: Picnometría de gases: Volumen de aire adsorbido por la muestra de sustrato, expresado en cm^3 por 100 g de peso seco de la muestra. Volumen adsorbido por la muestra tensionada y seca. Diferencia de adsorción entre ambos casos.	330
Tabla 85 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores iniciales empleado para el ajuste de los parámetros en las variantes V12 y V17 de integral simple del modelo logarítmico normal	356
Tabla 86: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Número de casos considerados por sustrato y modelo en el estudio de convergencia.....	357
Tabla 87: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Número de casos considerados por sustrato y modelo en el estudio de presencia de mínimos locales	358
Tabla 88: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: N° de ajustes de curvas realizados con las diferentes variantes del modelo logarítmico normal y considerados en el estudio de mínimos locales	366
Tabla 89: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores máximo y mínimo de los valores medios e intervalos de los 33 grupos considerados en el estudio de mínimos locales	366
Tabla 90 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la suma de cuadrados de la regresión (SC_{Reg}) para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente)	373
Tabla 91 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la suma de cuadrados del error (SC_{Error}) para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente).....	373
Tabla 92 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de R^2 para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente).	374
Tabla 93 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Nivel de significación α del valor F para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente).	374
Tabla 94: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la pendiente (m) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo. Nivel de significación $\alpha=P(z \geq 1)$. $\alpha > 0.1 \rightarrow \text{ns}$, $0.10 \geq \alpha > 0.05 \rightarrow *$, $0.05 \geq \alpha > 0.01 \rightarrow **$, $0.01 \geq \alpha \rightarrow ***$	375
Tabla 95: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Error estándar de la pendiente (m) de la recta de ajuste	

entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo	375
Tabla 96: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor del término independiente (b) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo	376
Tabla 97: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Error estándar del término independiente (b) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo	376
Tabla 98 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores de la suma de cuadrados de falta de ajuste (Lofit), para los ajustes de cada modelo a cada sustrato. Totales para cada modelo y para cada sustrato y total del ensayo	377
Tabla 99 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Falta de ajuste de los modelos. Valores para cada modelo de la SC_{Lofit} , CM_{Lofit} y RCM_{Lofit}	377
Tabla 100 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Falta de ajuste de los modelos. Valores para cada sustrato de la SC_{Lofit} , CM_{Lofit} y RCM_{Lofit}	378
Tabla 101 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Falta de ajuste de los modelos. Valores para cada tensión de la SC_{Lofit} , CM_{Lofit} y RCM_{Lofit} . Valor de tensión expresado en cm de columna de agua	378
Tabla 102 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Nivel de significación α para el test F de la falta de ajuste entre los datos experimentales y los modelos considerados.	379
Tabla 103: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor absoluto de los residuos para cada sustrato y modelo	379
Tabla 104 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza de los residuos considerando los tres factores de variación: modelo, sustrato y tensión	381
Tabla 105 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza del valor absoluto de los residuos considerando los tres factores de variación: modelo, sustrato y tensión.	382
Tabla 106: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza de los residuos para cada uno de los niveles del factor tensión	385
Tabla 107: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza del valor absoluto de los residuos para cada uno de los niveles del factor tensión	386
Tabla 108: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro: Valor medio de los residuos de cada modelo para cada valor de tensión. Obtenidos como media de los valores obtenidos para cada sustrato.	388

Tabla 109: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro: Evaluación del modelo: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor medio del valor absoluto de los residuos de cada modelo para cada valor de tensión. Obtenidos como media de los valores obtenidos para cada sustrato.....	388
Tabla 110: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Tensión 50 cm de columna de agua. Valor medio de los residuos de cada modelo para cada sustrato.	389
Tabla 111: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Tensión 100 cm de columna de agua. Valor medio de los residuos de cada modelo para cada sustrato.	389
Tabla 112: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza de los residuos para cada uno de los niveles del factor sustrato para los valores de tensión 50 y 100 cm de columna de agua.	390
Tabla 113 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Media de la distribución logarítmico normal y error estándar de estimación de esta media.....	392
Tabla 114 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Desviación estándar de la distribución logarítmico normal (sigma) y error estándar de estimación	393
Tabla 115 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Escalado, valor medio y error estándar de estimación ...	394
Tabla 116 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Desplazamiento, valor medio y error estándar de estimación.....	395
Tabla 117 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Comparación de los valores de desplazamiento obtenidos con el modelo logarítmico normal y de la humedad residual (Θ_r) obtenida con el modelo de Van Genuchten. Valor medio del desplazamiento (modelo logarítmico normal), valor medio y error estándar para la humedad residual (modelo de Van Genuchten), contenido de humedad del sustrato a tensión 100 cm de columan de agua (experimental).	396
Tabla 118 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores de la porosidad total obtenida con los diferentes modelos. Comparación con los valores obtenidos experimentalmente en laboratorio.	397
Tabla 119: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la tensión de humedad (cm de columna de agua) equivalente al valor medio de la distribución logarítmico normal	408
Tabla 120: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Valores considerados en la simulación para el análisis de sensibilidad.....	416

Tabla 121 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Incidencia del signo de los errores de μ y σ en la evolución del ΔL , en función de la tensión.	421
Tabla 122 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Ajuste de los parámetros a y b de la ecuación (248) a un plano considerando como variables independientes $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$	423
Tabla 123: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Incidencia máxima de los errores estándar de los parámetros del modelo logarítmico normal en el cálculo del porcentaje de volumen ocupado por agua (ΔV_{Ag})	425
Tabla 124 : Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Valores de la función Erf(x)	442
Tabla 125: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Análisis de la precisión de las medidas. Aportación a la SC_{Error} de cada uno de los sustrato y de cada uno de los valores de tensión considerados. Estimación de la varianza (CM) y la desviación estándar (RCM) de cada sustrato y tensión.	446
Tabla 126: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Precisión de los datos experimentales. Varianza (σ) entre repeticiones para cada combinación sustrato*tensión. Distribución por intervalos, de las varianzas de las 11 tensiones de cada sustrato, n° de casos y valores de las tensiones (entre paréntesis).....	447
Tabla 127: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Exactitud de los datos experimentales. Intervalos de tensión en los que se han obtenido valores experimentales de $d\Theta/dh \geq 0$, valores de los intervalos y valores de los incrementos obtenidos.	448
Tabla 128 : Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Cálculo de la incidencia de los factores aleatorios en la SC_{EA} , a partir de los datos obtenidos para los valores de los residuos y de sus valores absolutos. El número de grados de libertad es 2095.	448
Tabla 129: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Incidencia relativa de los factores fijos (exactitud) y aleatorios (precisión) en el valor de SC_{EA}	449

INDICE DE FIGURAS

<p>Figura 1 : Metodología de Referencia ISHS: Incidencia del error de Ps en %Vag. Cálculo en función de las medidas de laboratorio. Valor de la expresión $Z=100*\Delta(1/Ps)$ en función de Ps y ΔPs. El error inducido en el volumen ocupado por agua se obtiene multiplicando este valor por $(-Pag*Da)$ (ecuación (99) y Tabla 12). El error inducido en el volumen de aire es igual y de signo contrario (ecuación (106) y Tabla 12).....</p>	128
<p>Figura 2: Comparación de métodos utilizados para medir la densidad real: incineración y picnometría. Evolución de los valores obtenidos para la densidad real en función de la granulometría del sustrato –corteza de pino compostada- y del método de medida empleado.....</p>	191
<p>Figura 3 : Saturación de sustratos por vacío. Incidencia del nivel de vacío aplicado durante la saturación: Variación del valor de densidad real determinado por inmersión sobre muestras saturadas a distintos niveles de vacío. Las líneas de puntos corresponden al mismo sustrato que la correspondiente línea continua, pero sin considerar algunos valores aberrantes</p>	211
<p>Figura 4 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Residuos de las regresiones lineales en función del valor de la densidad real.....</p>	218
<p>Figura 5: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Residuos de las regresiones lineales en función del vacío aplicado.....</p>	218
<p>Figura 6 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación por vacío: Ecuación (169): Evolución del valor medido para la densidad real (Dr) ($y= Dr/Drms$) en función del vacío aplicado ($x=P1/P0$) y de la relación $V1/Vms$. El valor medido para la densidad real se obtiene multiplicando la ordenada y por $Drms$, correspondiente al valor de la densidad obtenida para el supuesto de que el volumen de aire atrapado es cero.</p>	237
<p>Figura 7: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación por vacío: Ecuación (170): Evolución de la pendiente de la densidad real (Dr) ($y=Pendiente/Drms$) en función del vacío aplicado ($x=P1/P0$) y de la relación $V1/Vms$.....</p>	237
<p>Figura 8: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Corteza <3 mm. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos.....</p>	246
<p>Figura 9: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Corteza >3 mm. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos.....</p>	246
<p>Figura 10: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Escoria granulada. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos</p>	247
<p>Figura 11: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Lana de escoria. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos</p>	247

Figura 12: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Perlita B6. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos.....	248
Figura 13: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Turba. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos.....	248
Figura 14: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Representación de los sustratos en el plano normal. (A) unión de los datos por modelos. (B) unión de los datos por sustratos. En la figura (A), tomando la línea de los modelos V12 y V14 de izquierda a derecha, los puntos corresponden a los sustratos 9, 6, 8, 2, 3, 4, 5, 7 y 1. Para los modelos V17 y V18, el orden es el mismo, falta el sustrato 9 por falta de convergencia, con lo que la serie comienza en el sustrato 6.	405
Figura 15: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Representación de los sustratos en el plano de porosidad	409
Figura 16: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Relación entre el valor de la porosidad total obtenido experimentalmente y el obtenido por ajuste de los modelos. Los números incluidos en el gráfico indican la posición de cada sustrato.....	409
Figura 17: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Evolución de los valores del escalado.....	410
Figura 18: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Plano de porosidad. Variación de los valores obtenidos para cada sustrato con los diferentes modelos	410
Figura 19: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro: Polimorfismo de la curva de retención de agua obtenida con el modelo logarítmico normal. A: Escala de 0 a 100 cm de columna de agua. B: Detalle para bajas tensiones (0-10 cm de columna de agua)	418
Figura 20: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Diferencia entre los valores calculados por el modelos con los unos valores iniciales de μ y σ y con valores incrementados de estas variables...	420
Figura 21: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Evolución de los valores de los parámetros a y b de la ecuación (248) en función de los incrementos de la media y de la desviación estándar (sigma) de la distribución normal.	422
Figura 22 : Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Componentes de la Suma de Cuadrados del error de los valores absolutos (SCEA) y su relación con la Suma de Cuadrados del Error (SCEror).....	443

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Sustratos

Las técnicas culturales aplicadas en la producción de plantas y hortalizas han experimentado cambios rápidos y notables durante las cinco últimas décadas en Europa, y más recientemente en España. Estos cambios están provocados en gran medida por la evolución de los sistemas de control de los factores de producción. El aumento de este control proporciona la posibilidad de aumentar la gama de productos, la productividad de los cultivos y la calidad de las cosechas.

Las estructuras para el control de los factores ambientales han evolucionado desde sistemas sencillos para proteger la línea de cultivo con una lámina de plástico hasta los invernaderos con cubierta de cristal, que proporcionan un elevado control sobre los parámetros ambientales que afectan al cultivo.

Los equipos de riego y fertilización automática desarrollados están proporcionando cada vez mayores posibilidades de control sobre los factores de producción que afectan al sistema radicular de la planta.

La sustitución del cultivo tradicional en suelo por el cultivo fuera de suelo sigue esta misma línea evolutiva, aumentando considerablemente la posibilidad de control de los factores de producción relacionados con el entorno radicular de la planta. Además de la posibilidad de control, el cultivo en sustrato presenta otras características diferenciadoras respecto al cultivo en suelo. Así, Raviv *et al.* (1986), FAO (1990), Abad (1995), Abad y Noguera (1998), señalan las siguientes razones para sustituir el cultivo en suelo por el cultivo fuera de suelo:

1. la necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro
2. la existencia de factores limitantes para la continuidad de los cultivos intensivos en el suelo natural, particularmente salinización, enfermedades y agotamiento de los suelos agrícolas, y
3. la fuerte intensificación cultural que facilita el cultivo hidropónico y en sustrato, al permitir un control riguroso del medio ambiente radicular, especialmente de los aspectos relacionados con el suministro de agua y de nutrientes.

Desde el punto de vista hortícola, la finalidad del sustrato de cultivo es producir una planta o cosecha de calidad y abundante, en el período de tiempo más corto posible y con los menores costes de producción (Abad *et al.*, 1993). Además, el sustrato utilizado no debe provocar un impacto medioambiental de importancia.

1.1.1 *Sustrato hortícola. Cultivo sin suelo. Conceptos*

El término *sustrato* se aplica en Horticultura a todo material sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, distinto del suelo *in situ*, que colocado en un contenedor -en forma pura o en mezcla- permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta (Blanc, 1987; Abad, 1991; Abad y Noguera, 1998). El sustrato puede intervenir (material químicamente activo) o no (material inerte) en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta.

Se entiende por *cultivo sin suelo* aquel sistema de cultivo en el que la planta desarrolla su sistema radicular en un medio (sólido o líquido) confinado en un espacio limitado y aislado, fuera del suelo. Desde un punto de vista práctico, los cultivos sin suelo suelen clasificarse en *cultivos hidropónicos* (cultivo en agua más nutrientes o sobre materiales inertes) y *cultivos en*

sustrato (cultivo sobre materiales químicamente activos, con capacidad de intercambio catiónico). Además, los cultivos sin suelo pueden funcionar como *sistemas abiertos*, a solución perdida -no recirculante-, o como *sistemas cerrados*, con recirculación de las soluciones nutritivas (FAO, 1990; Noguera, 1993; Urrestarazu, 1997).

1.1.2 Importancia económica de los cultivos sin suelo

El cultivo sin suelo encuentra numerosas aplicaciones como técnica de producción comercial de plantas y cosechas (Cánovas, 1993). Entre ellas destacan el cultivo en sustrato de plantas ornamentales en contenedor y el cultivo hidropónico de hortalizas.

Comunidad Autónoma	Año							
	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Galicia	414	351	501	2.193	263	279	277	2.885
P. de Asturias	89	30	30	150	150	210	280	280
Cantabria	8	8	8	8	8	8	4	144
País Vasco	516	355	435	590	577	1.008	890	456
Navarra	-	150	400	220	600	600	260	700
La Rioja	10	20	27	44	-	-	-	-
Aragón	68	7	7	12	36	38	38	-
Cataluña	24.156	7.258	12.911	18.785	21.130	18.514	16.885	23.507
Baleares	1.520	186	191	472	175	513	1.400	1.760
Castilla y León	-	154	120	464	877	656	582	654
Madrid	5.318	310	250	395	310	515	515	725
Castilla-La Mancha	288	600	613	513	625	625	635	840
C. Valenciana	48.925	39.128	39.835	40.505	38.795	32.652	39.652	30.529
R. de Murcia	662	345	333	4.236	338	362	186	352
Extremadura	-	-	-	400	800	200	200	200
Andalucía	82.170	12.221	9.483	23.958	33.863	37.393	33.559	29.329
Canarias	18.901	7.514	7.115	7.785	7.245	7.520	6.971	8.100
Total	183.045	68.637	72.259	100.730	105.792	101.093	102.334	100.461

Fuente: MAPA (1985, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994b, 1997 y 1999)

Tabla 1: Evolución de la producción de planta ornamental en maceta (en miles de plantas) durante los últimos años

El sector profesional de las plantas ornamentales en maceta es de gran importancia en nuestro país (Tabla 1 y Tabla 2). La producción de plantas en todo el Estado español se sitúa, en los últimos años, alrededor de los 100 millones de unidades. La mayor parte de la producción se concentra en las zonas próximas a la costa mediterránea. De los casi 101 millones de plantas, 56 millones corresponden a las comunidades autónomas de Cataluña, Baleares, Comunidad Valenciana y Murcia. Andalucía tiene una gran importancia, aportando 29 millones de plantas. A las provincias de Almería, Granada y Málaga, costeras del Mediterráneo, les corresponde una producción de 21 millones de plantas. En definitiva, la costa mediterránea produjo en 1996 un total de 85 millones de plantas, es decir el 84% de la producción total.

La superficie dedicada a la producción de planta ornamental es de 2.011 ha en todo el Estado español. De ellas, 1.262 corresponden a las comunidades autónomas de Cataluña, Baleares, Comunidad Valenciana y Murcia, y 351 a Andalucía -y de ellas 201 a las provincias de Almería, Granada y Málaga-. La costa mediterránea suma pues 1.613 ha, es decir el 80 % de la superficie total.

En los cultivos ornamentales en maceta raramente se utiliza el suelo en el sentido habitual. Los sustratos orgánicos, y muy especialmente las turbas *Sphagnum*, son los componentes más importantes y ampliamente utilizados en los medios de cultivo de las plantas que crecen en contenedor.

Comunidad Autónoma	Año							
	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Galicia	400	3.650	5.760	4.400	5.000	5.400	5.100	4.900
P. de Asturias	74	100	100	500	500	700	700	700
Cantabria	200	200	200	200	200	200	100	300
País Vasco	600	1.000	1.100	1.300	1.200	2.400	2.400	1.900
Navarra	-	200	600	300	600	600	600	1.600
La Rioja	200	300	300	500	-	-	-	-
Aragón	1.700	170	170	300	1.000	100	130	-
Cataluña	6.600	16.000	21.130	12.700	21.900	11.913	10.784	12.504
Baleares	1.600	2.000	1.700	3.300	902	3.800	3.500	4.400
Castilla y León	-	585	450	700	1.412	1.512	2.412	800
Madrid	73.400	1.500	1.500	2.000	1.700	2.700	2.900	3.800
Castilla-La mancha	300	600	700	600	800	800	800	1.000
C. Valenciana	19.700	60.000	62.000	91.000	87.000	82.750	115.102	95.073
R. de Murcia	700	12.900	12.300	14.200	13.400	14.700	4.200	14.200
Extremadura	-	-	-	100	200	200	200	200
Andalucía	4.900	16.600	16.075	22.050	31.800	34.800	32.700	35.055
Canarias	12.080	15.800	16.600	17.500	19.900	21.900	21.800	24.700
Total	122.454	131.605	140.685	171.650	187.514	184.475	203.428	201.132

Fuente: MAPA (1985, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994b, 1997 y 1999)

Tabla 2: Evolución de la superficie (en áreas) dedicada a la producción de planta ornamental en maceta durante los últimos años

El cultivo sin suelo de hortalizas se inició en nuestro país a principios de la década de los 80, evaluándose en unas 35 ha la superficie de cultivo bajo hidroponía en la campaña 1985/86 (Martínez y García, 1993). Desde entonces, la superficie dedicada al cultivo hidropónico ha experimentado un fuerte incremento, que todavía continúa hoy. Quizás sea este fuerte ritmo de crecimiento lo que hace difícil obtener una estimación fiable de la superficie actual de cultivo hidropónico. Según las últimas estimaciones, la superficie dedicada a hidroponía en el Poniente de Almería es de 5.000 has (Perez-Parra 2001, comunicación personal).

Actualmente, los sistemas de cultivo sin suelo de hortalizas más representativos (Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998), son:

1. Cultivo en sacos de arena
2. Cultivo en sacos de perlita
3. Cultivo en tablas y tacos de lana de roca, y
4. Cultivo en otros sistemas y materiales (tierra volcánica o picón, residuo de fibra de coco, corteza de pino, estériles del carbón, etc).

Todos estos sistemas funcionan prácticamente como sistemas abiertos, sin recircular la solución nutritiva. El tomate es la especie de mayor importancia en el cultivo sin suelo (Abad, 1995; Maroto, 1995), aunque en hidroponía también se producen otras hortalizas, como pimiento, pepino, melón, etc.

1.1.3 *Materiales utilizados como sustratos o componentes de sustratos*

El sustrato de cultivo está constituido por un material poroso, en el que se desarrolla el sistema radicular de la planta, y del que ésta toma el agua y los nutrientes que necesita para su desarrollo y el oxígeno necesario para el funcionamiento correcto del sistema radicular. Para Michelot (1999), el soporte del cultivo (suelo o sustrato) cumple cuatro funciones:

- Asegura el anclaje mecánico de la planta
- Constituye la reserva hídrica de la que las raíces toman el agua para cubrir las necesidades de la planta
- Las raíces son órganos aerobios. El sustrato debe proporcionar el oxígeno que necesitan para su correcto funcionamiento.
- Finalmente, debe asegurar la nutrición mineral de la planta.

El cultivo en sustrato proporciona, en relación al cultivo en suelo, una mayor capacidad de control de los factores de producción relacionados con el sistema radicular de la planta. Esta mayor capacidad de control es posible por la reducción de la capacidad tampón del medio, debida -por una parte- a la reducción del volumen explorado por las raíces y -por otra- a las características propias de los materiales empleados como sustratos de cultivo.

Son numerosos los materiales porosos que se pueden emplear para cubrir estas necesidades. Las características de los diferentes materiales varían en intervalos muy amplios. Esta diversidad llevó a los pioneros de los sustratos a definir el sustrato “ideal”, concibiendo como tal a un sustrato adecuado para el cultivo de cualquier planta. De Boodt ya definió un sustrato ideal (De Boodt y De Waele, 1968). Sin embargo, este concepto está en desuso y son varios los autores que responden negativamente a la pregunta ¿existe un sustrato ideal para el cultivo sin suelo? (Raviv *et al.* 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

Las características que debe reunir el sustrato a emplear varían en función de las necesidades del material vegetal a utilizar (especie, variedad, si se trata de varias especies o de una sola, etc), del objetivo del cultivo (multiplicación, producción de planta, producción de fruto, producción de flor, etc), de los medios de control disponibles en la explotación (estructuras de protección del cultivo, sistemas de control de la solución nutritiva, sistemas de control de riego, etc), de la incidencia de factores no controlados por el agricultor (factores climáticos, posibilidad de fallos en los sistemas de control, etc).

Ante esta diversidad de necesidades, la diversidad de posibles materiales y de sus características proporcionan la posibilidad de seleccionar el sustrato en función de las necesidades propias de cada explotación.

Desde el punto de vista de las características de la explotación y de las técnicas de producción, se presentan dos situaciones claramente diferenciadas: el cultivo hidropónico y la producción de planta en maceta o contenedor.

1.1.3.1 Cultivo hidropónico

El cultivo hidropónico se lleva a cabo en explotaciones con una elevada capacidad de control de los factores de producción, tanto los ambientales como los relativos al entorno radicular. Esta técnica se emplea normalmente para la producción de hortalizas de fruto y de flor cortada.

En estas condiciones, la utilización de sustratos con escasa o nula capacidad tampón potencia la capacidad de respuesta del cultivo frente a la variación controlada de los parámetros de cultivo.

El inconveniente de esta baja capacidad tampón es la susceptibilidad del cultivo a la incidencia de factores externos. El riesgo de daños es bajo debido al elevado control de los factores de producción. Cuanto mayor sea la fiabilidad de los sistemas control empleados, menor será el riesgo de daños.

La uniformidad que se da en las condiciones de cultivo, tiene como consecuencia la utilización de un escaso número de sustratos. La lana de roca y la perlita son los sustratos más utilizados; entre ambos ocupan un elevado porcentaje de la superficie total dedicada a hidroponía. Un caso especial es la utilización de arena. El empleo de la arena en los cultivos intensivos ha dado lugar al empleo de este material como medio de cultivo también en hidroponía, sobre todo en la Comunidad Autónoma de Murcia.

Durante el desarrollo de esta técnica de producción, se han utilizado otros sustratos como sacos de turba, vermiculita, corteza de pino, estériles de carbón, espumas sintéticas, etc. En los últimos años se está introduciendo la utilización de la fibra de coco. En cualquier caso, la mayor parte de la producción se lleva a cabo en lana de roca y perlita.

1.1.3.2 Cultivo de planta en maceta

Las explotaciones dedicadas a la producción de planta en maceta o contenedor presentan una amplia gama de posibilidades en lo referente al control de los parámetros de cultivo. Se pueden presentar desde explotaciones al aire libre, sin ninguna posibilidad de control de los parámetros ambientales, hasta la disponibilidad de estructuras de protección, con una gran capacidad de control. En lo referente al control de los parámetros del entorno radicular, la situación es similar y hay normalmente una correspondencia con las posibilidades de control del ambiente. Esta técnica se emplea en la producción de planta que sale de la explotación como planta viva entera, bien sea para uso ornamental doméstico, o bien para su instalación en un terreno de asiento definitivo como planta ornamental pública.

La gran diversidad de situaciones que se presenta tiene como consecuencia la diversidad de los materiales empleados como sustratos. Los países del centro de Europa han sido productores de turba. Estos países han tenido, y siguen teniendo, una gran importancia como productores de planta. Todo ello, junto con las posibilidades de la turba como sustrato, ha hecho que ésta sea el sustrato más empleado.

La producción de planta en países no productores de turba, junto con su dudosa disponibilidad futura, ha tenido como consecuencia la búsqueda de nuevos materiales, que se pueden utilizar como sustratos de cultivo.

Ante esta diversidad, se debe hacer un estudio detallado de las características del material a utilizar, estudiando sus posibilidades y limitaciones, y se deben tener claros los criterios a considerar en la elección de un sustrato.

1.1.4 Criterios para la elección de un sustrato

Las funciones de un sustrato de cultivo son: proporcionar al sistema radicular de la planta el agua y los nutrientes necesarios, y el oxígeno requerido para su respiración, así como el medio físico para el anclaje de la planta (1.1.3).

Hay un gran diversidad de materiales que se pueden emplear para cumplir estas funciones, bien en forma pura o en mezcla, en la preparación de los sustratos de cultivo para las plantas. La elección de un material particular viene determinada generalmente (Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998; Abad *et al.*, 1999a) por:

1. Su suministro y homogeneidad. Se invierte mucho tiempo, dinero y esfuerzo para poner a punto un sistema que permita preparar y manejar un sustrato particular. Por otra parte, cada sustrato requiere su propio plan de riego y fertilización. Un cambio en la calidad (características) del sustrato puede llegar a alterar el sistema completo, pudiendo provocar pérdidas graves de producción. Son particularmente difíciles de descubrir los cambios que no pueden ser detectados visualmente. Por todo ello, el material elegido debería reunir las características de disponibilidad elevada, suministro continuo y elevada homogeneidad.
2. La finalidad de la producción. Los objetivos del cultivo sin suelo, como técnica de producción comercial, pueden ser muchos y diversos: rápido crecimiento de las plantas; plantas de elevada calidad, con tamaño óptimo y aspecto excelente y uniforme; plantas que presenten pocos problemas cuando se trasplantan y reciban pocos cuidados posteriores; etc. La finalidad de la producción es un factor de gran importancia en la elección del sustrato.
3. Su coste. En una Horticultura competitiva, el coste de los materiales utilizados es importante. El coste del transporte constituye una parte importante del coste final del sustrato. La utilización de materiales locales reduce este componente del coste, por lo que, a igualdad de otros factores, la utilización de recursos locales tiene como consecuencia la reducción del coste de producción.
4. Sus propiedades. Una vez que se ha decidido la finalidad de la producción y se conocen los costes y la disponibilidad del material, el siguiente paso es examinar con detalle las propiedades del mismo. Las propiedades objeto de estudio se clasifican en cuatro grupos: propiedades físicas, físico – químicas, químicas y biológicas. Estas propiedades se discuten detalladamente más abajo.
5. La experiencia local en su utilización. La experiencia en el cultivo sin suelo se ha generado en países distantes de las regiones españolas en las que se está practicando esta técnica de cultivo. Existen diferencias marcadas entre estas zonas en aspectos tales como estructura de los invernaderos y condiciones climáticas de los mismos, calidad de las aguas de riego, especies y variedades cultivadas, ciclos de cultivo, etc. Estas diferencias obligan a desarrollar planes o programas de investigación, experimentación y extensión a nivel de comarca agrícola, con objeto de ofrecer finalmente al agricultor un paquete tecnológico adecuado a sus condiciones particulares.
6. Su impacto ambiental. El impacto ambiental de un sustrato puede ser debido a su obtención (caso de la turba) o a la generación de un residuo de difícil reutilización (caso de la lana de roca). La utilización como sustratos de residuos agrarios, forestales, ganaderos, urbanos, etc, tiene un impacto ambiental positivo, por la neutralización de un residuo generado por otras actividades económicas.

Algunos factores actúan como limitantes en la elección de los sustratos. Es el caso de la presencia de sustancias que sean tóxicas para la planta (fitotoxinas) (Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991; Abad *et al.*, 1993). Son muchos los materiales libres de esta limitación que pueden,

por tanto, ser utilizados con éxito, siempre y cuando su manejo esté adaptado a los requerimientos del medio y de la planta.

1.1.5 *Propiedades de los sustratos de cultivo*

El primer paso para la utilización de un material como sustrato de cultivo es la caracterización y el estudio crítico de sus propiedades físicas, fisico-químicas, químicas y biológicas. El objetivo de este estudio es doble; por una parte, la detección de posibles factores limitantes para su utilización como sustrato, y por otra, establecer sus utilidades y limitaciones como sustrato, así como la pautas de manejo adecuadas (Abad *et al.*, 1993; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

Si en el estudio de las propiedades se detecta la presencia de factores limitantes, el paso siguiente es la aplicación de los tratamientos adecuados para la superación de estas limitaciones, lo que se comprobará con la analítica adecuada (Abad *et al.*, 1993, ; Ortega *et al.*, 1998).

1.1.5.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son de gran importancia (Raviv *et al.*, 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998). Esto es debido al hecho de que una vez que el sustrato está en el contenedor y la planta creciendo en él, la capacidad del usuario para intervenir en la modificación de las propiedades físicas es prácticamente nula. Esto contrasta con el *status* químico de los sustratos, que puede ser modificado mediante técnicas de cultivo apropiadas, realizadas por el propio agricultor.

En función del ámbito de estudio, las propiedades físicas a estudiar son distintas. El manejo del agua de riego está estrechamente relacionado con las características del espacio poroso. El transporte y el manejo del sustrato están condicionados por la relación peso-volumen, y por lo tanto por su densidad aparente y la cantidad de agua absorbida. Otras características a tener en cuenta son la mojabilidad y la contracción de volumen.

1.1.5.1.1 *Distribución del tamaño de poro*

El espacio poroso de un sustrato está constituido por los espacios huecos (poros) dejados por la fase sólida. La forma, tamaño y distribución de los poros condiciona las propiedades hídricas del sustrato, y por lo tanto el manejo del agua de riego.

En ocasiones, esta fase sólida tiene una forma propia, es el caso de las fibras minerales aglomeradas con una resina (lana de roca) o el caso de las espumas sintéticas. En ellas, el espacio poroso está constituido por los poros que deja la propia estructura sólida en su interior.

Lo más usual es que la fase sólida esté constituida por partículas sueltas de tamaño variable y, en general, con una estructura interna determinada. Las partículas pueden ser de forma granular (ej.: cortezas) o fibrosa (ej.: turba). La estructura propia de las partículas granulares puede ser tal que en su interior formen estructuras celulares, que a su vez pueden estar o no comunicadas con el exterior de la partícula. Cuando las partículas son fibrosas, la posibilidad de encontrar estructuras celulares en su interior se reduce considerablemente.

En el caso de sustratos constituidos por partículas, el espacio poroso está formado por los espacios interparticulares conformados por la superposición de dichas partículas y, en su caso, por los espacios intraparticulares. La distribución del tamaño de las partículas y de los poros

determina el balance entre el contenido en agua y en aire del sustrato, a cualquier nivel de humedad (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991; Ansorena 1994).

La distribución del tamaño de partícula de los sustratos se expresa frecuentemente como un único parámetro: el Índice de Grosor (Richards *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1998). Este índice se define como el porcentaje acumulado (en peso o en volumen) de partículas con diámetro superior a 1 mm, y suele estar bien correlacionado con las características hidrofísicas del sustrato.

1.1.5.1.2 *Relaciones aire-agua*

Las relaciones aire-agua en el sustrato son consecuencia directa de la distribución del tamaño de poro. Las metodologías actuales definen distintos parámetros para describir la distribución de aire y agua en el medio poroso. En el apartado 2.- Análisis de las metodologías actuales, se definen los parámetros considerados en las metodologías analizadas.

1.1.5.1.3 *Densidad aparente*

La densidad aparente se define como la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del sustrato húmedo, es decir, incluyendo el espacio poroso entre las partículas (Martínez, 1992).

Este parámetro juega un importante papel, ya que los sustratos se transportan durante su manejo y manipulación, y, consecuentemente, su peso ha de ser tenido en cuenta. Por otro lado, el anclaje de la planta también debe ser considerado como un factor de importancia, ya que cuanto más alta sea la planta, más fuerte deberá ser el sustrato.

Cuando el cultivo está protegido del viento (caso de los invernaderos) y éste no supone un peligro para la estabilidad de la planta, la densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como $0,15 \text{ g/cm}^3$ (Abad, 1995). Las plantas que crecen al aire libre deberían ser cultivadas en sustratos más fuertes, con densidades aparentes comprendidas entre $0,50 \text{ g/cm}^3$ y $0,75 \text{ g/cm}^3$ (Raviv *et al.*, 1986).

1.1.5.1.4 *Conductividad hidráulica*

La cantidad de agua que retiene un sustrato es importante, pero también lo es su capacidad para transmitirla. Esta capacidad se mide por la Conductividad Hidráulica (K). Su valor es máximo en condiciones de saturación (Conductividad Hidráulica Saturada, K_{sat}) y está estrechamente relacionado con las características del espacio poroso (forma y tamaño de los poros, tortuosidad, etc) y del tipo de superficie (hidrófoba/hidrófila) de las partículas del sustrato. En condiciones de no saturación (Conductividad Hidráulica Insaturada, K_{insat}) su valor disminuye. Es función del contenido volumétrico de agua del sustrato, incidiendo además los mismos factores que sobre K_{sat} .

La determinación experimental de K_{insat} es laboriosa y compleja. Como alternativa puede estimarse mediante modelos de predicción, conociendo el valor de K_{sat} y los ajustes de la curva de liberación de agua (Mualen, 1976; Van Genuchten, 1978).

1.1.5.1.5 *Mojabilidad*

Algunos materiales orgánicos pueden presentar dificultades tanto para ser humedecidos inicialmente como para ser rehumectados una vez que se han secado en el contenedor, lo que puede provocar un retraso y una reducción en el crecimiento de la planta (Bunt, 1988). Las dificultades para mojar un sustrato se atribuyen generalmente a dos causas: la hidrofobicidad del material y la contracción que experimenta al secarse.

La mojabilidad se expresa como el tiempo (en minutos) necesario para que una muestra de sustrato seco a 40 °C absorba 10 ml de agua destilada (AS 3743, 1993). El nivel óptimo es igual o inferior a 5 minutos (Abad *et al.*, 1996).

1.1.5.1.6 *Contracción de volumen*

Corresponde al porcentaje de pérdida de volumen que experimenta el sustrato cuando se seca -generalmente a 105 °C-, referido al volumen aparente inicial en unas determinadas condiciones de humedad (generalmente saturación y drenaje posterior a 10 cm de tensión de columna de agua) (Martínez, 1992). Este parámetro informa sobre el grado de variación del volumen del sustrato bajo condiciones de cultivo, en ciclos de humectación-desección.

La contracción del volumen facilita la compactación del sustrato y la compresión de las raíces, disminuyendo la eficiencia del riego y de la fertilización (Conover y Poole, 1981; Fonteno *et al.*, 1981). El nivel máximo admisible es 30 % (Abad *et al.*, 1993).

1.1.5.2 *Propiedades fisico-químicas y químicas*

Las propiedades fisico-químicas y químicas caracterizan la transferencia de materia entre el sustrato y la solución del mismo (André, 1987): reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (propiedades químicas), reacciones de intercambio de iones (propiedades fisico-químicas) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (propiedades bioquímicas).

Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen mayoritariamente a la actividad química de los sustratos, debido a la formación y presencia de sustancias húmicas - productos finales más importantes de la descomposición de la materia orgánica-.

1.1.5.2.1 *pH*

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma “asimilable”. No obstante, el crecimiento y desarrollo de la planta se ven reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas.

El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991); bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido. Así, en el cultivo de las plantas ornamentales en contenedor, el nivel de referencia del pH (pasta saturada) oscila entre 5,2 y 6,3 (Abad *et al.*, 1993), y en el caso del cultivo hidropónico de hortalizas, el valor óptimo del pH (solución del sustrato) se sitúa entre 5,5 y 6,8 (Escudero, 1993).

La asimilabilidad de los elementos nutritivos se ve afectada de modo importante por el pH. Con pHs de 5,0 a 6,5, la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo de pH 5,0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, B, etc, mientras que por encima de pH 6,5 puede disminuir la asimilabilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu (Peterson, 1981). Los óxidos metálicos (Fe, Mn, Cu, Zn, etc) se hacen más solubles al bajar el pH (por debajo de 5,0), pudiendo llegar a resultar fitotóxicos.

La influencia del pH sobre la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos se discute más tarde, al abordar el estudio de esta última propiedad (1.1.5.2.3).

Por otro lado, el pH óptimo de los sustratos orgánicos (5,2-6,3) es también el más favorable para la actividad de los microorganismos beneficiosos para las plantas (bacterias nitrificantes, hongos micorrízicos, etc) (Handreck y Black, 1991).

Si el pH de un sustrato orgánico está fuera del intervalo recomendado, se deberá llevar a cabo el ajuste del mismo. Así, en el caso de los sustratos ácidos (turba *Sphagnum* p. ej.), se requiere la adición de cal o dolomita para provocar un incremento en el pH. El pH alcalino de los sustratos básicos (ej. corteza de pino) puede reducirse mediante la adición de azufre. La cantidad de cal o azufre a añadir al sustrato depende del pH original, del pH final a alcanzar y de la capacidad de intercambio catiónico, siendo la necesidad de enmienda tanto mayor cuanto mayor es la capacidad de cambio del material (Bunt, 1988; Martínez *et al.*, 1988; Handreck y Black, 1991).

El pH alcalino de algunos sustratos minerales inertes (lana de roca, perlita, etc) puede ser neutralizado por la solución nutritiva, ya que el poder tampón de aquellos es prácticamente nulo (Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

1.1.5.2.2 Salinidad

Mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato.

Según Bunt (1988) y Lemaire *et al.* (1989), las causas que originan un incremento en la salinidad del sustrato, una vez introducido en el contenedor, son: 1) la presencia de fertilizantes insolubles -como los de liberación lenta-, cuando se degradan para producir nitratos, o bien cuando liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas; 2) cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución nutritiva son superiores a las cantidades absorbidas por la planta más las pérdidas por lixiviación; y 3) cuando el sustrato presenta una alta capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone durante el transcurso del cultivo liberando nutrientes. Todas estas situaciones pueden ser prevenidas, en gran parte, conociendo las cantidades de fertilizantes requeridas por el cultivo y evitando aplicaciones excesivas de los mismos.

El incremento en la salinidad de un sustrato puede prevenirse o corregirse mediante lixiviación controlada (Kerr y Hanan, 1985; Abad *et al.*, 1989 a y b; Marfá *et al.*, 1998). En la práctica del riego en el cultivo en sustrato, el agua se maneja de manera excedentaria con objeto de evitar la acumulación de sales por lavado. Este exceso varía en función de la época del año, el estado de desarrollo de la planta y la calidad del agua de riego.

La respuesta de las plantas a la salinidad varía en función de su edad, condiciones ambientales, manejo del cultivo y características de la especie (ASCE, 1990). La tolerancia varía en función de la especie cultivada, siendo: 1) muy sensibles: Azalea, *Camellia*, fresa, *Gardenia*,

Rosa, etc; 2) sensibles: *Aphelandra*, *Erica*, *Ficus benjamina*, lechuga, pimiento, etc; 3) tolerantes: Clavel, crisantemo, *Dieffenbachia*, melón, pepino, tomate, etc; y 4) muy tolerantes: *Acacia*, *Atriplex*, *Yucca*, etc (Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991; Abad y Noguera, 1998).

1.1.5.2.3 Capacidad de intercambio catiónico

Se define como la suma de los cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Estos cationes están disponibles para la planta y no son lixiviados por efecto del riego.

El valor óptimo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los sustratos está estrechamente relacionado con la frecuencia de la fertirrigación (Lemaire *et al.*, 1989). Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de adsorción de cationes no constituye ninguna ventaja, siendo recomendable -en este caso- la utilización de materiales inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será conveniente utilizar sustratos con una capacidad de intercambio catiónico de moderada a elevada, es decir, superior a 20 meq/100 g ms (Abad *et al.*, 1993).

Los materiales orgánicos poseen una elevada capacidad de intercambio catiónico y una alta capacidad tampón frente a cambios rápidos en la disponibilidad de los nutrientes y en el pH (Wilson, 1984). Varía en función del pH: cuanto más alto es el pH, más elevada es la capacidad de intercambio catiónico (Ansorena 1994). Así, por ejemplo, para una turba *Sphagnum* rubia, la capacidad de intercambio catiónico se incrementó desde 50 meq/100 g ms hasta 100 meq/100 g ms al aumentar el pH de 3,5 a 5,5 (Puustjärvi, 1994). Como consecuencia del encalado de las turbas *Sphagnum*, se produce un incremento en la capacidad de intercambio catiónico, aumentando la proporción de cationes que pueden ser adsorbidos sobre los centros activos.

Ciertos sustratos minerales de naturaleza arcillosa, como la vermiculita, tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente mediante sustituciones catiónicas o isomorfias en los cristales del mineral (Abad, 1993; Abad y Noguera, 1998).

Algunos autores han indicado que los sustratos para el cultivo hidropónico de hortalizas deberían presentar una bajísima o nula capacidad de intercambio catiónico; es decir, deberían ser químicamente inertes con objeto de permitir un mejor control nutricional de la planta (Martínez y García, 1993) o evitar problemas de salinización del sustrato (Lemaire *et al.*, 1989).

1.1.5.2.4 Materia orgánica

La determinación de la materia orgánica total se realiza en los sustratos orgánicos o con un componente orgánico apreciable. Su análisis tiene poco sentido en los sustratos inorgánicos y, en determinados casos, puede ocasionar errores por pérdida de materia a la temperatura de calcinación (Martínez, 1992).

Además de informar sobre el contenido orgánico de un material, se utiliza para estimar la densidad real de los sustratos con elevado componente orgánico.

1.1.5.2.5 Relación Carbono: Nitrógeno (C/N)

La relación C/N se usa tradicionalmente como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y estabilidad (Stevenson, 1982; Costa *et al.*, 1991; Climent *et al.*, 1995 y 1996; Bernal *et al.*, 1998). Los daños que aparecen sobre las plantas cultivadas en materiales

orgánicos inmaduros, son debidos tanto a una inmovilización de nitrógeno como a una baja disponibilidad de oxígeno en la rizosfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos, que descomponen los materiales orgánicos frescos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares; el oxígeno es consumido también por la población microbiana (Raviv *et al.*, 1986).

Una relación C/N inferior a 20 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato, y es un índice de un material orgánico maduro y estable (Abad *et al.*, 1993).

1.1.5.2.6 Nutrientes “asimilables”

La mayoría de los sustratos minerales no se descomponen química ni biológicamente y, desde un punto de vista práctico, se pueden considerar desprovistos de nutrientes.

Por el contrario, los sustratos orgánicos difieren entre sí en el contenido en nutrientes asimilables. Así, algunos (turba *Sphagnum*, mantillo de bosque, etc) poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables, mientras que otros, como por ejemplo el compost, presentan niveles elevados, dependiendo del origen del compost y del proceso de compostaje (Raviv *et al.*, 1986; Burés, 1997).

En cualquier caso, y para un crecimiento óptimo de la planta, deberán añadirse siempre nutrientes adicionales como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo (fertilización de cobertera) (Raviv *et al.*, 1986).

La cuantía y frecuencia de la fertilización dependen de las características del sustrato (capacidad de intercambio catiónico) y del régimen de riego (Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998). Una CIC elevada aumenta la eficiencia de los fertilizantes de base aplicados durante el proceso de fabricación del sustrato, mientras que cuando se usan sustratos con baja CIC, los fertilizantes se aplican usualmente a través del sistema de riego (fertirrigación). Por otro lado, cuando se aportan dosis elevadas de riego, es necesario aumentar las cantidades de fertilizantes; por el contrario, con sistemas de subirrigación, es recomendable reducir las cantidades de fertilizantes que se aplican con el riego superficial.

Generalmente, se alcanza un crecimiento óptimo de la planta sobre sustratos orgánicos cuando la aplicación moderada de abonos de liberación lenta o progresiva es complementada con fertirrigación (Cadahía y Fernández, 1992; Cadahía, 1995).

En todo caso, y para conocer si el plan de fertilización es correcto, es necesario comparar la disolución nutritiva de riego con la del sustrato y los drenajes. Esta información puede completarse con el análisis de los tejidos vegetales y la observación visual de las plantas (Cadahía, 1988 y 1998; Cadahía y Fernández, 1992).

1.1.5.2.7 Componentes fibrosos

En muchos sustratos orgánicos es interesante determinar los contenidos en lignina, celulosa y hemicelulosa, ya que de este modo se puede conocer la biodegradabilidad del material. Cuanto mayor sea el contenido en compuestos ligno-celulósicos, mayor dificultad tendrán los microorganismos para degradar la materia orgánica (Hoitink y Poole, 1980; Handreck, 1992; Thomas *et al.*, 1998). Por ello, un material con una relación C/N elevada puede no requerir un proceso de compostaje si el contenido en componentes fibrosos es elevado.

1.1.5.3 Propiedades biológicas

Un examen detallado de las propiedades de los sustratos de cultivo debe incluir el estudio de sus propiedades biológicas. Estas propiedades evalúan la estabilidad biológica del material, así como la presencia de componentes que pueden actuar como estimuladores o inhibidores del crecimiento vegetal.

1.1.5.3.1 *Velocidad de descomposición*

Todos los sustratos orgánicos son susceptibles de degradación biológica, la cual se ve favorecida por las condiciones ambientales que existen en los invernaderos. La población microbiana es la responsable de dicho proceso, pudiendo provocar deficiencias de oxígeno y de nitrógeno, liberación de sustancias fitotóxicas, contracción del sustrato, etc (Raviv *et al.*, 1986). Así pues, la descomposición de la materia orgánica de los sustratos de cultivo es desfavorable desde el punto de vista hortícola, debiéndose tomar precauciones con objeto de minimizar sus efectos negativos sobre la planta. La disponibilidad de compuestos biodegradables (carbohidratos, ácidos grasos y proteínas) determina la velocidad de descomposición.

Por otra parte, las condiciones de cultivo deberían ser también consideradas: si el cultivo se prolonga durante largos períodos de tiempo, resulta recomendable el uso de materiales estables (turba negra o cortezas de árboles de tamaño grueso), mientras que si las plantas son de crecimiento rápido, pueden prosperar en materiales menos resistentes a la degradación (turba *Sphagnum rubia*) (Raviv *et al.*, 1986).

1.1.5.3.2 *Efectos de los productos de descomposición*

Muchos de los efectos biológicos de los sustratos orgánicos son atribuibles directamente a los ácidos húmicos y fúlvicos, que son los productos finales de la degradación de la lignina y la hemicelulosa (Raviv *et al.*, 1986). Una gran variedad de funciones vegetales, tanto a nivel de célula como de órgano, son afectadas positivamente por los ácidos húmicos y fúlvicos *per se* (Petrovic *et al.*, 1982; Vaughan y Malcolm, 1985; Abad *et al.*, 1991). Las sustancias húmicas actúan, asimismo, como transportadoras de los micronutrientes para la planta (Chen y Stevenson, 1986).

1.1.5.3.3 *Actividad reguladora del crecimiento*

Muchos materiales orgánicos utilizados en los medios de cultivo de las plantas presentan actividad auxínica. Dado que esta actividad hormonal no ha podido ser relacionada directamente con las sustancias húmicas, se ha atribuido a un efecto sinérgico entre las auxinas (bien producidas naturalmente por la planta, bien aplicadas exógenamente) y los compuestos fenólicos presentes en dichos materiales como consecuencia de la degradación de los compuestos orgánicos, especialmente lignina (Raviv *et al.*, 1984 y 1986).

1.1.5.3.4 *Actividad enzimática*

La descomposición de la materia orgánica libera enzimas. En los sustratos orgánicos se han identificado diferentes actividades enzimáticas (celulasas, proteasas, ureasa, etc) (Brown, 1981; Perucci *et al.*, 1982), todas ellas con efectos muy favorables sobre la nutrición vegetal.

1.1.5.3.5 *Propiedades supresivas*

Inhiben el desarrollo de determinados agentes fitopatógenos, especialmente hongos (Hoitink *et al.*, 1991 y 1997; Avilés *et al.*, 1999).

Estas propiedades se han encontrado en materiales orgánicos compostados, particularmente cortezas de árboles, con marcados efectos supresivos sobre diferentes hongos: *Fusarium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, etc.

Las propiedades supresivas de las cortezas de árboles compostadas son debidas, entre otros factores, al establecimiento de una microflora antagonica/supresiva de los hongos fitopatógenos durante el proceso de compostaje.

1.1.6 *Clasificación de los materiales*

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, sus capacidad de degradación, etc.

La clasificación que se presenta a continuación intenta recoger las diferencias más relevantes desde el punto de vista de la utilización hortícola de los sustratos (Zuang y Musard, 1984; Moinereau *et al.*, 1987; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

1.1.6.1 *Materiales Orgánicos*

1. De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica. El más empleado es la turba.
2. De síntesis. Son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, espuma de urea-formaldehído, poliestireno expandido, etc).
3. Subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, ganaderas, industriales, urbanas, etc. Muchos materiales de este grupo deberán someterse a un proceso de compostaje para su adecuación como sustratos (cascarilla de arroz, estiércoles, cortezas de árboles, serrín, virutas de madera, residuo de fibra de coco, residuo del corcho, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc).

1.1.6.2 *Materiales Inorgánicos (Minerales)*

1. De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc).
2. Transformados o tratados industrialmente. A partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos -y a veces también químicos- más o menos complejos, que modifican notablemente las características iniciales de los materiales de partida (arcilla expandida, lana de roca, perlita, vermiculita, etc).
3. Residuos y subproductos industriales. Comprenden los materiales residuales procedentes de distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, ladrillo molido, etc).

Dado que llevar a cabo una descripción de todos los materiales posibles es una tarea prácticamente inabordable, a continuación se indica únicamente la situación actual y las perspectivas de futuro de los materiales orgánicos y minerales utilizados como sustratos de cultivo en nuestro país.

1.1.7 Nuevos materiales utilizados como sustratos o componentes de los sustratos en el cultivo sin suelo. Materiales alternativos y/o sustitutivos

Como se ha señalado anteriormente, el cultivo sin suelo -como técnica de producción comercial- encuentra dos aplicaciones de importancia en el cultivo en sustrato de plantas ornamentales en maceta y en el cultivo hidropónico de hortalizas. En ambos campos de aplicación, se vienen produciendo cambios significativos en los materiales utilizados como sustratos o componentes de los sustratos de cultivo.

1.1.7.1 Cultivo en sustrato de plantas ornamentales

Entre los diferentes materiales empleados en la formulación de los sustratos de cultivo de las plantas ornamentales en maceta, las turbas *Sphagnum* han sido los más importantes y ampliamente utilizados durante muchos años. Sin embargo, se ha emprendido una activa búsqueda de nuevos materiales orgánicos alternativos y/o sustitutivos de estas turbas en numerosas partes del mundo, siendo sus principales razones (Raviv *et al.*, 1986; Pryce, 1991; Abad *et al.*, 1997; Abad y Noguera, 1998): 1) el elevado precio de la turba hortícola de calidad, particularmente en países sin recursos locales de turba *Sphagnum*, y 2) su cuestionable disponibilidad futura por motivos ecológicos, ya que las reservas de turba no son renovables e intervienen, además, como potentes sumideros del CO₂ atmosférico.

Actividad	Residuo/Subproducto
Explotación agrícola	Compost de champiñón ya utilizado, pajas de cereales, restos de poda, etc.
Explotación forestal	Cortezas de árboles, piñas de desecho, residuos del corcho, serrín y virutas de la madera, tierra de bosque, etc.
Explotación ganadera	Estiércoles, gallinaza, pieles y lana, etc.
Explotación marina	Algas, fanerógamas, restos de pescado, etc.
Industria agroalimentaria	Cascarilla de arroz, residuo de fibra de coco, lodos de alpechín, orujos de uva y de aceituna, residuos de café y de cacao, restos de frutas y hortalizas, etc.
Industria papelera	Lodos de papelera
Industria textil	Algodón, fibras acrílicas, lana, etc.
Núcleos urbanos	Lodos de depuración de aguas residuales, residuos sólidos urbanos, restos de poda de jardinería urbana, etc.

Fuente: Abad *et al.* (1997)

Tabla 3: Materiales residuales y subproductos orgánicos generados en diferentes actividades de producción y consumo, susceptibles de ser utilizados como sustratos o componentes de los sustratos de cultivo

Esta última consideración medioambiental ya se ha tenido en cuenta a la hora de adaptar el cultivo de hortalizas para consumo en fresco a la Norma española sobre Producción Controlada de Cultivos Protegidos UNE 155001-1 (AENOR, 1997), en la que se recomienda utilizar sustratos reciclables y no emplear turba como sustrato de cultivo.

Todo ello ha conducido a la búsqueda y utilización de materiales orgánicos alternativos y/o sustitutivos de las turbas, particularmente autóctonos y con disponibilidad local. En este contexto -y con objeto de proceder a la transformación ecológica y al reciclado de los materiales de desecho-, numerosos residuos y subproductos agrícolas, ganaderos, forestales, industriales, urbanos, etc, están siendo utilizados como sustratos o componentes de los sustratos de cultivo (Raviv *et al.*, 1986; Pryce, 1991; Abad *et al.*, 1997; Abad y Noguera, 1998). Como han demostrado numerosas investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años, el sector profesional de los sustratos de cultivo es capaz de aprovechar muchos materiales que son residuos o subproductos de nulo o escaso valor económico, generando así una demanda creciente de materiales de desecho y valorizando, a la vez, dichos residuos (Burés, 1997). La mayoría de estos materiales orgánicos deberán ser compostados, envejecidos, fermentados, etc, con objeto de adecuarlos a su uso como sustratos (Abad *et al.*, 1997)

Por otra parte, se están introduciendo en el mercado español algunos residuos y subproductos orgánicos ya conocidos, como la fibra de coco, y utilizados como sustratos de cultivo en otros países. En la Tabla 3 se presenta un listado de los residuos y subproductos orgánicos generados en diferentes actividades de producción y consumo, los cuales son susceptibles de ser utilizados como sustratos o componentes de los sustratos en el cultivo sin suelo.

A este respecto, recientemente han concluido los trabajos de la Acción Especial subvencionada por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) titulada “Elaboración de un inventario de sustratos y materiales adecuados para ser utilizados como sustratos o componentes de sustratos en España”. Ello ha permitido preparar un catálogo de materiales -que incluye las características y propiedades más importantes como sustratos-, en el que se ha prestado una atención especial a los residuos y subproductos generados por diferentes actividades de producción y consumo (Abad *et al.*, 1999). Con toda la información obtenida, se ha construido una base de datos general y relacional informatizada, la cual se ha instalado en el entorno web del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (www.mapya.es), y puede ser consultada con facilidad por los sectores productores y consumidores de sustratos.

1.1.7.2 Cultivo hidropónico

Durante estos últimos años se viene mostrando un gran interés por el medio ambiente, lo que ha facilitado el estudio del impacto ambiental de la actividad agraria sobre la atmósfera, el suelo y las aguas (superficiales y subterráneas).

Los agentes más contaminantes en la “industria” del cultivo sin suelo, son: 1) la lixiviación de los elementos fertilizantes, especialmente en los sistemas abiertos, no recirculantes; 2) el vertido de los residuos y materiales de desecho; 3) la emisión de productos fitosanitarios; y 4) la emisión de gases y el consumo extra de energía, como consecuencia de la calefacción, desinfección, etc (Van Os *et al.*, 1991; Ramos, 1993; Abad, 1995).

El mayor problema de residuos en el cultivo hidropónico lo constituyen, sin duda, los restos de los materiales utilizados como sustratos (Ramos, 1993; Bourgeois, 1998; Pieters *et al.*, 1998). Los materiales minerales transformados o tratados industrialmente, y muy especialmente la lana de roca, presentan problemas graves de eliminación -una vez que ha finalizado su vida útil- al no ser biodegradables. Desde el punto de vista medioambiental, los criterios más importantes para la elección de un material como sustrato en el cultivo sin suelo de hortalizas son su durabilidad y su capacidad para ser reciclado posteriormente (Vanachter *et al.*, 1993; Abad,

1995). Debería limitarse o restringirse el uso de materiales con una breve vida útil (1 ó 2 años), aunque se disponga de las técnicas de reciclado para los mismos.

Se está detectando últimamente un gran interés de las administraciones -locales, nacionales e internacionales- por fomentar el reciclado y la reutilización de estos residuos, con el fin de evitar la acumulación de los mismos en vertederos (Escobar, 1997).

Los problemas ambientales originados por la eliminación de los residuos de los sustratos transformados o tratados, han obligado a la búsqueda de nuevos materiales alternativos o sustitutivos -menos agresivos con el medio ambiente-, muchos de los cuales son residuos orgánicos biodegradables, no contaminantes. La literatura internacional ha acuñado nuevos términos para estos sustratos, que son poco agresivos con el medio ambiente: *Ecological growing media*, *environmentally sound substrates*, *ecologically friendly substrates*, etc. De este modo, en diferentes partes del mundo se están poniendo en práctica sistemas de cultivo sin suelo de hortalizas, que utilizan residuos orgánicos, frescos o compostados, en forma pura o en mezcla, tales como: cortezas de árboles (pino p.ej.), residuo de fibra de coco, fibra de madera, serrín y virutas de la madera, etc (FAO, 1990; Resh, 1997; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998). Por otra parte, algunos residuos industriales de naturaleza inorgánica o mineral están siendo también utilizados localmente como sustratos para el cultivo sin suelo: escoria cristalizada de horno alto (País Vasco), estériles del carbón (Asturias), etc. Estos últimos generados como consecuencia de la explotación de pozos y minas de hulla y de antracita.

Finalmente, señalar que el rápido crecimiento de la industria de los plásticos ha facilitado el uso como sustratos de algunos materiales orgánicos sintéticos, como el poliuretano expandido reciclado (Benoit y Ceustermans, 1990). Se obtiene a partir de los residuos de la industria de la espuma de poliuretano y presenta una gran durabilidad en condiciones de cultivo en campo, hasta unos 10 años.

La decisión sobre la utilización de todos estos materiales residuales como sustitutivos de la turba y de la lana de roca en el Estado español dependerá primeramente de factores económicos y técnicos, y, en segundo lugar, de consideraciones medioambientales (Abad y Noguera, 1998).

Una información más detallada sobre las características y propiedades de todos estos nuevos materiales alternativos y/o sustitutivos se puede obtener en Raviv *et al.* (1986), Moinereau *et al.* (1987), Bunt (1988), FAO (1990), Handreck y Black (1991), Abad *et al.* (1997), Burés (1997) y Resh (1997).

1.2 Modelización

1.2.1 Introducción

El desarrollo científico ha llevado a un proceso de especialización cada vez mayor. Esto se ha reflejado en general en un mayor progreso y en el caso de la Agricultura, en un notable incremento de los rendimientos obtenidos (Krug, 1985).

La especialización, que ha sido un elemento clave en el desarrollo, no está exenta de problemas. Uno de ellos es que las disciplinas aisladas pierden la visión general del conjunto. Cuanto mayor es el nivel de especialización, mayores son los problemas derivados de esta falta

de visión general y más necesario es un método que permita integrar los progresos obtenidos en las diferentes disciplinas relacionadas con un mismo tema y objetivo a desarrollar (Krug, 1985).

La demanda de métodos de integración de conocimientos encontró una vía de solución con el desarrollo de la teoría general de sistemas y con el considerable aumento del potencial de cálculo obtenido con el desarrollo de los ordenadores, que permitieron la modelización de los sistemas complejos (Baker y Curry, 1976; Penning de Vries, 1983; Krug, 1985; Boote *et al.*, 1996; Passioura, 1996; Sinclair y Seligman, 1996).

1.2.2 *Sistema*

1.2.2.1 Definición

Según Baker y Curry (1976) es difícil dar una definición de sistema debido a la amplitud de sentidos que se da a este término; no obstante, consideran que una definición simple del término sistema puede ser *un conjunto de partes identificables capaces de interactuar en tal sentido que el conjunto completo de funciones satisfaga un conjunto de requerimientos específicos*. Consideran, por tanto, que la interacción entre las distintas partes es una característica fundamental del sistema.

De Wit y Penning de Vries (1982), y Penning de Vries (1983), definen el sistema como *una parte de la realidad con elementos fuertemente interactuantes pero con una influencia pequeña en el entorno*. Penning de Vries (1983) señala que la influencia entre sistema y entorno ha de ser mínima en ambos sentidos. Si bien es muy difícil llegar a un sistema aislado del entorno se debe intentar, al menos, que la influencia del entorno en el sistema sea mínima y la del sistema en el entorno nula. Estos autores incluyen, al igual que Baker y Curry, el concepto de la interacción entre los elementos del sistema, y además añaden dos conceptos, la parcialidad (el sistema es una parte de la realidad) y la no incidencia entre sistema y entorno.

Por último, Acosta (1997) incide en la parcialidad al decir que la realidad, aunque existe, nunca se considera en su totalidad ni en la construcción de un modelo ni en la actividad científica en general. Considera además que esta parcialidad no es exclusiva de la ciencia sino una actitud generalizada que se presenta en cualquier aproximación humana al mundo real.

En definitiva, podemos decir que un sistema es una parte de la realidad, con interacciones entre los elementos internos del sistema y con una escasa relación con el entorno.

1.2.2.2 Límites del sistema

Teniendo en cuenta que el sistema es una parte de la realidad, se plantea el problema de su delimitación (Baker y Curry, 1976; De Wit y Penning de Vries, 1982) determinando qué factores de la realidad se consideran dentro del sistema y cuales no, pasando éstos a formar el entorno del sistema.

Los criterios más importantes a tener en cuenta para establecer los límites de un sistema son en primer lugar el objetivo planteado y en segundo lugar, las interacciones entre los diferentes elementos del sistema (Penning de Vries, 1983). Idealmente, los límites deben ser tales que el sistema esté aislado del entorno, o al menos que aunque el entorno incida en el sistema, éste no incida en el entorno (De Wit y Penning de Vries, 1982). Gordon (1969) denomina cerrados a los sistemas aislados del entorno y abiertos al resto.

Cuando se trabaja con sistemas con un cierto grado de complejidad, como es el caso de los cultivos, la elección de unos límites con estas características es una tarea imposible (De Wit y Penning de Vries, 1982), el número de componentes a considerar es excesivamente alto (De Wit y Penning de Vries, 1982; Sinclair y Seligman, 1996), e incluso la propia complejidad del sistema hace imposible identificar todos los elementos que intervienen (Mayr, 1982; Pease y Bull, 1992), aumentando las interacciones entre sistema y entorno.

Se puede conseguir una incidencia cada vez menor del sistema en el entorno ampliando los límites del sistema, pero el aumento de tamaño puede llegar a hacer inabordable la investigación (De Wit y Penning de Vries, 1982).

Por lo tanto, se debe llegar a una solución de compromiso en la que la delimitación del sistema está condicionada por los objetivos planteados y por las interacciones entre los elementos del sistema que delimitan su contorno natural (Penning de Vries, 1983). El sistema resultante ha de tener una incidencia en el entorno lo más baja posible (De Wit y Penning de Vries, 1982) y sus límites han de tener en cuenta el contorno natural del sistema así como las partes esenciales del mismo (Penning de Vries, 1983). Esto puede dar lugar a un sistema más grande que el que hubiera sido necesario para los objetivos iniciales (De Wit y Penning de Vries, 1982).

1.2.2.3 Complejidad del sistema

El análisis de sistemas y la simulación en Agricultura se inició tras los éxitos obtenidos en la aplicación de estas técnicas en ingeniería (De Wit y Penning de Vries, 1982). Los sistemas agrarios tienen un elevado nivel de complejidad (Baker y Curry, 1976; De Wit y Penning de Vries, 1982) que hace pensar que las técnicas que han tenido mucho éxito en ingeniería, no lo tengan tanto en sistemas biológicos (De Wit y Penning de Vries, 1982).

Para abordar esta complejidad, Baker y Curry (1976) consideran que frecuentemente un sistema complejo puede dividirse de una manera natural en varios componentes del sistema o subsistemas, utilizando esta estructura natural como esquema de trabajo para su estudio.

La complejidad se puede abordar también aplicando enfoques jerárquicos para su organización (Sinclair y Seligman, 1996). Son varios los autores que proponen niveles de jerarquización, como Goodal (1976), Van Keulen y de Wit (1982), De Wit y Penning de Vries (1982) y Whisler *et al.* (1986). En el caso de los sistemas biológicos, y entre ellos los sistemas agrarios, los niveles de organización se pueden establecer en función del tamaño de los componentes del sistema (De Wit y Penning de Vries, 1982; Whisler *et al.* 1986). En el caso de los sistemas agrarios, la escala de niveles de organización puede ser molécula, estructura celular, célula, tejido, órgano, individuo (o planta), población (o cultivo) y ecosistema (De Wit y Penning de Vries, 1982; Whisler *et al.* 1986). El nivel de organización del sistema considerado depende de los objetivos planteados en cada caso y de las características del modelo a desarrollar.

Por último, para sistemas de elevada complejidad, como los sistemas vivos, De Wit y Penning de Vries (1982) señalan la posibilidad de reducir los límites del sistema para obtener una considerable simplificación, centrándose en los aspectos de mayor interés. Para ello se pueden ordenar los procesos por su importancia y solo se estudian en detalle los procesos que están dentro del enfoque limitado (De Wit y Penning de Vries, 1982). Esta estrategia de reducción de límites implica la salida del sistema al entorno de elementos o procesos que interactúan en mayor o menor medida con los elementos que quedan dentro del sistema, alejándose así del objetivo planteado inicialmente de no incidencia del sistema en el entorno.

1.2.3 Modelos

1.2.3.1 Definición

Al igual que ocurría en el caso de los sistemas, el término modelo también puede tener una amplia variedad de sentidos. De Wit y Penning de Vries (1982) repasan algunos de los diferentes conceptos de modelo en función de la disciplina que se trate, arte, ingeniería o biología. Monteith (1996) por su parte, compara los diferentes planteamientos de la modelización en tres disciplinas importantes como son la física, la ingeniería y la biología.

En su acepción más general, *un modelo se define como una representación simplificada de un sistema* (Baker y Curry, 1976; De Wit y Penning de Vries, 1982).

La simplificación constituye el aspecto central del proceso de modelización. Está condicionada por el sistema a modelizar, por el punto de vista del modelizador y por los escenarios disponibles para la elaboración y utilización del modelo.

El resultado es que el modelo constituye una visión parcial del sistema. Por ello, es necesario detallar las condiciones para su adecuada utilización y para la interpretación correcta de los resultados. Estas condiciones constituyen las hipótesis del modelo y se derivan de los criterios empleados por el modelizador y de los escenarios considerados en su construcción.

La parcialidad del modelo, o dicho de otra forma las limitaciones que se presentan para su aplicación universal, tiene como consecuencia la necesidad de comprobar la validez del modelo desarrollado para los diferentes escenarios en los que se pretende aplicar. Este proceso de testado del modelo se debe hacer para el escenario o escenarios iniciales con el modelo desarrollado. El testado o validación del modelo se debe repetir cuando se pretende aplicar en un escenario diferente a aquellos en los que ya ha sido validado.

La construcción de un modelo es un proceso iterativo que permite la mejora continua de los resultados obtenidos, la ampliación de los objetivos y la aplicación a nuevos escenarios no previstos inicialmente.

1.2.3.2 Simplificación

La simplificación constituye el aspecto fundamental de la modelización. En la construcción de un modelo se han de tener en cuenta los factores que condicionan la simplificación y los criterios que se derivan de ellos. Todos estos criterios y condicionantes constituyen las hipótesis del modelo.

Para comprender la naturaleza es necesario simplificarla (Spitters, 1990). Los modelos deben ser tan sencillos como sea razonable y deben ajustarse a los objetivos particulares del experimento sin contener elementos redundantes. Spitters (1990) apoya esta afirmación en el principio de la navaja de Ockham “La multiplicidad no debe ser asumida sin necesidad” (Williams de Ockham, siglo XIV, citado por Spitters, 1990).

La modelización de sistemas complejos no considera todos los posibles elementos del sistema, unas veces porque la propia complejidad del sistema hace imposible conocer todos los elementos que lo integran (Sinclair y Seligman, 1996) y otras, porque de considerar todos los elementos conocidos, el modelo resultante tendría una elevada complejidad. Esto hace necesario llegar a un compromiso entre rigor y utilidad del modelo (Monteith, 1996). La consecuencia es

que en cualquier modelización de los sistemas reales es inevitable que la representación sea inexacta y simplificada (Anderson, 1976).

Puesto que no considera todos los posibles elementos del sistema, el modelo constituye una visión incompleta del mismo (Llamas, 1993), proporcionando una representación esquemática de la concepción que el modelizador tiene del sistema (Penning de Vries, 1983; Acosta, 1997). Esta visión parcial se refleja en la relación entre el modelo y el sistema (Acosta, 1997), y se plasma en las hipótesis del modelo que determinan las condiciones bajo las cuales deben ser interpretados los resultados obtenidos de su funcionamiento (Fernández-Rodríguez y López-Bellido, 1993a).

1.2.3.2.1 Factores condicionantes de la simplificación

El proceso de simplificación está condicionado por diferentes elementos que intervienen en el proceso de modelización, como son el propio sistema a modelizar, el modelizador y el escenario en el que se va a aplicar el modelo:

- El sistema a modelizar: Constituye el punto de partida. Es el factor objetivo del proceso. La finalidad de la modelización es la simulación fiable del comportamiento del sistema estudiado.
- El modelizador: Es un observador del sistema. Constituye el factor subjetivo del proceso. Su relación con el sistema a modelizar determina el conocimiento que tiene del mismo. Define los objetivos del proceso de modelización y el escenario en el que se desarrolla el modelo.
- Escenario de desarrollo y aplicación del modelo: Un escenario es el resultado de la relación entre el sistema y un entorno determinado. Constituye una situación particular o parcial de la realidad. En la definición de un escenario se limitan, implícita o explícitamente, los intervalos de variación de unas determinadas variables del sistema y del entorno.

La subjetividad del modelizador tiene como consecuencia la subjetividad del modelo obtenido. La parcialidad que supone el empleo de escenarios particulares tiene como consecuencia la parcialidad del modelo obtenido.

1.2.3.2.2 Criterios de simplificación

Los criterios de simplificación son consecuencia de los tres factores que la condicionan, descritos en apartado anterior, y de las relaciones entre ellos.

El punto de partida del proceso de modelización está constituido por el propio sistema a modelizar, por el conocimiento que el modelizador tiene del sistema (relación sistema – modelizador) y por la disponibilidad de datos (relación observador – sistema – escenario).

El punto final del proceso está constituido por los objetivos de la modelización (relación sistema – modelizador – escenario) y por el escenario en el que se va a aplicar el modelo.

- Sistema a modelizar: Constituye el punto de partida principal del proceso de modelización. Sus características, en especial su complejidad, condicionan el proceso de modelización.
- Conocimiento del sistema: Este criterio encierra una cierta subjetividad, puesto que proviene de la relación entre el observador (elemento subjetivo) y el sistema (elemento objetivo). Esta relación puede cambiar bien sea por el cambio de observador o bien por la adquisición de nuevos conocimientos del sistema. Si esto ocurre, este criterio cambia y por lo tanto el modelo resultante también cambiará.

- Disponibilidad de datos: El observador no está en contacto con todos los escenarios posibles del sistema, sino solo con unos pocos. Para el desarrollo del modelo solo podrá disponer de los datos provenientes de estos escenarios. Considerando que cada escenario es una situación particular del sistema, y que el observador es un elemento subjetivo, se deduce que este criterio encierre una elevada subjetividad. Tanto el cambio de observador como el cambio de escenario dan lugar a diferente situación de partida, y en consecuencia el resultado final será diferente.
- Objetivos. Determinan la utilidad del modelo. La construcción del modelo se puede dar por finalizada cuando cumpla las condiciones marcadas en los objetivos y responda de manera fiable a las preguntas planteadas en los mismos. Los objetivos se obtienen de la relación entre el modelizador, el sistema y el escenario de aplicación. El cambio de modelizador, de sistema o de escenario de aplicación, da lugar a un cambio de los objetivos que deben estar claramente definidos. Para un mismo sistema los escenarios pueden ser muy variados y el modelizador también puede cambiar. En estas condiciones los posibles objetivos son muy variados y en consecuencia también pueden serlo los modelos obtenidos.
- Escenario de aplicación del modelo: El desarrollo de modelos aplicables en todos los escenarios posibles de un sistema es una tarea muy difícil, cuando no imposible. Por lo tanto, cuando se va a desarrollar un modelo, es necesario definir los escenarios en los que está prevista su utilización. Estos escenarios determinan la facilidad o dificultad para medir las distintas variables del sistema y en consecuencia, la conveniencia de incluirlas o no dentro del modelo. De la misma forma, la complejidad del modelo obtenido debe ser adecuada a los escenarios en los que se va a aplicar

1.2.3.2.2.1 Sistema a modelizar: Características y grado de conocimiento

El sistema viene definido por los elementos que lo componen y las interrelaciones entre ellos. Las características del sistema objeto de modelización así como el conocimiento que se tenga de las mismas tienen una incidencia directa en el proceso de modelización y en las características del modelo obtenido.

En relación con el conocimiento que se tiene sobre el sistema objeto de estudio, algunos autores como Llamas (1993) relacionan el grado de conocimiento del sistema con la fiabilidad de repuesta y con la capacidad predictiva del modelo. Por lo tanto no es extraño que la identificación de los elementos y procesos que intervienen en el sistema sea considerada como una de las labores más importantes en el estudio de sistemas y en consecuencia de la modelización (Baker y Curry, 1976; Fernández-Rodríguez y López-Bellido, 1993a).

La complejidad del sistema está relacionada con la cantidad de elementos que lo constituyen y con las interrelaciones entre ellos. La complejidad de los sistemas varía en las diferentes disciplinas. Los sistemas con los que se trabaja en ingeniería tienen un bajo nivel de complejidad, todos sus componentes están definidos y tienen especificaciones claras (Sinclair y Seligman, 1996). La complejidad del sistema aumenta considerablemente cuando incluye organismos vivos, como es el caso de los sistemas biológicos en general y de los cultivos en particular (Baker y Curry, 1976; Fernández-Rodríguez y López-Bellido, 1993a; Monteith, 1996; Sinclair y Seligman, 1996).

La elevada complejidad de los sistemas biológicos obliga a diseñar estrategias que permitan su estudio y modelización. Se presentan dos posibles estrategias, el estudio según niveles de organización y el estudio por subsistemas.

Penning de Vries (1983), De Wit y Penning de Vries (1982) y Sinclair y Seligman (1996) consideran la organización natural de los sistemas biológicos en diferentes niveles jerarquizados, en función del tamaño de las estructuras que constituyen cada nivel. Los modelos establecen puentes entre los distintos niveles de organización y permiten la comprensión de grandes sistemas basándose en los conocimientos adquiridos por experimentación en pequeños sistemas.

Por otra parte, Baker y Curry (1976), Whisler *et al.* (1986) y Fernández-Rodríguez y López-Bellido (1993a) consideran que un sistema de cultivo se puede dividir en sus partes constituyentes para que los diversos procesos involucrados puedan ser modelizados por separado. Esto da lugar a una serie de submodelos, cuyo origen se encuentra en las distintas disciplinas como física del suelo, química, fisiología, etc.

Estas dos estrategias (niveles de organización y subsistemas) pueden estar relacionadas entre sí, y así lo contemplan expresamente Reynolds y Acock (1985) y Whisler *et al.* (1986), que para definir los subsistemas consideran tanto los niveles jerárquicos como los procesos que intervienen en el desarrollo del cultivo.

Por último es necesario señalar que debido a la elevada complejidad de los sistemas biológicos, los modelos de cultivo suponen siempre una elevada simplificación del sistema, aún cuando se definan en gran detalle (Fernández-Rodríguez y López-Bellido, 1993a; Sinclair y Seligman, 1996).

1.2.3.2.2 Disponibilidad de datos

El desarrollo y utilización de los modelos están fuertemente condicionados por la disponibilidad de datos. La información que se dispone de un sistema dado constituye la base para el desarrollo de los correspondientes modelos. La disponibilidad de datos como entradas del modelo condiciona las características del modelo a utilizar, y por lo tanto deberá tenerse en cuenta en la etapa de diseño del modelo.

El aumento de la complejidad de un modelo aumenta la dificultad para obtener los datos necesarios para la construcción del modelo y su funcionamiento. La obtención de algunos datos requiere experimentaciones complejas, incluso se pueden presentar casos de algunas variables que no se pueden medir directamente y es necesario hacer estimaciones (Sinclair y Seligman, 1996).

Baker y Curry (1976) tratan la incidencia de la disponibilidad de los datos durante la fase de elaboración del modelo. Para estos autores esta disponibilidad es siempre una importante consideración y es parte de la formulación del modelo. Los valores de las constantes y parámetros del modelo, así como los valores iniciales de las variables, se derivan de estos datos. Las hipótesis del modelo también están basadas en los datos disponibles, por lo que inciden en la credibilidad del modelo. Es necesario disponer además, de datos para los estudios de validez del modelo. Estos autores señalan además que la fuente de los datos debe estar localizada y su adecuación evaluada antes de la construcción del modelo.

Boote *et al.* (1996) debaten sobre la disponibilidad de datos como entradas del modelo, y cómo esta disponibilidad condiciona las características del modelo a utilizar. En general, la cantidad de entradas necesarias para el funcionamiento de un modelo está en relación directa con la complejidad del modelo. El desarrollo de modelos comprensivos con un elevado nivel de complejidad puede llegar a hacerlos inaplicables en situaciones de campo, por requerir entradas que no son fáciles de medir, (Whisler *et al.*, 1986; Boote *et al.*, 1996).

La disponibilidad de los datos se refiere no solo a la cantidad sino también a la calidad. Así, Boote *et al.* (1996) consideran que la calidad de actuación del modelo depende de la disponibilidad y calidad de los datos de entrada para el funcionamiento del modelo. En este sentido, la precisión de los datos disponibles puede llegar a actuar como factor limitante para el uso de modelos (Boote *et al.*, 1996).

1.2.3.2.3 Objetivos

La definición del objetivo de cada caso concreto de modelización es un aspecto fundamental para llevar a buen término el proceso. Baker y Curry (1976) señalan que un científico que se acerca a un sistema sin un objetivo específico *in mente* puede acabar fácilmente errante y sin dirección en un laberinto de técnicas matemáticas. Para estos autores, la hipótesis básica de la modelización es que el observador tiene un objetivo, una pregunta que contestar (Baker y Curry, 1976).

Spitters (1990) y Passioura (1996) indican que los modelos deben ajustarse a los objetivos particulares del experimento. Spitters (1990) puntualiza además que el modelo debe ajustarse a los objetivos sin contener elementos redundantes, y refuerza este argumento citando el principio de la navaja de Ockham “la multiplicidad no debe ser asumida sin necesidad” (Williams of Ockham, siglo XIV).

Fernández-Rodríguez y López-Bellido (1993a) consideran a los objetivos como la base a partir de la cual se tomarán las decisiones sobre las simplificaciones oportunas a efectuar, señalando, al igual que Baker y Curry (1976), que resulta esencial incluir en el modelo aquellas variables que tienen un mayor efecto en el comportamiento del sistema en relación con el objetivo marcado, y omitir aquellas otras que no tienen efecto material en la respuesta que buscamos.

Finalmente, en relación con los objetivos de un modelo, hay que señalar que dado que los objetivos varían considerablemente, no existe un modelo perfecto y universal (Spitters, 1990). El diseño, la escala y la complejidad del modelo deben satisfacer el objetivo, por lo que ningún modelo es el mejor para todos los usos (Boote *et al.*, 1996).

1.2.3.2.4 Uso que se va a dar al modelo

Como se ha visto anteriormente, los posibles objetivos planteados para el desarrollo de un modelo son muy variados. Como consecuencia el resultado final obtenido también lo será. En lo que respecta a la complejidad del modelo obtenido, Boote *et al.* (1996) señalan que la complejidad del modelo debe ser apropiada a la pregunta planteada.

Los modelos interesantes desde el punto de vista científico son normalmente muy detallados; la necesidad de explicar los fenómenos observados a partir de los principios subyacentes requiere el desarrollo de modelos con un elevado nivel de complejidad (Penning de Vries, 1983; Spitters, 1990).

El manejo del cultivo requiere predicciones exactas y fiables de las opciones alternativas en las operaciones de la explotación. El nivel de complejidad de los modelos empleados para este fin es menor que el correspondiente a los anteriores. Es suficiente con disponer de modelos bien parametrizados o modelos fisiológicos simples (Penning de Vries, 1983; Spitters, 1990).

Los sistemas de cultivo tienen un elevado nivel de complejidad y en consecuencia los modelos necesitan una elevada simplificación del sistema representado, incluso cuando se define con gran detalle (Sinclair y Seligman, 1996). Algunos autores como De Wit y Penning de Vries (1982) mantienen que el número de variables que se puede considerar en un modelo es limitado, debido principalmente a que el esfuerzo de investigación que se puede invertir en cualquier problema es también limitado.

La aplicación al proceso de modelización de los criterios anteriores (objetivos de modelización, características del sistema y disponibilidad de datos), da lugar a un modelo con un determinado nivel de complejidad. Si la complejidad del modelo es excesiva para el objetivo planteado, se asume que se puede obtener una considerable reducción de variables limitando las fronteras del modelo y centrándose en los aspectos de mayor interés. Para ello, los elementos y procesos que constituyen el sistema se ordenan en función de su importancia para el objetivo planteado, y solo los que están dentro del enfoque limitado se necesitan estudiar en detalle (De Wit y Penning de Vries, 1982).

1.2.3.2.3 *Hipótesis del modelo*

La subjetividad y parcialidad del modelo obtenido son consecuencia respectivamente de la subjetividad del observador y de la parcialidad de los escenarios contemplados en su construcción. El modelizador debe hacer una descripción clara y precisa de los criterios considerados y de los escenarios utilizados para obtener el modelo. Esta descripción constituye las hipótesis del modelo, que son imprescindibles para la correcta interpretación de los resultados obtenidos y para delimitar los escenarios en los que la aplicación del modelo es adecuada.

Boote *et al.* (1996) indican que las hipótesis determinan las capacidades y limitaciones del modelo, y deben determinar claramente cuales son los aspectos que el modelo no considera. Baker y Curry (1976) señalan que las hipótesis ponen límites a la teoría, estructuran el modelo y lo hacen utilizable.

Boote *et al.* (1996) insisten en que los modelizadores deben ser sinceros y honestos en la descripción de las capacidades y limitaciones de sus modelos, y en que se debe permanecer dentro de las hipótesis planteadas.

Baker y Curry (1976) inciden en la misma idea, señalando que es muy importante que las hipótesis para simulación de modelos se establezcan claramente, y añaden que condicionan fuertemente los objetivos del modelo y la credibilidad de las predicciones.

1.2.3.2.4 *Efectos de la simplificación sobre las características de los modelos*

Las características de los modelos son consecuencia de los factores que inciden en la simplificación, es decir, sistema modelizado, modelizador, y escenario en el que se va a aplicar el modelo (1.2.3.2.1). La necesaria subjetividad del modelizador, y la parcialidad de los escenarios considerados, confieren al modelo un carácter subjetivo y parcial.

Una consecuencia lógica y directa de la simplificación es que la complejidad del modelo es menor que la complejidad del sistema representado. La diferencia entre la complejidad del sistema y la del modelo es tanto mayor cuanto más complejo sea el sistema. La complejidad del modelo resultante está fuertemente influenciada por la complejidad del propio sistema modelizado, pero debe adecuarse a los objetivos planteados y al escenario en el que se va a aplicar.

El proceso iterativo aplicado a la construcción de modelos proporciona la herramienta adecuada para la evolución del modelo, mejorando su poder predictivo y ampliando los límites de aplicación a nuevos escenarios. Esta evolución va acompañada normalmente de un aumento de la complejidad. Es necesario alcanzar un equilibrio entre mejora del modelo y complejidad, y, en su caso, desarrollar nuevos modelos resumen que faciliten su aplicación.

1.2.3.2.4.1 Subjetividad y Parcialidad

Un modelo es una representación parcial de un sistema y como tal su aplicación está limitada por los factores que intervienen en su construcción. Los límites de aplicación se pueden ampliar aumentando la componente mecanicista del modelo y adecuándolo a nuevos escenarios. En cualquier caso, la utilidad del modelo en un escenario determinado vendrá dada por la similitud entre los valores observado y calculado.

Subjetividad y parcialidad son consecuencia de una misma causa, la aplicación de unos criterios por parte del modelizador. Algunos autores introducen esta subjetividad dentro de la definición del modelo. Así, Penning de Vries (1983) define el modelo como una representación esquemática de nuestra concepción de un. En esta misma línea, Acosta (1997) afirma que los modelos en ecología se caracterizan por la intención contenida en su relación con el mundo real. Para este mismo autor, la realidad nunca es considerada en su totalidad, ni en la construcción de modelos ni en la actividad científica en general. Esta parcialidad se encuentra en cualquier aproximación humana a la realidad y permite una mayor eficacia en la relación entre el hombre y el mundo real.

1.2.3.2.4.1.1 Aplicación en el intervalo en el que ha sido experimentado

Sinclair y Seligman (1996) proponen que los límites de los modelos de cultivo, como sustitutos de la realidad, deben ser reconocidos como consecuencia inevitable de la simplificación. Insisten reiteradamente en la necesidad de que el modelizador sea claro y riguroso en la descripción de las capacidades y limitaciones de su modelo.

El modelizador debe ser claro y riguroso en la descripción de las capacidades y limitaciones de su modelo y debe huir de la tentación de decir que el modelo se puede acomodar a factores dados ajustando unos parámetros (Boote *et al.*, 1996).

Los límites de aplicación del modelo dependen de diversos factores, entre los que Boote *et al.* (1996) destacan el objetivo para el que se ha desarrollado el modelo, los criterios de simplificación empleados, la disponibilidad de datos y las hipótesis del modelo. Para estos autores, un factor que tiene una gran incidencia en la determinación de los límites de aplicación del modelo es el nivel de mecanismos y de comprensividad del modelo. Desde este punto de vista, consideran dos tipos de modelos.

El primer tipo es el de los que tienen un bajo nivel de mecanismos, como los empíricos o los instrumentales, según definición de Acosta (1997). La aplicación de estos modelos solo es posible en el universo empírico en el que se han construido o calibrado (Monteith, 1996; Passioura, 1996; Acosta, 1997). Son válidos para hacer interpolaciones predictivas, pero no se pueden aplicar para interpolaciones explicativas (relaciones causa-efecto) y para extrapolaciones fuera de los intervalos considerados en la experimentación (Whisler *et al.*, 1986; Boote *et al.*, 1996). A veces se llega a un nivel tal de simplificación que el modelo obtenido es necesario calibrarlo para cada lugar en el que se va a aplicar (Boote *et al.*, 1996).

El otro tipo de modelo está constituido por los que incluyen un elevado nivel de mecanismos y comprensividad. La aplicación de estos modelos trasciende la utilidad concreta por la que se han originado (Acosta, 1997), permitiendo la predicción por extrapolación fuera de los intervalos considerados en la experimentación (Whisler *et al.*, 1986). Según Acosta (1997), esto es debido a que los procesos que ocurren en la naturaleza (el porqué de las cosas) presentan un cierto grado de universalidad independientemente de la manifestación concreta de los mismos. Un modelo explicativo podría aplicarse en los casos donde se puede admitir que se dan los mismos procesos que el modelo representa.

1.2.3.2.4.1.2 Ampliación del intervalo conforme aumentan los mecanicismos

Las limitaciones que se presentan para aplicar los modelos en unas condiciones determinadas son consecuencia del proceso de simplificación seguido durante su construcción. Sin embargo, como indican Baker y Curry (1976), el modelo obtenido puede no ser el producto final del esfuerzo de modelización. Estos autores recalcan la necesidad de que la construcción del modelo sea un esfuerzo interdisciplinar; cuando se consideran los resultados del modelo, cada uno de los componentes del equipo tendrá su propia visión, en este punto se puede reconsiderar el modelo y reiniciar el proceso de modelización considerando nuevos objetivos derivados de los resultados anteriores.

El resultado de esta reconsideración puede dar lugar a la reformulación del modelo. Esta reformulación puede incrementar el tamaño del modelo, bien porque se amplíen los objetivos o bien porque se aumente el nivel de detalle (Baker y Curry, 1976; Penning de Vries, 1983).

El aumento del tamaño del modelo, debido en general al número de mecanismos incluidos en el mismo, lleva emparejado un aumento del número de parámetros y variables considerados, aumentando la complejidad del modelo y la dificultad para obtener los datos necesarios para su funcionamiento (Whisler *et al.*, 1986; Sinclair y Seligman, 1996).

El desarrollo de estos modelos complejos permite el conocimiento de los sistemas complejos que constituyen el mundo real, pero requieren siempre que el modelo se pueda resumir de forma fidedigna para el uso por otros usuarios (Penning de Vries, 1983).

Como consecuencia de lo anterior, en el desarrollo de un modelo se presentan tres fases sucesivas, claramente diferenciadas (De Wit y Penning de Vries, 1982; Penning de Vries, 1983).

- Los modelos preliminares: se definen como modelos con estructura y datos que reflejan el conocimiento científico actual. Se consideran simples porque el conocimiento a nivel explicativo es todavía vago e impreciso.
- Los modelos comprensivos: son modelos de un sistema cuyos elementos esenciales son conocidos en profundidad, y en el que se incorpora mucho de este conocimiento.
- Los modelos resumen: son modelos de los modelos comprensivos. En ellos, los aspectos esenciales de los modelos comprensivos se formulan con el menor detalle posible.

1.2.3.2.4.1.3 Utilidad de los modelos

La utilidad depende de la similitud entre los valores observado y calculado para el objetivo planteado.

La utilidad de un modelo se basa en su capacidad para predecir el comportamiento del sistema. Su fiabilidad depende de la similitud entre la respuesta del sistema y la obtenida por el modelo.

Para Baker y Curry (1976), el modelo es una representación razonable del sistema representado, y se debe aceptar el riesgo de que el modelo tiene un error. Las causas de la diferencia entre sistema y modelo son muy diversas, entre ellas Baker y Curry (1976) destacan, el coste, la experiencia en este tipo de estudios, el conocimiento de los trabajadores en la simulación de sistemas, la simplicidad del modelo y las limitaciones de uso del modelo desarrollado.

Para Sinclair y Seligman (1996), la tolerancia (o diferencia) entre el modelo y el sistema dependen, en gran medida, de la complejidad del sistema representado. En las aplicaciones de ingeniería se consiguen modelos que representan con gran fidelidad al sistema; la tolerancia entre el modelo y el sistema es muy pequeña. Cuando se trabaja con sistemas complejos, como es el caso de los cultivos y otros sistemas biológicos, el nivel de complejidad del sistema es muy elevado; el modelo supone siempre una elevada simplificación del sistema, y la tolerancia entre ambos es inevitablemente amplia.

De Wit y Penning de Vries (1982) llegan a una conclusión similar partiendo de un punto de vista diferente, pero relacionado también con la complejidad del sistema de partida. Estos autores hablan de la necesidad de evaluar un modelo en lugar de la tolerancia, pero ambos aspectos están estrechamente relacionados. Si el conocimiento que se tiene del sistema es suficientemente elevado, se diseña un modelo para explicar el comportamiento del sistema que puede no ser necesario evaluarlo por comparación con el sistema real. Al igual que Sinclair y Seligman (1996) consideraban que la complejidad de los modelos biológicos llevaban necesariamente a tolerancias elevadas, De Wit y Penning de Vries (1982) consideran que los modelos en biología son tan rudimentarios que es necesario probar su utilidad.

Para Llamas (1993), el desarrollo de un modelo debe acompañarse de un análisis cuantitativo del riesgo inherente a cada una de sus predicciones. Esta necesidad la basa en que el modelo es una representación incompleta del sistema. Además, considera que los problemas de representatividad de la muestra tomada del sistema inciden en la aleatoriedad de las diferencias entre las respuestas del sistema y del modelo.

1.2.3.2.4.2 Complejidad del modelo

Los sistemas sencillos se pueden representar con un elevado grado de fiabilidad con modelos también sencillos. La complejidad del modelo aumenta, necesariamente, cuando aumenta la complejidad del sistema de partida. Sin embargo, no es éste el único factor que incide en la complejidad de los modelos. El intento de representar el sistema en todos sus detalles daría lugar a modelos de una elevada complejidad, que los haría inaplicables. La complejidad del modelo debe adecuarse a los objetivos marcados por el modelador y al escenario en el que se va a aplicar el modelo.

En definitiva, la complejidad del modelo está condicionada por los tres factores que intervienen en la modelización (1.2.3.2.1). La complejidad del sistema marca el punto de partida, un elevado nivel de complejidad que es necesario reducir. El escenario en el que se va a aplicar el modelo y el modelizador, mediante la fijación de los objetivos, marcan el punto de llegada, el máximo nivel de complejidad admisible para el modelo.

La representación de un sistema determinado puede dar lugar a modelos con diferentes niveles de complejidad, en función de los objetivos y escenarios planteados para su utilización. No se puede determinar a priori un nivel de complejidad adecuado para representar un

determinado sistema; los modelos con diferentes niveles de complejidad son útiles en función de las necesidades de cada caso (Boote *et al.*, 1996).

En ocasiones puede ser útil desarrollar modelos complejos, que posteriormente se particularizan para su aplicación en diferentes escenarios, dando lugar a varios modelos más simples con una elevada fiabilidad (Boote *et al.*, 1996).

1.2.3.2.4.2.1 *Relación con la complejidad del sistema*

La complejidad del modelo está fuertemente condicionada por la complejidad del sistema a representar.

Monteith (1996) considera que las tres disciplinas más importantes, física, ingeniería y biología, han desarrollado modelos de características diferentes. Las diferencias entre unos y otros están condicionadas en gran medida por la complejidad de los sistemas representados.

- Los físicos parten de la hipótesis de que el universo está gobernado por leyes generales simples. Como los cultivos son parte del universo, los físicos opinan que los modelos de cultivo deben construirse sobre algoritmos simples
- Los ingenieros parten de la misma hipótesis pero priman considerablemente los factores de seguridad, por lo que aumentan las variables y parámetros considerados en el modelo, hasta llegar a ser al menos el doble de los estrictamente necesarios.
- Los biólogos parten de la hipótesis de que todo es diferente hasta que se demuestre lo contrario. Esta hipótesis unida a la propia complejidad de los sistemas biológicos da lugar a una gran proliferación de parámetros.

La relación entre la complejidad de sistema de partida y la complejidad del modelo ha sido puesta de manifiesto por varios autores. Sinclair y Seligman (1996) señalan las diferentes características de los modelos de ingeniería y los biológicos, en relación con la complejidad del sistema de partida:

- En ingeniería el modelo es el punto de partida para hacer un dispositivo; todos los componentes están definidos, tienen especificaciones claras y la complejidad del modelo y del dispositivo son muy similares.
- En modelos de cultivo u otros modelos biológicos, el punto de partida es un sistema muy complejo, hasta el punto que es imposible identificar todos los factores posibles para todas las situaciones que pueden influir en el desarrollo del cultivo. El modelo implica siempre una elevada simplificación del sistema y la tolerancia entre ambos es inevitablemente amplia.

Baker y Curry (1976) y Fernández-Rodríguez y López-Bellido (1993a) inciden así mismo en la elevada complejidad que se da en los sistemas biológicos, y en sus consecuencias directas en la elevada simplificación que supone el modelo y en la amplia tolerancia entre modelo y sistema representado.

1.2.3.2.4.2.2 *Adecuación a las necesidades de aplicación: Objetivos y escenario de aplicación*

En el apartado anterior se ha tratado sobre la incidencia del sistema en la complejidad del modelo. En este apartado se argumenta la influencia de los otros dos factores que inciden en la modelización, es decir, escenario y observador, mediante la determinación de los objetivos. De Wit y Penning de Vries (1982) consideran además la limitación que supone las posibilidades de cálculo; para estos autores, modelos que incluyan 100 variables son ya muy grandes.

Desde el punto de vista del escenario, Acosta (1997) condiciona la utilidad de la simplificación al propósito de nuestra relación con la realidad. Esta relación está definida por unas condiciones determinadas del sistema y del entorno, y en consecuencia define un escenario concreto.

La incidencia que tienen los objetivos en la complejidad del modelo obtenido es ampliamente tratada por varios autores. Boote *et al.* (1996) y Spitters (1990) deducen que la diversidad de objetivos que se pueden plantear implica la obtención de modelos diferentes, con distintos niveles de complejidad, adecuados a los objetivos concretos de cada caso, sin que ninguno de ellos sea el mejor para todos los usos. Como consecuencia, es útil desarrollar submodelos de complejidad variable para adecuarlos a los diferentes usos.

La modelización de cultivos sirve para dos objetivos, la predicción de los efectos esperados en situaciones futuras aplicables al manejo de cultivos y la adquisición de conocimientos sobre el sistema estudiado aplicable a la investigación (Spitters, 1990; Boote *et al.*, 1996). Siendo coherentes con lo detallado anteriormente, se deduce que, en lo que a complejidad de los modelos se refiere, encontraremos dos niveles, uno para cada uno de los dos objetivos planteados.

El manejo del cultivo requiere predicciones exactas y fiables del efecto de las opciones alternativas en las operaciones de la explotación. Para ello se requieren modelos simples calibrados con amplios intervalos de variación de los datos tomados en los entornos en los que el modelo se va a utilizar. Los modelos más adecuados para este fin son los modelos de regresión bien parametrizados y los modelos fisiológicos simples (Spitters, 1990). Los modelos simples son más fáciles de comprender, necesitan pocas entradas y son de fácil uso y aplicación (Boote *et al.*, 1996). En general, se trata de modelos empíricos y se debe tener en cuenta que su aplicación está limitada al universo empírico en el que se han construido (Boote *et al.*, 1996; Acosta, 1997). Cuando el nivel de simplificación es excesivo, se puede llegar a expresiones que solo representan débilmente las hipótesis del modelizador (Sinclair y Seligman, 1996) o a modelos que se deben calibrar para cada nueva aplicación (Boote *et al.*, 1996).

La investigación está dirigida hacia el entendimiento de los sistemas estudiados y, por tanto, requiere modelos que expliquen los fenómenos observados a partir de los principios subyacentes (Spitters, 1990). Esto lleva necesariamente a un aumento de la complejidad del modelo obtenido

El aumento de la complejidad de los modelos explicativos, en relación con los anteriores, es debido a la inclusión de los mecanismos en los que se basa el funcionamiento del sistema. Estos modelos proporcionan una mayor potencia para discriminar los diferentes mecanismos que constituyen el sistema, para manipular las variables que inciden en el manejo del cultivo y para explicar e interpretar los resultados obtenidos (Spitters, 1990; Boote *et al.*, 1996). La precisión de estos modelos puede verse afectada por la acumulación de los errores de medida de los múltiples parámetros y variables considerados (Spitters, 1990; Boote *et al.*, 1996; Sinclair y Seligman, 1996). Se pueden presentar limitaciones en cuanto a la disponibilidad de las entradas necesarias (Sinclair y Seligman, 1996; Boote *et al.*, 1996) y son más difíciles de entender, usar y aplicar (Boote *et al.*, 1996). El aumento de la complejidad de un modelo más allá de lo razonable puede degenerar en un modelo que, queriendo explicarlo todo, no explica nada. A menudo los modelos más detallados solo son accesibles a los propios modelizadores, incluso éstos pueden perder el control del modelo (Spitters, 1990).

1.2.3.2.4.3 Iteratividad

La construcción de un modelo es un proceso iterativo; esto significa que en cualquier punto de la secuencia de construcción, el modelizador puede volver al paso previo (Baker y Curry, 1976).

La iteratividad proporciona una herramienta para la mejora continua del modelo, tanto en lo referente a la mejora del poder predictivo como a la aplicación en nuevos escenarios. Esta mejora tiene como consecuencia, normalmente, el aumento de la complejidad del modelo que dificulta su aplicación. Es necesario llegar a un equilibrio entre aumento de la complejidad y aplicabilidad del modelo.

1.2.3.2.4.3.1 *Mejora continua del modelo*

Un modelo puede evolucionar mejorando progresivamente su poder predictivo y/o ampliando los límites de aplicación permitiendo así su utilización en nuevos escenarios. La evolución del modelo se produce como consecuencia del desarrollo de nuevas teorías y/o como consecuencia de los datos experimentales obtenidos (Monteith, 1996). El desarrollo de una nueva teoría puede dar lugar a nuevos trabajos experimentales. Por otra parte, la obtención de datos experimentales inesperados proporciona las bases para el desarrollo de una nueva teoría (Monteith, 1996).

Baker y Curry (1976) explican el proceso de construcción de un modelo a partir del análisis del comportamiento anterior del sistema. Analizando los datos disponibles se puede construir un modelo preliminar tentativo. Este modelo se prueba con los datos actuales, para ver si los datos obtenidos son razonablemente similares a los experimentales. De esta comparación se obtiene la información necesaria para la modificación del modelo, que se vuelve a probar y comparar. El proceso se repite hasta que los datos obtenidos por el modelo sean lo suficientemente próximos a los experimentales.

Las sucesivas modificaciones del modelo se obtienen de la comparación entre los datos experimentales y los simulados por el modelo. Esto puede dar lugar a un simple cambio de enfoque o a una reformulación total del modelo (Baker y Curry, 1976). Para estos autores, es importante que estas modificaciones se produzcan como resultados de un esfuerzo interdisciplinar. Una vez obtenido el modelo, cada uno de los miembros del equipo aporta la visión relativa a su disciplina, se deciden las modificaciones pertinentes y se vuelve al inicio.

De Wit y Penning de Vries (1982) inciden en la misma idea; a partir de las diferencias entre el modelo y el sistema, se ajusta sucesivamente el modelo para obtener mejores resultados. De esta forma se parte de un modelo explicativo que evoluciona progresivamente hacia un modelo descriptivo.

Por lo tanto, el estudio de la discrepancia entre modelo y sistema sirve de estímulo para el desarrollo de nuevas hipótesis y para obtener un modelo que represente más fielmente al sistema (Baker y Curry, 1976; De Wit y Penning de Vries, 1982; Monteith, 1996).

1.2.3.2.4.3.2 *Necesidad de equilibrio*

Como hemos visto anteriormente, la simplificación es necesaria para comprender un sistema de elevada complejidad, como son los sistemas de cultivo. Los criterios aplicados para obtener un modelo más sencillo que el sistema que se representa, limitan la aplicación de los

modelos dentro de unas determinadas condiciones marcadas por el objetivo. Cuando la complejidad del modelo obtenido es todavía muy elevada para el uso que se le pretende dar, se pueden restringir los objetivos, se aplican criterios adicionales de simplificación que limitan la aplicación del modelo a unas condiciones más concretas.

De esta forma se pueden conseguir modelos de distinto nivel de complejidad en función de los objetivos marcados y del uso que se vaya a dar al modelo, considerando siempre que una mayor simplicidad implica, en general, mayores restricciones en la aplicación del modelo.

Monteith (1996) se refiere a la necesidad de equilibrio entre la simplificación y la aplicación generalizada del modelo. En este sentido, y para los modelos comprensivos, plantea que los modelizadores necesitan acertar en el equilibrio entre:

- (i) Restringir los algoritmos al mínimo para que permita explorar los problemas usuales por el camino más simple posible, y
- (ii) Hacer la estructura del modelo lo suficientemente adaptable para que las situaciones más complejas se introduzcan como nuevas ideas y desarrollos.

1.2.3.2.5 Tipos de modelos

Los modelos de cultivo simulan el comportamiento de un sistema (el cultivo) que cambia en función del tiempo.

Los modelos dinámicos describen en términos matemáticos los cambios en el sistema, permiten expresar cuantitativamente su estado en cualquier momento (Penning de Vries, 1983), permiten conocer las variaciones experimentadas con el transcurso del tiempo (Baker y Curry, 1976; De Wit y Penning de Vries, 1982), y su relación con los factores externos (Krug, 1985). La simulación de sistemas aplica los modelos dinámicos para estudiar los cambios experimentados por el sistema en función del tiempo (Baker y Curry, 1976).

La modelización de cultivos se define como la simulación dinámica del crecimiento del cultivo mediante integración numérica (Sinclair y Seligman, 1996). En consonancia con este concepto, el modelo de cultivo se define como un esquema cuantitativo para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo (Monteith (1996).

La modelización de cultivos está afectada por la parcialidad y la subjetividad propias del proceso de simplificación. La consecuencia es una gran diversidad en lo referente a los posibles modelos obtenidos. Estos se pueden clasificar en función de los diferentes criterios considerados en el proceso de modelización. Las características de los diferentes tipos obtenidos y su utilidad para los objetivos planteados, son también consecuencia de esos mismos criterios.

1.2.3.2.5.1 Criterios de clasificación y tipos

Para clasificar los modelos se pueden emplear distintos criterios, obteniéndose distintas clasificaciones. Sin embargo, para cada criterio de clasificación se obtienen en general dos tipos de modelos, y se puede establecer además una estrecha relación entre los tipos obtenidos aplicando los diferentes criterios.

1.2.3.2.5.1.1 *Relación entre variables*

El primer criterio de clasificación de modelos considerado es el tipo de relación que se establece entre las variables de entrada y las variables de salida. La relación entre unas y otras puede establecerse por dos métodos:

- Aplicando relaciones estadísticas entre los valores obtenidos experimentalmente para las variables de entrada y de salida.
- Aplicando el conocimiento científico previo para relacionar las variables de entrada y salida mediante las leyes físicas, químicas, o fisiológicas que gobiernan el sistema.

Los modelos correspondientes al primer grupo reciben, entre otras, las denominaciones de regresión, correlativos, o empíricos. Para los segundos, la denominación encontrada en la bibliografía es modelo mecanicista.

Estas denominaciones son las más extendidas. Sin embargo, y manteniendo como criterio de clasificación la relación entre variables, se pueden encontrar variaciones en la denominación.

Spitters (1990) denomina empíricos o de regresión a los primeros y modelos fisiológicos a los segundos. Addiscott y Wagenet (1985) los denominan funcional y mecanicista respectivamente. Monteith (1996) y Boote *et al.* (1996) denominan empíricos a los primeros y para los segundos mantienen la denominación de mecanicista. Acosta (1997) emplea las denominaciones de empirista y abstracto. Penning de Vries (1983) los denomina demostrativos y explicativos, respectivamente.

Reynolds y Acock (1985) y Whisler *et al.* (1986) denominan empíricos o correlativos a los primeros y mecanicistas o explicativos a los segundos. Estos autores consideran, además de estos dos tipos de modelos, un tercero que denominan compresivo, pero señalan que la comprensividad de un modelo aumenta de forma paralela a la cantidad de mecanicismos incluidos en el mismo.

1.2.3.2.5.1.2 *Conocimiento previo del sistema*

En función del conocimiento previo que se tiene del sistema, los modelos se pueden clasificar en dos tipos: modelos de caja negra y modelos de caja blanca. En los primeros no se conoce en absoluto el funcionamiento del sistema, mientras que en los segundos el comportamiento del sistema se puede explicar en su totalidad, a partir del conocimiento que se tiene sobre las leyes físicas que lo gobiernan (Llamas, 1993).

1.2.3.2.5.1.3 *Método de construcción del modelo*

Para la construcción del modelo se pueden emplear métodos inductivos o deductivos. El método inductivo se apoya únicamente en la información obtenida experimentalmente para los datos de entrada y respuesta del modelo. En el método deductivo se analiza y se juzga el sistema, tratando de conocer sus relaciones internas; después se deducen analíticamente las relaciones entre ellos, utilizándose los datos experimentales únicamente a título de verificación (Llamas, 1993).

1.2.3.2.5.1.4 Información que aporta sobre el sistema

En función de la información que aportan sobre el sistema representado los podemos clasificar en descriptivos y explicativos (Spitters, 1990). Los primeros describen el comportamiento del sistema sin precisar sus causas. Los segundos explican el funcionamiento del sistema a partir de las leyes que lo gobiernan y coinciden, por lo tanto, con los modelos mecanicistas.

1.2.3.2.5.1.5 Utilidad del modelo

Un modelo puede considerarse como una construcción que sirve para reproducir un aspecto de la realidad en el que estamos interesados. Por su carácter utilitario, los modelos contruidos bajo esta perspectiva Acosta (1997) los denomina instrumentales. Otra forma de entender un modelo es atribuirle la intención de explicar la realidad a que se refiere, necesidad que se añade a la de predecir el comportamiento. Acosta (1997) denomina explicativos a estos modelos.

1.2.3.2.5.1.6 Relación entre los distintos criterios

Los modelos obtenidos por aplicación de relaciones estadísticas entre las variables de entrada y salida se aplican cuando el conocimiento del funcionamiento del sistema es escaso, por lo que se corresponden con los de caja negra. Prácticamente lo único que se conoce son los valores de las variables de entrada y de salida, por lo que se deben aplicar métodos inductivos. Describen el sistema pero no explican su funcionamiento, por lo que se corresponden con los descriptivos. En general, son modelos con un nivel de complejidad bajo, que proporcionan, dentro del rango considerado para las variables, una buena precisión de ajuste, pudiendo asimilarse entonces a los modelos instrumentales.

Los modelos mecanicistas se aplican cuando se dispone de conocimiento suficiente sobre los mecanismos que gobiernan el sistema. Se tiene por tanto un elevado conocimiento del sistema, por lo que coinciden con los modelos de caja blanca. El conocimiento de las relaciones internas entre los elementos del sistema permite analizar su funcionamiento y aplicar métodos deductivos. Por todo ello, el modelo explica el funcionamiento del sistema y se corresponde con los modelos explicativos.

1.2.3.2.5.1.7 Términos medios

Como se ha visto, aplicando distintos criterios se obtienen distintos tipos de modelos, en general dos tipos para cada criterio. Estas clasificaciones son útiles, pero representan casos extremos que difícilmente se presentan en la realidad. Los modelos de cultivo se sitúan en algún punto intermedio entre ambos extremos (Krug, 1985; Llamas, 1993; Monteith, 1996).

Whisler *et al.* (1986) también señalan que los modelos de cultivo contienen una mezcla de empirismo y mecanicismo, y añaden que todos los modelos se vuelven empíricos a determinado nivel.

Boote *et al.* (1996) cita a Whisler *et al.* (1986) para proponer que los modelos de simulación de cultivos tengan un elevado nivel de mecanicismo y comprensividad para poder explicar e interpretar los resultados de la investigación. Finalmente, Boote *et al.* (1996) consideran que son necesarios ambos modelos simples y complejos para aplicar unos u otros en función de las necesidades de cada caso.

1.2.3.2.5.2 Características y utilidad de los diferentes tipos de modelos

Los objetivos principales de la modelización son la predicción de los efectos esperados en situaciones futuras, y la adquisición de conocimiento dentro del sistema estudiado (1.2.3.2.4.2.2). Estos dos objetivos se corresponden con dos disciplinas de trabajo, la ciencia y la ingeniería (Spitters, 1990 y Passioura, 1996).

La ciencia aspira a mejorar nuestro conocimiento de los sistemas estudiados. Se requieren modelos que expliquen los fenómenos observados a partir de los principios que gobiernan el sistema. La ingeniería aspira a dar una recomendación segura de manejo. Se requieren modelos que proporcionen predicciones exactas y fiables del efecto de las opciones alternativas en las operaciones de la explotación.

Estas dos formas de ver la realidad son diferentes y por lo tanto requieren modelos diferentes. Para Spitters (1990) el manejo requiere modelos predictivos, mientras que la investigación demanda modelos explicativos. Penning de Vries (1983) coincide con esta relación de manejo – modelos predictivos, investigación – modelos explicativos. Aún cuando este autor no menciona expresamente estos emparejamientos, es la única posibilidad que se deduce de las características exigidas para uno y otro objetivo. Por último, en la misma línea Passioura (1996) destaca que los mejores modelos de ingeniería se basan en relaciones empíricas robustas entre el comportamiento de la planta y las principales variables del entorno.

1.2.3.3 Limitaciones en el uso de modelos

Los factores que intervienen en el proceso de modelización tienen como consecuencia la limitación en el uso de modelo. Consecuencia de estas limitaciones es la necesidad de testar el modelo para evaluar su aplicación en unos escenarios determinados.

1.2.3.3.1 *Universalidad*

Los objetivos de la modelización son la predicción de los efectos esperados en situaciones futuras y la adquisición de conocimiento del sistema estudiado (1.2.3.2.5.2).

Un modelo universal es aplicable en todas y cada una de las situaciones pasadas, presentes o futuras que se pueden presentar en un sistema. Según Acosta (1997) podemos asumir que los procesos que ocurren en la naturaleza presentan un cierto grado de universalidad independientemente de la manifestación concreta de los mismos. Este concepto de universalidad implica que solo los modelos explicativos (o mecanicistas) pueden alcanzar algún grado de universalidad, puesto que se pueden aplicar en los casos donde se puede admitir que se dan los mismos procesos que el modelo representa. Por el contrario, los modelos instrumentales o experimentales únicamente son aplicables en el universo experimental en el que han sido contruidos.

Los sucesivos estudios realizados sobre un mismo sistema proporcionan un conocimiento cada vez más detallado sobre los elementos que lo constituyen, así como de las interacciones entre ellos. Por esta vía se puede llegar, al menos hipotéticamente, a una situación en la que se conocen todos los elementos e interacciones que constituyen el sistema estudiado. Una vez alcanzada esta situación se ha cubierto uno de los objetivos anteriormente planteados, la adquisición de conocimiento del sistema estudiado (1.2.3.2.5.2).

La construcción de un modelo que considere todos los elementos del sistema y todas sus interacciones hace posible la predicción del comportamiento del sistema en cualquier situación que se pueda presentar en el futuro, cumpliendo así el otro objetivo de la modelización considerado por Spitters (1990). El modelo así construido es un modelo universal puesto que considera todos los elementos constitutivos del sistema estudiado.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que las características de los modelos son consecuencia de los factores que intervienen en el proceso de simplificación. La objetividad del observador y la parcialidad de los escenarios considerados limitan la aplicación universal del modelo obtenido.

El sistema en sí mismo no limita la aplicación del modelo, es el elemento objetivo de la simplificación. Es su relación con los otros dos elementos donde las características del sistema pueden limitar su aplicación. El nivel de complejidad del sistema puede facilitar o dificultar su relación con el observador y, desde este punto de vista, la complejidad del sistema actúa como factor limitante de la universalidad del modelo obtenido.

El observador constituye el elemento subjetivo del proceso de modelización. Esta subjetividad se pone de manifiesto en dos casos, el conocimiento que el observador tiene del sistema y el planteamiento de los objetivos de la modelización.

El escenario es el elemento que aporta parcialidad. Una determinada combinación de sistema y entorno constituye una parte de la realidad. Esta parcialidad se transmite al modelo directamente, y también indirectamente por la relación con el observador en la fijación de los objetivos del modelo.

1.2.3.3.1.1 La complejidad del sistema como factor limitante de la universalidad

La universalidad de los modelos es un hecho, o puede serlo, cuando se representan sistemas sencillos, como es el caso de algunos modelos de ingeniería (De Wit y Penning de Vries, 1982; y Sinclair y Seligman, 1996).

La universalidad de los modelos se hace cada vez más difícil cuando aumenta la complejidad del sistema representado. La universalidad es inalcanzable cuando se representan sistemas con un alto grado de complejidad. Este es el caso, entre otros, de los sistemas que incluyen organismos vivos (Baker y Curry, 1976; De Wit y Penning de Vries, 1982; Monteith, 1996; Sinclair y Seligman, 1996).

1.2.3.3.1.2 Limitaciones por conocimiento del sistema

Los sistemas complejos incluyen numerosos elementos e interacciones entre ellos. Estos elementos pueden clasificarse en distintos niveles jerárquicos. En el caso de los seres vivos, algunos de estos niveles están constituidos por organismos discretos (Sinclair y Seligman, 1996). El funcionamiento de las estructuras correspondientes a los niveles de organización superiores es el resultado de la integración de los inferiores.

Los sistemas que incluyen seres vivos están formados por un gran número de componentes y procesos interactuando sobre un rango de niveles de organización tan amplio que es imposible identificar todos los factores posibles para todas las situaciones que pueden influir en el desarrollo del cultivo (Mayr, 1982; Pease y Bull, 1992).

El desconocimiento de estos elementos obliga a incluir en el modelo una componente estocástica, que sustituya los mecanismos relativos a los elementos desconocidos. La variación de las condiciones de estos elementos limita la universalidad del modelo, obligando a calibrarlo cuando cambian las condiciones del entorno, por ejemplo, cuando se aplica en una zona climatológica distinta a aquella en la que se ha desarrollado el modelo (Sinclair y Seligman, 1996). La consecuencia práctica es que es imposible crear modelos de cultivo universales (Spitters, 1990; Sinclair y Seligman, 1996).

1.2.3.3.1.3 Limitación por complejidad del modelo

En el caso hipotético de conocer todos los elementos que constituyen un sistema, se podría construir un modelo que incluyera a todos ellos. La complejidad del modelo así obtenido es comparable a la complejidad del sistema que representa.

Si el sistema representado es sencillo, con un número reducido de elementos, el tamaño del modelo que lo representa también será reducido y, por lo tanto, manejable y útil. El modelo así obtenido representa todas las posibles variantes del sistema y en consecuencia es un modelo universal de este sistema.

Si por el contrario el sistema representado tiene un elevado grado de complejidad, el modelo que lo representa también lo tendrá. Esta complejidad puede llegar a ser tal que el modelo obtenido sea difícil de entender, usar y aplicar (Boote *et al.*, 1996).

Cuando se trabaja con sistemas que incluyen seres vivos, la situación descrita, en la que se conocen todos los elementos del sistema, es inalcanzable. Sin embargo, el proceso iterativo de construcción permite, por aproximaciones sucesivas, acercarse cada vez más a este objetivo. Consecuencia de esta evolución del modelo y de la ampliación de los objetivos es el aumento de la complejidad, que lleva emparejado un aumento del número de parámetros del modelo y la disminución de la sensibilidad de cada parámetro (Penning de Vries, 1983).

El aumento de parámetros del modelo aumenta la dificultad para obtener los datos necesarios. En ocasiones se necesitan trabajos experimentales complejos y, a veces, la única forma de evaluar algunas variables es la estimación, incluso por tanteo, llegando a casos en los que los datos no están disponibles (Whisler *et al.*, 1986; Sinclair y Seligman, 1996).

Las consecuencias de estas limitaciones en la disponibilidad de datos son: la necesidad de calibrado del modelo para las condiciones concretas en las que se va a aplicar (Sinclair y Seligman, 1996); la inestabilidad de las salidas del modelo, en particular cuando algún mecanismo se ha modelizado incorrectamente (Boote *et al.*, 1996); y finalmente, el modelo puede llegar a ser inaplicable en condiciones de campo, por la imposibilidad de medir algunas variables necesarias para el funcionamiento del modelo (Boote *et al.*, 1996).

Además de estas limitaciones, debe tenerse en cuenta que el número de variables que se pueden considerar en un modelo es limitado, no solo por la potencia del ordenador empleado, sino sobre todo porque el esfuerzo de investigación que se puede invertir en cualquier problema es limitado. Modelos que tienen alrededor de 100 variables son ya muy grandes, pero al mismo tiempo pueden ser pequeños comparados con la complejidad del sistema considerado (De Wit y Penning de Vries, 1982).

La complejidad del modelo, así como su diseño y escala, deben estar en consonancia con los objetivos planteados (Boote *et al.*, 1996). Los modelos interesantes desde el punto de vista científico son muy detallados y la complejidad resultante puede hacerlos inaplicables

para el manejo de cultivo. La complejidad de los modelos usados para predicción o manejo es menor que para los anteriores y son normalmente muy elementales para discusiones de interés científico (Penning de Vries, 1983).

Para concluir, Penning de Vries (1983) señala que el conocimiento de un sistema complejo del mundo real, y por ello un gran modelo de él, requiere siempre que el modelo se pueda resumir de forma fidedigna para el uso por otros.

1.2.3.3.2 *Testado de modelos*

De la discusión del apartado anterior se deduce la dificultad de elaborar modelos universales. Por ello, una vez elaborado el modelo es necesario evaluar su utilidad para los objetivos propuestos y establecer los límites ente los que el modelo simula adecuadamente el comportamiento del sistema que representa.

Monteith (1996) considera que los modelizadores validan los modelos para evitar el peligro que representa la aplicación indebida de los mismos. Whisler *et al.* (1986) consideran dos formas de testado: la validación, en la que las predicciones del modelo se comparan con las observaciones de campo, y el análisis de sensibilidad e incertidumbre, en el que se prueba como responde el modelo a los cambios de ciertas variables y parámetros.

1.2.3.3.2.1 Validación

Whisler *et al.* (1986) definen la validación de los modelos como *la comparación de las predicciones de un modelo verificado con las observaciones experimentales distintas a las empleadas en la construcción y calibración del modelo, e identificación y corrección de errores en el modelo hasta que sea apropiado para los objetivos proyectados.*

Esta definición no es, ni mucho menos, la única que podemos encontrar para este término. En la bibliografía se presenta una gran confusión para los términos validación y verificación, utilizándolos en ocasiones como equivalentes -como señalan Baker y Curry (1976)- y en ocasiones como términos claramente diferenciados. Cuando se presentan como términos diferenciados, la definición de validación varía de unos autores a otros.

La definición de validación de Whisler *et al.* (1986) es la más completa que hemos encontrado en la bibliografía. Define claramente las características previas que debe reunir el modelo a validar -calibrado y verificado- las características de los datos que se deben emplear para la validación -diferentes a los empleados en la construcción y calibrado del modelo- las labores a realizar -identificación y corrección de errores- y señala finalmente hasta cuando debe continuar este proceso de identificación y corrección de errores -cuando el modelo sea apropiado a los objetivos proyectados-.

1.2.3.3.2.1.1 *Calibrado y verificación previa del modelo*

En la definición de Whisler *et al.* (1986), el modelo a validar debe estar previamente calibrado y verificado.

El calibrado consiste en ajustar ciertos parámetros del modelo o relaciones para que funcione adecuadamente en unas determinadas condiciones (De Wit y Penning de Vries, 1982; Boote *et al.*, 1996). Llamas (1993) define el calibrado como la evaluación o estimación de los parámetros del modelo con criterios deductivos o con ayuda de observaciones anteriores, indicando la forma en que se pueden obtener dichos parámetros.

Whisler *et al.* (1986) consideran que un modelo verificado es aquel cuyas ecuaciones han sido testadas para asegurar que funciona de acuerdo a lo propuesto por el modelizador. Podemos considerar que esta definición establece el principio de lo que debe ser la verificación de un modelo, pero no concreta mucho. Para Baker y Curry (1976), verificar significa probar la veracidad, e indican que una forma de verificar el modelo es hacerlo funcionar con datos históricos del sistema real y comparar las salidas del modelo con los datos del sistema real. Por último, Quintana *et al.* (1997) distinguen entre la verificación del programa y la verificación del modelo. En el primer caso se trata de evidenciar que el programa informático resuelve de forma correcta las ecuaciones que constituyen el modelo matemático. Para verificar el modelo, éste se utiliza en nuevas simulaciones y los datos obtenidos se comparan con series de datos de campo independientes de los empleados en el calibrado del modelo.

1.2.3.3.2.1.2 Datos a emplear en la validación

La validación de un modelo está frecuentemente limitada por la disponibilidad de datos suficientes en cantidad y calidad.

La disponibilidad de datos experimentales es fundamental para la validación. La base de la validación es la comparación de las predicciones del modelo con los datos experimentales tomados del sistema representado. Los datos empleados en la validación del modelo deben ser diferentes a los empleados en la construcción y calibrado de dicho modelo (Whisler *et al.* 1986; Llamas, 1993; Quintana *et al.*, 1997). Cuando el modelo a validar es muy complejo, la obtención de los datos necesario para ello requiere la realización de un gran número de ensayos en condiciones muy diversas, lo que limita las posibilidades de validación (Monteith, 1996). Como consecuencia, en comparación con las necesidades, los datos disponibles son pocos y poco profundos (Penning de Vries, 1983). Por otra parte, ha de tenerse en cuenta que los datos tomados del sistema real, utilizados como referencia para la validación, están afectados por los correspondientes errores experimentales y su magnitud limita las posibilidades de validación del modelo (Sinclair y Seligman, 1996).

Todas estas limitaciones dificultan la disponibilidad de los datos necesarios para la validación del modelo, por lo que en muchas ocasiones no se lleva a cabo (Quintana *et al.*, 1997). Otras veces, los datos empleados para la construcción y calibrado del modelo se emplean para la validación (Whisler *et al.* 1986). Los mismos autores señalan que esto es debido a la dificultad para obtener datos fiables, y que éstos no se pueden derrochar, pero recalcan a continuación que, como se indica en la definición, los datos de calibrado no pueden ser empleados para la validación (Whisler *et al.* 1986).

1.2.3.3.2.1.3 Identificación y corrección de errores

La definición de validación de Whisler *et al.* (1986) incluye una parte relativa a la identificación y corrección de errores en el modelo, hasta que sea apropiado para los objetivos proyectados.

La validación de un modelo compara los valores calculados por el modelo con la respuesta del sistema. El modelo será adecuado a los objetivos previstos cuando la diferencia entre el valor calculado y observado es menor que el error admisible para el objetivo marcado. Baker y Curry (1976) consideran que, independientemente de la disciplina a la que se aplican, la estructura de los modelos está fuertemente condicionada por la precisión requerida. Llamas (1993) considera que la calidad de un modelo se mide por esta diferencia. Finalmente, Boote *et*

al. (1996) consideran que la validación debe determinar si el modelo predice con precisión el comportamiento del sistema.

Las fuentes de error en un modelo pueden ser muy diversas, pero a juicio de Penning de Vries (1983) las más importantes son las conceptuales. Esta autor coincide con Whisler *et al.* (1986) en la necesidad de que el modelizador corrija tantos errores como le sea posible antes de proporcionar el modelo, aunque señala que no se puede dar ninguna garantía de que el modelo esté libre de errores.

Cuando el comportamiento del modelo no se corresponde con el comportamiento del sistema, se pone de manifiesto que alguno de los componentes del modelo es erróneo (De Wit y Penning de Vries, 1982; Penning de Vries, 1983). La identificación de la fuente de estos errores permite establecer nuevas hipótesis y corregir el modelo, con lo que contribuye a la mejora del mismo (Monteith, 1996).

1.2.3.3.2 Estrategias de validación

Monteith (1996) considera que la validación debe ser equivalente al testado de la hipótesis nula, estableciendo las circunstancias en las que el modelo falla. Estos fallos sirven para establecer nuevas hipótesis y mejorar el modelo.

Lo normal es encontrar un concepto más complejo de la valoración de modelos. Sinclair y Seligman (1996) no están de acuerdo con el planteamiento anterior. Para estos autores, la mayor dificultad que se presenta para validar un modelo de cultivo es, precisamente, que no se trata de una simple hipótesis falsificable, sino de un conjunto de hipótesis, deduciendo de ello que los modelos no pueden ser validados. Otros autores, como Oreskes *et al.* (1994), coinciden en esta idea y señalan que los modelos se pueden invalidar pero nunca validar.

Las causas por las que un modelo no se puede validar tienen dos posibles orígenes, los datos experimentales y las hipótesis que constituyen el modelo. En esta línea, Whisler *et al.* (1986) consideran dos niveles diferentes de validación de un modelo, predicción e hipótesis. La validación del valor predictivo se hace con datos de campo, mientras que la validación de las hipótesis se hace con datos de ambiente controlado.

La validación del valor predictivo con datos de campo presenta numerosos problemas relacionados con la obtención de datos suficientes y fiables, como ya se ha discutido anteriormente (ver 1.2.3.3.2.1.2). Por otra parte, ha de tenerse en cuenta que se puede obtener una buena aproximación a los datos experimentales estableciendo distintos grupos de hipótesis, o dicho de otra manera, es posible obtener una predicción correcta partiendo de hipótesis falsas. Por ello, Whisler *et al.* (1986) consideran que la validación de las hipótesis proporciona más confianza que la validación del poder predictivo.

Cuando se pretenda validar una hipótesis debe tenerse en cuenta que no es posible probar una hipótesis como absolutamente correcta. Sin embargo, testando un modelo bajo condiciones diversas, se proporcionan amplias oportunidades para identificar sus áreas de fallo (Whisler *et al.* 1986). Esta validación en condiciones diversas requiere la realización de un gran número de ensayos de campo, en un amplio rango de condiciones ambientales. La validación rigurosa de un modelo está limitada por la posibilidad de realizar tales ensayos (Monteith, 1996). Para Boote *et al.* (1996) es esencial testar el modelo en condiciones definidas y diversas, si el modelizador desea hacer aplicaciones o extrapolaciones a esos entornos y situaciones.

Estas dificultades que se presentan en el testado de un modelo, no deben llevar a la falsa idea de que el proceso de validación, e incluso los propios modelos de cultivo, carecen de utilidad. Sinclair y Seligman (1996) indican que, a pesar de sus limitaciones, los modelos de cultivo pueden utilizarse con efectividad para estudiar las posibles implicaciones de varias hipótesis sobre un cultivo o un entorno. La validación de un modelo informa sobre si la fiabilidad del modelo es buena o mala cuando se aplica en unas determinadas condiciones (Sinclair y Seligman, 1996).

1.2.3.3.2.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se considera como una parte de la validación del modelo (De Wit y Penning de Vries, 1982; Penning de Vries, 1983; Whisler *et al.* 1986; Quintana *et al.* 1997). Estudia el efecto de las variaciones de las entradas en las salidas del modelo (Quintana *et al.* 1997).

Este análisis se realiza aumentando o disminuyendo el valor de una entrada del modelo en un intervalo razonable, manteniendo el resto de entradas constantes, y comparando el signo y forma de la salida con el esperado o conocido (De Wit y Penning de Vries, 1982; Penning de Vries, 1983; Whisler *et al.*, 1986). El proceso debe repetirse para cada una de las entradas o grupos de entradas que se consideren de interés en cada caso.

El análisis de sensibilidad aporta información adicional de interés sobre el comportamiento del modelo ante los cambios de una determinada entrada. Sirve como referencia para estimar a priori la magnitud de las posibles modificaciones a introducir en la adaptación de un modelo a unas nuevas condiciones (Fernández-Rodríguez y López-Bellido, 1993b).

1.2.3.4 Diferencia entre valores observados y calculados

Un modelo universal es capaz de predecir con gran fiabilidad el comportamiento del sistema que representa. Una consecuencia de esta fiabilidad es la similitud entre el valor calculado por el modelo y el observado en el sistema real.

Cuando se trabaja con sistemas complejos, la elaboración de un modelo universal es una tarea prácticamente imposible, como ya se ha visto anteriormente. En este caso, la modelización implica un proceso de simplificación, que da lugar a un modelo con un nivel de complejidad inferior al del sistema que representa.

Los criterios de simplificación y sus efectos sobre las características del modelo se han discutido en el apartado 1.2.3.2. La consecuencia directa de ello es que la aplicación de los modelos está limitada por las hipótesis del modelo. Estas hipótesis posibilitan la propia construcción del modelo, que son consecuencia de las limitaciones a la universalidad de los modelos (1.2.3.3.1).

El testado del modelo, como se ha discutido en el apartado 1.2.3.3.2, proporciona la herramienta necesaria para calcular los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo, para su ajuste a un entorno determinado, para estudiar su aplicabilidad en un nuevo entorno y para efectuar, si procede, los ajustes necesarios para que el modelo reproduzca adecuadamente el funcionamiento del sistema en el nuevo entorno.

Una vez realizados los ajustes oportunos, la aplicabilidad del modelo está determinada por la diferencia entre el comportamiento del modelo y el del sistema real. El modelo será

aplicable cuando esta diferencia sea menor que la fijada previamente como asumible. Si el modelo trabaja con variables cuantitativas, la diferencia entre el comportamiento del modelo y del sistema que representa también se puede expresar de forma cuantitativa.

Baker y Curry (1976) definen el error de un modelo como la diferencia entre el valor simulado por el modelo y el valor verdadero, entendiendo como tal el correspondiente al sistema real.

1.2.3.4.1 *Causas de la diferencia*

Las diferencias entre los valores obtenidos por el modelo y los observados en el sistema real son consecuencia, por una parte, de la propia estructura del modelo, de los criterios seguidos para la simplificación y de las hipótesis que se derivan de ellos. Por otra parte, de los errores experimentales inevitables en la toma de datos del sistema real.

1.2.3.4.1.1 Estructura del modelo

1.2.3.4.1.1.1 *Elementos del sistema no considerados en el modelo*

El número de variables que se pueden incluir en un modelo es limitado. De Wit y Penning de Vries (1982) consideran que modelos con 100 variables son ya muy grandes. Estos autores señalan que estos modelos pueden ser sencillos en comparación con el sistema representado.

Cuando se presentan estos casos, el modelo no considera algunos de los elementos del sistema, y por lo tanto no es sensible a las variaciones de los mismos. Las variaciones en los valores de estos elementos provocarán diferencias en la respuesta del sistema real que el modelo no podrá reflejar, presentándose diferencias entre los valores observado y los calculados por el modelo.

La magnitud del error del modelo debido a esta causa dependerá de la incidencia en la respuesta del sistema del conjunto de los elementos no considerados en dicho modelo.

1.2.3.4.1.1.2 *Intervalos de validez de las variables*

Los modelos son una representación parcial del sistema cuyo comportamiento puede predecir aceptablemente dentro de las condiciones en que han sido experimentados (1.2.3.2.4.1.1). Este condicionante es muy estricto en el caso de los modelos experimentales, pero conforme aumenta la componente mecanicista del modelo la aplicación del mismo se puede extender a condiciones en las que no ha sido experimentado (1.2.3.2.4.1.2). Aún en estos casos, algunos autores, como De Wit y Penning de Vries (1982), consideran que los modelos en biología son tan rudimentarios que es necesario probar su utilidad.

Las mencionadas condiciones en las que se ha experimentado el modelo constituyen diferentes escenarios de aplicación del mismo. Dado que el escenario es el resultado de la relación entre sistema y entorno, se deben considerar tanto los intervalos relativos a las variables del sistema como los relativos a las variables del entorno, y, en consecuencia, tanto las variables consideradas en el modelo como las no incluidas en el mismo.

a) *Variables consideradas en el modelo*

Las variables consideradas en el modelo varían dentro de unos intervalos determinados durante el proceso experimental. Cuando la modelización de una determinada variable del sistema se hace con criterios mecanicistas, el modelo puede considerarse válido para cualquier valor de esta variable. Si, por el contrario, se han empleado criterios experimentales, como ajustes estadísticos entre las diferentes variables, el modelo tiene plena validez dentro de los intervalos, pero fuera de ellos el modelo puede dar lugar a predicciones absurdas (López, 1998).

b) *Variables no consideradas en el modelo.*

También deben tenerse en cuenta los intervalos de variación de las variables no consideradas en el modelo. Durante los diferentes trabajos experimentales realizados para desarrollar y validar el modelo, estas variables varían dentro de determinados intervalos.

Cuando una variable no considerada en el modelo toma un valor distanciado del intervalo considerado anteriormente, el modelo sigue siendo insensible a esta variación y sigue proporcionando el mismo valor de salida. El sistema, por el contrario, sigue siendo sensible a esta variación y la salida varía en consecuencia. Cuando la diferencia entre el valor ‘constante’ proporcionado por el modelo y el valor ‘variable’ proporcionado por el sistema es inadmisiblemente, el modelo no se puede aplicar.

Esto explica que los modelos de cultivo desarrollados y validados en unas condiciones climáticas determinadas, fallen cuando se aplican en condiciones climáticas diferentes. Sinclair y Seligman (1996) señalan que cada nueva estación o nueva localización tienen como consecuencia cambios que no fueron previstos en el modelo original; los modelos fallan cuando se aplican en latitudes distintas a las que fueron desarrollados, incluso después de haber pasado por un proceso de calibrado a las nuevas condiciones. Quintana *et al.* (1997) señalan que los cambios del entorno que pueden afectar a la dinámica del medio pueden conducir a diferencias notables entre las predicciones que se efectúan y la evolución real de un emplazamiento.

1.2.3.4.1.1.3 *Procedimiento de cálculo*

Baker y Curry (1976) incluyen el propio proceso de cálculo como una fuente de error. Los métodos numéricos proporcionan soluciones utilizables reemplazando problemas complejos por otros más simples, que proporcionan soluciones aproximadas a los problemas originales.

La incidencia de este error se debe relativizar. La capacidad de cálculo de los ordenadores actuales no tienen nada que ver con los medios disponibles en 1976. Las herramientas de cálculo disponibles, junto con la velocidad de cálculo, permiten disminuir el error de cálculo hasta límites muy bajos, empleando para ello tiempos razonables.

1.2.3.4.1.2 *Errores experimentales*

El desarrollo de un modelo, y su validación, se basa en gran medida en datos obtenidos experimentalmente del sistema real. Algunos usos del modelo requieren la utilización de datos tomados del sistema real. Todo proceso de obtención de datos está afectado por los errores experimentales y por lo tanto, éstos afectan tanto a la construcción del modelo como a su uso (Baker y Curry, 1976).

1.2.3.4.1.2.1 Errores experimentales en la construcción y evaluación del modelo

La construcción y validación de un modelo requiere la disponibilidad de datos experimentales. La obtención de estos datos puede presentar distintos grados de complejidad, que puede ir desde la simplicidad de las medidas directas hasta la necesidad de realizar trabajos experimentales con un elevado grado de complejidad. En ocasiones, es necesario disponer de valores de variables que no pueden medirse directamente, por lo que es necesario hacer estimaciones por tanteo (Sinclair y Seligman, 1996).

Las dificultades para obtener estos valores inciden en la magnitud del error que puede afectar al valor medido. Estos errores se combinan y propagan a través del modelo (Sinclair y Seligman, 1996), dando lugar a unas incertidumbres que pueden ocasionar diferencias importantes entre las predicciones del modelo y la evolución del sistema real (Quintana *et al.*, 1997).

La importancia de estos errores radica en el hecho de que afectan a todas las predicciones que se hagan con el modelo. El testado del modelo permite evaluar estas diferencias y, en su caso, corregir los coeficientes del modelo para reducirlas a niveles aceptables. Los datos experimentales empleados en la evaluación también están afectados por los correspondientes errores experimentales (Sinclair y Seligman, 1996). Pero permiten ajustar los parámetros del modelo para obtener una simulación del sistema con un margen de error conocido en el entorno en el que se ha evaluado dicho modelo.

1.2.3.4.1.2.2 Errores experimentales en la utilización del modelo

Algunos usos de los modelos requieren la utilización de datos de entrada obtenidos experimentalmente. Es el caso, por ejemplo, de la predicción del comportamiento a partir del estado actual, sea del cultivo, de los nutrientes y estado hídrico del suelo o sustrato, de las condiciones climatológicas, de las condiciones actuales de humedad y temperatura de invernadero, etc. Estos datos experimentales también están afectados por los errores experimentales.

A diferencia de los errores considerados en el apartado anterior, estos solo afectan a las predicciones concretas en las que se emplean los datos. Sin embargo, es importante tener en cuenta la incidencia de estos errores y su estudio mediante el análisis de sensibilidad. Este tipo de análisis aporta información, entre otras, sobre la relación entre el incremento de la variable de entrada y el incremento de la variable de salida. De esta forma, una vez fijada la precisión que se requiere en la variable de salida, se puede obtener la precisión con que se debe medir la variable de entrada, es decir, la precisión exigida para los trabajos experimentales.

1.2.3.5 Factores limitantes a considerar en la aplicación de modelos

El modelo se ha definido como una representación simplificada de un sistema (1.2.3.1). Como consecuencia de esta simplificación, la capacidad del modelo para representar el sistema es limitada (1.2.3.3). Se pierde el carácter universal (1.2.3.3.1) y es necesario testar o probar el modelo para evaluar su aplicación en unos escenarios determinados (1.2.3.3.2).

La pérdida de universalidad es consecuencia directa de la simplificación que se consigue sacando del modelo variables que intervienen en el sistema y/o limitando los intervalos de variación de las variables, tanto de las que intervienen en el modelo como de las no consideradas en el mismo.

La necesidad de testar un modelo viene dada por la necesidad de evaluar las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los valores observados en el sistema (1.2.3.4). Estas diferencias son consecuencia, por una parte, de los criterios de simplificación empleados y, por otra, de los errores de medida inherentes a todo trabajo experimental (1.2.3.4.1).

En consecuencia, los factores que limitan la aplicación de los modelos de cultivo los podemos clasificar en tres grandes grupos:

1. Incidencia de factores del sistema no considerados como variables en el modelo: La incidencia en la respuesta del sistema de factores no considerados como variables en el modelo limita su aplicación.
2. Intervalos de validez de las variables: La aplicación de un modelo determinado está limitada por los intervalos de variación, durante el proceso experimental, de todos los factores que inciden en el resultado final, tanto los que se han incluido en el modelo como variables como los que han quedado fuera del mismo.
3. Errores de medida: La fiabilidad de los valores calculados aplicando el modelo está limitada por la fiabilidad de las medidas de las variables independientes del modelo.

1.2.3.5.1 Factor limitante 1: Factores del sistema no considerados como variables en el modelo

El escenario de aplicación del modelo determina la facilidad o dificultad para medir las distintas variables del sistema y, en consecuencia, la conveniencia o no de incluirlas en el modelo (1.2.3.2.2). Las posibilidades de medir una variable determinada están condicionadas por la complejidad del sistema estudiado (1.2.3.2.2.2), que condiciona la disponibilidad de datos.

Los objetivos del modelo marcados por el modelizador son un aspecto fundamental del proceso de modelización (1.2.3.2.2.3). El modelo debe incluir aquellas variables que tienen un mayor efecto en el comportamiento del sistema en relación con el objetivo marcado, y omitir aquellas otras que no tienen efecto material en la respuesta que buscamos (1.2.3.2.2.3). Teniendo en cuenta el uso que se va a dar al modelo, se puede obtener una considerable simplificación limitando las fronteras del modelo y centrándose en los aspectos de mayor interés.

Estos condicionantes tienen como consecuencia la salida del modelo de variables que representan a distintos elementos, que actúan en el sistema. Estos elementos del sistema no considerados en el modelo son una de las causas de la diferencia entre los valores obtenidos por el modelo y los observados en el sistema (1.2.3.4.1.1.1).

En relación con los factores considerados en el modelo y los modelos a desarrollar o a aplicar, se pueden hacer dos planteamientos:

- ¿Qué variables independientes deben de considerarse en el modelo para estudiar un determinado aspecto del sistema?
- ¿Qué aspectos del sistema se pueden estudiar con unas determinadas variables que podemos medir?

Si se pretende hacer estudios sobre fertilización es obvio que debe de disponerse de los análisis químicos del suelo o sustrato, sin los cuales no podría estudiarse adecuadamente este aspecto. Sin embargo, para el estudio de las condiciones de estrés por falta de agua o de aire, puede prescindirse de los análisis mencionados, pero son necesarios los análisis de tipo físico.

Las posibilidades de medición de variables son distintas, por ejemplo, en campo y en laboratorio. Esto condiciona los modelos que se pueden construir y utilizar en uno y otro caso.

1.2.3.5.2 *Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo*

El escenario de desarrollo y aplicación de un modelo limita, implícita o explícitamente, los intervalos de variación de unas determinadas variables del sistema y del entorno (1.2.3.2.1). Los intervalos de validez son de aplicación tanto a las variables consideradas en el modelo como a las que han quedado fuera de él (1.2.3.4.1.1.2)

La aplicación de los modelos de cultivo se limita a unos determinados intervalos de todos los factores de producción que inciden en la respuesta del cultivo. El motivo de esta limitación puede ser doble. Por una parte, el origen puede estar en los intervalos experimentales de las variables considerados en el desarrollo del modelo. Por otra parte, la obtención de un modelo simplificado a partir de otro más genérico, puede incluir la limitación de intervalos de algunas variables. De esta forma, se puede obtener una simplificación importante del modelo a costa de restringir su ámbito de aplicación.

Sinclair y Seligman (1996) citan varios ejemplos de los problemas que se presentan cuando los modelos de cultivo obtenidos en unas determinadas condiciones, se aplican en lugares o estaciones climáticas diferentes a aquellas en las que se ha desarrollado el modelo. Los intervalos de variación de los factores de producción que intervienen en el resultado del cultivo, considerados o no en el modelo, varían considerablemente de unas zonas de cultivos a otras, y entre las diferentes estaciones climáticas. Si un modelo de cultivo se desarrolla a partir de trabajos experimentales desarrollados en clima templado, su aplicación en una clima subtropical proporcionará respuestas del cultivo que poco o nada tendrán que ver con la respuesta real en estas condiciones. Las diferencias entre el valor calculado por el modelo y la respuesta real pueden explicarse por las grandes diferencias entre las condiciones climáticas entre las dos zonas consideradas, que se reflejan en los diferentes intervalos de variación de los parámetros climáticos.

1.2.3.5.3 *Factor limitante 3: Errores de medida*

Para obtener los modelos de cultivo experimentales es necesario medir los factores de producción y la respuesta del cultivo. Para la aplicación de los modelos de cultivo, sean experimentales o mecanicistas, es necesario medir los valores que toman los factores de producción que intervienen en el modelo como variables independientes.

Kemphorne y Allmaras (1986) definen la medida como la cuantificación de un atributo del material sometido a investigación, dirigida a contestar una pregunta específica en un experimento.

Toda medición está afectada por los errores de medida (Willard *et al.*, 1965; Kemphorne y Allmaras, 1986), que se pueden clasificar siguiendo distintos criterios.

Willard *et al.* (1965) se basan en la finalidad de la medida, *establecer cuantitativamente ciertos hechos científicos [... y expresarlo...] numéricamente en unidades apropiadas y con un número de cifras significativas fijado previamente teniendo en cuenta los errores existentes*. En base a este objetivo, los autores definen la exactitud y la precisión de las mediciones efectuadas.

La exactitud se define como la aproximación de una medición o serie de mediciones semejantes al valor verdadero de la magnitud medida (Willard *et al.*, 1965). La precisión se define como el grado de aproximación de un número de resultados similares o repetidos a un valor común en una serie de medidas (Willard *et al.*, 1965).

Baker y Curry (1976) hacen una adaptación de estas definiciones al caso de modelos y definen la exactitud como la magnitud de la diferencia entre el valor simulado por el modelo y el valor verdadero de una larga serie de pruebas en condiciones diversas. La precisión es la magnitud en la que el modelo repite sus resultados cuando se hacen simulaciones repetidas en el mismo sistema y condiciones.

Baker y Curry consideran que lo que define el error de un modelo es su exactitud y no su precisión, puesto que ésta es debida a factores internos del ordenador. Esta afirmación es coherente con la definición de precisión que hacen los mismos autores. Es lógico que si en un proceso de cálculo los valores de entrada no varían, tampoco lo harán los valores de salida.

Cuando los valores de entrada se obtienen a partir de situaciones hipotéticas, con datos fijados basándose en unos determinados criterios, este razonamiento es totalmente válido. Si por el contrario, se pretende estudiar la evolución a partir de una determinada situación real del sistema, es necesario obtener unas medidas afectadas por los correspondientes errores experimentales. La obtención de medidas repetidas da lugar a distintos valores de entrada en el modelo, que darán lugar a distintas salidas correspondientes a una única situación de partida. En este caso, la precisión de las salidas dependerá no solo de las características del equipo informático, sino también de la precisión de las entradas y de la estructura del modelo.

Desde otro punto de vista, Kempthorne y Allmaras (1986) inciden en los aspectos relacionados con la metodología aplicada para obtener el valor medido y clasifican los errores por su origen experimental.

El error puro de medida se define como la variabilidad entre los resultados de un proceso de medida aplicado a un mismo objeto. El error puro de muestreo se define como la variabilidad entre los resultados obtenidos para distintas muestras obtenidas de un lote de material heterogéneo. El error de una observación en una submuestra incluye los dos errores, error de medida y error de muestreo (Kempthorne y Allmaras, 1986).

La magnitud de los errores cometidos en las medidas realizadas para calcular un modelo experimental (1.2.3.4.1.2.1), inciden en la exactitud y precisión del modelo obtenido y, por tanto, en la exactitud y precisión de los valores obtenidos como respuesta del cultivo, siempre que se aplique el modelo.

La magnitud del error cometido en la medida de un factor de producción para aplicar el modelo (1.2.3.4.1.2.2) incide en la exactitud y precisión del valor obtenido como respuesta del cultivo en la aplicación concreta, pero no en el resto.

La utilidad del modelo será tanto mayor cuanto más fiables sean las medidas tomadas y, por lo tanto, cuanto menores sean los errores de medida.

1.3 La caracterización física de sustratos como modelo de cultivo

1.3.1 Introducción

El estudio de las propiedades físicas del sustrato y la interpretación de los resultados analíticos obtenidos, se plantea como un modelo de comportamiento. En un modelo, las variables de entrada permiten predecir el comportamiento del sistema. En la caracterización

física de los sustratos, los valores obtenidos en el laboratorio permiten establecer los criterios de manejo del sustrato para obtener el resultado satisfactorio en el desarrollo del cultivo.

El modelo se ha definido como una representación simplificada de un sistema (1.2.3.1). La simplificación constituye el aspecto central del proceso de modelización (1.2.3.1). Los criterios a considerar en esta simplificación son (1.2.3.2.2): el sistema a modelizar, la disponibilidad de datos, el objetivo del modelo, y el uso que se le va a dar. Deben tenerse en cuenta, además, los escenarios de desarrollo y aplicación del modelo (1.2.3.2.1).

- a) El sistema a modelizar es el propio cultivo, cuya evolución está relacionada con los factores de producción, como suministro de agua y nutrientes, factores ambientales, etc.
- b) Conocimiento del sistema: Como ya se ha visto en 1.2.3.2.2, este criterio encierra una cierta subjetividad, puesto que relaciona al observador (elemento subjetivo) con el sistema (elemento objetivo).
- c) La disponibilidad de datos se refiere no solo a la cantidad, sino también a la calidad (1.2.3.2.2.2). Los errores experimentales de medida de las variables físicas consideradas pueden llegar a actuar como factor limitante de la utilidad de la caracterización física.
- d) El objetivo del modelo es predecir el comportamiento del sustrato respecto a la disponibilidad de aire y de agua para el sistema radicular de la planta. Este objetivo limita la aplicación del modelo a los aspectos físicos del sustrato relacionados con el suministro de aire y agua al sistema radicular de la planta.
- e) El uso que se va a dar al modelo es la obtención de criterios para la elección y manejo del sustrato, y manejo del agua de riego, que permitan mantener las disponibilidades de aire y agua en el entorno radicular dentro de unos márgenes previamente fijados, adecuados a las necesidades de la planta cultivada.
- f) Escenarios de aplicación del modelo: Cuando se desarrolla un modelo es necesario definir los escenarios en los que está prevista su utilización (1.2.3.2.2). En el trabajo experimental se van a emplear sustratos de características muy diversas. La finalidad de esta diversidad es ampliar los escenarios de aplicación de la metodología de medida y del modelo de porosidad a desarrollar.

1.3.2 Relación entre metodología de laboratorio e interpretación de los resultados

La caracterización física de sustratos de cultivo estudia las metodologías de laboratorio necesarias para medir los parámetros físicos del sustrato, y su relación con los aspectos del cultivo relacionados con ellos, principalmente el riego.

De esta definición se deducen los dos componentes importantes de la caracterización física:

- Aplicación de modelos de cultivo para relacionar las propiedades físicas del sustrato con determinados aspectos del cultivo, principalmente el manejo del riego
- Aplicación de metodologías de laboratorio para determinar los parámetros que definen las propiedades físicas del sustrato y que intervienen como variables independientes en el modelo.

Los modelos que relacionan los datos analíticos de laboratorio con la respuesta del cultivo proporcionan los criterios de interpretación de los valores obtenidos en laboratorio, aplicando las metodologías desarrolladas al efecto.

1.3.2.1 Modelo de cultivo

El desarrollo de un cultivo es un sistema con un elevado grado de complejidad. Por ello, los modelos de cultivo implican, necesariamente, un elevado grado de simplificación.

El modelo a plantear para la caracterización física de los sustratos tiene como variables independientes los parámetros físicos medidos en laboratorio que definen las propiedades del sustrato, y como variable dependiente la respuesta del cultivo.

El objetivo de la caracterización física es predecir el comportamiento del sustrato respecto a la disponibilidad de aire y agua para el sistema radicular de la planta (1.3.1d). Esto condiciona las variables a considerar en el modelo, que se restringen a las relacionadas con la física del entorno radicular.

El modelo a plantear encierra en realidad dos submodelos. La respuesta de la planta no depende directamente de las propiedades físicas de los sustratos, de los nutrientes aportados, de los compuestos con actividad biológica y los microorganismos presentes en el sustrato, o de los sistema de calefacción, refrigeración o humidificación empleados.

La respuesta del cultivo depende de las condiciones físicas, químicas y biológicas del entorno radicular, de las condiciones ambientales, del material vegetal utilizado, etc. Las propiedades físicas del sustrato, la aportación de nutrientes, y el resto de los elementos mencionados en el párrafo anterior, proporcionan los medios para conseguir las condiciones físicas, químicas y biológicas en el entorno radicular, y las condiciones ambientales de humedad y temperatura adecuadas para el desarrollo del cultivo.

Por lo tanto, el modelo de cultivo a plantear debe relacionar las variables medidas en el laboratorio con la respuesta del cultivo, y constar de dos submodelos:

- Un modelo en el que las variables independientes son las propiedades físicas del sustrato y el manejo del agua de riego. Las variables dependientes, en este primer modelo, son las condiciones físicas creadas en el entorno radicular.
- Un segundo modelo que es un modelo de cultivo en sentido estricto. En él, las variables independientes son, entre otras, las condiciones físicas del entorno radicular obtenidas del modelo anterior. La variable dependiente es la respuesta del cultivo.

El primer modelo nos permite relacionar propiedades físicas del sustrato y manejo del agua de riego con las condiciones físicas del entorno radicular. Esto nos permite establecer los criterios para mantener la disponibilidad de aire y agua dentro de unos intervalos de variación adecuados para el desarrollo de la planta. Para la utilización eficaz de este modelo, es necesario conocer las condiciones físicas del entorno radicular más adecuadas para el cultivo concreto que se va a producir.

Cuando el resto de las variables independientes que intervienen en el segundo modelo (condiciones químicas y biológicas del entorno radicular, y condiciones ambientales) permanecen constantes, o dentro de unos intervalos de variación adecuados para el desarrollo del cultivo (no limitantes), puede establecerse un modelo conjunto, en el que las variables

independientes se corresponden con las del primer modelo, y la variable dependiente corresponde a la respuesta de la planta.

1.3.2 Metodología de laboratorio

La metodología de laboratorio proporciona los valores de las variables independientes de los modelos a emplear. Un cambio de metodología puede suponer un cambio en el valor de la variable medida. La sustitución de una variable independiente por otra implica un cambio de modelo y, por lo tanto, un cambio en los criterios de interpretación de las variables analíticas obtenidas en el laboratorio.

Como ejemplo, podemos citar el empleo de diferentes métodos para la medida de la densidad real de sustratos, incineración, picnometría de agua o de alcohol, etc. Los valores obtenidos son función del método de medida empleado. Puesto que los datos obtenidos son diferentes, la interpretación también debe de serlo. En este caso concreto, el estudio detallado de las diferencias metodológicas y su incidencia en el parámetro medido proporciona los criterios para la interpretación correcta de las diferencias observadas.

La relación entre el valor de una variable y la respuesta del cultivo depende pues del método empleado para medir la variable. A cada metodología de análisis le corresponde un modelo propio y, en consecuencia, unos criterios diferentes para la interpretación de los resultados analíticos. Por lo tanto, el método analítico y la interpretación de los resultados se deben considerar siempre de forma conjunta. La caracterización física debe de incluir, por tanto, ambos aspectos.

1.3.3 *Metodologías de caracterización física de sustratos de cultivo*

Las metodologías de laboratorio que se pueden aplicar para estudiar las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son muy diversas. Los laboratorios que trabajan habitualmente con sustratos utilizan, en general, metodologías descritas específicamente para estos materiales. Sin embargo, no es extraño encontrar en la bibliografía trabajos en los que las propiedades físicas de los sustratos se estudian aplicando metodologías de laboratorio desarrolladas para suelos. El estudio de las propiedades físicas de los suelos agrícolas es anterior al de los sustratos y está, sin duda, mucho más avanzado; por ello, es fuente continua de nuevas adaptaciones metodológicas, que se aplican a sustratos.

La elección de la metodología a emplear en cada caso depende fundamentalmente de dos factores:

- **Objetivos del trabajo:** Relación entre los objetivos del trabajo planteados y las características de la metodología.
- **Medios disponibles:** Disponibilidad de los medios necesarios para la aplicación de una metodología determinada

El estudio de los parámetros físicos más usuales puede hacerse con las metodologías ampliamente utilizadas en la bibliografía. Si, por el contrario, se pretende estudiar aspectos específicos de un sustrato, puede ser necesario introducir variaciones en las mencionadas metodologías o desarrollar otras nuevas, que permitan la medida de un nuevo parámetro, o medidas más exactas y precisas que las obtenidas por las metodologías usuales. Los objetivos planteados en un determinado trabajo, con unos parámetros a medir y una exactitud y precisión determinadas, pueden limitar las metodologías aplicables a cada caso concreto.

Los medios disponibles, en un momento dado, para la caracterización física de los sustratos de cultivo pueden condicionar la metodología a aplicar. Si se dispone del equipamiento necesario para una determinada metodología de caracterización física de suelos o sustratos, la adquisición o no de un nuevo equipamiento vendrá determinada por la relación entre la posibilidad de acceder a un nuevo equipo y la información obtenida a cambio. Las diferentes disponibilidades de equipos pueden dar lugar a diferentes estrategias de medida, o de adquisición de equipos, para cubrir un mismo objetivo.

La aplicación de los dos criterios mencionados en los diferentes trabajos de caracterización que se han llevado a cabo a lo largo del tiempo, ha dado lugar a un elevado número de variantes metodológicas, alguna de las cuales ha evolucionado y ha adquirido carta de naturaleza propia como metodología para el estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo (De Boodt *et al.*, 1974b; Goh y Maas, 1980; Fonteno *et al.*, 1981; Joyal *et al.*, 1989; Gabriëls y Verdonck, 1991).

El resultado final se traduce en una diversidad de metodologías de caracterización física, que presenta la ventaja de poder elegir la metodología más adecuada para el fin que se pretende en cada caso. Podemos encontrar metodologías muy simples, para trabajos básicos de caracterización, y metodologías más complejas, para trabajos que requieren un nivel elevado de información.

El inconveniente más grave de esta diversidad es la dificultad para comparar los resultados obtenidos con diferentes metodologías. Este es un problema de gran magnitud y ha sido el origen de diferentes trabajos de comparación de resultados entre diversos métodos y entre distintos laboratorios (Schmilewski y Günther, 1988; Gabriëls *et al.*, 1991). En estos estudios se ha observado una gran variabilidad en los resultados y, con objeto de poder comparar los resultados obtenidos en diferentes laboratorios, el Grupo de Trabajo de Sustratos de la International Society for Horticultural Science (ISHS) propuso una metodología de referencia (Gabriëls y Verdonck, 1991).

1.3.4 Complejidad/simplicidad metodológica

La definición dada para la caracterización física (1.3.2) incluye tres conceptos que pueden tener distinto grado de complejidad, riego, modelo de cultivo y metodología de medida.

- El riego, como aspecto del cultivo, constituye, en último término, el sistema a representar o estudiar. Es un sistema complejo en el que intervienen un número elevado de factores como propiedades físicas del sustrato, condiciones climáticas, sistema de riego y equipamiento disponible, etc.
- El modelo de cultivo empleado en la caracterización física considera únicamente las propiedades físicas del sustrato, por lo que es más sencillo que el riego como sistema representado. Se pueden emplear diferentes modelos para explicar aspectos parciales del riego a partir de las propiedades físicas del sustrato. El grado de complejidad varía de unos modelos a otros y es función del número de variables independientes consideradas en el modelo y de las relaciones entre ellas.
- La metodología de laboratorio empleada para medir los parámetros que intervienen en los modelos, como variables independientes, presenta distintos grados de complejidad, que aumenta con el número de variables a medir y con la fiabilidad exigida a las medidas. Como contrapartida, los modelos que se pueden elaborar son más complejos y precisos, y, en consecuencia, la información que se puede obtener es superior. El objetivo perseguido en

cada caso marcará la conveniencia de emplear una metodología sencilla y rápida, o bien otra más compleja que aporte un mayor nivel de información.

Entre las metodologías descritas para sustratos podemos encontrar una amplia gama en cuanto a complejidad e información obtenida. La valoración de las mismas no debe hacerse en términos absolutos, sino que debe tenerse en cuenta el objetivo perseguido en cada caso. Por ejemplo, comparamos dos metodologías hipotéticas, una metodología A, que proporciona una gran cantidad de información útil pero que, precisamente por ello, exige una cantidad importante de medios y tiene un alto grado de complejidad, con otra metodología B, que proporciona una menor información que la anterior, pero con una reducción considerable de medios necesarios siendo además mucho más sencilla. El estudio de aspectos concretos de un sustrato para conocer su utilidad puede aconsejar aplicar la metodología A. Con ello, se dispondrá de mayor información, y en consecuencia, se van a explotar mejor las posibilidades del material en estudio y, aunque los medios necesarios por unidad de análisis sean comparativamente altos, los medios totales necesarios no son excesivos, puesto que se aplica a un número reducido de muestras. Si por el contrario se trata de un laboratorio dedicado al análisis de sustratos para establecer criterios de riego, la metodología B permite, con los mismos medios disponibles, analizar una mayor cantidad de muestras que con la metodología A. En este caso, aunque la información individualizada sea menor, la agilidad que proporciona una metodología sencilla permite disponer de información relativa a una cantidad de muestras considerablemente mayor y obtener, en consecuencia, un mayor rendimiento económico y analítico de los medios disponibles.

1.3.5 Incidencia de los factores limitantes de los modelos en las metodologías de caracterización física.

La aplicación de los modelos de caracterización física, como un caso particular de los modelos de cultivo, está limitada por los factores limitantes de la aplicación de modelos (1.2.3.5).

1.3.5.1 Factor limitante 1: Variables no consideradas en la metodología

Los factores de producción no considerados en los modelos equivalen, en el caso de las metodologías de caracterización física, a los parámetros físicos o variables no medidas. Los parámetros físicos medidos con cada una de las metodologías, condicionan su aplicación. Desde este punto de vista, podemos clasificar los parámetros a medir y, por tanto, las metodologías de caracterización, en tres grandes grupos:

1. Parámetros básicos: Densidades aparente, real o de partícula, porosidad total, etc.
2. Reparto de fases en condiciones de equilibrio estático
3. Dinámica del agua

1.3.5.1.1 Parámetros básicos

Los parámetros que constituyen este grupo tienen una utilidad muy limitada para la aplicación a cultivos. Su utilidad es mayor para otros fines como, por ejemplo, el transporte y las relaciones comerciales. Su importancia, desde el punto de vista de caracterización física, radica en que son necesarios para calcular el reparto de fases.

Los métodos empleados habitualmente para su determinación, varían de unas metodologías a otras. Los valores obtenidos con distintos métodos no siempre son comparables, por lo que sólo deben de considerarse en el conjunto de la metodología y nunca de forma aislada.

1.3.5.1.2 *Reparto de fases en condiciones de equilibrio estático.*

La información que aporta el estudio del reparto de fases en condiciones de equilibrio estático, es de gran utilidad para conocer las condiciones hídricas y de aireación en las que se encuentra el sistema radicular de la planta cultivada en un determinado sustrato. Con ello, se pueden obtener los criterios a tener en cuenta en la aplicación de riegos, para proporcionar al sistema radicular de la planta unas condiciones adecuadas para su desarrollo.

Entre las metodologías de caracterización descritas, unas estudian la variación del reparto de fases en intervalos de potencial matricial suficientemente amplios (De Boodt *et al.*, 1974b; Gabriëls y Verdonck, 1991), mientras que otras miden el reparto de fases en una condiciones muy concretas (British Standard Intitution, 1990). La información que aportan las primeras es, al menos en principio, más completa que la de las últimas.

1.3.5.1.3 *Dinámica del agua*

El estudio de los movimientos del agua dentro del sustrato requiere la medida de las variables relacionadas con el movimiento del agua en el medio poroso, como la difusividad y la conductividad hidráulica, tanto en condiciones de saturación como de no saturación.

La medida de estas variables en los suelos agrícolas está ampliamente descrita en la bibliografía. La conductividad hidráulica de los suelos en condiciones de no saturación puede medirse experimentalmente, aplicando las metodologías descritas al efecto (Green *et al.*, 1986; Klute y Dirksen, 1986; Moozegar y Warrick, 1986), o bien se puede calcular a partir de la conductividad hidráulica saturada y la curva de retención de agua, aplicando los modelos desarrollados al efecto (Van Genuchten, 1980; Van Genuchten y Nielsen, 1985; Mualen, 1986). La aplicación de las metodologías experimentales y de los modelos de cálculo para medir o evaluar la conductividad hidráulica de los sustratos presenta numerosos dificultades, por las diferentes características del espacio poroso de suelos y sustratos.

1.3.5.2 Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo

La gran variación de las características físicas entre los diferentes materiales proporciona una gran transcendencia a este criterio, como factor limitante de la validez de las metodologías de caracterización física. La aplicación indiscriminada de una determinada metodología puede dar lugar a errores muy importantes, por la aplicación de la misma fuera de su intervalo de validación. En este aspecto, pueden diferenciarse dos situaciones especialmente importantes, la adaptación a sustratos de cultivo de las metodologías desarrolladas para suelos y la aplicación de una metodología desarrollada para un grupo de sustratos de propiedades diferentes a las del sustrato problema.

1.3.5.2.1 *Adaptación a sustratos de las metodologías desarrolladas para suelos*

Las características del espacio poroso de los materiales empleados como sustratos de cultivo son muy diferentes de las características del espacio poroso de los suelos, tanto en lo referente al valor total de la porosidad como a la distribución del tamaño de los poros.

El valor total de la porosidad oscila alrededor del 50 % en el caso de los suelos, mientras que en el caso de los sustratos los valores oscilan alrededor del 90 %, pudiendo llegar hasta el 97 % y siendo poco frecuente encontrar valores por debajo del 80 %.

Respecto a la distribución del tamaño de los poros -si se compara el orden de magnitud de los diámetros de poro entre suelos y sustratos- se obtiene una relación del orden de 10 veces mayor en el caso de los sustratos de cultivo, aunque la variabilidad en uno y otro caso es elevada.

Estas importantes diferencias impiden la aplicación directa a los sustratos de cultivo de las metodologías de caracterización física desarrolladas para los suelos agrícolas.

1.3.5.2 Aplicación generalizada de las metodologías desarrolladas para unos sustratos determinados.

La gran variabilidad que presentan los materiales utilizados como sustratos puede limitar la aplicación generalizada incluso de las metodologías de caracterización desarrolladas específicamente para sustratos de cultivo. Pueden utilizarse para este fin materiales fibrosos o granulares, orgánicos o minerales, con porosidad ocluida o sin ella, combinaciones diversas de ellos, etc.

Respecto a la estructura fibrosa o granular del material, pueden aplicarse métodos para determinar la distribución del tamaño de partícula muy eficaces en el caso de materiales granulares, pero poco útiles para los fibrosos. Por otra parte, están descritos los métodos de estimación de la densidad de partícula por vía indirecta (incineración), muy útiles cuando se trata de sustratos con un elevado contenido de materia orgánica y sin porosidad ocluida, pero de dudosa utilidad si no se cumplen estas condiciones. Como último ejemplo, podemos citar la incidencia que la porosidad de accesibilidad condicionada tiene en la medida de las características del espacio poroso. Se entiende por porosidad de accesibilidad condicionada el espacio poroso cuya ocupación por el agua depende del método de saturación empleado. El empleo en los materiales en los que este tipo de porosidad es importante de las metodologías desarrolladas para materiales en los que el porcentaje de porosidad de acceso condicionado es bajo o nulo, puede dar lugar a valores a veces erráticos y de difícil explicación, si no se tiene en cuenta esta circunstancia.

Los países en los que el cultivo en sustrato está más desarrollado, emplean generalmente la turba como sustrato básico. Las metodologías de caracterización física desarrolladas son adecuadas para la turba, que es un material fibroso, con un contenido en materia orgánica muy elevado, y con valores muy bajos o nulos de porosidad ocluida y de accesibilidad condicionada. La aplicación de estas metodologías a otros materiales diferentes, como sustratos minerales (escoria, fibras minerales), de estructura más o menos granular o poliédrica (escoria, cortezas, restos vegetales), con una proporción importante de porosidad ocluida y/o de accesibilidad condicionada (cortezas, restos vegetales), puede plantear problemas importantes de medida, que dan lugar a errores muy importantes.

1.3.5.3 Factor limitante 3: Errores de medida

El valor obtenido por medida directa o indirecta de una magnitud es la suma de diversos procesos deterministas y aleatorios que intervienen durante la medición. La repetición de la medida de una misma magnitud permite evaluar la componente del valor medido debida a los procesos determinista (componente no aleatoria) y la debida a los factores aleatorios (componente aleatoria).

En general, la medida es tanto más fiable cuanto menos sean los factores que intervienen en la misma, y, en cualquier caso, cuanto mejor se conozca la incidencia de los diferentes factores en el proceso de medida.

La medida de una magnitud puede realizarse directamente con un instrumento de medida, por ejemplo la medida de un peso mediante una balanza, una distancia mediante una cinta métrica o escala graduada, la medida de ángulos mediante un transportador de ángulos o un teodolito, o la medida de una intensidad de color mediante un colorímetro.

Los valores de las variables pueden obtenerse también indirectamente, a partir de otros parámetros cuya medición directa sea más sencilla que la de la variable problema. Estas medidas indirectas se obtienen mediante la aplicación de modelos sencillos, que relacionan la variable o variables problema con la variable o variables cuyos valores se obtienen por medición directa. Un ejemplo de la aplicación de modelos para medidas indirectas es la obtención del contenido hídrico del sustrato en un contenedor a partir de la medida del potencial matricial mediante un tensiómetro. Es frecuente y deseable que en el modelo solo intervengan dos variables, una independiente cuyo valor se obtiene por medición directa, y otra dependiente cuyo valor se pretende conocer.

Aplicando el criterio de Willard *et al.* (1965), los errores afectan a la exactitud y a la precisión de los valores obtenidos. Atendiendo al criterio de Kempthorne y Allmaras (1986), el error obtenido tiene dos componentes, error puro de medida y error puro de muestro (1.2.3.5.3).

1.3.5.3.1 *Exactitud y precisión*

Willard *et al.* (1965) contemplan dos componentes del error de medida, la exactitud y la precisión (1.2.3.5.3). En el apartado 1.3.5.3, se ha considerado que el valor medido tiene una componente aleatorio y otra no aleatoria.

La componente no aleatoria es función del valor verdadero de la magnitud y de otros factores que, conocidos o no, inciden siguiendo siempre unas pautas determinadas, por ejemplo la incidencia de la temperatura en la medida de volúmenes con una probeta o de pesos mediante una balanza electrónica.

La componente aleatoria del valor medido es función de los factores aleatorios que intervienen en el proceso de medida y de aquellos factores que aún no siendo aleatorios no se controlan durante el proceso de medida y se comportan como aleatorios. Un ejemplo de factor aleatorio lo constituye la apreciación del operario en la medida de distancias con una cinta métrica. Respecto a los factores no aleatorios que se comportan como tales, puede ponerse como ejemplo la tensión de la cinta métrica durante el proceso de medida. Si la tensión aplicada se controla, actúa como componente no aleatoria, pero si por el contrario no se controla y varía de forma aleatoria, actúa como factor aleatorio e incide en la componente aleatoria de la medida.

1.3.5.3.1.1 *Exactitud*

La exactitud indica la aproximación de una medición o serie de mediciones semejantes al valor verdadero de la magnitud medida. (Willard *et al.*, 1965). Se obtiene por diferencia entre el valor verdadero y el valor medido.

El valor medido es conocido, si el valor verdadero fuera conocido no sería necesario efectuar la medida, pero si no se conoce no puede evaluarse la exactitud de la medida ni conocerse la fiabilidad de la misma. Se deduce una contradicción intrínseca en la evaluación de la exactitud, al menos aparentemente. Esta contradicción deja de serlo si se tiene en cuenta que una medida no es un hecho independiente y aislado del resto de las medidas efectuadas con el mismo método de medida, sino que todas ellas están relacionados porque se llevan a cabo

siguiendo unas determinadas pautas. Si consideramos este concepto, en el conjunto de medidas a realizar pueden incluirse valores de referencia, que permitirán evaluar la exactitud del método de medida.

Considerando los componentes del valor medido (1.3.5.3), la exactitud se corresponde con la diferencia entre el valor verdadero y la componente no aleatoria del valor medido. En este caso, la obtención de medidas repetidas de una misma magnitud es parte integrante del método de medida, puesto que en otro caso no se pueden evaluar las componentes no aleatoria y aleatoria del valor medido.

Cualquiera que sea el concepto considerado, la exactitud de un método de medida puede evaluarse mediante la utilización de valores de referencia, que pueden ser absolutos o relativos. Los valores absolutos son patrones de medida debidamente contrastados, como los patrones de peso, longitud o las soluciones patrón empleadas para el calibrado de los equipos en los análisis químicos.

La aplicación de valores relativos conocidos para evaluar la exactitud de un método se obtiene a partir de modelos conceptuales que, basándose en unas determinadas relaciones, permiten calcular el valor esperado de un parámetro determinado. La diferencia entre el valor calculado y el observado permite evaluar la exactitud del método. Un ejemplo que ilustra este concepto es el levantamiento topográfico mediante itinerarios cerrados. Para determinar las coordenadas de unos puntos del terreno se establece un itinerario con principio y fin en el mismo punto, que incluye en el recorrido a todos los demás. Haciendo estación en cada uno de los puntos del itinerario, se miden ángulos y distancias a los puntos anterior y posterior. Se asignan unas coordenadas reales o ficticias al punto inicial y se calculan las coordenadas de cada punto a partir de las del anterior. De esta forma, las coordenadas obtenidas para el último punto del itinerario deberían de ser exactamente las del punto de partida, puesto que es el mismo. Los errores cometidos en las medidas sucesivas en parte se acumulan y en parte se compensan, dando como resultado final una diferencia entre los valores inicial y final del punto de partida. Esta diferencia permite evaluar la exactitud global del itinerario realizado e introducir los correspondientes factores de corrección de las medidas efectuadas.

1.3.5.3.1.2 Precisión

La precisión se define como el grado de aproximación de un número de resultados similares o repetidos a un valor común en una serie de medidas (Willard *et al.*, 1965). Considerando los componentes del valor medido (1.3.5.3), la precisión mide la componente aleatoria de la medida

Los distintos estimadores de la precisión se obtienen por comparación entre las medidas repetidas, no interviniendo el valor verdadero de la magnitud medida. Los estimadores más empleados son la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación, todos ellos relacionados entre sí. También pueden usarse otros como la suma de cuadrados, el valor medio de las desviaciones, etc.

1.3.5.3.1.3 Incidencia en la metodología de caracterización

El tratamiento de los errores y, en su caso, las estrategias a seguir para su reducción, son distintos en función del tipo de error de que se trate.

El error de exactitud se debe a la incidencia de factores no aleatorios. Para reducirlos es necesario estudiar detalladamente los diferentes pasos de la metodología seguida, revisando los conceptos aplicados, la posible incidencia de errores sistemáticos y calibrando los instrumentos de medida. La exactitud se mejora modificando adecuadamente la metodología seguida y calibrando los instrumentos de medida empleados.

El error de precisión se debe a la incidencia de factores aleatorios. Asumimos la hipótesis de que los valores medidos se distribuyen siguiendo una distribución normal (Kempthorne y Allmaras, 1986). El error de precisión se evalúa mediante los parámetros de dispersión de esta distribución normal, la desviación estándar y los valores derivados de ella. Para mejorar la precisión es necesario reducir el valor de la desviación estándar. La estadística relaciona el tamaño muestral con la desviación estándar de los valores medidos. Desde el punto de vista metodológico, la precisión de las medidas se puede obtener aumentando el tamaño muestral y/o aumentando el número de muestras analizadas.

1.3.5.3.2 *Error de medida y error de muestreo – variabilidad del sustrato*

Kempthorne y Allmaras (1986) analizan los errores desde el punto de vista de la metodología de laboratorio. Para obtener el valor medido, es necesario obtener una o varias muestras, sobre cada una de las cuales se realizan una o varias mediciones. Estos autores contemplan dos tipos de errores: el error de medida y el error de muestreo.

La medición se inicia con la determinación de los puntos en los que se va a realizar la medición o, en el caso de caracterización de sustratos, con el muestreo del material a medir. Posteriormente, se obtienen los valores con los aparatos y metodologías pertinentes. Kempthorne y Allmaras (1986) diferencian los errores debidos a estas dos etapas. El error de muestreo corresponde a la primera fase y el de medida a la segunda.

1.3.5.3.2.1 Error de medida

Kempthorne y Allmaras (1986) definen el error puro de medida como la variabilidad entre los resultados de un proceso de medida aplicado a un mismo objeto (1.2.3.5.3). Este error engloba los errores debidos a todo el proceso de medida, independientemente de que afecten a la componente fija o a la componente aleatoria del valor medido.

Cuando se obtienen medidas repetidas sobre varias muestras, el error de medida corresponde a las diferencias entre las diferentes mediciones realizadas sobre una misma muestra, y entre éstos y el valor verdadero correspondiente a la muestra.

1.3.5.3.2.2 Error de muestreo – variabilidad del sustrato

Kempthorne y Allmaras (1986) definen el error puro de muestreo como la variabilidad entre los resultados obtenidos para distintas muestras obtenidas de un lote de material heterogéneo (1.2.3.5.3).

Cuando se muestrea un lote de material para obtener unas mediciones, el valor de la variable a medir puede tomar valores verdaderos diferentes en las distintas muestras obtenidas. Las muestras obtenidas deben ser representativas del lote muestreado. La variabilidad de los valores verdaderos entre las muestras depende, principalmente, de la homogeneidad del lote muestreado.

Kemphorne y Allmaras (1986) consideran esta variabilidad como un error de muestreo. Visto desde nuestro punto de vista, la variabilidad entre muestras está informando de la heterogeneidad del lote muestreado, en nuestro caso de la heterogeneidad del lote de sustrato. Desde el punto de vista agronómico es muy importante disponer de una evaluación fiable de esta heterogeneidad, puesto que es la causa de la heterogeneidad entre las macetas o sacos de cultivo llenados con el sustrato.

1.3.5.3.2.3 Incidencia en la caracterización de sustratos

El error de medida, obtenido a partir de la variabilidad dentro de muestras, informa sobre la probabilidad de que el valor verdadero de la magnitud medida se encuentre dentro de un determinado intervalo. Los intervalos de confianza se obtienen a partir del valor medio y de la componente de la variabilidad debida a la precisión del método de medida.

La variabilidad del sustrato (error de muestreo), obtenida a partir de la variabilidad entre muestras, informa de la probabilidad de encontrar para la magnitud medida un determinado valor verdadero en una muestra del sustrato. En el caso del cultivo en contenedor, informa de la variabilidad de las propiedades físicas que podemos encontrar entre los distintos contenedores empleando un mismo sustrato. Cuanto mayor sea esta variabilidad, mayores diferencias habrá entre los contenedores y más difícil será aplicar un riego adecuado.

La variabilidad entre muestras depende, además de la heterogeneidad del sustrato, de la técnica de muestreo y del tamaño muestral empleado.

Si la técnica empleada en alguna de las distintas etapas del muestreo no es adecuada, las muestras tomadas pueden no ser representativas e incidir en la variabilidad de las medidas efectuadas, proporcionando una información incorrecta sobre la variabilidad de material.

El tamaño muestral incide asimismo en la variabilidad de las medidas realizadas. Aplicando las leyes estadísticas, puede calcularse la correspondencia entre la variabilidad obtenida con tamaños muestrales diferentes.

En los casos en los que el método de medida permite efectuar varias medidas sobre una misma muestra, la repetición del proceso sobre varias muestras proporciona la información suficiente para evaluar tanto el error de medida como la variabilidad del sustrato o del material sometido a análisis. Si este planteamiento no puede hacerse completo, la información obtenida es incompleta y pueden darse los siguientes casos:

1. Una sola medida sobre una sola muestra: No aporta ninguna información sobre el error de medida ni sobre la variabilidad del material.
2. Varias medidas sobre una sola muestra: La variabilidad observada entre las diferentes medidas efectuadas informa sobre el error de medida. En este caso, no se dispone de información sobre la variabilidad del material.
3. Varias muestras sobre las que se efectúa una única medida por muestra: La variabilidad observada entre las medidas es debida a los efectos acumulados del error de medida y de la variabilidad del material analizado.

En las diferentes metodologías desarrolladas para la medida de parámetros físicos en sustratos de cultivo se aplica el tercer caso considerado, por lo que no se puede discriminar entre la componente de la variabilidad debida al error de medida y la debida a la variabilidad del material analizado. Para poder calcular la componente debida a una y otra causa, es necesario

evaluar una de ellas mediante otro procedimiento, bien sea la precisión del método, bien la variabilidad del material.

La componente de la variabilidad observada debida a la variabilidad del material analizado puede ser muy pequeña en el caso de sustratos muy uniformes o en el caso de sustratos que se pueden homogeneizar adecuadamente. En este caso, puede considerarse que la variabilidad observada corresponde al error de medida. En los sustratos, esta homogeneización puede lograrse en la mayor parte de los casos, pero no siempre es fácil. Cuando se trabaja con sustratos granulares, como cortezas o perlita, y la curva granulométrica presenta diferencias importantes en el tamaño de partícula, la obtención de muestras homogéneas resulta muy difícil y, a veces, imposible.

1.3.6 Incidencia de los factores limitantes de los modelos en las medidas

Durante la medición inciden diversos factores que provocan diferencias entre el valor verdadero y el valor medido, y, por tanto, errores de medida. La incidencia de un nuevo factor durante la medición supone una nueva fuente de error, que es tanto mayor cuanto menor sea el control ejercido sobre el mencionado factor.

Las únicas causas de error en las medidas directas son: el instrumento de medida y el operario. En el caso de medidas indirectas, hay que añadir a los anteriores la estructura del modelo que relaciona la variable medida con la calculada, que incrementa los factores que intervienen en el valor final obtenido.

La aplicación indiscriminada de la medición indirecta puede dar lugar a errores importantes y no siempre detectables. En ocasiones, se recurre a métodos de medida indirectos en los que los valores que intervienen como variables independientes se han obtenido, también, por métodos indirectos, repitiéndose este proceso varias veces. En estos casos se produce un arrastre de errores en cascada, que impide conocer su incidencia en el valor final obtenido. En estos casos puede estimarse la precisión de las medidas, pero la exactitud no se puede conocer a no ser que se disponga de patrones de medida. Para los parámetros que se miden en la caracterización física, no es fácil disponer de patrones de referencia.

Al igual que en otros casos, la aplicación de los modelos empleados para obtener medidas indirectas también está limitada por los tres factores limitantes de los modelos, tanto si se trata de modelos experimentales, como si se emplean modelos conceptuales. Los primeros se obtienen por ajuste estadístico entre los valores de la variable medida y la variable problema, por ejemplo, concentración de un nutriente por colirimetría. Los modelos conceptuales se obtienen por aplicación de una ley conocida que relaciona la variable medida con la variable medida, por ejemplo el cálculo de la densidad real de una mezcla a partir de las densidades de sus componentes.

1.3.6.1 Primer factor limitante: Incidencia en la variable dependiente de procesos no considerados en el modelo

El primer factor limitante de los modelos relativo a factores o procesos no considerados en el modelo se interpreta, en este caso, como variables que no se miden o que no intervienen en el modelo como variables independientes, y que sin embargo inciden en el valor de la variable calculada. La incidencia de estos factores ha de ser necesariamente pequeña, para que la

diferencia entre el valor calculado y el verdadero permanezca dentro de los límites de tolerancia de medida previamente establecidos.

Si los factores no considerados varían de forma aleatoria durante el proceso de medida, incidirán en la componente aleatoria y por lo tanto incidirán en la precisión de las medidas. Si, por el contrario, estas variaciones se producen siguiendo unas determinadas pautas, incidirán en la componente no aleatoria y, por tanto, en la exactitud de las medidas realizadas.

Los factores no considerados en el modelo que inciden en el resultado final siguiendo una pauta determinada pueden ser conocidos y, en ocasiones, puede conocerse incluso su incidencia en el resultado final. En estos casos es posible disminuir su incidencia, controlando su variación dentro de intervalos lo suficientemente estrechos durante el proceso de medida. Si esto no fuera posible, pueden introducirse factores de corrección en el cálculo que permitan aumentar la exactitud del valor obtenido.

1.3.6.2 Segundo factor limitante: Intervalos de validez del modelo

El segundo factor limitante se refiere a la validez de un modelo dentro de unos determinados intervalos de variación de las variables consideradas. Afecta siempre a los modelos experimentales, cuyo calibrado se obtiene para unos valores determinados de la variable independiente.

En el caso de los modelos conceptuales depende de los casos concretos. Para la elaboración de un modelo conceptual se parte de un concepto físico, químico, etc, que sigue una determinada ley. Si esta ley incluye pocas variables, puede aplicarse directamente. Si el número de variables es elevado para emplearlo como método de medida indirecta, el modelo puede simplificarse, estableciendo unas hipótesis determinadas. Por ejemplo, puede considerarse que, en las condiciones habituales de trabajo, la variabilidad de una determinada variable independiente del modelo tiene una incidencia escasa en el resultado final, por lo que el modelo puede simplificarse considerando a la mencionada variable como constante.

Tanto si el modelo es experimental, como si se trata de un modelo conceptual obtenido por simplificación de otro más complejo, su validez está limitada a unos determinados intervalos de las variables independientes. En el caso de los modelos experimentales, este intervalo se corresponde con el intervalo de variación de las variables independientes en el trabajo previo de definición del modelo o de calibrado del mismo. En el caso de los modelos conceptuales simplificados, la limitación está marcada por los criterios seguidos para la simplificación del modelo original.

La utilización del modelo fuera de los intervalos de validez incide en la componente no aleatoria del valor medido y, por lo tanto, en la exactitud del mismo. El modelo empleado proporcionará, dentro del intervalo de validez, un error asumible para la variable problema. Puede haber varios modelos diferentes al empleado que, dentro del mismo intervalo, proporcionen un error asumible. Fuera del mencionado intervalo, los valores proporcionados por los distintos modelos pueden ser muy dispares. Para conocer cual de ellos es el correcto, es necesario validarlo en el nuevo intervalo. De no ser así, puede ocurrir que el modelo empleado se separe del modelo verdadero (normalmente desconocido), proporcionando valores sistemáticamente diferentes de los verdaderos. Esto incide en la componente fija del valor medido y, por lo tanto, en la exactitud de la medición.

La precisión de los valores obtenidos puede disminuir considerablemente cuando se pretende aplicar el modelo fuera de su intervalo de aplicación. La sensibilidad de la variable dependiente (valor buscado) a los variaciones de la variable independiente (valor medido) es función de la pendiente del modelo utilizado. Cuando esta pendiente es elevada, los errores inducidos en la variable dependiente son más elevados que los errores del parámetro medido (variable independiente).

1.3.6.3 Tercer factor limitante: Errores de medida

El tercer factor limitante de la aplicación de modelos relativo a los errores de medida tiene, en este caso dos aplicaciones claramente diferenciadas: los errores de medida de todas las variables incluidas en el modelo, en el caso de la elaboración o calibrado del mismo, y los errores de medida de las variables independientes en la aplicación del modelo, para obtener el valor de la variable problema.

Los modelos experimentales se obtienen a partir de los valores medidos de las variables independientes y dependientes consideradas en el modelo. Los errores de medida en unas y otras inciden en el cálculo de los valores de los parámetros que definen el modelo y, por lo tanto, en los valores calculados posteriormente por aplicación de dicho modelo. Las diferencias entre el valor verdadero y la componente no aleatoria del valor medido (exactitud) serán tanto mayores cuanto mayores sean los errores cometidos en la medida de las variables durante el proceso experimental de elaboración del modelo. El calibrado de los modelos experimentales incide, por lo tanto, en la exactitud de todas las medidas obtenidas posteriormente por aplicación del modelo. La precisión puede conocerse por los valores obtenidos para las medidas repetidas.

Una vez definido el modelo, sea conceptual o experimental, la medida experimental de las variables independientes permite obtener el valor correspondiente de las variables dependientes. Los errores experimentales de medida de las primeras se transmiten a través del modelo hasta las segundas, incidiendo en la componente aleatoria de las medidas y por lo tanto en la precisión.

En función de las características del modelo, estos errores pueden atenuarse, aumentar o mantenerse en el mismo orden de magnitud. Mediante simulación puede estudiarse la sensibilidad del valor calculado a las variaciones del valor medido y, con ello, predecir el intervalo de confianza de la variable calculada una vez conocido el error del instrumento de medida, o bien definir cuál debe de ser el error máximo del instrumento de medida para obtener unos intervalos de confianza previamente definidos para la variable calculada.

En el caso de que las variables independientes consideradas en el modelo de medida sean más de una, la transmisión de los errores a través del modelo puede tener numerosas complicaciones, y los errores cometidos en las diferentes medidas pueden tener efectos aditivos entre sí, o bien neutralizarse unos con otros, incidiendo en mayor o menor medida en la variable calculada. En ocasiones, el modelo de cálculo de una variable produce una compensación entre los errores cometidos en las variables independientes y las dependientes, produciéndose, de esta forma, una ocultación, que no neutralización, entre unos y otros. El error global es aparentemente cero cuando se consideran conjuntamente los valores obtenidos por medición directa y los calculados a partir de éstos. En este caso, la obtención de valores repetidos puede proporcionar una buena información sobre la precisión de las medidas efectuadas, pero la exactitud de los valores calculados puede verse muy afectada por la acumulación sucesiva de los errores de los valores obtenidos por medición directa.

En la Tabla 4 se presenta, a modo de resumen, la incidencia de los tres factores limitantes de la aplicación de los modelos en la exactitud y precisión de las medidas.

	Exactitud	Precisión
1º Factor limitante: Incidencia de factores no controlados		
Varían de forma aleatoria	No afecta	Afecta
Varían siguiendo pautas determinadas desconocidas	Afecta	No afecta
Varían siguiendo pautas determinadas conocidas		
Factores controlables	Controlable	No afecta
Factores no controlables	Corrección	No afecta
2º Factor limitante: Intervalos de variación		
Modelos experimentales	Afecta	Afecta
Modelos conceptuales		
Simplificados	Afecta	Afecta
No simplificados	No afecta	No afecta
3º Factor limitante: Errores de medida		
Obtención y calibrado de modelos experimentales	Afecta	No afecta
Aplicación del modelo: errores en medidas directas	No afecta	Afecta
Más de una variable independiente	Ocultación	No afecta

Tabla 4: Modelización: Incidencia de los factores limitantes de los modelos en la exactitud y precisión de las medidas indirectas

2 ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS ACTUALES

En el apartado 1.3 se ha planteado la caracterización física de los sustratos como un modelo de cultivo. El sistema a modelizar, el conocimiento que se tiene del mismo, la disponibilidad de datos, el objetivo que se plantea para el desarrollo del modelo, el uso que se le va a dar, y los escenarios de aplicación, condicionan el desarrollo del modelo, y en este caso, la metodología de caracterización.

En la bibliografía se pueden encontrar metodologías de caracterización muy diversas. De ellas hemos seleccionado cuatro bien por su utilización más o menos extendida, o bien porque tienen algunas características que las hacen singulares. Los usos previstos y los objetivos considerados en su desarrollo son las causas principales de las diferencias entre estas metodologías. Las utilidades y limitaciones de las mismas se analizan bajo el enfoque de los modelos de cultivo, haciendo finalmente un análisis de los factores limitantes para su aplicación.

La metodología desarrollada por De Boodt y sus colaboradores en la década de los 70 es la primera que adquiere carta de naturaleza como método para el estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo. De Boodt parte de unos amplios conocimientos previos de física de suelos. Estudia las diferencias entre suelos y sustratos. A partir de estas diferencias, desarrolla los conceptos físicos a considerar en el estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo. De Boodt desarrolla además unas rutinas de laboratorio, adaptadas a las características propias de los sustratos, para determinar los parámetros físicos considerados. La metodología de laboratorio ha sido superada en varios aspectos por desarrollos posteriores, lo que es lógico si se tiene en cuenta el tiempo transcurrido. Sin embargo, los conceptos desarrollados han sido aceptados de forma generalizada o se han completado o concretado con aportaciones de otros autores, pero son de plena vigencia en la actualidad.

El Agricultural Development and Advisory Service (ADAS) del Reino Unido se planteó el desarrollo de una metodología de aplicación rápida y sencilla para las tareas de asesoramiento. La metodología desarrollada proporciona un diagnóstico rápido del sustrato analizado y de las pautas a seguir.

Los investigadores y los laboratorios de análisis de las propiedades físicas fueron aceptando los conceptos físicos planteados por De Boodt. Sin embargo, las rutinas de laboratorio empleadas se modificaron y adaptaron en función de las necesidades de cada caso. Esto dio lugar a una gran diversidad de métodos de laboratorio, que hacía muy difícil la comparación de los resultados obtenidos. Tras la realización de diversos trabajos experimentales, en el Congreso de la ISHS celebrado en Atenas en 1992, Verdonck y Gabriëls presentaron un método de referencia para el análisis físico de los sustratos de cultivo.

El objetivo que se plantea el Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte (EEUU) es hacer sustratos más eficientes para proporcionar disponibilidad de agua a la planta. La parte más importante de este desarrollo tiene lugar a finales de la década de los 80. Se disponía ya de una cantidad importante de información sobre física de sustratos. Esta metodología relativiza la importancia de la rutina de laboratorio y la condiciona a su adaptación a los objetivos planteados para el estudio. El planteamiento que se hace del estudio de las propiedades físicas tiene mucho que ver con el enfoque de modelo de cultivo que hemos expuesto en el apartado 1.3. Finalmente, estudia la fiabilidad de los modelos matemáticos empleados en el estudio de las relaciones hídricas de los suelos agrícolas cuando dichos modelos se aplican a los sustratos de cultivo.

2.1 Metodología de De Boodt

2.1.1 *Introducción*

Los trabajos sobre sustratos de cultivo desarrollados por el equipo de De Boodt se justifican por la importancia del cultivo de planta ornamental en la región de Gante (Bélgica). Los sustratos utilizados eran principalmente orgánicos, y en especial mantillo de hojas de pino y de roble (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972; Verdonck *et al.*, 1974). Verdonck *et al.* (1974) evalúan en 800.000 m³ el volumen de sustrato utilizado cada año en esta región.

La degradación de los sustratos orgánicos durante el cultivo tiene dos consecuencias importantes: por una parte la alteración de las propiedades físicas del medio de cultivo, y por otra la necesidad de reposición de los sustratos degradados. Debido a esta degradación, las necesidades anuales de reposición de sustratos para la región de Gante se cifran en unos 260.000 m³ (Verdonck *et al.*, 1974).

La disponibilidad del mantillo no era suficiente para cubrir esta demanda, por lo que se hizo necesario buscar nuevos materiales con la calidad suficiente para sustituir a estos sustratos y que estuvieran además disponibles en cantidad abundante (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972). En esta línea, el equipo de De Boodt trabajó con desechos de madera (Cappaert *et al.*, 1974), corteza compostada (Verdonck y Cappaert, 1978), lodos de depuradoras (Verdonck *et al.*, 1980), residuos sólidos urbanos (De Vleeschauwer *et al.*, 1980), residuos de tabaco mezclados con corteza (Verdonck *et al.*, 1985), etc.

En la búsqueda de nuevos materiales alternativos para su uso como sustratos, De Boodt da una gran importancia a las propiedades físicas, poniéndolas al mismo nivel que las propiedades químicas. Esta importancia la fundamenta en el hecho de que una vez que el cultivo se ha iniciado, es muy difícil mejorar las propiedades físicas del sustrato (De Boodt y Verdonck, 1971), lo que es más fácil para los parámetros químicos (Verdonck y Penninck, 1986). Este es el motivo por el que los primeros trabajos de De Boodt sobre sustratos tratan de correlacionar las propiedades físicas con el crecimiento de la planta (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972).

2.1.2 *Desarrollo metodológico*

El desarrollo de una metodología para la caracterización física de los sustratos de cultivo depende en gran medida de los objetivos planteados para la metodología a desarrollar y de los medios disponibles.

Podemos considerar que el objetivo planteado por De Boodt fue desarrollar una metodología de laboratorio para la medida del reparto de fases en función del potencial matricial adecuado a los intervalos de variación del mismo en los sustratos.

Respecto a los medios disponibles, De Boodt contaba con unos amplios conocimientos de física de suelos, así como de las metodologías de laboratorio disponibles para la determinación de las propiedades físicas de los mismos.

La escasez de trabajos previos específicos sobre sustratos hizo necesario iniciar los estudios con metodologías propias de suelos. El desarrollo de estos trabajos puso de manifiesto

las grandes diferencias existentes entre suelos y sustratos. En consecuencia, fue necesario redefinir las propiedades físicas de interés, desarrollando nuevos conceptos sobre las características del espacio poroso y la disponibilidad del agua para la planta. Paralelamente, fue necesario desarrollar nuevos métodos de laboratorio para la determinación de las mencionadas propiedades físicas.

2.1.2.1 El sustrato según De Boodt

De Boodt (1975) considera que -para una planta- el sustrato es ante todo el medio poroso en el que está anclada, el cual debe atender a sus necesidades físicas, químicas y biológicas.

Entiende por buen sustrato a un medio que se caracteriza –permanentemente- por una alta capacidad de agua disponible y que, al mismo tiempo, tiene un elevado volumen de aire. La capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de calor deben ser suficientemente altas, aun cuando el contenido de sal y la conductividad calorífica deben ser bajos (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972).

2.1.2.2 Propiedades importantes

Del concepto de sustrato se deduce que, en la optimización física del sustrato para el cultivo de planta ornamental, inciden diferentes factores (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972):

- a) Economía del agua
- b) Economía del aire
- c) Economía de los nutrientes
- d) Economía del calor

De estos cuatro factores, los dos primeros son complementarios, por lo que deben ser evaluados conjuntamente (De Boodt y Verdonck, 1972). En general, los componentes que proporcionan las condiciones adecuadas para los puntos a, b, c y d son los mismos la mayoría de las veces; para cumplir los requisitos físicos, solamente se debe cuidar la mejora de la economía del agua y del aire (De Boodt y Verdonck, 1972). Por todo ello, De Boodt concluye que la disponibilidad de agua para el crecimiento de la planta es una de las características más importantes del sustrato (De Boodt *et al.*, 1974a; De Boodt, 1975).

Por otra parte, Verdonck y Penninck (1986) consideran que el volumen de aire es el parámetro que determina la calidad de los sustratos elaborados de turba. Las condiciones “ideales” del contenido de aire aseguran el éxito del crecimiento de la planta.

2.1.2.3 Características a determinar

Dada la importancia que para De Boodt tiene la economía del aire y del agua, la caracterización del medio de crecimiento de las raíces comienza por el estudio de la distribución de fases (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972).

En las ciencias del suelo este reparto de fases se estudia mediante la curva pF o curva de retención de agua, cuyos puntos más representativos son la saturación, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972; De Boodt *et al.*, 1974a). Esta curva relaciona el % de volumen de agua y de aire con la tensión de humedad (Felipó *et al.*, 1979).

De Boodt aplica el mismo criterio para el caso de los sustratos de cultivo, pero con la salvedad de que únicamente son de interés los puntos correspondientes a bajas tensiones (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972; De Boodt *et al.*, 1974a; Felipó *et al.*, 1979). Para justificar este cambio se utiliza un criterio energético.

La disponibilidad del agua decrece cuando se incrementa la tensión de humedad; son varios los ejemplos que pueden encontrarse al respecto en la bibliografía (Richards y Waldleigh, 1952). En cambio, otros -como de Veihmeyer y Hendrickson (1927)- consideran que el agua está igualmente disponible en todo el rango por encima del punto de marchitez. De Boodt considera más adecuada la primera opción y la confirma con un ensayo con plantas de (De Boodt y De Waele, 1968).

El decrecimiento en la disponibilidad de agua se entiende fácilmente si se considera que cuanto más seco esté el sustrato, mayor es la fuerza con la que el agua está retenida en los poros. Para extraer esta agua, la planta tiene que utilizar una energía que podría utilizar en la producción de materia seca (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972; De Boodt *et al.*, 1974a).

En consecuencia, el agua del sustrato tiene que estar disponible a un nivel energético tan bajo como sea posible, considerando que -al mismo tiempo- debe haber aire disponible en cantidad suficiente en los poros de la zona radicular (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972; De Boodt *et al.*, 1974a). Las dos condiciones son en esencia contradictorias, puesto que en un poro cuando está presente el agua está ausente el aire, y viceversa (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt *et al.*, 1974a). Puede ser más realista la idea señalada por el mismo De Boodt (De Boodt y Verdonck, 1972) de que los poros pueden estar parcialmente llenos de agua. En cualquier caso, lo cierto es que agua y aire son complementarios, y, para un sustrato dado, una mayor disponibilidad de agua supone una menor disponibilidad de aire.

2.1.2.4 Clasificación del espacio poroso

La distribución de fases está estrechamente relacionada con las características del espacio poroso y, en concreto, con la distribución de los tamaños de los poros. Para relacionar ambas distribuciones, en el caso de suelos se emplea el modelo que asimila los poros a tubos capilares: los poros de menor diámetro están llenos de agua y los mayores están llenos de aire. El valor del diámetro que marca el límite entre los poros ocupados por aire o por agua está relacionado con el valor de la tensión de humedad por la ecuación

$$H = \frac{2 \times T \times \cos \Theta}{r \times d \times g}$$

Donde:

- H: es la tensión de humedad, en altura de columna de agua
- r: es el diámetro del tubo capilar equivalente al diámetro del poro
- Θ : es el ángulo de contacto entre el agua y la pared ($\Theta=0$ en un sustrato embebido de agua)
- T: es la tensión superficial agua-atmósfera, igual a 72 dinas/cm
- d: es la densidad del agua = 1 g/cm³
- g: es la fuerza de la gravedad igual a 981 cm/seg² en nuestra zona

De Boodt aplica este mismo modelo para la relación entre la distribución del tamaño de poro y la distribución de fases en los sustratos de cultivo (De Boodt, 1975).

Con objeto de mejorar el entendimiento del espacio poroso total, y teniendo en cuenta la utilización por parte de la planta del agua del sustrato, De Boodt hace una clasificación de los poros usando algunos puntos de la curva pF , para calcular la distribución de fases a unas tensiones dadas (De Boodt y Verdonck, 1971; De Boodt, 1975).

En este sentido, considera esencial conocer el reparto de fases para dos valores de tensión, correspondientes a 10 y 100 cm de columna de agua (De Boodt y Verdonck, 1971). La tensión cero la considera inadmisibles para el cultivo, puesto que el sustrato está totalmente saturado y, por lo tanto, con ausencia total de aire (De Boodt y Verdonck, 1972).

El valor de 10 cm de tensión se toma porque el espesor de la capa de sustrato en contenedor en invernadero es de 10 a 15 cm y, en consecuencia, después de un riego, la succión en la parte alta de la maceta es equivalente a 10 cm (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972).

El valor 100 cm se considera como límite superior, tanto para cultivos en invernadero como al aire libre. En el caso de invernadero, el criterio es conocer el estado de humedad más seco que, en condiciones normales de invernadero no influirá de forma significativa en el crecimiento de la planta (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972; De Boodt *et al.*, 1974a). Un experimento con plantas de *Ficus* indica que la tensión de 100 cm puede considerarse como un máximo (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972; De Boodt *et al.*, 1974a). Con respecto a los cultivos al aire libre, De Boodt justifica la importancia de la tensión a 100 cm por el hecho de que los tubos de drenaje de las parcelas están aproximadamente a 100 cm de profundidad, por lo que la parte superior está sometida a 100 cm de tensión (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972).

Entre los puntos 10 y 100 cm de tensión, la evolución puede ser lineal o exponencial. La forma de la curva condiciona la capacidad específica de agua, definida por Richards (1960) como la derivada del contenido volumétrico de humedad con respecto al potencial matricial. Por lo tanto, es importante conocer la evolución de la curva de retención de agua entre estos dos valores de tensión. Para ello, es necesario conocer el reparto de fases en algún punto intermedio, tomándose el valor correspondiente a 50 cm de tensión de agua (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972).

La curva se traza finalmente empleando cuatro puntos principales, que son el contenido de humedad a 0, 10, 50 y 100 cm de tensión.

A partir de los contenidos de humedad del sustrato a estas tensiones, De Boodt define los siguientes parámetros:

- Contenido de aire (De Boodt *et al.*, 1974b), o poros llenos de aire a 10 cm de tensión (De Boodt y Verdonck, 1972; De Boodt, 1975), o volumen de aire después del riego (De Boodt y De Waele, 1968; Felipó *et al.*, 1979; Pagés *et al.*, 1981): Volumen de poros drenados a una tensión de 10 cm después de regar el sustrato. Este volumen de aire es igual a la porosidad total menos el volumen de agua presente cuando se establece el equilibrio a 10 cm de tensión.
- Porcentaje de agua fácilmente asimilable por la planta (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt, 1975; Pagés *et al.*, 1981) o agua fácilmente disponible (De Boodt y

Verdonck, 1972; De Boodt *et al.*, 1974b; Felipó *et al.*, 1979): Cantidad de agua liberada cuando la tensión en el sustrato sube de 10 a 50 cm de agua.

- Poder tampón del agua (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt *et al.*, 1974b; De Boodt, 1975; Pagés *et al.*, 1981), capacidad de reserva de agua (De Boodt y Verdonck, 1972) o capacidad compensadora de agua (Felipó *et al.*, 1979): Cantidad de agua liberada entre 50 y 100 cm de tensión. Esta cantidad es igual a la diferencia de la humedad, expresada en porcentaje de volumen, cuando el sustrato está en equilibrio a 50 y 100 cm de tensión. Es una medida de la capacidad tampón del sustrato -cuando se presenta una ola de calor- y debe ser al menos del 4 o 5 %.
- Capacidad de agua de un sustrato es el agua retenida a 10 cm de tensión (De Boodt, 1975; Felipó *et al.*, 1979) y se expresa en g/100 g de sustrato seco.
- De Boodt considera otro punto esencial: el valor de la succión para la cual el volumen de agua iguala al volumen de aire del sustrato (Verdonck *et al.*, 1974; De Boodt, 1975; Felipó *et al.*, 1979). Para la interpretación de los valores obtenidos para este parámetro Felipó *et al.* (1979) proporciona los siguientes criterios: si es menor de 10 cm de tensión, el sustrato tiene suficiente aire, pero prácticamente no tiene agua fácilmente asimilable; si está entre 10 y 30 cm el sustrato tiene al mismo tiempo aire y agua fácilmente asimilable; y si el valor es superior a 30 cm de tensión, el sustrato tiene suficiente agua fácilmente asimilable, pero prácticamente no tiene aire en la zona de las raíces.

La diversidad de requerimientos de las diferentes especies vegetales ha hecho que el concepto de sustrato “ideal” esté ya en desuso, pero De Boodt lo definió como un sustrato con un 20% de volumen de aire, un valor del agua fácilmente disponible entre 20 y 30 % (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972; Verdonck *et al.*, 1974; De Boodt, 1975; Felipó *et al.*, 1979; Pagés *et al.*, 1981), entre 5 y 10 % para el poder tampón (De Boodt, 1975; Pagés *et al.*, 1981) y un valor entre 15 y 25 cm para la tensión en la que el volumen de aire es igual al volumen de agua (Verdonck *et al.*, 1974). De Boodt ya apuntaba que no todas las especies ornamentales requieren los mismos sustratos: el límite superior de la zona del sustrato ideal es conveniente para las epifitas, orquideáceas y bromeliáceas, mientras que el límite inferior es conveniente para las geofitas, *Ficus*, *Philodendron* y otras plantas verdes (De Boodt, 1975).

2.1.3 Determinaciones necesarias para el estudio de la distribución de fases

La metodología de laboratorio desarrollada por De Boodt para el estudio de la distribución de fases incluye (De Boodt y De Waele, 1968, De Boodt *et al.*, 1974b):

- La densidad aparente
- La porosidad total o espacio poroso total
- El contenido de humedad a 10, 50 y 100 cm de tensión de columna de agua

2.1.3.1 Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente de un sustrato se define como la relación entre el peso seco y el volumen aparente ocupado por el sustrato (De Boodt y De Waele, 1968). Por analogía con el suelo mineral, De Boodt comienza la caracterización de los sustratos por la determinación de la densidad aparente (De Boodt, 1975).

La densidad aparente de los sustratos presenta diferencias importantes con respecto a la de los suelos agrícolas. Los valores en el caso de suelos oscilan entre 1 y 1,4 g/cm³ (De Boodt y

De Waele, 1968). En el caso de sustratos varía considerablemente de unos materiales a otros pero en un intervalo de valores muy inferior los suelos. Así, para la turba podemos encontrar valores de 0,05 a 0,15 g/cm³ (Pagés *et al.*, 1981), 0,2 para mantillo de hojas de pino (De Boodt, 1975), entre 0,2 y 0,25 para compost de corteza de pino (Pagés *et al.*, 1981), y valores de hasta 0,3 g/cm³, e incluso superiores, para otros sustratos (De Boodt y De Waele, 1968).

En el caso de sustratos orgánicos, la densidad aparente varía a lo largo del cultivo e informa sobre el cambio del volumen total de poros y su morfología, así como sobre la velocidad de mineralización y humificación (De Boodt y Verdonck, 1971). En el caso de la turba, la densidad aparente está relacionada linealmente con el grado de humificación (Von Post, 1926 citado por De Boodt y Verdonck (1971).

En la metodología desarrollada por De Boodt, el valor de la densidad aparente interviene en el cálculo de la porosidad total, del volumen ocupado por agua y del volumen ocupado por aire. Los errores cometidos en la medida de la densidad aparente inciden, por lo tanto, en el cálculo de los tres volúmenes. Verdonck *et al.* (1978) consideran que es necesario que la densidad aparente se determine de forma tan precisa como sea posible, ya que con una diferencia de 0,005 g/cm³ o 5 g/l, se pueden alcanzar diferencias en el contenido de humedad mayores del 6%.

El punto crítico en la determinación de la densidad aparente es la medida del volumen de sustrato inalterado. La obtención de una muestra de sustrato *in situ* es difícil de llevar a cabo porque inciden factores como la compactación producida por el método de toma de muestra y el estado hídrico del sustrato, entre otros (De Boodt y De Waele, 1968). En la determinación de la densidad aparente de los sustratos orgánicos debe tenerse en cuenta, además, que ésta varía a lo largo del cultivo, incidiendo en el volumen total de poros y su morfología (De Boodt y Verdonck, 1971). La densidad aparente está fuertemente influenciada por la compactación (De Boodt, 1975) y por el contenido de humedad de la muestra (Verdonck *et al.*, 1978).

La incidencia de estos factores en el valor obtenido hace necesario normalizar el método para su determinación (De Boodt, 1975). Este método debe ser representativo de la situación real que se produce en campo. Para la medida de la densidad aparente de muestras de suelo inalterado, De Boodt empleó como referencia el método propuesto por Bagge Olsen (1967) y comparó los resultados obtenidos con la densidad aparente obtenida cuando la muestra alterada se coloca sin presionar en un recipiente sometido a 10 cm de tensión. La correlación de los valores obtenidos para la densidad aparente por ambos métodos es elevada, con una diferencia en el espacio poroso total menor del 1%, por lo que se puede considerar que ambos métodos son equivalentes (De Boodt y De Waele, 1968).

2.1.3.2 Determinación de la porosidad total

El valor del espacio poroso total se obtiene a partir de los valores de las densidades real y aparente (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt *et al.*, 1974b; De Boodt, 1975; Verdonck *et al.*, 1978; Felipó *et al.*, 1979) y equivale al contenido volumétrico de agua a 0 cm de succión (De Boodt y De Waele, 1968).

Para calcular por esta vía el valor de la porosidad total es necesario conocer el valor de la densidad real. El método empleado por De Boodt para su evaluación es la picnometría (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt, 1975; Felipó *et al.*, 1979; Pagés *et al.*, 1981).

El valor de la densidad real de los sustratos de cultivo orgánicos depende del grado de descomposición de la materia orgánica y varía entre 1,3 y 1,9 g./cm³; para la turba se toma como valor medio 1,45. (De Boodt, 1975). Según De Boodt, la densidad del material sólido de un sustrato es un valor poco variable que tiene que ser determinado una sola vez para un experimento dado (De Boodt y De Waele, 1968).

La sensibilidad del valor de la porosidad total a las variaciones de la densidad real es pequeña, de forma que variaciones relativamente grandes de la densidad real producen pequeñas variaciones del valor de la porosidad total calculada (De Boodt y De Waele, 1968).

2.1.3.3 Distribución de fases

Aún siendo un dato importante, la porosidad total no informa mucho sobre la disponibilidad del agua. Esta propiedad es debida a la distribución de los diámetros de los poros que constituyen el espacio poroso. El problema es determinar qué diámetros y qué volúmenes determinan la disponibilidad del agua de los sustratos (De Boodt, 1975).

La utilización del modelo capilar permite relacionar la distribución de los diámetros de los poros con la evolución del reparto volumétrico de fases en función de la tensión de humedad. El estudio de la distribución de fases de un sustrato requiere, por lo tanto, la medida del reparto del volumen total entre la fase sólida (material sólido), líquida (agua) y gaseosa (aire) para distintos valores de la tensión de humedad, es decir, obtener -en sustratos- el equivalente a la curva pF de suelos.

El porcentaje de volumen ocupado por el material sólido es complementario de la porosidad total. De Boodt (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972) parte de la hipótesis de que el volumen de sólido no cambia entre 0 y 100 cm de tensión de humedad. De Boodt puntualiza que aun cuando esta suposición no es absolutamente correcta, es aceptable cuando la variación máxima del espacio poroso total es un pequeño porcentaje para el intervalo de succiones de 0 a 100 cm de columna de agua (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972).

El contenido volumétrico de agua se determina por gravimetría después de someter la muestra a presión (De Boodt y De Waele, 1968) o succión (De Boodt *et al.*, 1974a y b; De Boodt, 1975) sobre una placa porosa. El porcentaje de volumen de humedad de un suelo obtenido aplicando una presión dada es el mismo que si la muestra se hubiera sometido a una succión de la misma magnitud (De Boodt y De Waele, 1968).

El volumen de aire se obtiene por diferencia entre el espacio poroso total y el porcentaje de humedad (De Boodt y De Waele, 1968).

Para obtener la curva de liberación de agua se consideran cuatro puntos: 0, 10, 50 y 100 cm de succión (De Boodt y De Waele, 1968; Richards *et al.*, 1964). La representación gráfica de esta curva muestra de forma inmediata la cantidad de agua disponible (De Boodt y De Waele, 1968).

2.1.4 Metodología de laboratorio

La rutina de laboratorio para el estudio de la distribución de fases incluye cuatro etapas independientes, que son la determinación de la densidad aparente, de la densidad real, del

contenido de humedad de la muestra de laboratorio, y el tensionado de las muestras y posterior determinación del contenido hídrico.

2.1.4.1 Determinación de la densidad aparente

El valor de la densidad aparente se obtiene con una rutina de laboratorio específica para este fin. La determinación en varias muestras de un mismo sustrato proporciona el valor medio y el error de estima, con la posibilidad de establecer los correspondientes límites de confianza. El valor medio obtenido se emplea para calcular el volumen total de la muestra y, en consecuencia, en el cálculo del reparto porcentual de las tres fases.

La determinación de la densidad aparente de los sustratos de cultivo se basa en la obtención del peso seco del sustrato contenido en un anillo de volumen conocido. La gran cantidad de factores que inciden en el valor de la densidad aparente, y la importancia de obtener un valor, preciso obligan a normalizar su medida.

Para asegurar el llenado del anillo de referencia se coloca un segundo anillo superpuesto. El conjunto de los dos anillos se llena con la muestra de sustrato, se satura y se somete a una tensión de 10 cm de columna de agua. Después se separa el segundo anillo y se retira el sustrato sobrante, asegurándose de que el volumen del sustrato que queda en el primer anillo coincide con el volumen interno del mismo. El valor de la densidad aparente se obtiene a partir del peso seco del sustrato contenido en el anillo y el volumen interno del anillo previamente calibrado. Los resultados obtenidos con este método son similares a los obtenidos con muestra inalterada de sustrato (De Boodt y De Waele, 1968).

Respecto a las medidas de los anillos empleados, De Boodt (1975) cita a modo de ejemplo un tubo de 3 pulgadas, es decir 7.5 cm de diámetro interno, por 4 cm de altura. En otras publicaciones, la medida más usual es 7,7 cm de diámetro interno y se mantiene la altura de 4 cm (De Boodt *et al.*, 1974b; Pagés *et al.*, 1981). En la comparación de análisis entre laboratorios (Verdonck *et al.*, 1978) no se mencionan las medidas de los anillos empleados, pero del texto se deduce que la altura es 5 cm.

Los tiempos de saturación y tensionado para alcanzar el equilibrio a 10 cm de columna de agua varían de unas publicaciones a otras, entre 24 y 48 horas (De Boodt *et al.*, 1974b; De Boodt, 1975; Verdonck *et al.*, 1978; Pagés *et al.*, 1981). En la comparación de métodos mencionada anteriormente (Verdonck *et al.*, 1978), se emplea además un método con compresión en el que, para saturar el sustrato, se emplea un doble ciclo de compresión, saturación en lecho de arena y tensionado. La saturación y el tensionado dependen de varios factores como la humedad inicial de la muestra y las características propias del sustrato; en cualquier caso, se debe asegurar la máxima saturación posible del sustrato y el equilibrio a 10 cm de tensión.

2.1.4.2 Determinación de la porosidad total

El valor de la porosidad total se obtiene a partir de los valores de las densidades real y aparente obtenidas mediante las correspondientes rutinas de laboratorio. El método aplicado por De Boodt para medir la densidad aparente es el detallado en el apartado anterior. Para la medida de la densidad real De Boodt utiliza la picnometría (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt, 1975; Pagés *et al.*, 1981; Felipó *et al.*, 1979).

Teniendo en cuenta la escasa sensibilidad de la porosidad total a las variaciones de la densidad real y que la densidad del material sólido de un sustrato es un valor poco variable, De Boodt (De Boodt y De Waele, 1968) indica que es suficiente determinarla una sola vez para un experimento dado.

Como alternativa a la picnometría, Verdonck *et al.* (1978) proponen el cálculo de la densidad real a partir de las componentes orgánica y mineral del sustrato asignando valores de 1,55 y 2,65 respectivamente, a las densidades reales de ambos componentes, pero sin especificar el método para determinar la proporción de uno y otro. Para estimar por este método la densidad real de un sustrato orgánico, las componentes orgánica y mineral se determinan por calcinación.

2.1.4.3 Determinación del porcentaje de humedad de la muestra de laboratorio

La rutina de laboratorio desarrollada por De Boodt para medir el reparto volumétrico de fases no permite la obtención directa y sencilla del peso seco de la muestra. Por esta razón, se obtiene de forma indirecta, a partir del peso de la muestra de laboratorio húmeda y de la determinación del contenido de humedad de la misma.

La determinación del contenido de humedad se lleva a cabo de forma simultánea con el tensionado. Para ello se procede a una homogeneización lo más exhaustiva posible de la muestra de laboratorio. Una vez homogeneizada, se procede al llenado de los embudos de tensionado y a la toma de muestras para determinar el contenido de humedad.

2.1.4.4 Tensionado y medida del reparto volumétrico

El reparto volumétrico de fases varía en función de la tensión de humedad. La curva de liberación de agua representa esta relación. Cuando se mide el reparto volumétrico de fases es necesario, por lo tanto, conocer la tensión de humedad del sustrato en el momento de la medición.

Para llevar la muestra de sustrato hasta una tensión de humedad determinada, De Boodt utilizó inicialmente la membrana empleada para el estudio de la curva de retención de agua de suelos, aplicando las presiones adecuadas a los sustratos de cultivo (De Boodt y De Waele, 1968).

Sin embargo, una vez fijados los límites correctos de la disponibilidad del agua, el grupo de De Boodt diseñó y construyó un aparato especial para determinar en laboratorio la disponibilidad del agua de un sustrato (De Boodt *et al.*, 1974a).

El equipo y su sistema de funcionamiento se ha descrito en numerosas publicaciones (De Boodt *et al.*, 1974a y b; De Boodt, 1975; Pagés *et al.*, 1981; Felipó *et al.*, 1979). Está formado por un embudo de vidrio con una válvula de tres vías en la salida, que esta conectada mediante un tubo flexible a un sistema de tensionado. La unión flexible entre el embudo y el sistema de tensionado permite variar el valor de la succión aplicada. La válvula de tres vías permite independizar el embudo del resto del sistema, así como su posterior conexión, permitiendo así el control de peso entre dos tensiones sucesivas.

El embudo tiene un diseño especial, con una parte cilíndrica y otra cónica (o similar) que conecta con la salida. Entre la parte cilíndrica y la cónica se dispone una placa porosa unida

solidariamente a las paredes del embudo, formando así dos compartimentos: uno cilíndrico, con la placa porosa en la base, sobre la que se coloca la muestra de sustrato, y otro limitado por la placa porosa y la válvula de tres vías que se llena de agua y se conecta al sistema de tensionado para llevar a la muestra hasta el valor de tensión previamente fijado.

La metodología para el tensionado y medida de volúmenes se describe en diferentes trabajos (De Boodt *et al.*, 1974b; De Boodt, 1975; Verdonck *et al.*, 1978; Felipó *et al.*, 1979; Pagés *et al.*, 1981). En primer lugar se determina el contenido de humedad de la muestra de sustrato, del que se pone una capa de 2 – 3 cm sobre la placa porosa del embudo. Se satura durante 24 (De Boodt *et al.*, 1974b) ó 48 horas (De Boodt, 1975), en cualquier caso hasta saturación completa, y se somete a la tensión prefijada durante 12 (De Boodt *et al.*, 1974b; Felipó *et al.*, 1979) ó 24 - 28 horas (De Boodt, 1975).

Una vez alcanzado el equilibrio, se separa el embudo del sistema y se determina el volumen de agua por gravimetría, y el volumen de aire por diferencia entre la porosidad total y el contenido de humedad. Una vez obtenido el peso del embudo con el sustrato tensionado, se vuelve a colocar en el sistema y se aplica la tensión siguiente.

Los valores de tensión necesarios son –al menos- 10, 50 y 100 cm de columna de agua. El reparto de volúmenes correspondiente a tensión 0 cm de columna de agua se obtiene teniendo en cuenta que todo el volumen de poros está ocupado por agua. Cuando se requiere una información más detallada de las características del sustrato, se mide el reparto de volúmenes a valores de tensión intermedios.

2.1.5 *Aplicación de la teoría de modelos*

2.1.5.1 Definición del modelo

Como ya se ha visto anteriormente (1.3.2) de la definición de caracterización física de los sustratos se deducen dos componentes importantes:

- Aplicación de modelos de cultivo para relacionar las propiedades físicas del sustrato con determinados aspectos del cultivo
- Aplicación de metodologías de laboratorio para determinar los parámetros físicos que definen las propiedades físicas, y que intervienen como variables independientes en el modelo

Para aplicar el modelo es necesario conocer los valores de las variables independientes, es decir se deben evaluar los parámetros que definen las propiedades físicas del sustrato. Para ello, es necesario aplicar las metodologías de laboratorio desarrolladas al efecto. La relación entre estas propiedades físicas y la respuesta de la planta proporciona los criterios de interpretación de los resultados analíticos.

2.1.5.1.1 *Relación entre propiedades físicas y respuesta del cultivo*

De Boodt indica que, de las observaciones en invernadero, parece obvio que el concepto clásico de disponibilidad de agua y, en particular, su límite inferior -el punto de marchitez permanente (15 atmósferas)- es inútil en cultivo de plantas ornamentales. Puesto que las circunstancias externas en cultivo de plantas ornamentales son tan diferentes de los cultivos en suelo, se debe reajustar el concepto y método de determinación de disponibilidad de agua en cultivos de planta ornamental (De Boodt *et al.*, 1974a).

Los ensayos de campo realizados por De Boodt y colaboradores son numerosos. Los objetivos de estos ensayos han sido en unos casos estudiar la utilización -como sustrato de cultivo- de materiales alternativos. En otros casos, se plantea directamente como objetivo el estudio de las relaciones entre las propiedades físicas de los sustratos, o las condiciones físicas del entorno radicular, y la respuesta de la planta.

Para el tema que nos ocupa, se obtiene más información de los segundos que de los primeros. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el estudio de la utilización de nuevos materiales como sustratos de cultivo tiene una parte relativa a las propiedades físicas, que aportan una información importante para el estudio de las relaciones sustrato-planta.

Los ensayos para el estudio de sustratos alternativos fueron:

- Sustratos alternativos para cultivo de *Anthurium Scherzerianum*, *Monstera deliciosa* y *Maranta*, y de estaquillado con *Begonia tuberhybrida multiflora*, de propiedades físicas similares a los empleados habitualmente (De Boodt y Verdonck, 1971).
- Utilización de corteza compostada en *Dracaena terminales*, *Monstera deliciosa*, *Ficus elastica*, *Pelargonium zonale*, *Pelargonium peltatum* y *Crisantemum*. Segunda serie de ensayos con corteza compostada, con adición suplementaria de abonos de liberación lenta con *Fatsedera*, *Dieffenbachia* y *Aechmea fasciata* (Cappaert et al., 1974).
- Estudio del comportamiento de la corteza compostada con *Cordyline terminalis*, *Ficus cyathistipula* y *Calathea makoyana* (Verdonck y Cappaert, 1978).
- Utilización como sustrato de cultivo de compost de lodo de depuradora de papelera con corteza, empleando como plantas testigo *Fatsedera*, *Aralia eglantissima*, *Dieffenbachia exotica*, *Vriesia splendens* y *Monstera deliciosa* (Verdonck et al., 1980).
- Utilización de residuos sólidos urbanos como sustrato de cultivo, empleando como plantas indicadoras *Dieffenbachia*, *Codiaeum* y *Cordyline* (De Vleeschauwer et al., 1980).
- Utilización como sustrato de cultivo de compost de mezcla de corteza y residuos de tabaco, empleando como plantas indicadoras *Monstera deliciosa* y *Ficus lirata* (Verdonck et al., 1985).

Los experimentos diseñados específicamente para el estudio de la relación entre propiedades físicas y respuesta de la planta son:

- Experimento en invernadero con plantas de *Ficus* en turba rubia para estudiar dos niveles de humedad del sustrato: 10-100 cm de tensión de agua, y 100-300 cm de tensión de agua. De Boodt se apoyó en gran medida en este ensayo para establecer el valor de 100 cm de tensión como límite superior para el cultivo de planta ornamental (De Boodt y De Waele, 1968).
- Cuatro ensayos con *Philodendron*, *Azalea*, *Anthurium* y *Aechmea* en los que se emplearon 3, 11, 2 y 13 sustratos respectivamente. De estos ensayos De Boodt concluye que los mejores resultados se obtienen cuando las raíces podían disponer simultáneamente de un gran volumen de aire y de una gran cantidad de agua fácilmente asimilable, junto con una concentración de sales y una conductividad calorífica pequeñas (De Boodt y De Waele, 1968).

- Ensayo de riego con ocho niveles hídricos distintos, empleando como planta testigo *Ficus elastica* (De Boodt *et al.*, 1974a). Como resultado de este ensayo, De Boodt obtuvo una serie de conclusiones importantes:
 - La mejor succión para plantas ornamentales está entre 20 y 50 cm de agua
 - Los sustratos para planta ornamental presentan una gran variabilidad respecto a la disponibilidad de agua, de forma que para cada planta ornamental se puede encontrar un sustrato óptimo.
 - Cada sustrato requiere su propio sistema de riego: en mantillo de hojas de pino podemos regar a menudo, sin peligro de sobresaturación. En turba debemos regular el periodo de riego, dependiendo de la evaporación en el invernadero, porque la turba es sensible a la sobresaturación.

2.1.5.1.2 Metodología de laboratorio para determinar los parámetros físicos que definen las propiedades físicas y que intervienen como variables independientes en el modelo

La metodología de laboratorio tiene por objeto medir, con la mayor fiabilidad posible, los parámetros físicos que intervienen como variables independientes en los modelos anteriormente mencionados. La fiabilidad de las mediciones realizadas condiciona la aplicación de los modelos que las utilizan.

Para medir el reparto volumétrico de fases, De Boodt mide las densidades aparente y real del sustrato, lleva las muestras a un valor predeterminado de tensión de humedad, y una vez alcanzado este punto, evalúa los volúmenes ocupados por material sólido, agua y aire.

Para la medida de la densidad aparente desarrolló un método propio, que contrastó con la medida de la densidad aparente por el método de O. Bagge Olsen (Bagge Olsen, 1967)

La medida de la densidad real la obtiene por picnometría, método empleado para la medida de la densidad real en suelos minerales.

Para llevar las muestras hasta un valor de succión previamente fijado, emplea inicialmente la cámara de presión (De Boodt y De Waele, 1968), y posteriormente desarrolla un equipo que facilita el tensionado en el intervalo de bajas tensiones, de interés en el caso de los sustratos (De Boodt *et al.*, 1974b).

Para el cálculo del reparto de volúmenes en una muestra de sustrato tensionada, sigue el método empleado en suelo, es decir, el volumen total se calcula a partir el peso seco y la densidad aparente; el volumen ocupado por material sólido a partir de los valores de las densidades real y aparente; el volumen de agua se obtiene por gravimetría; finalmente, el volumen de aire se obtiene por diferencia entre el volumen total y la suma de los volúmenes ocupados por material sólido y agua.

2.1.5.2 Factores limitantes para su aplicación

Los modelos desarrollados a partir de las propiedades físicas del sustrato están limitados a los aspectos del cultivo en los que inciden las condiciones físicas. Las propiedades físicas del sustrato y el control del riego intervienen como variables independientes en un modelo cuyas variables dependientes son las condiciones físicas del entorno radicular. Por lo tanto, las propiedades físicas del sustrato, junto con el manejo del riego, proporcionan el instrumento para

mantener las condiciones físicas del entorno radicular dentro de unos intervalos de variación adecuados para el desarrollo de la planta.

Esta utilidad de las propiedades físicas y del manejo del riego está limitada por los tres factores que limitan la aplicación de los modelos.

2.1.5.2.1 *Factor limitante 1: variables no consideradas en la metodología*

La metodología de laboratorio puesta a punto por De Boodt mide los parámetros básicos (1.3.5.1.1) y los correspondientes al reparto de fases en condiciones de equilibrio estático (1.3.5.1.2). No mide los parámetros relacionados con la dinámica del agua (1.3.5.1.3). Por lo tanto, la aplicación de la metodología de De Boodt se limita a la modelización del comportamiento hídrico del sustrato en condiciones de equilibrio estático.

De Boodt destacó la importancia que tienen la conductividad hidráulica de los sustratos (De Boodt y Verdonck, 1971), pero no desarrolló ninguna metodología para su evaluación. Igualmente menciona el concepto de capacidad específica de agua (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972), tomado de Richards (1960), que, refiriéndose a suelos, lo define como la derivada del contenido de agua del suelo con respecto al potencial matricial. Para conocer la capacidad específica de agua así definida, es necesario ajustar los datos experimentales a una función matemática y obtener su derivada.

2.1.5.2.2 *Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo*

En el caso de las metodologías de caracterización física, la limitación por aplicar la metodología fuera de los intervalos de validez del modelo puede deberse a la aplicación en sustratos de metodologías desarrolladas para suelos (1.3.5.2.1) o a la aplicación generalizada de las metodologías desarrolladas para unos sustratos determinados (1.3.5.2.2). Esta es una limitación genérica que debe tenerse siempre presente.

Respecto a limitaciones específicas de los métodos empleados, destacamos las siguientes:

La medida de la densidad aparente se basa en la medida del peso de un volumen previamente conocido de sustrato. Para obtener ese volumen se procede a la saturación y tensionado a 10 cm de agua. Las características del espacio poroso pueden limitar tanto la saturación inicial como la obtención del equilibrio posterior. La aplicación del método descrito está limitado a aquellos sustratos con unas características del espacio poroso que permitan la saturación total del sustrato y alcanzar el equilibrio posterior.

Por otra parte, De Boodt supone que el volumen ocupado por el material sólido no cambia cuando la succión varía de 0 a 100 cm (De Boodt y De Waele, 1968), y puntualiza: *aún cuando esta suposición no es absolutamente correcta, es aceptable cuando el cambio máximo del espacio poroso total es un pequeño porcentaje cuando la succión aumenta de 0 a 100 cm de agua*. Teniendo en cuenta que la densidad real no varía con la variación de la succión, las variaciones de la porosidad se corresponden con variaciones de la densidad aparente. Por lo tanto, la aplicación de la metodología de De Boodt se limita a los sustratos en los que las variaciones de la densidad aparente y de la porosidad total, son despreciables en el intervalo de 0 a 100 cm de tensión de agua.

Para la medida de la densidad real De Boodt propone emplear la picnometría, utilizada para los suelos minerales. La densidad real de estos suelos minerales es, generalmente, superior

a 2 g/cm^3 , y en cualquier caso lo suficientemente elevada para que durante el proceso de medida no se presenten problemas de flotabilidad. La diversidad de los materiales empleados como sustratos de cultivo se manifiesta en ocasiones en la densidad medida por picnometría. En algunos casos se presentan problemas de flotabilidad, que dificultan considerablemente la medida y la hace poco fiable.

Respecto a la medida de la densidad real, ha de tenerse en cuenta que es una herramienta para obtener el valor de la porosidad del sustrato. Algunos sustratos presentan porosidad ocluida, que no interviene en el intercambio de aire y agua. Si consideramos el concepto de De Boodt (De Boodt y De Waele, 1968) -espacio poroso total equivalente al contenido volumétrico de humedad a 0 cm de tensión (2.1.3.2)- es evidente que la porosidad que no interviene en el intercambio de aire y agua no entra dentro de este concepto. Esto debe tenerse en cuenta en la evaluación de la densidad real, puesto que en otro caso se estaría sobredimensionando el valor de la porosidad. La medida de la densidad real por picnometría tiene en cuenta este efecto

Respeto a la saturación y tensionado, para la medida del reparto de fases, cabe aplicar aquí a cada valor de tensión lo que se ha señalado para la medida de la densidad aparente.

Por otra parte, y debido al gradiente de humedad que se presenta en los sustratos, la incidencia de la altura de la muestra puede ser, en algunas ocasiones, importante. El sustrato se coloca en el embudo con la humedad de la muestra original, posteriormente se satura y tensiona. Este proceso puede provocar variaciones importantes de volumen y, en consecuencia, de altura del sustrato. La obtención de una altura constante del sustrato después de saturar y tensionar, depende en gran medida de la experiencia del operario.

2.1.5.2.3 Factor limitante 3: Errores de medida

Los valores de los volúmenes ocupados por el material sólido, agua y aire, se obtienen indirectamente a partir de otras variables, medidas directamente (2.1.3). Los errores experimentales de medida de estas últimas se arrastran a las primeras a través de los modelos de cálculo empleado. Para conocer la incidencia de los errores experimentales en la evaluación del reparto volumétrico de fases es necesario hacer un análisis de sensibilidad (1.2.3.3.2.3), que se detalla a continuación.

2.1.6 Análisis de sensibilidad

El objetivo de la metodología de laboratorio desarrollada por De Boodt para la caracterización física de sustratos de cultivo es el estudio del reparto de fases (2.1.2). De Boodt considera que la disponibilidad de agua y aire son las características más importantes de un sustrato (2.1.2.2); por ello, la metodología de laboratorio será tanto más útil cuanto más y mejor informe sobre la economía del agua y del aire del sustrato. Sin embargo, la imposibilidad de medir directamente el reparto volumétrico de fases, obliga a obtener indirectamente estas medidas.

Las medidas indirectas se obtienen mediante la aplicación de modelos sencillos, que relacionan las variables problema con las variables obtenidas por medición directa. Los modelos aplicados en el caso de la caracterización física de sustratos son modelos conceptuales derivados de las relaciones físicas entre las variables medidas y las calculadas.

El error cometido en una medida directa se transmite a través del modelo hasta la medida indirecta y puede incidir en la exactitud o en la precisión. La incidencia en uno u otro componente del error depende del protocolo de trabajo utilizado.

En el caso de la metodología de De Boedt, una vez homogeneizada la muestra de sustrato, se reparte en submuestras para realizar los diferentes análisis, al menos por duplicado, siendo frecuente hacer tres o cuatro repeticiones. Las variables medidas en laboratorio para el posterior cálculo del reparto de volúmenes son:

- Densidad aparente (Da)
- Densidad real (Dr)
- % de materia seca de la muestra de laboratorio ($\%S$)
- Peso de la muestra de sustrato con la humedad de laboratorio (Ph)
- Peso de la muestra de sustrato tensionado (Pag)

Las tres primeras variables se obtienen con metodologías de laboratorio específicas para cada caso. Con ello se obtiene el valor medio y la desviación estándar de la densidad aparente, la densidad real y el contenido de materia seca del sustrato sometido a análisis. El peso de la muestra de sustrato con la humedad de laboratorio y el peso tensionado se obtienen para cada una de las repeticiones de sustrato tensionadas. El cálculo del reparto volumétrico se hace para cada una de las repeticiones, empleando los valores medios de Da , Dr y $\%S$ para todas las repeticiones de un mismo sustrato, y para cada repetición los valores correspondientes de Pag y Ph .

Con objeto de conocer la incidencia en el cálculo de volúmenes de los errores cometidos en las medidas de laboratorio, se ha evaluado la magnitud del error inducido en las primeras por las segundas. El método seguido para ello es considerar constantes todas las variables independientes consideradas en el modelo, excepto la sometida al estudio de errores. En estas condiciones, se calculan los valores de las variables dependientes correspondientes al valor inicial (supuesto valor verdadero) y un valor final obtenido como la suma del valor inicial más el incremento o error. El incremento o error de la variable dependiente se obtiene por diferencia entre los valores calculados con la medida de laboratorio incrementada y sin incrementar.

2.1.6.1 Cálculo de volúmenes en función de las medidas de laboratorio

El cálculo del reparto volumétrico de fases para cada muestra analizada se obtiene a partir de los valores de las densidades real (Dr) y aparente (Da) del sustrato, del porcentaje de humedad ($\%S$) de la muestra de laboratorio y del peso de agua (Pag) y peso de sustrato con la humedad de la muestra de laboratorio (Ph). A estas medidas las denominaremos en lo sucesivo medidas de laboratorio.

En primer lugar se obtienen las expresiones del error en función de las medidas de laboratorio, que intervienen como variables independientes de las ecuaciones de cálculo. Multiplicando y dividiendo el término a la derecha del signo igual por el valor de la variable incrementada, se consiguen expresiones que facilitan la comprensión de la incidencia del error.

2.1.6.1.1 Cálculo de la porosidad total y volumen ocupado por material sólido

Porosidad total (Pt) y volumen ocupado por material sólido (Vms) son complementarios, por lo que conocido uno, el otro es inmediato. Siendo Vt el volumen total de la muestra:

$$(1) Vt = Vms + Pt$$

Dividiendo por el volumen total y multiplicando por 100, para expresarlo en porcentaje del volumen total:

$$(2) 100 = \%Vms + \%Pt$$

El valor de la porosidad total, expresado como porcentaje del volumen total ($\%Pt$), viene dado por la expresión:

$$(3) \boxed{\%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)}$$

Esta expresión está ya en función de las medidas de laboratorio, por lo que no necesita transformación.

2.1.6.1.2 Cálculo del volumen ocupado por agua

El contenido hídrico del sustrato puede expresarse como relación de volumen o como relación ponderal. La relación más empleada es el porcentaje del volumen total ocupado por agua ($\%Vag$), que se emplea para estudiar el reparto de fases de los sustratos. Siendo Vag el volumen ocupado por agua, Vt el volumen total, Pag el peso de agua, da la densidad del agua y Ps el peso seco:

$$(4) \%Vag = 100 \times \frac{Vag}{Vt}$$

Teniendo en cuenta que

$$(5) Vag = \frac{Pag}{da} = \frac{Pag(g)}{1\left(\frac{g}{cm^3}\right)} = Pag(cm^3)$$

$$(6) Vt = \frac{Ps}{Da}$$

Sustituyendo (5) y (6) en (4), se obtiene:

$$(7) \%Vag = 100 \times Da \times \frac{Pag}{Ps}$$

El peso seco no es en este caso una medida de laboratorio, por lo que debe sustituirse por su valor en función de $\%S$ y Ph

$$(8) Ps = \frac{\%S \times Ph}{100}$$

Sustituyendo en (7):

$$(9) \quad \boxed{\%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}}$$

2.1.6.1.3 Cálculo del volumen ocupado por aire

En la metodología de De Booyt, el porcentaje de volumen ocupado por aire (%Vai) se obtiene como diferencia entre la porosidad total y el volumen ocupado por agua, es decir:

$$(10) \quad \%Vai = \%Pt - \%Vag$$

Sustituyendo en (10) los valores de %Pt y %Vag dados por las expresiones(3) y (9) respectivamente:

$$(11) \quad \%Vai = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) - 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}$$

$$(12) \quad \%Vai = 100 - 100 \times \frac{Da}{Dr} - 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}$$

$$(13) \quad \boxed{\%Vai = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S}\right)}$$

2.1.6.2 Incidencia de los errores de la densidad aparente

2.1.6.2.1 Incidencia en la Porosidad total (%Pt) y volumen ocupado por material sólido (%Vms)

El valor de la porosidad total se obtiene de la expresión (3):

$$(14) \quad \boxed{\%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)}$$

Incrementando con el error y restando la función incrementada menos la función sin incrementar, y operando:

$$(15) \quad \%Pt_2 - \%Pt_1 = 100 \times \left(1 - \frac{Da_2}{Dr}\right) - 100 \times \left(1 - \frac{Da_1}{Dr}\right)$$

$$(16) \quad \Delta\%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da_2}{Dr} - 1 + \frac{Da_1}{Dr}\right)$$

$$(17) \quad \Delta\%Pt = 100 \times \frac{1}{Dr} \times [-(Da_2 - Da_1)]$$

$$(18) \quad \boxed{\Delta\%Pt = -100 \times \frac{1}{Dr} \times \Delta Da}$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada

$$(19) \quad \Delta \%Pt = -100 \times \frac{1}{Dr} \times Da \times \frac{1}{Da} \times \Delta Da$$

De (14) se deduce:

$$(20) \quad 100 \times \frac{Da}{Dr} = 100 - \%Pt$$

Sustituyendo en (19) se obtiene:

$$(21) \quad \Delta \%Pt = -(100 - \%Pt) \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$$

De (2) se obtiene:

$$(22) \quad 100 - \%Pt = \%Vms$$

Sustituyendo en (21):

$$(23) \quad \boxed{\Delta \%Pt = -\%Vms \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]}$$

El volumen ocupado por material sólido es complementario de la porosidad total (1). De (2) y (3) se obtiene:

$$(24) \quad \boxed{\%Vms = 100 \times \frac{Da}{Dr}}$$

Operando como en el caso anterior, se obtiene una ecuación similar a la (18):

$$(25) \quad \boxed{\Delta \%Vms = 100 \times \frac{1}{Dr} \times \Delta Da}$$

Operando de forma análoga, la incidencia del error de la densidad aparente en el $\%Vms$ viene dado por la expresión:

$$(26) \quad \boxed{\Delta \%Vms = \%Vms \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]}$$

2.1.6.2.2 Incidencia en el volumen ocupado por agua ($\%Vag$)

Partiendo de la expresión (9):

$$(27) \quad \boxed{\%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}}$$

Operando de forma análoga al caso anterior se obtiene

$$(28) \quad \Delta\%Vag = 10^4 \times \frac{Pag}{\%S \times Ph} \times (Da_2 - Da_1)$$

$$(29) \quad \boxed{\Delta\%Vag = 10^4 \times \frac{Pag}{\%S \times Ph} \times \Delta Da}$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada:

$$(30) \quad \Delta\%Vag = 10^4 \times \frac{Pag}{\%S \times Ph} \times Da \times \frac{1}{Da} \times \Delta Da$$

Teniendo en cuenta que la primera parte de la expresión a la derecha del signo igual de (30) coincide con la expresión a la derecha del signo igual de (27):

$$(31) \quad \boxed{\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]}$$

2.1.6.2.3 Incidencia en el volumen ocupado por aire (%Vai)

Partiendo de la expresión (13):

$$(32) \quad \boxed{\%Vai = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right)}$$

Incrementando y restando se obtiene:

$$(33) \quad \Delta\%Vai = \left[100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da_2 \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right) \right] - \left[100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da_1 \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right) \right]$$

$$(34) \quad \Delta\%Vai = 100 \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right) \times (-Da_2 + Da_1)$$

$$(35) \quad \boxed{\Delta\%Vai = -100 \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right) \times \Delta Da}$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada:

$$(36) \quad \Delta\%Vai = -100 \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right) \times Da \times \frac{1}{Da} \times \Delta Da$$

Operando como en casos anteriores, teniendo en cuenta (9) y (20), y sustituyendo en (36) se obtiene:

$$(37) \quad \Delta\%Vai = -[(100 - \%Pt) + \%Vag] \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$$

Teniendo en cuenta que

$$(38) \quad \%Pt = \%Vag + \%Vai \Rightarrow 100 - \%Pt + \%Vag = 100 - (\%Vag + \%Vai) + \%Vag = 100 - \%Vai$$

Sustituyendo en (37):

$$(39) \quad \Delta\%Vai = -(100 - \%Vai) \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$$

2.1.6.3 Incidencia de los errores de la densidad real

2.1.6.3.1 Incidencia en la Porosidad total (%Pt) y en el volumen ocupado por material sólido (%Vms)

El valor de la porosidad total se obtiene de la expresión (3):

$$(40) \quad \%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right)$$

Procediendo como en 2.1.6.2.1 se obtiene:

$$(41) \quad \Delta\%Pt = -100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada y operando como en 2.1.6.2.1 se obtiene:

$$(42) \quad \Delta\%Pt = -\%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$$

Teniendo en cuenta (24) y operando de forma análoga se obtiene:

$$(43) \quad \Delta\%Vms = 100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$$

Si lo expresamos en función de la porosidad total:

$$(44) \quad \Delta\%Vms = \%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$$

2.1.6.3.2 Incidencia en el volumen ocupado por agua (%Vag)

Partimos de la expresión (9):

$$(45) \quad \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}$$

La densidad real no interviene en el cálculo del %Vag

2.1.6.3.3 Incidencia en el volumen ocupado por aire (%Vai)

El valor del volumen ocupado por aire viene dado por la expresión (13):

$$(46) \quad \%Vai = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right)$$

Incrementando Dr y operando de forma similar a 2.1.6.2.3 se obtiene:

$$(47) \quad \Delta \%Vai = -100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada y operando como en 2.1.6.2.3 se obtiene:

$$(48) \quad \Delta \%Vai = -\%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$$

2.1.6.4 Incidencia de los errores del porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio (%S)

El porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio se calcula como:

$$(49) \quad \%S = 100 \times \frac{Ps}{Ph}$$

2.1.6.4.1 Incidencia en la Porosidad total (%Pt) y en el volumen ocupado por material sólido (%Vms)

Partimos de la expresión de la porosidad total dada por (3):

$$(50) \quad \%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right)$$

El porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio no interviene en el cálculo de %Pt.

2.1.6.4.2 Incidencia en el volumen ocupado por agua (%Vag)

El volumen de agua lo tomamos de la expresión (9)

$$(51) \quad \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph \times \%S}$$

Incrementando y restando se obtiene:

$$(52) \quad \Delta \%Vag = \left(10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph \times \%S_2} \right) - \left(10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph \times \%S_1} \right)$$

$$(53) \quad \Delta \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \left(\frac{1}{\%S_2} - \frac{1}{\%S_1} \right)$$

$$(54) \quad \boxed{\Delta \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right)}$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada:

$$(55) \quad \Delta \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{1}{\%S} \times \%S \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right)$$

Teniendo en cuenta que la primera parte de la expresión a la derecha del signo igual de (55) coincide con la expresión a la derecha del signo igual de (51), y sustituyendo, se obtiene:

$$(56) \quad \boxed{\Delta \%Vag = \%Vag \times \left[\%S \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right) \right]}$$

2.1.6.4.3 Incidencia en el volumen ocupado por aire (%Vai)

El punto de partida viene dado por la expresión (13), que se puede expresar de la forma:

$$(57) \quad \boxed{\%Vai = 100 - 100 \times Da \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{100 \times Pag}{\%S \times Ph} \right)}$$

Incrementando y restando:

$$(58) \quad \Delta \%Vai = \left[100 - 100 \times Da \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{100 \times Pag}{\%S_2 \times Ph} \right) \right] - \left[100 - 100 \times Da \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{100 \times Pag}{\%S_1 \times Ph} \right) \right]$$

$$(59) \quad \Delta \%Vai = 100 \times Da \times \left(\frac{100 \times Pag}{Ph} \right) \times \left(-\frac{1}{\%S_2} + \frac{1}{\%S_1} \right)$$

$$(60) \quad \Delta \%Vai = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \left(-\frac{1}{\%S_2} + \frac{1}{\%S_1} \right)$$

$$(61) \quad \boxed{\Delta \%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right)}$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada

$$(62) \quad \Delta \%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{1}{\%S} \times \%S \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right)$$

Teniendo en cuenta (7), la primera parte de la expresión a la derecha del signo igual de (62) corresponde al valor del %Vag:

$$(63) \quad \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}$$

Sustituyendo en (62):

$$(64) \quad \Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[\%S \times \Delta\left(\frac{1}{\%S}\right) \right]$$

2.1.6.5 Incidencia de los errores del peso tensionado

El peso del agua retenida en el sustrato tensionado se obtiene por diferencia entre el peso del sustrato tensionado (sustrato (Ps) + agua (Pag) + tara (T)) y el correspondiente peso seco (Ps+T). Los posibles errores en la estimación del peso seco y de la tara inciden en el minuendo y el sustraendo, por lo que no repercuten en el peso del agua. En éste, únicamente incide el error de pesada del conjunto del sustrato tensionado con su correspondiente tara. Por lo tanto: $\Delta Pag = \Delta$ Peso tensionado.

2.1.6.5.1 Incidencia en la Porosidad total (%Pt) y en el volumen ocupado por material sólido (%Vms)

Partimos de la expresión de la porosidad total dada por (3):

$$(65) \quad \%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right)$$

El peso del agua no interviene en el cálculo de la porosidad total

2.1.6.5.2 Incidencia en el volumen ocupado por agua (%Vag)

El volumen de agua lo tomamos de la expresión (9)

$$(66) \quad \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}$$

Procediendo como en 2.1.6.4.2:

$$(67) \quad \Delta\%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{1}{\%S \times Ph} \times \Delta Pag$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada, y aplicando el mismo razonamiento que en 2.1.6.4.3:

$$(68) \quad \Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\frac{1}{Pag} \times \Delta Pag \right]$$

2.1.6.5.3 Incidencia en el volumen ocupado por aire (%Vai)

El punto de partida viene dado por la expresión (13):

$$(69) \quad \%Vai = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right)$$

Incrementando, restando y operando como en 2.1.6.4.3:

$$(70) \quad \Delta \%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{1}{\%S \times Ph} \times \Delta Pag$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada, y operando como en 2.1.6.4.3, se llega a:

$$(71) \quad \Delta \%Vai = -\%Vag \times \left[\frac{1}{Pag} \times \Delta Pag \right]$$

2.1.6.6 Incidencia de los errores del peso de la muestra con la humedad de la muestra de laboratorio (Ph)

2.1.6.6.1 Incidencia en la Porosidad total (%Pt) y en el volumen ocupado por material sólido (%Vms)

Partimos de la expresión de la porosidad total dada por (3):

$$(72) \quad \%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right)$$

El valor Ph no interviene en el cálculo de $\%Pt$

2.1.6.6.2 Incidencia en el volumen ocupado por agua (%Vag)

El volumen de agua lo tomamos de la expresión (9)

$$(73) \quad \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S \times Ph}$$

Operando como en 2.1.6.4.2:

$$(74) \quad \Delta \%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S} \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada y operando como en 2.1.6.4.2

$$(75) \quad \Delta \%Vag = \%Vag \times \left[Ph \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right) \right]$$

2.1.6.6.3 Incidencia en el volumen ocupado por aire (%Vai)

El punto de partida viene dado por la expresión (13):

$$(76) \quad \%Vai = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} - Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right)$$

Incrementando, restando y operando como en 2.1.6.2.1 se obtiene:

$$(77) \quad \Delta \%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S} \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada y teniendo en cuenta el valor de %Vag dado por la expresión (66) se obtiene:

$$(78) \quad \Delta \%Vai = -\%Vag \times \left[Ph \times \left(\frac{1}{Ph} \right) \right]$$

2.1.6.7 Análisis de las expresiones de error obtenidas

En Tabla 10 y Tabla 11 se resumen las relaciones obtenidas para calcular el error de medida en función de las medidas de laboratorio, y en función de los porcentajes de volumen, respectivamente.

Los conceptos que intervienen en las expresiones de las dos tablas son similares, y las conclusiones a las que se llega son las mismas en ambos casos. El análisis de las expresiones de la Tabla 11 es más sencillo y más claro que el de las expresiones de la Tabla 10. Por ello, se realiza el análisis detallado de las expresiones de la Tabla 11 y, finalmente, se hace una evaluación conjunta teniendo en cuenta la información de ambas tablas.

Los datos que interesa conocer sobre el error son:

- Signo (2.1.6.7.1)
- Factores que afecta a su magnitud (2.1.6.7.2)
- Intervalo de variación para los materiales utilizados normalmente como sustratos de cultivo (2.1.6.7.4)

En la Tabla 11 se observa que las expresiones del error se pueden descomponer en tres factores:

- Signo general de la expresión (2.1.6.7.1)
- Factor de escala (2.1.6.7.2.1)
- Función de la variable incrementada (encerrada entre corchetes [...]) (2.1.6.7.2.2)

2.1.6.7.1 Signo del error

El signo del error indica la relación entre sobrevaloración e infravaloración de las medidas de laboratorio y las medidas calculadas. Si el signo del error es positivo, significa que los incrementos de la medida de laboratorio y el de la variable calculada son del mismo signo, y por lo tanto la sobrevaloración o infravaloración de la primera produce la sobrevaloración o

infravaloración, respectivamente de la segunda. Si, por el contrario, el signo del error es negativo, las variaciones de la medida de laboratorio y calculada son de signo contrario, el error de sobrevaloración de la primera provoca la infravaloración de la segunda y viceversa el error de infravaloración de la primera provoca la sobrevaloración de la segunda.

El signo del error se obtiene del producto de signos de los tres factores de la expresión:

- Signo general de la expresión (2.1.6.7.1.1)
- Signo del factor de escala (2.1.6.7.1.2)
- Signo de la función de la variable incrementada (2.1.6.7.1.3)

2.1.6.7.1.1 Signo general de la expresión

El signo general de la expresión depende de la variable calculada, por lo que es el mismo para cada una de las columnas de Tabla 10 y Tabla 11, y es común para las columnas equivalentes de ambas tablas. Este signo es positivo (+) para %Vms y %Vag, y negativo (-) para %Pt y %Vai. La relación de complementariedad entre %Pt y %Vms hace que los errores respectivos sean de signo contrario. El procedimiento de cálculo de %Vai hace que el error de éste sea de signo contrario al de la suma de errores de %Vms y %Vag. Dado que el signo de estos dos volúmenes es positivo, el de %Vai ha de ser necesariamente negativo

2.1.6.7.1.2 Signo del factor de escala

Si se prescinde del signo general de la expresión, ya analizado, el signo del factor de escala es siempre positivo. Como puede verse en la Tabla 11, el factor de escala es siempre un porcentaje de volumen, que siempre es positivo.

2.1.6.7.1.3 Signo de la función de la variable incrementada

La función de la variable incrementada se presenta en la Tabla 11 entre corchetes ([...]). Esta función presenta dos formas posibles:

- $\frac{1}{x} \times \Delta x$
- $x \times \Delta\left(\frac{1}{x}\right)$

Siendo x la variable incrementada.

Para un incremento positivo de x , el valor de la primera función es positivo, y el de la segunda negativo. Si el incremento de x es negativo, el valor de la primera función es negativo, y el de la segunda es positivo. Por lo tanto, el signo de la primera función es positivo y el de la segunda negativo.

El valor de x y de $1/x$ es siempre positivo, por lo que el signo de las dos funciones indicadas depende exclusivamente de Δx e $\Delta(1/x)$. La deducción del signo del primer caso es por lo tanto inmediata.

La relación entre el signo Δx e $\Delta(1/x)$, se demuestra con el siguiente razonamiento:

$$(79) \quad \left. \begin{array}{l} \Delta x = x_2 - x_1 \\ \Delta x > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow x_2 - x_1 > 0 \Rightarrow x_2 > x_1$$

$$(80) \quad \left. \begin{aligned} \Delta\left(\frac{1}{x}\right) &= \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \\ \Delta x > 0 \Rightarrow x_2 > x_1 &\Rightarrow \frac{1}{x_2} < \frac{1}{x_1} \Rightarrow \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} < 0 \end{aligned} \right\} \Delta x > 0 \Rightarrow \Delta\left(\frac{1}{x}\right) < 0$$

De forma análoga se demuestra:

$$(81) \quad \Delta x < 0 \Rightarrow \Delta\left(\frac{1}{x}\right) > 0$$

Por lo que se puede concluir:

$$(82) \quad \text{Signo}\left[\Delta\left(\frac{1}{x}\right)\right] = -\text{Signo}[\Delta x]$$

2.1.6.7.1.4 Signos obtenidos para las expresiones de error

En la Tabla 5 se resume el signo del error de la variable calculada, en función de la medida de laboratorio. El valor del signo de esta tabla se obtiene del producto del signo general de la expresión y del signo de la función de la variable incrementada. Cuando el signo es positivo (+), la sobrevaloración o infravaloración de la medida de laboratorio tiene como consecuencia la sobrevaloración o infravaloración de la variable calculada, respectivamente. Si el signo es negativo (-), la sobrevaloración o infravaloración de la medida de laboratorio tiene como consecuencia la infravaloración o sobrevaloración, respectivamente, de la variable calculada.

	<i>%Pt</i>	<i>%Vms</i>	<i>%Vag</i>	<i>%Vai</i>
<i>Da</i>	-	+	+	-
<i>Dr</i>	+	-	•	+
<i>%S</i>	•	•	-	+
<i>Pag</i>	•	•	+	-
<i>Ph</i>	•	•	-	+

Tabla 5: Metodología de De Boedt: Relación entre los signos de los errores de la medida de laboratorio y de la variable calculada.

2.1.6.7.2 Factores que afectan a la magnitud del error

Los factores que afectan a la magnitud del error son el factor de escala y la función de la variable incrementada. El factor de escala depende de la variable calculada, por lo que es común para todas las casillas de una misma columna. La función de la variable incrementada es función de la medida de laboratorio, por lo que es común a todas las casillas de la misma fila. El valor absoluto se obtiene por el producto entre ambas.

2.1.6.7.2.1 Factor escala

En la evaluación del error utilizando las expresiones de la Tabla 11, el factor de escala depende exclusivamente de la variable calculada, por lo que este es común para todos los elementos de una misma columna, excepto en el caso de %*Vai*.

Dado que %*Pt* y %*Vms* son complementarios, sus errores son iguales en magnitud. El factor de escala es %*Vms*. Por lo tanto, el error es tanto mayor cuanto menor sea la porosidad total del sustrato.

En el caso de %*Vag*, el factor de escala es el propio %*Vag*. El error cometido es proporcional al contenido hídrico, por lo que los errores son mayores para tensiones bajas.

El factor de escala correspondiente a %*Vai* no es común a toda la columna, como en los casos anteriores. Esto es debido al método de cálculo del volumen ocupado por aire, por diferencia entre la porosidad total y %*Vag*. El factor de escala obtenido es igual a la suma de los factores de escala de uno y otro, o bien a la suma del factor de escala de %*Vms* y %*Vag*.

2.1.6.7.2.2 Función de la variable incrementada

Como se ha visto anteriormente al hablar del signo, para las expresiones de la Tabla 11, la función de la variable incrementada puede tener dos formas:

- $\frac{1}{x} \times \Delta x$
- $x \times \Delta\left(\frac{1}{x}\right)$

Para un mismo valor de Δx , el valor absoluto de ambas expresiones es decreciente para valores crecientes de x . La deducción del primer caso es directa, puesto que el valor de x divide al del incremento o error.

Respecto al segundo caso, podemos hacer la siguiente deducción:

$$(83) \quad x \times \Delta\left(\frac{1}{x}\right) = x \times \left(\frac{1}{x + \Delta x} - \frac{1}{x}\right) = \frac{x}{x + \Delta x} - \frac{x}{x} = \frac{x}{x + \Delta x} - 1$$

Si se analiza el minuendo de la expresión:

$$(84) \quad \frac{x}{x + \Delta x} = \frac{1}{\frac{x + \Delta x}{x}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta x}{x}} \therefore \frac{\Delta x}{x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0 \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{\Delta x}{x}} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 1$$

Por lo tanto:

$$(85) \quad \left. \begin{array}{l} x \times \Delta\left(\frac{1}{x}\right) = \frac{x}{x + \Delta x} - 1 \\ \frac{x}{x + \Delta x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 1 \end{array} \right\} \frac{x}{x + \Delta x} - 1 \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0 \Rightarrow x \times \Delta\left(\frac{1}{x}\right) \rightarrow 0$$

Por lo tanto, la magnitud de los errores inducidos en el cálculo de volúmenes por un determinado error de Da , Dr , $\%S$, Pag y Ph , será tanto menor cuanto mayor sea el valor de la medida de laboratorio causante del error.

2.1.6.7.3 Incidencia de los errores en el cálculo de volúmenes

Una vez conocidos los factores que afectan al signo y magnitud del error, interesa conocer como evolucionan los errores del reparto volumétrico, calculado en función de las propiedades físicas del material poroso utilizado como sustrato.

2.1.6.7.3.1 Porosidad total y Volumen ocupado por material sólido

Como ya se ha visto anteriormente, de las ecuaciones de la Tabla 11 se desprende que la incidencia del error es directamente proporcional a $\%Vms$, y que los errores inducidos por Da y Dr disminuyen al aumentar Da o Dr , respectivamente.

De las expresiones de la Tabla 10 se desprende que la incidencia del error de Da es inversamente proporcional a Dr , y que el error inducido por Dr es directamente proporcional a Da . Los errores de $\%S$, Pag y Ph no tienen incidencia en el cálculo de la porosidad total.

En consecuencia, la sensibilidad de la porosidad total a los errores de las medidas de laboratorio, tanto Dr como Da , aumenta con la disminución de la porosidad total, por lo que se debe tener cuidado con los sustratos de baja porosidad. La sensibilidad a los errores de la Da aumenta con la disminución de Dr , por que se debe de prestar especial atención a los sustratos de baja Dr . Finalmente, la sensibilidad a los errores de la Dr aumenta con el aumento de la Da .

2.1.6.7.3.2 Porcentaje de volumen de agua

De las expresiones de la Tabla 11 se desprende que la incidencia del error es directamente proporcional al porcentaje de volumen de agua, y que los errores inducidos por cada una de las medidas de laboratorio implicadas en el cálculo disminuyen al aumentar el valor de la variable respectiva.

En las expresiones de la Tabla 10 se observa también que el error es directamente proporcional al contenido hídrico, puesto que interviene el valor de Pag (excepto en el error inducido por Pag). Además, el error inducido por $\%S$ y Ph es directamente proporcional a Da .

En consecuencia, la sensibilidad del porcentaje de volumen ocupado por agua a los errores de las medidas de partida Dr , Da , $\%S$ y Ph , aumenta con el aumento del contenido hídrico, por lo que se debe prestar mucha atención cuando se trabaja a bajas tensiones. La sensibilidad a los errores de la $\%S$ y Ph aumenta cuando aumenta Da , por lo que se debe hacer hincapié en los materiales con Da elevada, entre los que se encuentra muchos de los materiales alternativos.

2.1.6.7.3.3 Porcentaje de volumen de aire

Como ya se ha visto, el error del volumen ocupado por aire es igual a la suma de los errores de $\%Vms$ y $\%Vag$. Por lo tanto, y teniendo en cuenta que el error de $\%Vms$ es proporcional a $\%Vms$ y que el error de $\%Vag$ es proporcional a $\%Vag$, se deduce que el error de $\%Vai$ aumenta con los valores de $\%Vms$ y de $\%Vag$, es decir cuanto menor sea el contenido de aire mayor será el error cometido en la estimación del volumen de aire en el sustrato. En

consecuencia los errores, de medida de %*Vai* son especialmente importantes cuando se trabaja a bajas tensiones. De los parámetros definidos por De Boodt para describir la curva de retención de agua, el más afectado es la Capacidad de Aireación, correspondiente al %*Vai* a 10 cm de tensión.

2.1.6.7.4 Intervalos de error

Una vez analizadas las expresiones de cálculo del error y los factores que inciden en ellas, aumentando o disminuyendo su magnitud, se han establecido unos intervalos de variación de las propiedades físicas de los sustratos que intervienen en el cálculo de errores, y, a partir de estos valores, se han calculado los intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico.

Fuente	Mínimo	Máximo
<i>Da</i>	0.1	0.3
<i>Dr</i>	2.5	1
<i>Pag/Ps</i>	0.5	10
% <i>S</i>	95	40
<i>Vt</i>	150	250
<i>Ph</i>	25	80
<i>Pt</i>	80	95

Tabla 6: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 10. La columna *mínimo* corresponde a los valores que proporcionan menor error en la variable calculada. La columna *máximo* corresponde a los valores que proporcionan mayor error en la variable calculada.

	Error	% <i>Pt</i>		% <i>Vms</i>		% <i>Vag</i>		% <i>Vai</i>	
		mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
<i>Da</i>	0.005	-0.20	-0.50	0.20	0.50	0.25	5.00	-0.45	-5.50
<i>g</i> *cm ⁻³	0.010	-0.40	-1.00	0.40	1.00	0.50	10.00	-0.90	-11.00
<i>Dr</i>	0.100	0.15	2.73	-0.15	-2.73			0.15	2.73
<i>g</i> *cm ⁻³	0.400	0.55	8.57	-0.55	-8.57			0.55	8.57
% <i>S</i>	1.000					-0.05	-3.66	0.05	3.66
	3.000					-0.15	-10.47	0.15	10.47
<i>Pag</i>	0.100					0.07	0.04	-0.07	-0.04
<i>g</i>	1.000					0.67	0.40	-0.67	-0.40
<i>Ph</i> (g)	0.100					-0.02	-0.19	0.02	0.19

Tabla 7: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico, aplicando las expresiones de la Tabla 10 y los intervalos de la Tabla 6.

En Tabla 6 y Tabla 8 se detallan los intervalos considerados para las medidas de laboratorio que intervienen en las expresiones detalladas en Tabla 10 y Tabla 11, respectivamente. La primera columna de valores de estas tablas proporciona los valores del intervalo para obtener el error mínimo, y la columna de la derecha da los valores que

proporcionan el máximo error en el reparto volumétrico. En Tabla 7 y Tabla 9 se detallan los valores de los errores del reparto volumétrico aplicando, las expresiones de Tabla 10 y Tabla 11 respectivamente y teniendo en cuenta los valores de Tabla 6 y Tabla 8 respectivamente.

	Mínimo	Máximo
<i>Da</i>	0.3	0.1
<i>Dr</i>	2.5	1
<i>Pag</i>	225	15
<i>%S</i>	95	40
<i>Ph</i>	79	38
<i>%Vms</i>	5	20
<i>%Vag</i>	10	90
<i>%Vai</i>	90	5
<i>Vt</i>	150	250
<i>Ps</i>	15	75

Tabla 8: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 11. La columna *mínimo* corresponde a los valores que proporcionan menor error en la variable calculada. La columna *máximo* corresponde a los valores que proporcionan mayor error en la variable calculada.

2.1.6.7.4.1 Intervalos de las variables independientes

Los intervalos de error considerados para las medidas de laboratorio se detallan en la primera columna de Tabla 7 y Tabla 9.

Los valores de las variables *Ph* y *Pag* se obtienen directamente en laboratorio, con una balanza. Las balanzas utilizadas normalmente para este fin tienen una precisión de 0,01 g por lo que no es normal que el error de medida supere en mucho a esta cifra; en cualquier caso, el valor de 0,1 g debe considerarse como el máximo debido al error de medida. En el caso de *Pag* se considera además el error de 1g. Es prácticamente imposible cometer este error por gravimetría. Sin embargo, en ocasiones aparecen burbujas en la parte del embudo que debe estar llena de agua, con lo que se pierde la tara. El error considerado de 1 g puede producirse por la aparición de una burbuja de 1 cm³ de aire.

Los errores considerados para las variables *Da*, *Dr* y *%S*, son más elevados. Estos errores son posibles y frecuentes, por la rutina de laboratorio empleada. Los valores de *Da*, *Dr* y *%S* empleados en el cálculo de volúmenes corresponden a los valores medios obtenidos por metodologías independientes, desarrolladas al efecto. Efectuando varias mediciones de una misma variable sobre diversas muestras, se obtiene el valor medio y la variabilidad del valor medido (por ejemplo desviación estándar). El valor medio obtenido será tanto más fiable cuanto menor sea la variabilidad de las medidas y, por lo tanto, el error probable cometido por emplear en un cálculo el valor medio -en lugar del valor verdadero- será tanto mayor cuanto mayor sea la variabilidad de las medidas obtenidas.

Los métodos empleados para medir estas variables permiten la realización de una única medida sobre cada muestra (1.3.5.3.2.3). La variabilidad observada para las medidas obtenidas es debida a los efectos añadidos de la precisión del método de laboratorio y de la variabilidad

propia del sustrato, y es tanto mayor cuanto mayor sea la heterogeneidad del sustrato (1.3.5.3.2.2). En consecuencia, los valores de la desviación estándar de los valores obtenidos son elevados, proporcionando unos intervalos de confianza muy amplios para los valores de Da , Dr y $\%S$.

En consecuencia, los errores probables cometidos por el empleo del valor medio de Da , Dr y $\%S$, son elevados por la incidencia de la variabilidad propia del sustrato en la variabilidad del valor medido. Este error probable es tanto mayor cuanto mayor sea la variabilidad del material analizado. Por este motivo, se han considerado para estas variables unos intervalos de error amplios en términos relativos, pero no improbables.

	Error	%Pt		%Vms		%Vag		%Vai	
		mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	Máximo
Da	0.005	-0.08	-1.00	0.08	1.00	0.17	4.50	-0.17	-4.75
$g \cdot cm^{-3}$	0.010	-0.17	-2.00	0.17	2.00	0.33	9.00	-0.33	-9.50
Dr	0.1	0.19	1.82	-0.19	-1.82			0.19	1.82
$g \cdot cm^{-3}$	0.4	0.69	5.71	-0.69	-5.71			0.69	5.71
$\%S$	1					-0.10	-2.20	0.10	2.20
	3					-0.31	-6.28	0.31	6.28
Pag	0.1					0.00	0.00	0.00	0.00
g	1.0					0.00	0.01	0.00	-0.01
Ph (g)	0.10					-0.01	-0.24	0.01	0.24

Tabla 9: Metodología de De Boodt: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico aplicando las expresiones de la Tabla 11 y los intervalos de la Tabla 8

La variabilidad de las medidas obtenidas para Da , Dr y $\%S$ es tanto menor cuanto más homogénea sea la muestra de laboratorio, de ahí la importancia de la homogeneización previa de la muestra. Cuando la homogeneización es deficiente, porque el método aplicado es inadecuado o porque el sustrato en sí mismo es heterogéneo, aumenta considerablemente la variabilidad de las medidas obtenidas y, en consecuencia, el error probable por el empleo de los valores medios de Da , Dr y $\%S$.

Los errores de la densidad aparente considerados son 0,005 y 0,1 g/cm^3 . el primero, a pesar de ser bajo, tiene una incidencia muy importante, sobre todo en $\%Vag$, que se arrastra a $\%Vai$. El valor máximo no puede considerarse excesivo si se repasan los valores de la desviación estándar de la Da que se presentan en la bibliografía (por ejemplo, Verdonck *et al.*, 1978; Gabriëls *et al.*, 1991). La variabilidad aumenta cuando se trabaja con sustratos de una amplia gama granulométrica, o con mezclas de sustratos.

Para la densidad real se han considerado los errores de 0,1 y 0,4 g/cm^3 . Los mismos factores que inciden en la variabilidad de la medida de Da , inciden en la variabilidad de Dr . Pero la fuente de error más importante en este caso es el empleo de un método de medida de densidad real no adecuado para el objetivo planteado, por ejemplo el empleo de un método no sensible a la presencia de porosidad ocluida cuando se pretende medir la porosidad abierta.

Por último, para el porcentaje de humedad de la muestra de laboratorio ($\%S$), los valores de error considerados son 1 y 3%. La distribución de la humedad en las muestras de sustrato puede presentar diferencias importantes de unos puntos a otros si no se almacena y homogeneiza

adecuadamente, y, a veces, la homogeneización resulta una tarea difícil de conseguir. La heterogeneidad de la distribución de humedad en la muestra de laboratorio puede estar causada por las diferencias de altura en la muestra de sustrato y por el gradiente de humedad que se produce cuando se alcanza el equilibrio hídrico. Este efecto es tanto mayor cuanto más húmeda esté la muestra de sustrato. Otro efecto que incide en la distribución heterogénea de la humedad es el desecamiento de la capa exterior de la muestra por exposición al aire, presentando un gradiente de humedad desde la parte externa hacia el centro. Si la muestra se manipula adecuadamente, este efecto no tiene por qué ser importante. Por último, la diferente distribución de la humedad entre los diferentes componentes de una mezcla, y entre las diferentes granulometrías de un mismo material, puede provocar una situación en la que la homogeneización sea difícil de conseguir. En este caso, el contenido de humedad de cada una de las muestras analizadas estará estrechamente relacionado con los componentes de la mezcla, o la distribución granulométrica de cada muestra, proporcionando una elevada variabilidad de los valores obtenidos.

2.1.6.7.4.2 Error inducido en la medida de la porosidad total y % de volumen ocupado por material sólido

Los errores de la porosidad total y $\%Vms$ son debidos a los errores de Da y Dr . Los errores de Pag , $\%S$ y Ph , no tienen incidencia en la medida de la porosidad total (2.1.6.7.3.1).

Para los intervalos considerados, el error máximo de la porosidad total debido al error de Da es 2% (Tabla 9). Este error corresponde a un sustrato con $Da=0,1$, $\%Vms=20$ e $\Delta Da=0,1$ g/cm³. El error aumenta con el $\%Vms$ y con el error de la Da , y disminuye con el aumento de la densidad aparente. El valor considerado de $\%Vms$ es alto (20%), y no es frecuente -aunque sí posible- encontrar valores muy superiores al considerado en este caso.

El error inducido en la porosidad total por el error de Dr puede alcanzar, para los intervalos considerados, valores altos, de casi 9% (Tabla 7). Este error se obtiene con un valor elevado de la densidad aparente (0,3 g/cm³) y un valor bajo de la densidad real (1 g/cm³). El valor del error aumenta con Da y $\%Vms$, y disminuye con el aumento de Dr . Sin embargo, las causas de este error tan abultado son debidas a la incidencia de un valor elevado de ΔDr (0,4) que se presenta cuando se emplea un método de medida de la densidad real inadecuado para el objetivo de trabajo propuesto.

2.1.6.7.4.3 Error inducido en la medida de volumen ocupado por agua

El valor de volumen ocupado por agua es sensible a los errores de Da , Pag , $\%S$ y Ph . No le afectan los errores de medida de Dr .

Los errores de esta variable, para los intervalos considerados, son mayores que los de $\%Vms$. El $\%Vag$ es muy sensible a los errores de medida de la densidad aparente y de $\%S$. Los errores mayores se dan en condiciones de elevados contenidos hídricos.

Para el cálculo de estos errores se ha empleado el valor de Pag/Ps en lugar de $100*Pag/(Ph*\%S)$, dado que el primero es más representativo que el segundo.

Así en la Tabla 7 se observa que con un valor de $Pag/Ps=10$:

- El error inducido en $\%Vag$ es de 5% y del 10% para unos valores de ΔDa de 0,005 y 0,01, respectivamente.

- El error inducido en $\%Vag$ es de -3.66% y -10.47% para unos valores de $\Delta\%S$ de 1% y 3% respectivamente y con un valor de $Da=0,1$.

En la Tabla 9, para un valor de $\%Vag=90\%$:

- El error inducido en $\%Vag$ es de $4,5\%$ y 9% para unos valores de ΔDa de $0,005$ y $0,01\text{ g/cm}^3$ respectivamente.
- El error inducido en $\%Vag$ es de -2.20% y -6.28% para unos valores de $\Delta\%S$ de 1% y 3% , respectivamente, y con un valor de $\%S=40$.

Los errores son directamente proporcionales al contenido de humedad, medido como Pag/Ps o $\%Vag$ según los casos. Los valores de humedad considerados son altos ($Pag/Ps=10$ y $\%Vag=90$). El descenso de estos índices de humedad provoca un descenso proporcional de la incidencia del error, por lo que si se mantienen las condiciones de elevado contenido hídrico, el error sigue siendo igualmente importante. Para disminuir el error a la mitad sería necesario disminuir a la mitad el contenido hídrico, pasando a $Pa/Ps=5$ ó $\%Vag=45$.

El error debido a $\Delta\%S$ y el de ΔPh , calculados con las expresiones correspondientes a la Tabla 10, es directamente proporcional al valor de Da . Empleando los valores de los intervalos para obtener el valor máximo del error, se deberían emplear $Da=0,3\text{ g/cm}^3$ y $Pa/Ps=10$. La coincidencia de estos dos valores en un sustrato real es poco probable, por lo que en estos casos concretos se ha hecho $Da=1,5\text{ g/cm}^3$.

2.1.6.7.4.4 Error inducido en la medida de volumen ocupado por aire

El error del volumen ocupado por aire es igual a la suma de los errores de $\%Vms$ y $\%Vag$.

En el caso del error debido a ΔDa (Tabla 9) el error de $\%Vms$ se ha calculado para un sustrato de $Da=0,1\text{ g/cm}^3$ y $\%Vms=20$. El error de $\%Vag$ se ha calculado para un valor de $Da=0,1\text{ g/cm}^3$ y $\%Vag=90$. Los valores de $\%Vms=20$ y $\%Vag=90$ no se pueden dar simultáneamente en un mismo sustrato, por lo que el error máximo de $\%Vai$ no es igual a la suma de los valores máximos de $\%Vms$ y $\%Vag$. En consecuencia, para el cálculo del error de $\%Vai$ se ha considerado un sustrato con $Da=0,1\text{ g/cm}^3$ y $\%Vai=5$. Se obtiene así un valor de -4.75% y -9.50 en lugar de -5.5% y -11% , que proporcionan la suma de los anteriores. El valor de este error es directamente proporcional a la diferencia $100-\%Vai$, por lo que aumenta cuando disminuye el mencionado $\%Vai$.

El resto de las variables inciden en $\%Vms$ o $\%Vag$, pero no en los dos, por lo que el error máximo de $\%Vai$ se obtiene directamente a partir de los anteriores.

Los valores del error de $\%Vai$ confirman la sensibilidad de este parámetro a los errores de Da , Dr y $\%S$, cuando se presenten contenidos de humedad elevados, y da una idea de los errores que pueden cometer en las medidas próximas a saturación, como es el caso del contenido de aire a 10 cm de tensión (capacidad de aireación), sobre todo en sustratos con una elevada retención de humedad.

2.1.6.8 Exactitud y precisión de las medidas indirectas obtenidas

Teniendo en cuenta la metodología seguida en el cálculo de volúmenes, para el estudio de la incidencia de los errores de las medidas directas se deben hacer dos grupos: por una parte se consideran Da , Dr y $\%S$, y por otra, Pag y Ph .

Los valores de la densidad aparente (Da), la densidad real (Dr) y el porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio ($\%S$) empleados en el cálculo de volúmenes, son comunes a todas las repeticiones de un mismo sustrato. La precisión con que se han obtenido estas medidas incide en la precisión del reparto volumétrico calculado. La evaluación de la precisión de una medida calculada a partir de la precisión de las medidas de laboratorio de este grupo es un problema estadístico que, en ocasiones, no tiene una solución fácil.

La exactitud de la evaluación de estas medidas de laboratorio incide de la misma forma en todas las repeticiones de un mismo sustrato. Se trata, por lo tanto, de un error sistemático, que incide en la exactitud de las medidas indirectas obtenidas a partir de ellas.

Los valores del peso de la muestra de sustrato con la humedad de laboratorio (Pag), y el peso de la muestra de sustrato tensionado (Ph), se obtienen para cada una de las repeticiones. La incidencia de factores fijos, como el calibrado incorrecto de la balanza u otros errores sistemáticos, inciden de la misma forma en todas las medidas efectuadas y, por lo tanto, en la exactitud de la medida realizada. Los factores aleatorios inciden en la precisión de la medida directa. Dado que se efectúa una medición en cada una de las repeticiones, la incidencia de los factores aleatorios en una medida directa es independiente de la incidencia en el resto de las mediciones efectuadas. Esta incidencia se transmite a través del modelo a la correspondiente medida indirecta. De esta forma, se puede evaluar la precisión del reparto volumétrico debido a la precisión de Ph y de Pag .

Como se ha visto en 1.3.5.3.1.1, para evaluar la exactitud de las medidas es necesario disponer de valores de referencia absolutos (patrones) o relativos. En el caso de la medida del reparto de volúmenes en sustratos de cultivo, no se dispone de patrones de referencia. Respecto a los valores de referencia relativos, el estudio de las relaciones físicas indica que la suma del porcentaje de volúmenes ocupados por material sólido, agua y aire es igual a 100. Se podría emplear esta relación para obtener una evaluación del error global del método, pero se emplea para calcular el volumen ocupado por aire. Esto provoca el efecto anteriormente comentado, de la acumulación en el volumen ocupado por aire de los errores de los volúmenes de material sólido y agua, de tal forma que, cuando se suman los valores obtenidos para los tres volúmenes, el valor obtenido es 100, produciéndose la ocultación -por compensación- de los errores de medida de los distintos volúmenes.

En consecuencia, la metodología no permite conocer la exactitud de las medidas de los volúmenes ocupados por las diferentes fases. Respecto a la precisión, se puede conocer sin problemas la componente debida a las medidas de Ph y Pag , pero la evaluación de la componente debida a Da , Dr y $\%S$ no es fácil, y normalmente sólo se hace una evaluación cualitativa y subjetiva.

2.1.7 Recapitulación

- La aplicación de la metodología de De Boodt se limita a la modelización del comportamiento hídrico del sustrato en condiciones de equilibrio estático.
- La fiabilidad de la determinación de la densidad aparente y del reparto volumétrico de fases está limitada por la obtención de la adecuada saturación del sustrato y posterior equilibrio a la tensión prefijada.
- El método de determinación de la densidad real está condicionado por las características del espacio poroso.

- La metodología de De Boodt no permite conocer la exactitud de los valores obtenidos para el reparto de volúmenes.
- Respecto a la precisión de estos valores, se puede conocer la componente debida a las medidas de peso de agua y peso fresco de la muestra, pero no la debida a la densidad real, densidad aparente y porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio.
- El error del porcentaje de volumen de aire es directamente proporcional al contenido hídrico de la muestra tensionada, por lo que las medidas a bajas tensiones son poco fiables.
- El valor absoluto del error del porcentaje de volumen de aire se obtiene como suma de los errores de porcentaje de volumen de material sólido y porcentaje de volumen de agua.
- Las medidas que mayor incidencia tienen en los errores del reparto volumétrico son, por este orden, densidad aparente, porcentaje de materia seca de la muestra de laboratorio, y densidad real. La metodología de cálculo empleada no permite conocer la incidencia de estos errores en la exactitud ni en la precisión de los valores obtenidos para el reparto volumétrico de fases.

Finalmente, es importante destacar la naturaleza de los sustratos empleados. Algunos trabajos de De Boodt tratan sobre la búsqueda de materiales alternativos a la turba. Sin embargo, es éste el material más utilizado. La mayor parte de los materiales alternativos a la turba tienen una densidad aparente superior y una porosidad total inferior. Como se ha visto, ambas características tienen como consecuencia el aumento de la incidencia de los errores de medida en los errores del cálculo del reparto volumétrico.

Fuente \ Error	% Porosidad total (Pt)	% Volumen material sólido (%Vms)	% Volumen agua (%Vag)	% Volumen aire (%Vai)
Da	$\Delta\%Pt = -100 \times \frac{1}{Dr} \times \Delta Da$	$\Delta\%Vms = 100 \times \frac{1}{Dr} \times \Delta Da$	$\Delta\%Vag = 10^4 \times \frac{Pag}{\%S \times Ph} \times \Delta Da$	$\Delta\%Vai = -100 \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{Pag}{Ph} \times \frac{100}{\%S} \right) \times \Delta Da$
Dr	$\Delta\%Pt = -100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$	$\Delta\%Vms = 100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$		$\Delta\%Vai = -100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$
%S			$\Delta\%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right)$	$\Delta\%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{Pag}{Ph} \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right)$
Pag			$\Delta\%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{1}{\%S \times Ph} \times \Delta Pag$	$\Delta\%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{1}{\%S \times Ph} \times \Delta Pag$
Ph			$\Delta\%Vag = 10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S} \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right)$	$\Delta\%Vai = -10^4 \times Da \times \frac{Pag}{\%S} \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right)$

Tabla 10: Metodología de De Boodt: Cálculo de la incidencia de los errores de las mediciones de laboratorio en las variables calculadas

Fuente \ Error	% Porosidad total (Pt)	% Volumen material sólido (%Vms)	% Volumen agua (%Vag)	% Volumen aire (%Vai)
Da	$\%Pt = -\%Vms \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$	$\%Vms = \%Vms \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$	$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$	$\Delta\%Vai = -(100 - \%Vag) \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$
Dr	$\Delta\%Pt = -\%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$	$\Delta\%Vms = \%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$		$\Delta\%Vai = -\%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$
%S			$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\%S \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right) \right]$	$\Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[\%S \times \Delta \left(\frac{1}{\%S} \right) \right]$
Pag			$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\frac{1}{Pag} \times \Delta Pag \right]$	$\Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[\frac{1}{Pag} \times \Delta Pag \right]$
Ph			$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[Ph \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right) \right]$	$\Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[Ph \times \Delta \left(\frac{1}{Ph} \right) \right]$

Tabla 11: Metodología de De Boodt: Expresión de la incidencia de errores de las variable calculadas en función del porcentaje de volumen

2.2 Metodología de Agricultural Development and Advisory Service (ADAS) del Reino Unido

2.2.1 *Introducción*

Los trabajos de asesoramiento exigen métodos para medidas rutinarias que no sólo deben ser relativamente rápidos y sencillos, sino que además sean aplicables a una amplio rango de componentes de sustratos (Bragg y Chambers, 1988). Estos mismos autores indican que en el desarrollo inicial de un método de asesoramiento para ADAS, en el centro regional de Wolverhampton (Reino Unido), se considera un número importante de objetivos, a saber:

- El equipamiento debe ser asequible y de bajo coste
- Los agricultores deben ser capaces de relacionar su experiencia con el método
- El método debe tener aplicaciones en campo y en laboratorio
- El método debe ser rápido
- Los asesores deben ser capaces de interpretar el resultado y relacionarlo con los sistemas de cultivo

Bragg y Chambers (1988) consideran que la porosidad llena de aire (AFP), o capacidad de aire, de los sustratos es probablemente la propiedad física más importante. Se han desarrollado numerosos métodos para determinar la AFP, que pueden clasificarse en volumétricos y gravimétricos, según se obtenga este valor midiendo el volumen de agua drenado o por diferencia de pesada entre el sustrato húmedo y seco. Tanto los métodos volumétricos como los gravimétricos presentan problemas para conseguir la saturación del sustrato, consumen mucho tiempo en los trabajos de asesoramiento rutinarios, especialmente los gravimétricos, y, a menudo, requieren equipamiento especial de tensionado (Bragg y Chambers, 1988).

Para solucionar estos problemas, Bragg y Chambers (1988) realizan tres ciclos de saturación y drenaje del sustrato y, en lugar de tensionar, dejan drenar por gravedad.

En el método Wolverhampton, el sustrato se prepara en una maceta troncocónica estándar, que se alarga con un collar de extensión. Antes de medir el volumen de agua drenado, es necesario sellar los agujeros de drenaje, utilizando para ello una almohadilla de caucho (Bragg y Chambers 1988). En opinión de Byrne y Carty (1989), esto provoca dos problemas importantes:

- El collar de extensión utilizado para el llenado inicial y saturación de la muestra se sujetaba en un sitio únicamente por fricción. El manejo de la maceta hacía muy fácil la caída del collar con la consiguiente pérdida de la muestra.
- En la etapa final de la prueba, cuando la maceta saturada era transferida al embudo de drenaje, era necesario sellar la maceta con una almohadilla de goma. Esta operación requiere una considerable destreza del operario y no garantiza el sellado completo al agua.

Para resolver estos problemas, el Research & Development of Bord na Mona (Irlanda) modificó el método, sustituyendo la maceta estándar del método Wolverhampton por un cilindro con fondo de doble disco, que permite la apertura y cierre hermético de los agujeros de drenaje. En este nuevo diseño se mejora considerablemente el anclaje del collar de extensión, con lo que

se resuelve el problema de caída y pérdida de la muestra. El sistema de sellado del drenaje minimiza la sensibilidad del método al operador (Byrne y Carty, 1989).

2.2.2 Norma BS 4156:1990 Recommendations for Peat for horticultural and landscape use

Esta norma de British Standard Institution (1990) proporciona recomendaciones para turba para uso agrícola y paisajismo. No es aplicable a envases de menos de 2,5 litros.

Para la medida de la porosidad llena de aire, esta norma aplica el método Wolverhampton (Bragg y Chambers, 1988), con la modificación introducida en el método por Bord na Mona (Byrne y Carty, 1989).

Además de la medida de la porosidad llena de aire, la norma establece la determinación de la cantidad, las normas de etiquetado, los métodos de muestreo, de medida de pH y CE, contenido de humedad y retención de agua, determinación de cenizas, tamaño de partícula y densidad aparente compactada, usando un cilindro de 1 litro.

2.2.3 Desarrollo metodológico

Tanto los medios disponibles como los objetivos que se plantea ADAS para el desarrollo de una metodología de caracterización física de sustratos de cultivo, son completamente distintos a los contemplados para el desarrollo metodológico de De Boodt, dando como resultado un desarrollo metodológico que nada tiene que ver con el anterior.

Cuando se desarrolla esta metodología, la de De Boodt ya se encuentra totalmente desarrollada como metodología específica para la caracterización física de los sustratos. Pero no es la única, y Bragg y Chambers (1988) se apoyan en las metodologías de caracterización desarrolladas para trabajos de asesoramiento. Consideran que la porosidad de aire o capacidad de aire de los sustratos es la propiedad física más importante y desarrollan un método para su medición directa, basándose en los mismos principios que Bugbee y Frink (1986), Goh y Haynes (1977), Handreck (1981), y Handreck y Black (1986).

El objetivo planteado por ADAS para el método es apoyar los trabajos de asesoramiento que exigen métodos para medidas rutinarias de sustratos, que deben ser relativamente rápidos y sencillos, y aplicables a un amplio rango de ingredientes.

El mayor problema de los métodos desarrollados para la medida de la porosidad de aire es conseguir la saturación del sustrato. Otros inconvenientes son que consumen un tiempo excesivo para su uso en trabajos de asesoramiento y que normalmente requieren equipamiento especial de tensionado.

2.2.4 Aplicación de la teoría de modelos

2.2.4.1 Definición del modelo

En la metodología ADAS se plantea un modelo sencillo, que relaciona directamente el valor de porosidad de aire con las condiciones que provoca en el entorno radicular. A partir de estas condiciones, establece la relación entre los valores de la porosidad de aire y el manejo del sustrato (Bragg y Chambers, 1988), y los valores más adecuados para turba en sustratos en contenedor (BS 4156:1990).

2.2.4.2 Metodología de laboratorio

La saturación del sustrato previa a la medida de la porosidad de aire es uno de los problemas planteados para resolver con este desarrollo metodológico. En la medida de la capacidad de contenedor, White y Mastalerz (1986) resuelven este problema con tres ciclos de saturación y drenaje. Bragg y Chambers (1988) emplean el mismo sistema para lograr la saturación total del sustrato.

El equipamiento utilizado inicialmente consistía en una maceta estándar con un anillo de extensión, para asegurar el llenado total de la maceta. La maceta llena de sustrato se somete a los tres ciclos de saturación y drenaje. Finalmente, se retira el anillo de extensión y el sustrato sobrante, y, después de volver a saturar, se mide el volumen de agua drenado (Bragg y Chambers, 1988).

La saturación y drenaje del sustrato en una maceta estándar con el anillo de extensión planteaba numerosos problemas de manejo, que se acentuaban en el momento de la medida del volumen de agua evacuado. Para resolver estos problemas, Byrne y Carty (1989), diseñaron un contenedor cilíndrico con sistema de apertura y cierre de los agujeros de drenaje, que facilita considerablemente el manejo y la medida de la porosidad de aire.

Esta modificación fue aceptada por British Standard en la norma BS 4156:1990. Las variables físicas consideradas en esta norma son:

- Contenido de humedad de la muestra de laboratorio
- Contenido de cenizas
- Distribución del tamaño de partícula
- Densidad compactada
- Porosidad de aire
- Retención de agua

El contenido de humedad de la muestra de laboratorio y el contenido de cenizas se determinan sobre la misma muestra de sustrato, de unos 50 g. Esta se seca a 105 ± 2 °C hasta peso constante, con lo que se obtiene la humedad. Posteriormente se incinera durante 16 h a 470-490 °C (preferiblemente 475), con lo que se obtiene el contenido en cenizas.

Para la distribución del tamaño de partícula emplea tamices de 20, 10, 5 y 1 mm de luz, colocados en columna, y sobre el tamiz superior (el de mayor luz) se coloca la muestra de sustrato seca al aire.

Para obtener la densidad compactada se dispone de un cilindro de $1\text{ l} \pm 25\text{ ml}$ con una relación altura/diámetro entre 1,0 y 1,2, que se llena de sustrato y se somete a una carga de 650 g.

La porosidad de aire se obtiene por medida directa del volumen de agua evacuado, siguiendo la metodología indicada anteriormente.

La retención de agua corresponde al contenido de agua del sustrato tras la medida de la porosidad de aire. Se determina midiendo el contenido de humedad de la turba drenada aplicando el método utilizado para determinar la humedad de la muestra de laboratorio.

2.2.5 *Factores limitantes para su aplicación*

2.2.5.1 Factor limitante 1: variables no consideradas en el modelo.

Los objetivos planteados para el desarrollo metodológico limitan considerablemente las variables medidas para obtener, a cambio, una mayor agilidad en las labores de asesoramiento. Se le da una gran importancia a la simplicidad del método y a la porosidad de aire. El desarrollo del método ha incidido en estos dos hechos y su aplicación se limita a los aspectos en los que la porosidad de aire es importante.

2.2.5.2 Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo.

Una de las exigencias impuesta por los trabajos de asesoramiento es que el método sea aplicable a un amplio rango de ingredientes de sustrato (Bragg y Chambers, 1988). La saturación del sustrato se considera una etapa crítica para la validez del modelo. El método de saturación empleado es eficaz para un abanico muy amplio de propiedades de sustratos, por lo que no hay limitación en cuanto a los sustratos sobre los que se puede aplicar.

2.2.5.3 Factor limitante 3: Errores de medida

La incidencia de los errores cometidos en las mediciones directas son escasos. A diferencia de la metodología de De Boodt, en la metodología ADAS los modelos que relacionan las mediciones directas con las variables objeto de estudio son muy simples, de tal forma que se pueden considerar prácticamente como medidas directas.

En todos los casos, el valor problema se obtiene por producto o cociente entre dos medidas directas, sin intervención de ninguna otra variable que tenga efecto amplificador o reductor del error cometido.

Más que a errores de medición, los errores se pueden producir por una aplicación inadecuada del método, como por ejemplo:

- Una toma de muestra no representativa
- Una homogeneización deficiente antes de tomar la muestra para determinar el contenido de humedad
- La incidencia de la compactación en la medida de la densidad aparente compactada. Si se toman los valores extremos de los intervalos de las medidas dadas para esta medición, la presión aplicada varía de 7,61 a 8,95 g/cm²
- La pérdida de agua del contenedor entre la última saturación y la medida del volumen drenado

Las modificaciones introducidas por Byrne y Carty (1989) redujeron considerablemente la sensibilidad del método al operario, obteniéndose finalmente una metodología fiable para las variables consideradas, siempre que se tenga un cuidado mínimo en la manipulación de las muestras.

2.3 Metodología de referencia de la International Society for Horticultural Science

2.3.1 Origen

El interés por los cultivos en sustrato provocó el desarrollo de numerosas rutinas de laboratorio para el estudio de sus propiedades. Esta situación presentaba una gran cantidad de inconvenientes, por lo que ya se discutió sobre este asunto en los congresos de Gante (Bélgica) y Noordwijk (Holanda) (Verdonck *et al.*, 1978). El primero se celebró en septiembre de 1973 y fue en el que De Boodt presentó la rutina de laboratorio correspondiente a su metodología de caracterización física (De Boodt *et al.*, 1974b). El de Noordwijk se celebró entre los días 7 y 11 de abril de 1975. Como resultado de estas discusiones, Verdonck *et al.* (1978) presentaron, en el congreso de Dublín (Irlanda) celebrado entre los días 19 y 22 de septiembre de 1977, un trabajo de comparación de métodos de análisis físicos en el que participaron 7 laboratorios de 6 países.

Verdonck *et al.* (1978) justifican este trabajo en las consideraciones que se desprenden de las discusiones entabladas en los dos congresos anteriormente mencionados:

- Hay numerosos métodos en uso para la caracterización física de sustratos, casi tantos como laboratorios implicados. Debe tenerse en cuenta que muchos laboratorios prefieren utilizar su propio método, pero el objetivo es tener un método normalizado de referencia aceptado internacionalmente.
- El productor de sustratos solo necesita un método rápido y simple para comprobar si su sustrato reúne los requisitos mínimos exigidos.
- Los agricultores, y por lo tanto todas las rutinas de los laboratorios, quieren obtener estos datos de forma rápida y barata.
- Para los productos de turba, que son todavía materias primas y no están listos para ser utilizados como sustratos, es suficiente tener un método para el control de producción.
- Cuando las propiedades físicas tienen que ser determinadas en sustratos para plantas se tienen que imitar las condiciones físicas durante el cultivo.

Estas consideraciones llevan a los autores a las siguientes conclusiones:

- En aquel momento no se podía dar un método para la determinación de las propiedades físicas que reuniera todas las condiciones
- Debe diferenciarse entre los productos puros de turba, sin mezcla, y los sustratos listos para su utilización.
- Para los sustratos se necesita un método preciso para la caracterización (método de referencia), con dos variantes de compactación. A partir de este método se debe derivar un método simplificado para rutinas de medida, por ejemplo en lugar de determinar toda la curva de pF, determinar solo los puntos más significativos de esta curva.

Los autores tienen en cuenta las necesidades de productores y usuarios de sustratos y concluyen que se debe diferenciar entre las materias primas y los sustratos listos para su utilización. En la comparación de métodos se ponen de manifiesto las grandes diferencias encontradas entre métodos, y la gran incidencia en el volumen ocupado por agua de los errores cometidos en la estimación de la densidad aparente (Verdonck *et al.*, 1978).

Posteriormente, en el *International Symposium on Substrates in Horticulture Other than Soil in situ* celebrado en Barcelona en 1983, Günther (1984) planteó la necesidad de llegar a acuerdos sobre los métodos de caracterización de sustratos de cultivo y los criterios de interpretación.

Günther basó esta necesidad en los problemas que se plantean en las transacciones internacionales de sustratos, por la diversidad de métodos de determinación de las propiedades físicas y de los criterios de interpretación. La importancia de la turba como sustrato de cultivo ya se había puesto de manifiesto en los congresos de la *International Peat Society (IPS)* celebrados en 1969, 1973 y 1975. Este material se comprime con facilidad, por lo que el valor de la densidad aparente y de otros parámetros físicos está fuertemente influenciado por el método de medida empleado (Günther, 1984; Schmilewski y Günther, 1988). El empleo de diferentes métodos de medida, tanto para la densidad aparente como para otras características del sustrato, da lugar a numerosas disputas que podrían evitarse (Günther, 1984; Schmilewski y Günther, 1988). En esta misma línea, Gabriëls y Verdonck (1991) argumentan que, debido a la proliferación de materiales diversos empleados como sustratos de cultivo, han cambiado las investigaciones en control de calidad, y cada laboratorio ha desarrollado su propio método para analizar y caracterizar los sustratos, llegándose a situaciones caóticas cuando se pretenden comparar los resultados obtenidos.

Desde el punto de vista legal y comercial, las normativas desarrolladas en los diferentes países se han basado en diferentes metodologías y criterios de interpretación, reflejando la diversidad existente entre los diferentes institutos y laboratorios. De esta forma, en las transacciones internacionales, el vendedor obtiene una valoración, según su normativa, y el comprador otra, según la suya (Günther, 1984; Gabriëls *et al.*, 1991; Gabriëls, 1995).

Desde el punto de vista del usuario, la importancia que tiene el conocimiento de las propiedades del sustrato para su manejo adecuado, ha dado lugar a una exigencia cada vez mayor de una constancia de las mismas (Gabriëls *et al.*, 1991). Al igual que en otros casos, la disparidad de métodos y criterios de interpretación dificulta el conocimiento, por parte del usuario, de las pautas más adecuadas para manejarlo adecuadamente, por lo que desde este sector se pide también un acuerdo al respecto.

Por todo ello, Günther (1984), en el mencionado congreso de Barcelona, propuso que la ISHS trabajara en colaboración con los institutos comprometidos en el análisis de sustratos para llegar a un acuerdo en los métodos y criterios de interpretación. Los objetivos debían ser los siguientes:

- Conformidad internacional en los métodos de medida
- Declaración de procedimientos de medida en el informe de análisis
- Uso de muestras de referencia estándar para test de laboratorio
- Normalización de procedimientos de medida, por ejemplo determinación de la densidad aparente en estrecha relación con la práctica

El autor señalaba que en un futuro próximo se debían alcanzar estos objetivos para poder asegurar una mejor transferencia de los resultados analíticos a la práctica. Estableciendo un método de referencia, usado por todos los laboratorios, tendremos una norma para expresar los resultados en un mismo sistema y para evaluar los criterios de calidad de los medios de cultivo (Gabriëls *et al.*, 1991).

Como puede observarse, Verdonck *et al.* (1978) y Günther (1984) inciden en distintos problemas; el primero se centra más en problemas técnicos, mientras que el segundo lo hace en problemas de tipo legal y comercial. Pero ambos coinciden en que el motivo de unos y otros es la diversidad de métodos analíticos empleados. Por ello, en ambos casos consideran la necesidad de disponer de un método normalizado de referencia, aceptado internacionalmente

2.3.2 *Desarrollo cronológico*

Como consecuencia del trabajo presentado por Günther (1984) en el congreso de Barcelona, Schmilewski y Günther (1988) presentaron, en el congreso celebrado entre el 5 y 7 de septiembre de 1987 en Gl. Avernæs-Funen (Dinamarca), una comunicación sobre comparación de métodos de medida de las propiedades de los sustratos que pone de manifiesto la relación entre los métodos de caracterización empleados y los valores obtenidos. En este trabajo se compararon los resultados analíticos obtenidos con diferentes técnicas en 23 laboratorios de 12 países, empleando 5 sustratos elaborados industrialmente a partir de turba. Según los autores, este estudio internacional demuestra claramente que:

- ...los resultados obtenidos en los análisis físicos y químicos presentan una dispersión dependiente de los métodos analíticos.
- ...los métodos analíticos habituales, y los datos resultantes de ellos, no permiten hacer una valoración hortícola de los sustratos sobre unas bases internacionales.
- ...las recomendaciones de nutrientes publicadas no son transferibles referidas a ciertos cultivos.

En el apartado de conclusiones, los autores consideran oportuno hacer las siguientes sugerencias:

- Los laboratorios y agricultores no deberían aceptar la diversidad de métodos analíticos para las propiedades de un mismo sustrato
- Los agentes extractantes y las relaciones de extracción deben ser normalizados.
- La determinación de la densidad aparente es muy importante para calcular y evaluar otras propiedades del sustrato que están relacionadas con el volumen, por lo que debe ser normalizada.
- Los contenidos en macro y microelementos deberían ser expresados siempre como mg/l de sustrato.
- Declaraciones de los productos en dos o más lenguas, declaración de resultados analíticos de dos o más métodos analíticos para propiedades físicas y químicas, es totalmente inapropiado y engañoso, y tiene que buscar un objetivo
- Los criterios para evaluar los sustratos deben ser revisados.
- El agricultor tiene que ser capaz de entender los resultados analíticos. Esto no es posible, considerando que incluso de hecho los expertos tienen problemas de comunicación.

En lo referente a las propiedades físicas, las conclusiones de este trabajo coinciden con el anteriormente mencionado de Verdonck *et al.* (1978), y en particular en lo referente a la variabilidad de los resultados obtenidos y la importancia de la determinación de la densidad aparente.

Los autores vuelven a insistir en que debe ser encargado por la 'Commission for Plant Substrates' de la ISHS la puesta en marcha de la normalización de los métodos analíticos.

En este mismo congreso se celebra una sesión de discusión sobre el tema (Verdonck y Gabriëls, 1988), en la que ya se establecen algunas pautas y se convoca una sesión de trabajo especial que se celebró en Gante (Bélgica) los días 19 y 20 de febrero de 1988 (Verdonck y Gabriëls, 1988). En esta reunión de Gante se propuso un 'Método de referencia para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo' (Verdonck y Gabriëls, 1992), que se presentó de forma detallada en el *International Symposium on Compost Recycling of Wastes* celebrado en Atenas los días 4 a 7 de octubre de 1989 (Verdonck y Gabriëls, 1992).

Para confirmar la utilidad del método común y estudiar la variabilidad entre laboratorios, se llevaron a cabo una serie de determinaciones físicas y químicas en 31 laboratorios de 15 países (Gabriëls *et al.*, 1991). Los autores de este trabajo concluyen que, en general, los resultados de la caracterización física se aproximan bastante a lo esperado; sin embargo, los resultados químicos todavía no se corresponden, mostrando una alta variabilidad. Respecto a los parámetros físicos, los autores señalan que la variabilidad de los resultados observados es satisfactoria para la determinación de la mayor parte de los parámetros, pero la variabilidad del % de aire a $pF=1$ es alta, probablemente porque la variabilidad total es debida a la acumulación de las variaciones de los resultados analíticos, contribuyendo factores como el espacio poroso total, % de volumen de agua, densidad real y densidad aparente (Gabriëls *et al.*, 1991).

Para resolver este problema, se han tomado diversas iniciativas por parte de distintas instituciones. Por una parte, son varios los países que han adoptado normativas propias. Por otra, un departamento de la Comisión de la Comunidad Europea, la *Community Bureau of Reference* (BCR según las iniciales en francés), está también muy interesada en la armonización de medidas, acreditación, certificación y especificaciones técnicas (Gabriëls, 1995). La ISHS inició los trabajos en 1970, y en 1992 se publicó en detalle un método de referencia internacional para la determinación de las propiedades físicas y químicas de los sustratos de cultivo (Verdonck y Gabriëls, 1992; Gabriëls, 1995). El Comité Europeo de Normalización tiene en marcha un Comité Técnico (CEN/TC223) para caracterizar y normalizar mejoradores de suelos y medios de cultivo en el que están activos 4 grupos de trabajo: vocabulario, seguridad, muestreo y métodos analíticos (Gabriëls, 1995).

2.3.3 Evolución del método

La necesidad de establecer un método de referencia ha quedado claramente patente. Sin embargo, pronto se vieron las dificultades de tipo práctico que presenta su utilización universal. Una de estas dificultades es la diversidad de los desarrollos metodológicos llevados a cabo en cada laboratorio. Según Gabriëls y Verdonck (1991), en la CEE hay unos 150 laboratorios implicados en Investigación, desarrollo y control de calidad de sustratos, que analizan unas 500.000 muestras por año en un mercado de 20 millones de m^3 .

En el congreso de Guernsey (1990), se habla ya de un procedimiento aceptable de referencia para adaptarlo como método control, usado por todos los laboratorios, con el que poder comparar los resultados analíticos y evaluar los criterios de calidad de los medios de cultivo (Gabriëls *et al.*, 1991).

Posteriormente en el congreso de Naaldwijk (Holanda) de 1994, Gabriëls (1995) insiste en esta idea cuando, hablando de la situación creada por la diversidad de métodos la califica de inaceptable y dice que *es necesario un método de referencia que puede ser comparado con otros procedimientos en diferentes países. De hecho, no se puede esperar que los laboratorios que analizan suelos agrícolas y/o sustratos y mejoradores de suelos adopten un mismo método de inmediato. Sin duda hay muchas circunstancias que ocasionan que diferentes laboratorios*

prefieran diferentes métodos. [...] Es mucho más fácil estar de acuerdo sobre la adopción de un método de referencia que sobre la adopción de métodos individuales.

Parece, por tanto, que la idea inicial de adoptar un único método de caracterización queda definitivamente desechada y se considera la idea de tener un método de referencia, con el que contrastar el método propio de cada laboratorio. Gabriëls (1995) coincide aquí con la idea expresada anteriormente por Verdonck *et al* (1978) en el congreso de Dublín de 1977, sobre la dificultad de conseguir la utilización de un único método por todos los laboratorios, planteándose el objetivo de tener un método normalizado de referencia, aceptado universalmente (Verdonck *et al.*, 1978).

En el congreso de Florencia (1992), Gabriëls *et al.* (1993) presentaron un método rápido para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo. La necesidad de este método la justificaron en *un comentario que se escucha a menudo sobre el método de referencia ISHS antes mencionado es el de que consume mucho tiempo [...] y para trabajar en un sistema científico sólido, el procedimiento de trabajo completo requiere de 10 a 12 días.* En este caso, Gabriëls vuelve a converger con la publicación de Verdonck *et al* (1978), que señalaba que el productor de sustratos necesita un método rápido y simple para probar si su sustrato reúne los requisitos mínimos exigidos.

La necesidad de disponer de unos materiales de referencia ya la puso de manifiesto Günther (1984) en el Congreso de Barcelona de 1983. Posteriormente, en los trabajos de estudio de las características físicas llevado a cabo por el Grupo de Trabajo de Normalización de Métodos Analíticos y Evaluación de los Resultados (Comisión de Sustratos de Cultivo) de la ISHS, se puso de manifiesto la necesidad de contar con unas muestras de referencia (Verdonck *et al.*, 1995). En el Congreso de Florencia (1992), ese grupo de trabajo se comprometió a prestar más atención a este aspecto, y en el congreso de Naaldwijk (Holanda) presentó tres materiales para cubrir este objetivo (Verdonck *et al.*, 1995).

2.3.4 **Desarrollo metodológico**

2.3.4.1 Medios disponibles

Cuando se acomete el desarrollo de la metodología de referencia, se cuenta con un amplio desarrollo de los conceptos aplicables a la caracterización física de sustratos de cultivo. De Boodt no es el único autor que ha trabajado en este desarrollo, pero el grupo de trabajo encargado de desarrollar la metodología asume los trabajos conceptuales de este autor prácticamente en su totalidad.

2.3.4.2 Objetivos

El objetivo principal que se plantea es el desarrollo de una metodología de caracterización física de sustratos de cultivo, que sea aceptada como método de referencia por los distintos laboratorios. Este es el objetivo plantado tanto por Verdonck *et al.* (1978) como por Schmilewski y Günther (1988).

Para conseguir estos objetivos es necesario normalizar los procedimientos de medida y utilizar muestras de referencia estándar.

La propuesta de una metodología para normalizar los procedimientos de medida se presentó en el congreso de Atenas de 1989 (Verdonck y Gabriëls, 1992). Los materiales de referencia se presentaron en el congreso de Naaldwijk (Holanda) de 1995 (Verdonck *et al.*, 1995).

2.3.5 *Aplicación de la teoría de modelos*

Al igual que en la metodología de De Boodt (2.1.5), la aplicación de la teoría de modelos al estudio de la metodología de referencia debe considerar dos conceptos:

- Aplicación de modelos de cultivo para relacionar las propiedades físicas del sustrato con determinados aspectos del cultivo
- Aplicación de metodologías de laboratorio para medir los parámetros físicos que definen las propiedades físicas y que intervienen como variables independientes en el modelo

Sin embargo, la metodología de referencia de la ISHS se refiere exclusivamente a la metodología de laboratorio para medir los parámetros físicos. No desarrolla conceptos nuevos y asume implícitamente los conceptos definidos por De Boodt y la teoría desarrollada al respecto por el mismo autor.

2.3.5.1 Metodología de laboratorio

Aunque los fundamentos teóricos empleados en esta metodología son los mismos que en la de De Boodt, la rutina de laboratorio es completamente diferente. La rutina se describe con detalle en Verdonck y Gabriëls (1992). Las diferencias más importantes entre estas dos metodologías se dan en la preparación de la muestra y el sistema de tensionado.

2.3.5.1.1 *Métodos de laboratorio*

Las muestras se colocan en un conjunto de dos anillos superpuestos, de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura cada uno de ellos. El volumen del cilindro inferior sirve de referencia para la determinación de la densidad aparente, que posteriormente interviene en el cálculo del reparto volumétrico.

Respecto al sistema de tensionado, la placa porosa empleada en los embudos de De Boodt se sustituye, en este caso, por un lecho de arena, con una granulometría que permite una permeabilidad razonable y un valor de burbujeo mínimo de 120 cm de columna de agua (potencial de entrada de aire menor de -120 cm de agua).

Un volumen importante de sustrato ($\cong 10$ litros) se satura y tensiona a 50 cm de columna de agua. A continuación se homogeneiza y se preparan las muestras en los dobles anillos metálicos. Las muestras así preparadas se colocan sobre el lecho de arena, donde se saturan y someten a los valores de tensión prefijados, normalmente 10, 50 y 100 cm de agua. Una vez alcanzado el equilibrio, la muestra se saca del lecho de arena, se quita el anillo superior y el sustrato sobrante, y se pesa, se seca en estufa a 105 °C hasta peso constante, y se vuelve a pesar.

Esta metodología no permite aplicar tensiones sucesivas a una misma muestra, como ocurría en el caso de De Boodt, por lo que se necesita una muestra de laboratorio más voluminosa.

La densidad real se calcula a partir del contenido en cenizas, obtenido por incineración durante 16 horas a 600 °C. Los valores empleados para las densidades reales de las cenizas y la materia orgánica son 2,65 y 1,5 g/cm³ respectivamente.

2.3.5.1.2 Cálculos

Los valores obtenidos por medición directa para cada muestra, son:

- El volumen de la muestra, igual al volumen interno del anillo portamuestra
- El peso de agua, obtenido por diferencia entre el peso de la muestra tensionada y el peso de la muestra seca
- El peso seco de la muestra, obtenido por diferencia entre el peso seco y la tara

A partir de estos valores, y como paso previo al cálculo de volúmenes, se calculan los siguientes:

- Densidad aparente definida, como la relación entre el volumen y el peso seco de la muestra tensionada a 10 cm de agua
- % de agua sobre peso tensionado: este valor se obtiene multiplicando por 100 el cociente entre el peso de agua y el peso del sustrato tensionado. Se expresa en g de agua / 100 g de sustrato tensionado.
- % de agua sobre peso seco: que se obtiene multiplicando por 100 el cociente entre peso de agua y peso seco. Es expresa en g de agua / 100 g de sustrato seco.

Finalmente, con los valores medios para cada sustrato de la densidad real y de la densidad aparente, y con el valor obtenido en cada repetición para % de agua sobre peso seco, se calcula -para cada repetición- el valor de la porosidad total (*Pt*), % volumen de material sólido (*%Vms*), % de volumen de agua (*%Vag*) y % de volumen de aire (*%Vai*). A partir de los valores obtenidos en cada repetición para estos tres últimos volúmenes, se obtienen los correspondientes valores medios y desviaciones para cada sustrato.

2.3.5.2 Factores limitantes para su aplicación

La aplicación de los conceptos desarrollados por De Boodt en la metodología de referencia hace que, en lo referente a los factores limitante 1 y 2, las limitaciones para la aplicación de la metodología de referencia sean similares a las del método de De Boodt.

2.3.5.2.1 *Factor limitante 1: Variables no consideradas en el modelo*

Al igual que en el caso de De Boodt, la aplicación de esta metodología se limita a la modelización del comportamiento hídrico del sustrato en condiciones de equilibrio estático.

2.3.5.2.2 *Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo*

En numerosas ocasiones se ha puesto de manifiesto la dificultad que tiene alcanzar un nivel adecuado de saturación del sustrato. Como en las otras metodologías ya comentadas, el uso correcto de la metodología está condicionado a que se alcance el adecuado nivel de saturación del sustrato y el equilibrio posterior durante el tensionado de la muestra. El método de saturación empleado en este caso es más eficaz que el usado en el método de De Boodt, por lo que las limitaciones al respecto son también menores.

Respecto a la densidad aparente, es de plena aplicación -en este caso- la argumentación dada al respecto para la metodología de De Boodt en el apartado 2.1.5.2.2

El valor de la densidad real se obtiene a partir de los contenidos en materia mineral y orgánica. Para calcular este reparto, se emplea la incineración, y su aplicación está limitada por unos contenidos mínimos de materia orgánica. Comparando este método con la picnometría empleada por De Boodt, la evaluación de la densidad real a partir del contenido en materia orgánica medida por incineración es insensible a la presencia de porosidad ocluida: en el caso de que exista, sobredimensionará la porosidad total en una magnitud igual al valor de la porosidad ocluida, y, por el método de cálculo empleado, sobredimensionará en la misma medida el volumen ocupado por aire. Este hecho, que puede no tener gran importancia para la porosidad total, es importante en el caso del volumen ocupado por aire, pudiendo presentar como sustratos adecuados para el cultivo, sustratos que en realidad son asfíxiantes.

La altura del sustrato considerada es, en este caso, 5 cm. El protocolo de laboratorio permite que esta altura sea la misma para todas las muestras, pero esta altura mayor que en el caso de De Boodt, la hace más sensible a la incidencia de errores por variación del gradiente de humedad. Este hecho limita la correcta aplicación de la metodología a los sustratos cuyo gradiente de humedad se mantenga dentro de unos límites estrechos en el intervalo de tensiones entre $t-2,5$ y $t+2,5$ siendo t el valor de la tensión de humedad aplicado.

2.3.5.2.3 *Factor limitante 3: Errores de medida*

Al igual que en el caso de la metodología de De Boodt, consideramos que la incidencia de los errores requiere un tratamiento detallado, por lo que se le dedica el apartado 2.3.6.

2.3.6 *Análisis de sensibilidad*

El reparto volumétrico en cada repetición se obtiene a partir de los valores medios para cada sustrato de las densidades real y aparente, y de la relación entre peso de agua y peso seco de la repetición correspondiente. Esta estrategia de cálculo permite sustituir el valor de la relación entre peso de agua y peso seco por las medidas originales, aportando exactamente los mismos resultados. En cambio, el valor de la densidad aparente empleado no es el que se puede obtener para cada repetición concreta, sino el valor medio de las determinaciones a 10 cm de tensión. El empleo de los valores correspondientes a cada repetición de P_s y V_t , no es equivalente al empleo del valor medio; la diferencia entre los valores obtenidos empleando una u otra estrategia depende de la variabilidad del valor obtenido para la densidad aparente. Verdonck y Gabriëls (1992) se decantan por la utilización del valor medio en lugar de utilizar el valor de la densidad aparente correspondiente a cada repetición.

Teniendo en cuenta los métodos de cálculo del reparto volumétrico, se ha calculado la incidencia del error aplicando el mismo procedimiento que en el caso de la metodología de De Boodt (2.1.6).

Para el cálculo de errores en función de las medidas de laboratorio, debemos de tener en cuenta que, aunque los procedimientos de medida son distintos, las medidas de laboratorio son similares a la metodología de De Boodt, por lo que los cálculos a realizar son también parecidos. Por ello, el apartado correspondiente a la incidencia de los errores de las medidas de laboratorio en el reparto volumétrico, se reduce considerablemente.

2.3.6.1 Cálculo de volúmenes en función de las medidas de laboratorio

Las medidas de laboratorio consideradas en este caso son Da , Dr , Pag y Ps . Las medidas de $\%S$ y Ph que se empleaban en la metodología de De Boodt, se sustituyen -en este caso- por un medida directa del peso seco, proporcionando una evaluación más fiable de esta variable.

En el procedimiento de cálculo, Verdonck y Gabriëls (1992) emplean como valores intermedios la relación porcentual ente peso de agua y peso de sustrato seco, y la relación porcentual entre peso de agua y peso de sustrato tensionado. Poniendo estas expresiones en función de las medidas de laboratorio, se llega a unas expresiones idénticas a las de la metodología de De Boodt, para los casos en los que no interviene el Ps , y con la sustitución por Ps de la expresión $100/(\%S*Ph)$, en los casos en los que interviene en el cálculo.

En este caso no tiene sentido expresar el reparto volumétrico en función de $\%S$ y de Ph , puesto que éstas no son medidas de laboratorio. Es necesario, en cambio, calcular el reparto volumétrico en función de Ps , que aquí es medida de laboratorio y no lo era en el caso de la metodología de De Boodt.

2.3.6.1.1 Cálculo de la densidad aparente

El valor de la densidad aparente se obtiene a partir de la expresión:

$$(86) \quad Da = \frac{Ps}{V_t}$$

Esta expresión está en función de las medidas de laboratorio. El valor de la densidad aparente se obtiene para cada una de las muestras tensionadas a 10 cm de agua. El valor medio de todas ellas se emplea en el cálculo del reparto volumétrico de todas las muestras de un mismo sustrato.

2.3.6.1.2 Calculo del % de agua sobre sustrato húmedo

$$(87) \quad D = 100 \times \frac{Pag}{Pag + Ps}$$

Esta valor está ya expresado en función de las medidas de laboratorio.

2.3.6.1.3 Cálculo del % de agua sobre sustrato seco

Verdonck y Gabriëls (1992) aplican la expresión:

$$(88) \quad \%Ag_s = \frac{100 \times D}{100 - D}$$

Sustituyendo D por su valor en (87) y operando se deduce:

$$(89) \quad \%Ag_s = 100 \times \frac{Pag}{Ps}$$

2.3.6.1.4 Cálculo de la porosidad total y volumen ocupado por material sólido

Porosidad total y volumen ocupado por material sólido son complementarios, por lo que conocido uno, el otro es inmediato.

El valor de la porosidad total se toma de (3):

$$(90) \quad \boxed{\%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)}$$

La expresión se encuentra directamente en función de los valores de partida y es idéntica a la empleada en la metodología de De Boodt.

2.3.6.1.5 Cálculo del volumen ocupado por agua

Verdonck y Gabriëls (1992) lo obtienen de la expresión:

$$(91) \quad \%Vag = \%Ag_s \times Da$$

Sustituyendo Ag_s por su valor de la expresión (89) se obtiene:

$$(92) \quad \boxed{\%Vag = 100 \times \frac{Pag}{Ps} \times Da}$$

Esta expresión se diferencia de la empleada por De Boodt en la sustitución de $100/(\%S*Ph)$ por Ps .

2.3.6.1.6 Cálculo del volumen ocupado por aire

Al igual que en la metodología de De Boodt, el volumen ocupado por aire se obtiene como diferencia entre la porosidad total y el volumen ocupado por agua (10):

$$(93) \quad \%Vai = \%Pt - \%Vag$$

Sustituyendo $\%Pt$ y $\%Vag$ por sus valores de las expresiones (90) y (92), respectivamente:

$$(94) \quad \%Vai = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) - 100 \times \frac{Pag}{Ps} \times Da$$

$$(95) \quad \boxed{\%Vai = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} - \frac{Pag}{Ps} \times Da\right)}$$

Esta expresión se diferencia de la empleada por De Boodt en la sustitución de $100/(\%S*Ph)$ por Ps en el término de la expresión procedente de $\%Vai$.

2.3.6.2 Incidencia de los errores de la densidad aparente, densidad real y peso de agua

Las expresiones para calcular el error provocado en %Pt y %Vms son idénticas a las de la metodología de De Boodt. Las expresiones para calcular el error provocado en %Vag únicamente se diferencian de las de la metodología de De Boodt en la sustitución por Ps de la expresión $100/(\%S \cdot Ph)$.

2.3.6.3 Incidencia de los errores del peso seco

2.3.6.3.1 Incidencia en la porosidad total

El valor de la porosidad total lo tomamos de la expresión (90):

$$(96) \quad \%Pt = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right)$$

el peso seco no interviene en el cálculo de la porosidad total

2.3.6.3.2 Incidencia en el volumen ocupado por agua

Partimos de la expresión (92):

$$(97) \quad \%Vag = 100 \times \frac{Pag}{Ps} \times Da$$

Incrementando y restando:

$$(98) \quad \Delta \%Vag = 100 \times \frac{Pag}{Ps_2} \times Da - 100 \times \frac{Pag}{Ps_1} \times Da$$

$$(99) \quad \Delta \%Vag = 100 \times Pag \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada

$$(100) \quad \Delta \%Vag = 100 \times Pag \times Da \times \frac{1}{Ps} \times Ps \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right)$$

Teniendo en cuenta (92)

$$(101) \quad 100 \times Pag \times Da \times \frac{1}{Ps} = \%Vag$$

Sustituyendo en (100):

$$(102) \quad \Delta \%Vag = \%Vag \times \left[Ps \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right) \right]$$

Fuente Error	% Porosidad total (Pt)	% Volumen material sólido (%Vms)	% Volumen agua (%Vag)	% Volumen aire (%Vai)
Da	$\Delta\%Pt = -100 \times \frac{1}{Dr} \times \Delta Da$	$\Delta\%Vms = 100 \times \frac{1}{Dr} \times \Delta Da$	$\Delta\%Vai = -100 \times \frac{Pag}{Ps} \times \Delta Da$	$\Delta\%Vai = -100 \times \left(\frac{1}{Dr} + \frac{Pa}{Ps} \right) \times \Delta Da$
Dr	$\Delta\%Pt = -100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$	$\Delta\%Vms = 100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$		$\Delta\%Vai = -100 \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right)$
Pag			$\Delta\%Vag = 100 \times \frac{Da}{Ps} \times \Delta Pag$	$\%Vai = -100 \times \frac{Da}{Ps} \times \Delta Pag$
Ps			$\Delta\%Vag = 100 \times Pag \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right)$	$\Delta\%Vai = -100 \times Pag \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right)$

Tabla 12: Metodología de Referencia ISHS: Cálculo de la incidencia de los errores de las mediciones de laboratorio en las variables calculadas

Fuente \ Error	% Porosidad total (Pt)	% Volumen material sólido (%Vms)	% Volumen agua (%Vag)	% Volumen aire (%Vai)
Da	$\Delta\%Pt = -\%Vms \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$	$\Delta\%Pt = \%Vms \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$	$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$	$\Delta\%Vai = -(100 - \%Vai) \times \left[\frac{1}{Da} \times \Delta Da \right]$
Dr	$\Delta\%Pt = -\%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$	$\Delta\%Pt = \%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$		$\Delta\%Vai = -\%Vms \times \left[Dr \times \Delta \left(\frac{1}{Dr} \right) \right]$
Pag			$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[\frac{1}{Pag} \times \Delta Pag \right]$	$\Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[\frac{1}{Pag} \times \Delta Pag \right]$
Ps			$\Delta\%Vag = \%Vag \times \left[Ps \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right) \right]$	$\Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[Ps \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right) \right]$

Tabla 13: Metodología de Referencia ISHS: Cálculo de la incidencia de los errores del porcentaje volumétrico en las variables calculadas

2.3.6.3.3 Incidencia en el volumen ocupado por aire

El valor de %Vai se ha calculado en 2.3.6.1.6 y viene dado por la expresión (95):

$$(103) \quad \%Vai = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} - \frac{Pag}{Ps} \times Da \right)$$

Incrementando y restando y operando:

$$(104) \quad \Delta\%Vai = 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} - \frac{Pag}{Ps_2} \times Da \right) - 100 \times \left(1 - \frac{Da}{Dr} - \frac{Pag}{Ps_1} \times Da \right)$$

$$(105) \quad \Delta\%Vai = 100 \times Pag \times Da \times \left(-\frac{1}{Ps_2} + \frac{1}{Ps_1} \right)$$

$$(106) \quad \Delta\%Vai = -100 \times Pag \times Da \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la variable incrementada

$$(107) \quad \Delta\%Vai = -100 \times Pag \times Da \times \frac{1}{Ps} \times Ps \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right)$$

Sustituyendo por %Vag el valor de la expresión (101):

$$(108) \quad \Delta\%Vai = -\%Vag \times \left[Ps \times \Delta \left(\frac{1}{Ps} \right) \right]$$

2.3.6.4 Análisis de las expresiones de error

En Tabla 12 y Tabla 13 se resumen las expresiones para calcular el error del reparto volumétrico en función del error de las medidas de laboratorio y en función de los porcentajes de volumen, respectivamente. Estas expresiones son similares a las de Tabla 10 y Tabla 11 correspondientes a la metodología de De Boedt. Por lo tanto, la discusión de 2.1.6.7.1 y 2.1.6.7.2 sobre signo y magnitud del error, es de aplicación en este caso.

\$	%Pt	%Vms	%Vag	%Vai
Da	-	+	+	-
Dr	+	-		+
Pag			+	-
Ps			-	+

Tabla 14: Metodología de Referencia ISHS: Relación entre los signos de los errores de la medida de laboratorio y de la variable calculada.

Las únicas diferencias que se presentan son las relativas al ya comentado cambio de la expresión $100/(\%S*Ph)$ por la medida directa Ps , y las derivadas del cálculo de errores en función de Ps . La función de la variable incrementada es, en este caso, $Ps*\Delta(1/Ps)$. Teniendo en cuenta lo discutido en los puntos 2.1.6.7.1 y 2.1.6.7.2, se deduce que el signo es negativo y su valor absoluto es decreciente, para valores crecientes de Ps .

Como consecuencia, los signos de los errores son los que se indican en la Tabla 14.

2.3.6.4.1 Intervalos de error del reparto volumétrico

Al igual que en el caso de la metodología de De Boedt, una vez analizadas las expresiones del error, se ha procedido a evaluar los intervalos de error del reparto volumétrico. En Tabla 15 y Tabla 17 se facilitan los valores considerados para las características físicas que intervienen como variables independientes en las expresiones de Tabla 12 y Tabla 13 respectivamente.

Fuente	Mínimo	Máximo
Da	0.1	0.3
Dr	2.5	1
Pa/Ps	0.5	10
Vt	400	200
Ps	100	40
Pag	160	380
$\%Vag$	10	90

Tabla 15: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 12

	Error	$\% Pt$		$\% Vms$		$\% Vag$		$\% Vai$	
		mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Da	0.005	-0.20	-0.50	0.20	0.50	0.25	5.00	-0.45	-5.50
$g*cm^{-3}$	0.010	-0.40	-1.00	0.40	1.00	0.50	10.00	-0.90	-11.00
Dr	0.100	0.15	2.73	-0.15	-2.73			0.15	2.73
$g*cm^{-3}$	0.400	0.55	8.57	-0.55	-8.57			0.55	8.57
Pag	0.100					0.03	0.05	-0.03	-0.05
g	1.000					0.25	0.50	-0.25	-0.50
Ps (g)	0.100					*-0.07	*-0.47	0.07	0.47
	0.500					*-0.33	*-2.32	0.33	2.32

Tabla 16: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico aplicando las expresiones de la Tabla 12 y los intervalos de la Tabla 15. *Estos valores corresponden a los máximos y mínimos de una serie de cálculos, en los que se han considerado todas las combinaciones posibles para los valores $\%Vag=80\% - 95\%$, $Da=0,1 - 0,3 g*cm^{-3}$, $Vt=200 - 400 cm^3$).

2.3.6.4.1.1 Errores inducidos en el reparto volumétrico por los errores de Da , Dr y Pag

Las expresiones empleadas para calcular la incidencia de los errores de Da y Dr en $\%Pt$ y $\%Vms$ son idénticas a las empleadas en el caso de De Boodt. Los valores del error considerados para Da y Dr son también los mismos, por lo que los valores encontrados para el error de $\%Pt$ y $\%Vms$, y la argumentación dada para la metodología de De Boodt, son, por lo tanto, de aplicación en este caso.

Las expresiones empleadas para calcular la incidencia del error de Da y Dr en $\%Vag$ y $\%Vai$, son equivalentes a las empleadas en la metodología de De Boodt con la única sustitución de $\%S*Ph$ por el valor Ps . Sin embargo, en el momento de efectuar el cálculo, en la metodología de De Boodt, se sustituyó $\%S*Ps$ por su equivalente. Por lo tanto, las expresiones y los valores de error empleados, y los resultados obtenidos, son idénticos en los dos casos, y el razonamiento aplicado para la metodología de De Boodt es de aplicación también en este caso.

	Mínimo máximo	
Da	0.3	0.1
Dr	2.5	1
Pag	225	15
$\%S$	95	40
Ph	79	38
$\%Vms$	5	20
$\%Vag$	10	90
$\%Vai$	90	5
Vt	400	200
Ps	75	40

Tabla 17: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación considerados para las variables que intervienen en las expresiones de error de la Tabla 13

	Error	$\% Pt$		$\% Vms$		$\% Vag$		$\% Vai$	
		mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Da	0.005	-0.08	-1.00	0.08	1.00	0.17	4.50	-0.25	-5.50
$g*cm^{-3}$	0.010	-0.17	-2.00	0.17	2.00	0.33	9.00	-0.50	-11.00
$Dr g*cm^{-3}$	0.100	0.19	1.82	-0.19	-1.82			0.19	1.82
	0.400	0.69	5.71	-0.69	-5.71			0.69	5.71
Pag	0.100					0.00	0.00	0.00	0.00
g	1.000					0.00	0.01	0.00	-0.01
$Ps (g)$	0.100					-0.01	-0.22	0.01	0.22
	0.500					-0.07	-1.11	0.07	1.11

Tabla 18: Metodología de Referencia ISHS: Intervalos de variación de los errores del reparto volumétrico aplicando las expresiones de la Tabla 13 y los intervalos de la Tabla 17

Los errores inducidos en el reparto volumétrico por los errores en P_{ag} son despreciables tanto en la metodología de De Boodt (Tabla 9) como en la de ISHS (Tabla 16). Las expresiones empleadas en ambos casos son las mismas y los intervalos son similares. El mayor volumen de muestra empleado en el caso de la metodología ISHS disminuye la incidencia del error; no obstante, en los dos casos es lo suficientemente pequeño como para considerarlo despreciable.

2.3.6.4.1.2 Error inducido en el reparto volumétrico por el error del peso seco (P_s)

En el caso de la metodología de De Boodt se medía $\%S$ y Ph . En la metodología ISHS, estas dos medidas se sustituyen por la medida directa del peso seco (P_s).

Los errores considerados para el peso seco son 0,1 y 0,5 g. Aplicando el mismo criterio de la metodología de De Boodt, el primer valor corresponde al máximo error cometido por gravimetría. El error de 0,5 g puede darse en casos extremos, por la pérdida de material durante el secado y manipulación para obtención del peso seco. Cuando el sustrato tiene una parte importante de finos y/o cuando la luz de la malla utilizada para cerrar el anillo metálico es grande, puede producirse pérdida de parte del material seco a través de la tela de cierre, incurriendo así en un error por pérdida de material. Por otra parte, se puede acumular sustrato en la sujeción de la tela que sirve de cierre del anillo metálico portamuestras. Esto produce una sobrevaloración del peso seco de sustrato.

Como puede observarse en Tabla 16 y Tabla 18, los errores provocados por el error de P_s pueden ser importantes.

En la expresión de la Tabla 13, el factor de escala es $\%V_{ag}$, siguiendo la norma de que el factor de escala para $\%V_{ag}$ es $\%V_{ag}$. La función de la variable incrementada es $P_s \cdot \Delta(1/P_s)$, que, como ya se ha demostrado (2.1.6.7.2.2), es decreciente para valores crecientes de P_s . El valor máximo obtenido para el error de $\%V_{ag}$ es de -1,11 (Tabla 18) correspondiente a $\%V_{ag}=90\%$ y $P_s=40$ g. Corresponde a un sustrato con elevada porosidad, en condiciones de saturación o próximos a saturación; teniendo en cuenta que el volumen de la muestra es aproximadamente 400 cm^3 , el peso de 40 g corresponde a un sustrato de $D_a=0,1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Ambas condiciones son perfectamente posibles, por lo que si durante la manipulación del sustrato se produce la pérdida de 0.5 g de peso seco, el error inducido será de -1,11 %. Este error es tanto mayor cuanto menor sea el peso seco. Por lo tanto, aumentará con la disminución del peso seco, bien sea por la disminución del volumen de muestra o por la disminución de D_a .

Para calcular el error en función de las medidas de laboratorio (Tabla 12) se han hecho varias hipótesis sobre características de sustrato y tamaños de muestra, en base a los cuales se han obtenido los valores de P_s , P_{ag} y D_a . Se han considerado dos valores para D_a (0,1 y 0,3 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), dos para $\%V_{ag}$ (95 y 80%) y dos para el volumen de muestra (200 y 400 cm^3). El error más elevado es -2,32% (Tabla 16), que corresponde a un sustrato con $\%V_{ag}=95$, $D_a=0.1$ y una muestra de 200 cm^3 . Si el tamaño muestral se aumenta a 400 cm^3 , el error disminuye -1,17%. Si además el contenido de agua disminuye a 80%, el valor del error es de =0.99.

Este error es proporcional a D_a y $\%V_{ag}$, y a $\Delta(1/P_s)$. Este último factor es decreciente cuando aumenta P_s . La evolución de $100 \cdot \Delta(1/P_s)$ en función de P_s y del error de P_s se representa en Figura 1. Cuando el peso seco es superior a 100 g, el valor de este factor es inferior a 0,01 incluso para errores de 1 g. Para que el error en el reparto volumétrico fuera 1%, el producto $P_{ag} \cdot D_a$ tendría que ser 100. Si se trabaja con muestras de 400 cm^3 , con un valor $P_s=100$, $D_a=0,25$ y, por lo tanto, $P_{ag}=400$, el error será siempre menor (en valor absoluto) de 1%. El valor inferior a 0,01 se obtiene también para $P_s=70$ $\Delta P_s=0,4$ y para $P_s=40$ y $\Delta P_s=0,1$. El

valor de la función $100 \cdot \Delta(1/P_s)$ menor que 0.2 para $P_s=80 \Delta P_s=1$, para $P_s=50 \Delta P_s=0.5$ y $P_s=30 \Delta P_s=0.1$. Como puede apreciarse en la Figura 1, por encima de estos valores el valor de la expresión aumenta considerablemente.

2.3.6.5 Exactitud y precisión del reparto volumétrico

El razonamiento aplicado en el apartado 2.1.6.8, sobre la exactitud y precisión del reparto volumétrico en la metodología de De Boodt, son aplicables a la metodología de referencia ISHS.

En aquella ocasión se hacían dos grupos, un primer grupo con las medidas de D_a , D_r y $\%S$ obtenidas previamente y cuyo valor medio se aplicaba a todas las repeticiones de un mismo sustrato. El segundo grupo estaba constituido por las mediciones obtenidas directamente sobre cada una de las repeticiones y estaba formado por P_{ag} y P_h .

En el caso de la metodología de referencia ISHS, el primer grupo está formado por D_a y D_r , y el segundo por P_{ag} y P_s .

En consecuencia, y siguiendo un razonamiento análogo, la exactitud del reparto volumétrico depende de los errores sistemáticos cometidos en las medidas de D_a y D_r , de los posibles errores de calibrado de la balanza de laboratorio, y de los posibles errores sistemáticos que se hayan cometido en el calibrado de todos los anillos, como la utilización en todos ellos de un mismo instrumento de medida mal calibrado. La mayor incidencia de errores puede deberse, en este caso, a la aplicación de un método de medida de la densidad real no adecuado para el objetivo del trabajo o bien, a la elevada variabilidad de las medidas de D_a y D_r provocada por la heterogeneidad propia del material analizado.

El método empleado para el cálculo del volumen de aire es, al igual que en la metodología de De Boodt, por diferencia entre $\%P_t$ y $\%V_{ag}$, por lo que se produce la misma ocultación por compensación de los errores cometidos en el reparto volumétrico.

Respecto a la precisión, y siguiendo también el mismo razonamiento, no es fácil evaluar la incidencia en el reparto volumétrico de la precisión de medida de D_a y D_r . La componente de la precisión que se puede conocer es la debida a las medidas de P_{ag} y P_s .

En resumen, esta metodología tampoco permite conocer la exactitud de las medidas obtenidas para el reparto volumétrico. Respecto a la precisión, se puede conocer la componente debida a P_{ag} y P_s . La componente debida a D_a y D_r no se puede conocer.

Con respecto a la rutina de laboratorio desarrollada por De Boodt, la de referencia de ISHS supone un avance importante: La primera es muy sensible a los errores cometidos en la estimación de P_h y $\%S$, con una incidencia en la exactitud y precisión del reparto volumétrico importante y difícil de evaluar. La metodología de referencia elimina esta fuente de error, con la sustitución de P_h y $\%S$ por la obtención directa del peso seco.

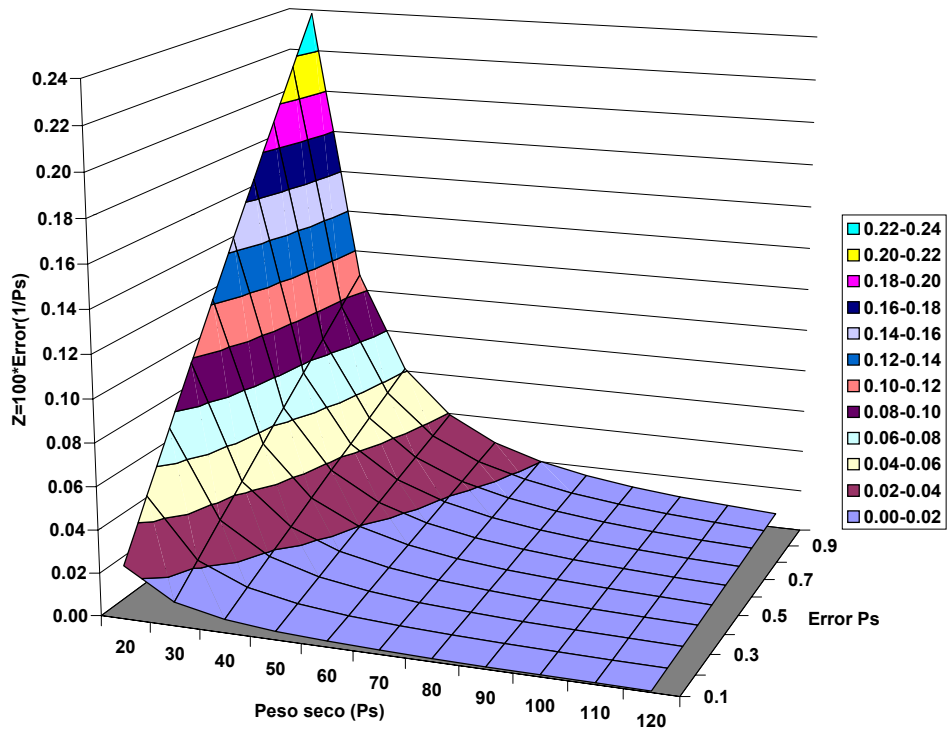


Figura 1 : Metodología de Referencia ISHS: Incidencia del error de Ps en %Vag. Cálculo en función de las medidas de laboratorio. Valor de la expresión $Z=100 \cdot \Delta(1/Ps)$ en función de Ps y ΔPs . El error inducido en el volumen ocupado por agua se obtiene multiplicando este valor por $(-P_{ag} \cdot D_a)$ (ecuación (99) y Tabla 12). El error inducido en el volumen de aire es igual y de signo contrario (ecuación (106) y Tabla 12)..

2.4 Metodología del Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte (EEUU)

2.4.1 Principios básicos

La producción rentable de cultivos hortícolas en contenedor exige un control preciso del agua y los fertilizantes. El primer objetivo de investigación sobre sustratos de cultivo fue desarrollar sustratos que favorecieran el suministro adecuado de agua a la planta, pero que drenaran lo suficientemente bien para tener una buena aireación del sistema radicular. Esta estrategia dio lugar a la utilización de grandes cantidades de agua y nutrientes, con un porcentaje importante de pérdidas por drenaje. La estrategia cambió hacia una reducción de los inputs de agua y fertilizantes. Este cambio se debió, en gran medida a la contaminación potencial por pesticidas y fertilizantes (Fonteno, 1993)

El objetivo que se planteó Fonteno (1993) para la investigación en sustratos fue hacer mezclas más eficientes, para proporcionar disponibilidad de agua a la planta.

La mejora de esta eficiencia exige un mejor entendimiento de las propiedades físicas e hidráulicas de los sustratos, y unos diagnósticos más acertados en la evaluación de los mismos a partir de sus propiedades físicas (Fonteno, 1993).

Este planteamiento coincide en gran medida con la asimilación de la caracterización física a un modelo de cultivo. Una de las utilidades de los modelos de cultivo es su valor predictivo, por el que, conocidos los factores de producción, se puede predecir el comportamiento del cultivo.

Este es precisamente el objetivo de un diagnóstico: predecir el comportamiento del cultivo a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para las características físicas del sustrato. El valor predictivo del modelo será tanto mayor cuanto más exacto y preciso sea el conocimiento y la evaluación de los valores que intervienen como variables independientes en el modelo, y cuanto mejor se conozca la relación entre las variable independientes y la función.

En consecuencia, los diagnósticos serán tanto mejores cuanto más se conozcan las propiedades físicas e hidráulicas del sustrato, cuanto mejor sea su evaluación aplicando las metodologías de laboratorio más adecuadas, y cuanto mejor se conozca la relación entre estas propiedades y la respuesta del cultivo.

2.4.2 Propiedades físicas e hidráulicas

Las propiedades físicas e hidráulicas del sustrato junto con el manejo del riego, constituyen los instrumentos con los que cuenta el horticultor para proporcionar al entorno radicular de la planta las condiciones físicas más adecuadas para su desarrollo (1.3.2.1), es decir una relación adecuada entre los volúmenes de aire, agua y material sólido, para proporcionar al sistema radicular el aire necesario para la respiración de las raíces y el agua requerida para el desarrollo de la planta.

La evolución de los volúmenes relativos de aire, agua y sustrato en el entorno radicular está basada en la relación entre el estado energético y el contenido en agua del medio, que a su

vez es reflejo de la distribución del tamaño de poro de dicho medio, y se representa mediante la curva de retención de agua (Milks *et al.*, 1989a; Fonteno, 1989).

Las propiedades hídricas inciden en la entrada del agua dentro del sustrato, el movimiento del agua hacia las raíces, el flujo de agua hacia fuera del sustrato, y la evaporación de agua en la superficie del sustrato (Fonteno, 1993). Estas propiedades se pueden dividir en dos categorías:

- Características de retención de agua, que miden la capacidad del sustrato para almacenar agua.
- Conductividad hidráulica, que mide la capacidad del sustrato para transmitir agua.

Las características de retención de agua han sido tratadas suficientemente para el caso de los sustratos de cultivo. Los métodos para determinar la conductividad hidráulica han sido desarrollados para suelo. Aún cuando estos métodos son útiles, para medir en sustratos hortícolas gruesos son necesarias modificaciones significativas (Fonteno, 1993).

A diferencia de los criterios considerados en el desarrollo de la metodología de referencia ISHS (2.3.4.2), Fonteno (1993) considera muy importante llegar a un acuerdo sobre las definiciones de las propiedades a determinar, haciendo este aspecto prioritario sobre la metodología de laboratorio. Considera adecuado el planteamiento de los físicos y químicos que trabajan en suelos, que antes de estandarizar procedimientos y protocolos, se ponen de acuerdo en la nomenclatura y normalizan las definiciones.

Para la definición de conceptos, Fonteno tiene en cuenta los trabajos desarrollados por otros investigadores, los completa y, finalmente, define un modelo de variables de capacidad en equilibrio.

2.4.2.1 Conceptos físicos tomados de metodologías previamente desarrolladas

La caracterización física de los sustratos estudia la distribución de fases, que incluye los volúmenes de material sólido, aire y agua en diferentes condiciones de humedad (Fonteno *et al.*, 1981). El reparto del volumen total entre las tres fases está fuertemente condicionado por las relaciones entre el status energético del agua y el contenido de humedad del medio, que a su vez es reflejo de la distribución del tamaño de poro de dicho medio (Fonteno, 1989).

Estas relaciones se representan en los estudios de física de suelos por la curva pF, que relaciona el contenido de humedad con el logaritmo de la tensión de humedad, expresada en cm de columna de agua. Bunt (1961) definió la curva de retención de agua para sustratos de cultivo en maceta (Fonteno, 1989) y utilizó la misma escala que en el caso de suelos. Posteriormente, De Boodt (De Boodt y De Waele, 1968) consideró más adecuado utilizar una escala lineal para el rango de tensiones de 0 a 100 cm de columna de y aunque Puustjärvi y Robertson (1975) volvieron a utilizar la escala semilogarítmica, fue la escala lineal de De Boodt la que se impuso para la descripción de la curva de retención de agua de sustratos de cultivo. Por ello, el equipo de la Universidad de Carolina del Norte utiliza la escala lineal de De Boodt.

Fonteno asume la clasificación dada por De Boodt (De Boodt y Verdonck, 1972) para delimitar los rangos del espacio poroso y acepta las definiciones de espacio de aire, agua fácilmente disponible y agua de reserva, y lo completa con las de agua difícilmente disponible y agua no disponible (Fonteno *et al.*, 1981).

Considera además el concepto de capacidad de contenedor definido por White y Mastalerz (1986). Fonteno comenta las dificultades para relacionar este concepto con la curva de retención de humedad (Fonteno, 1989), pero este problema quedó resuelto cuando Milks *et al.* (1989b) combinaron la curva de retención de agua con la geometría del contenedor.

Finalmente, ese equipo de trabajo propuso un modelo de variables de capacidad en equilibrio, que combina la función no lineal de Van Genuchten (1980) con la geometría del contenedor (Milks *et al.*, 1989b).

2.4.2.2 Conceptos básicos en la metodología de Fonteno

2.4.2.2.1 *Curva de retención de agua*

Para estudiar las propiedades físicas de los sustrato de cultivo, Fonteno emplea la curva de retención de agua previamente utilizada por Bunt (1961), De Boodt y De Waele (1968), y Puustjärvi y Robertson, (1975).

Asume que a tensiones superiores a 100 cm se puede reducir considerablemente el crecimiento de la planta. Este concepto lo toma de los trabajos de De Boodt y Verdonck (1971), y Puustjärvi y Robertson (1975).

De Boodt y De Waele (1968) clasificaron la curva de retención de agua en tres tramos para tensiones menores de 100 cm: 0-10 cm, 10-50 cm, y 50-100 cm de columna de agua. Fonteno *et al.* (1981) completan esta clasificación, introduciendo el valor de tensión de 15.000 cm de columna de agua correspondiente al punto de marchitez permanente y, en consecuencia introducen dos nuevos tramos, 100-15.000 cm y más de 15.000 cm, e introduce los conceptos de agua difícilmente disponible, para el agua liberada ente 100 y 15.000 cm de columna de agua, y agua no disponible, para la retenida a 15.000 cm de columna de agua.

2.4.2.2.2 *Porosidad total*

En el concepto de Fonteno, la porosidad incluye el espacio poroso accesible al agua, y, por lo tanto, el volumen que interviene en el intercambio aire-agua. Los poros no accesibles al intercambio de agua no se consideran dentro de este concepto de porosidad.

Fonteno (1993) toma la definición de porosidad de Danielson y Sutherland (1986), que definen el espacio poroso como el volumen total ocupado por el sólido restado de la unidad. Esta definición puede dar lugar a dudas sobre si el volumen correspondiente a los poros ocluidos se considera como volumen ocupado por sólido o, por el contrario, se considera como volumen de poros. Sin embargo, Fonteno *et al.* (1981) toman el concepto de porosidad de De Boodt (De Boodt y Verdonck, 1972), que define la porosidad total como el contenido de humedad a presión cero. Posteriormente Fonteno (1989) define la porosidad total como el volumen del medio no ocupado por la fracción sólida, y añade que puede ser cuantificado midiendo la cantidad de agua a saturación.

De las dos últimas definiciones se deduce que se refiere únicamente al espacio poroso accesible al agua y que, en el volumen no ocupado por la fracción sólida, no incluye el volumen de poros ocluidos o no accesibles al agua. Por lo tanto, podemos deducir que cuando Fonteno toma la definición de porosidad de Danielson y Sutherland (1986), cuando habla de volumen total ocupado por sólido, considera en este concepto el volumen no accesible al intercambio de aire y agua.

El valor de la porosidad total puede obtenerse a partir de los valores de las densidades real y aparente. Los métodos de medida de la densidad real son tediosos y exigentes en tiempo. En el caso de suelos, cuando no se necesita una alta precisión, se emplea el valor medio de $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ con un error menor del 5% (Fonteno, 1993).

Fonteno considera que los métodos picnométricos y de inmersión son difíciles para sustratos hortícolas, mientras que los porómetros proporcionan un resultado rápido, repetible y fiable, pero que está afectado por el contenido de humedad y por la densidad aparente (Fonteno, 1993). En cualquier caso, estos métodos consideran como volumen ocupado por el material sólido al volumen comunicado con el espacio exterior, confirmando la hipótesis de que se considera como espacio poroso total al volumen de poros que intervienen en el intercambio aire-agua.

2.4.2.2.3 *Agua disponible*

Según Fonteno (1993), la estimación del agua disponible se hace muy difícil por la falta de consenso en la definición. Analizando el término ‘agua disponible’, Fonteno considera que esta falta de consenso puede deberse a que este término tiene dos componentes, ‘disponibilidad del agua’ y ‘capacidad de agua disponible’.

- Disponibilidad del agua: Incluye la integración del tipo de planta (especie, cultivar, condición física, estado y madurez, y distribución de raíces), condiciones de la rizosfera (gradiente de potencial en la interfase raíz-sustrato) y transporte hidráulico del sustrato (conductividad hidráulica insaturada cercana a la porción de raíces que absorben el agua).
- Capacidad de agua disponible: En física de suelos, se considera agua disponible a la cantidad de agua retenida en la reserva del suelo, que puede ser tomada por las plantas (Cassel y Nielsen, 1986). Está definida por la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Es una medida de la cantidad máxima de agua disponible para la planta en condiciones de baja demanda evaporativa.

El análisis detenido de estos términos pone de manifiesto un concepto de la disponibilidad del agua en equilibrio dinámico, en contraposición al concepto de disponibilidad de agua en equilibrio estático, habitualmente empleado.

Cuando se estudia el contenido volumétrico de agua del entorno radicular, se considera que se ha alcanzado el equilibrio estático. En este concepto, el potencial hídrico es constante en todos los puntos del contenedor y, por lo tanto, no hay movimiento de agua. En estas condiciones, el reparto de agua en el perfil del sustrato viene dado por la relación entre el reparto volumétrico de agua y el potencial matricial, que se obtiene como diferencia entre el potencial hídrico (constante) y el potencial gravitacional.

Sin embargo, las raíces absorben el agua del entorno y actúan como sumideros, provocando un gradiente local de potencial hídrico. Cada una de las raíces absorbentes equivale a la presencia de un sumidero y, por lo tanto, la distribución de estos gradientes depende de la distribución del sistema radicular.

El potencial hídrico de la raíz es menor que el potencial hídrico del sustrato, creándose de esta forma un gradiente en la interfase sustrato-raíz y el correspondiente flujo de absorción de agua por la planta. Esta absorción de agua provoca un descenso del contenido hídrico del sustrato en las proximidades de la interfase raíz-sustrato, que tiene como consecuencia la creación de un gradiente de potencial hídrico en el sustrato. La presencia de estos gradientes

provoca unos flujos de agua, que tiende a equilibrarlos. El equilibrio se alcanza cuando la absorción de agua por parte de la raíz iguala al flujo de agua provocado por el efecto del gradiente.

Si la absorción aumenta, el equilibrio se rompe, la absorción es mayor que el flujo de agua y consecuentemente se produce una disminución local del contenido de humedad, que provoca un aumento de gradiente de potencial. Este aumento de gradiente tiene como consecuencia un aumento del flujo, alcanzándose de nuevo el equilibrio cuando el aumento del flujo llega a igualar el aumento de la absorción.

Si en la situación de equilibrio la absorción de agua disminuye, el flujo de agua es mayor que la absorción, aumentando localmente el contenido de humedad y disminuyendo, en consecuencia, el gradiente de potencial. Esta disminución del gradiente provoca una disminución del flujo, alcanzándose de nuevo el equilibrio cuando el flujo de agua provocado por el gradiente de humedad iguala a la cantidad de agua absorbida por la raíz.

El mecanismo explicado en los párrafos anteriores es válido localmente, en las proximidades de cada una de las raíces absorbentes, y a una escala de distancias adecuada a las dimensiones de estas raíces. Si consideramos el contenedor en su conjunto, la absorción de agua por parte de la raíz provoca un descenso del contenido hídrico del sustrato y, en consecuencia, un descenso del potencial hídrico medio del sustrato.

Si se mantiene el potencial hídrico de raíz, y por tanto un determinado nivel energético, y se produce un descenso del potencial hídrico del sustrato, el gradiente hídrico es menor, y por lo tanto también será menor el flujo de agua en el equilibrio y la absorción. La disminución de la absorción y el mantenimiento del nivel energético, implican un consumo mayor de energía por unidad de masa de agua absorbida, enlazando de esta forma con el planteamiento energético sobre la disponibilidad de agua (De Boodt y De Waele, 1968).

En este planteamiento, las zonas del sustrato más alejadas de la interfase raíz-sustrato actúan como reservas de agua, y las raíces como sumidero. La capacidad de agua disponible se corresponde con la reserva de agua a partir de la cual se inicia el flujo de agua que finalmente absorbe la raíz. La disponibilidad del agua depende de la capacidad de suministro de agua por parte del sustrato, que a su vez está relacionada con la distancia entre la reserva y el sumidero, del potencial matricial con que el agua está retenida por las partículas del sustrato, y de la conductividad hidráulica del mismo (Fonteno, 1989).

Los métodos de laboratorio no consideran la densidad y distribución de raíces (Fonteno, 1993), por lo que la información obtenida es incompleta. Sin embargo debe tenerse en cuenta que cuando se cultivan plantas en contenedores de hasta 15 cm, están expuestas a potenciales matriciales entre 0 y 50 cm y en este rango, es el volumen de agua y no el potencial matricial el que influye en el cultivo (Fonteno, 1989).

2.4.2.3 Modelo de variables de capacidad en equilibrio

Fonteno parte de los conceptos definidos por De Boodt (De Boodt y Verdonck, 1972), considerando además el punto de marchitez permanente, la forma del contenedor y la ecuación de Van Genuchten (1980), y define el modelo de variables de capacidad en equilibrio (Milks *et al.*, 1989b; Fonteno, 1989), en el que considera los siguientes parámetros:

- Porosidad total (Pt). Es el volumen del sustrato no ocupado por la fracción sólida; puede ser cuantificado midiendo la cantidad de agua a saturación.
- Capacidad de contenedor (CC). Se obtiene por la combinación de las funciones matemáticas de la curva de retención de humedad y la geometría del contenedor (Bilderback y Fonteno, 1987).
- Espacio de aire. Se obtiene como diferencia entre porosidad total y la capacidad de contenedor
- Capacidad de agua disponible. Viene dada por la diferencia entre la capacidad de contenedor y el punto de marchitez permanente.
- Agua no disponible. Es la cantidad de agua retenida a 15.000 cm de columna de agua (punto de marchitez permanente).

2.4.3 Metodología de laboratorio

Fonteno (1993) considera adecuado el criterio de los físicos y químicos de suelos, por el que la normalización de los procedimientos y protocolos es posterior a la de las definiciones. Incidiendo más en este planteamiento, indica que los físicos y químicos de suelos tienen varios procedimientos desarrollados para cada una de las propiedades físicas e hidráulicas, y la elección del método depende de varios factores, tales como

- 1) Disponibilidad de equipamiento
- 2) Naturaleza del suelo
- 3) Clase de muestras disponibles
- 4) Habilidad y conocimientos del experimentador
- 5) Rango de los parámetros a medir
- 6) Objetivo para el que se hacen las medidas.

La aplicación de estos criterios implica una flexibilización de los métodos de laboratorio empleados para determinar las propiedades físicas de los sustratos de cultivo. Este criterio es opuesto al seguido para desarrollar la metodología de referencia de la ISHS, que considera que para que los datos experimentales sean comparables, la metodología y el instrumental de laboratorio deben ser exactamente los mismos.

Sobre esta contradicción, deben hacerse dos puntualizaciones:

1. La metodología de referencia no pretende ser una metodología exclusiva, sino que finalmente quedó como una metodología de uso común en distintos laboratorios, que permite comparar resultados. Por lo tanto, se pueden utilizar otras metodologías, cuyos resultados se pueden contrastar con la de referencia.
2. La metodología aplicada en el Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte (EEUU) es flexible en su aplicación, pero mantiene una características generales. Sobre ésta se introducen ligeras variantes metodológicas, en función de los factores considerados en la elección del método, ya mencionados anteriormente.

Las características generales de la metodología han sido descritas por Fonteno *et al.* (1981) y modificadas por Bilderback *et al.* (1982):

- Preparación de la muestra en cilindros metálicos de 7,62 cm de diámetro por 7,62 cm de altura.

- Tensionado de la muestra por aplicación de presión neumática, con la muestra colocada sobre una placa porosa.
- Cuando se alcanza el equilibrio, se anota el volumen de agua drenado para cada incremento de presión (Fonteno, 1989).
- La densidad aparente se determina a partir del volumen de la muestra y del peso seco a 105 °C.
- Para medir el contenido hídrico a 15.000 cm de columna de agua, Fonteno (1993) emplea el extractor de placa de presión (Cassel y Nielsen, 1986).

Algunas variantes que se pueden encontrar en la bibliografía se refieren a la preparación de la muestra. La metodología es distinta si se parte de sustrato no utilizado o si se pretende analizar las características del sustrato en el que se ha desarrollado un cultivo (Fonteno *et al.*, 1981; Bilderback *et al.*, 1982; Karlovich y Fonteno, 1986; Fonteno, 1989).

Los valores de tensión aplicados para medir la curva de retención de agua son los más variables y varían en función del objetivo del trabajo, según la precisión que se exija en la determinación de la curva de retención de agua.

Para la determinación de la densidad aparente se emplean dos variantes. Se obtiene por relación entre el peso seco en estufa a 105 °C y el volumen correspondiente. Las variantes se refieren al volumen considerado, que en un caso se toma el volumen de sustrato tensionado a 100 cm de agua (Fonteno *et al.*, 1981), y en otro considera el volumen de sustrato tensionado a 300 cm (Fonteno, 1989).

En todos los casos, la muestra se prepara en un anillo metálico de 7,62 cm de diámetro interior y 7,62 cm de altura. Para el tensionado, el anillo se coloca sobre la placa porosa de un embudo Kimax y se aplica presión neumática. Cuando se alcanza el equilibrio a la tensión prefijada, se anota el volumen de agua drenado.

2.4.4 Relación entre las propiedades del sustrato y la respuesta del cultivo

Fonteno (1993) señala como obstáculo para la descripción efectiva de las propiedades físicas e hídricas de los sustratos, la aparente diferencia filosófica considerada en la investigación de estas propiedades, y señala dos enfoques:

- Empírico, que mide los componentes que han sido probados
- Mecanicista, que explora los mecanismos de transporte de agua en sustratos hortícolas. En este último caso, el investigador busca el desarrollo de modelos matemáticos sobre relaciones de propiedades físicas y químicas.

En ambos casos, son extremadamente importantes los diagnósticos empíricos precisos (Fonteno, 1993).

2.4.4.1 Criterios a seguir

Fonteno (1993) propone un enfoque de la investigación más efectivo, que use los diagnósticos precisos y exactos que proporcionen datos sólidos para un plan integrado y bien concebido, que utilice esos datos. Los datos de los procedimientos de diagnóstico empíricos deben situarse dentro de una estructura diseñada para describir matemáticamente la relación entre estas propiedades.

En definitiva, en un protocolo de investigación deben de considerarse los dos enfoques, empírico y mecanicista, y deben seguirse los siguientes pasos (Fonteno, 1993):

- 1) Desarrollo de definiciones estándar para las propiedades y términos
- 2) Desarrollo de una estructura mecanicista basada en la modelización
- 3) Desarrollo de los procedimientos de recogida de datos

Los puntos 1 y 3 ya han sido tratados en los apartados 2.4.2 y 2.4.3, respectivamente, por lo que únicamente queda pendiente de desarrollo el punto 2, que se trata a continuación.

2.4.4.2 Desarrollo de una estructura mecanicista basada en la modelización

El enfoque mecanicista del diagnóstico planteado por Fonteno (1993) explora los mecanismos de transporte de agua de los sustratos hortícolas y busca el desarrollo de modelos matemáticos sobre relaciones de propiedades físicas y químicas.

Para Milks *et al.* (1989a) el entendimiento de la física del entorno radicular en un contenedor está basado en la relación entre el estado energético y el contenido de humedad del medio. Esta relación es reflejo de la distribución del tamaño de poro del medio y se denomina humedad característica del suelo o curva de retención de humedad.

Bunt (1961) introdujo el uso de la curva de retención de humedad en sustratos de cultivo. Posteriormente, se han hecho numerosos esfuerzos para relacionar esta curva con el crecimiento de las plantas y para utilizarla con fines predictivos y descriptivos (Milks *et al.*, 1989a).

De Boodt y De Waele (1968) toman de Richards (1960) el concepto de capacidad específica de agua, que la definen como la derivada del contenido volumétrico de humedad con respecto al potencial matricial. Para calcular este parámetro es necesario definir una función matemática para la curva de retención de agua, con objeto de obtener después su derivada. Sin embargo, De Boodt no detalla ningún método para determinar esta curva.

Puustjärvi y Robertson (1975) trabajan en sustratos con la curva pF desarrollada para suelos, pero, al igual que De Boodt, no mencionan ningún método para darle forma matemática a esta curva.

Son Fonteno *et al.* (1981) quienes introduce el análisis de regresión para describir la curva de retención de agua de sustratos hortícolas.

La introducción de estos análisis la justifican por la importancia que tiene el desarrollo de modelos generales de cultivo para cultivos en contenedor (Milks *et al.*, 1989a), además de la importancia que tiene en aplicaciones específicas, como los trabajos en contenedor de Karlovich y Fonteno (1986) o la modelización de la conductividad hidráulica insaturada estudiada por Van Genuchten y Nielsen (1985).

En un estudio inicial Fonteno, *et al.* (1981) concluyen que la relación entre el contenido de humedad y la tensión es lineal en el intervalo de 0 a 20 cm de columna de agua, y no lineal en el rango de 20 a 100 cm de columna de agua. Además, indican que el grado de no linealidad varía con el tipo de sustrato y tiempo de cultivo.

Posteriormente, y para predecir la capacidad de contenedor y el espacio de aire, Fonteno emplea un modelo de regresión cúbica de los datos semilogarítmicos (Karlovich y Fonteno, 1986).

Finalmente, Milks *et al.* (1989a) hacen una revisión de los modelos matemáticos empleados en física de suelos, para relacionar el contenido de humedad con la tensión de humedad. Clasifican los modelos en dos grupos: modelos cúbicos y modelos empíricos no lineales continuamente diferenciables. Entre los primeros, citan a Fonteno y Bilderback (1983), Karlovich y Fonteno (1986), y Tilt (1983). Entre los modelos no lineales, citan a King (1965), Laliberte (1969), Su y Brooks (1975), y Van Genuchten (1980). Finalmente, seleccionan un modelo de cada grupo y comparan la bondad de los ajustes obtenidos con ambos modelos para los datos experimentales obtenidos en laboratorio.

De entre los modelos cúbicos, seleccionan el de Karlovich y Fonteno (1986), que viene dado por la ecuación:

$$(109) \quad Y = a + bX + cX^2 + dX^3$$

donde $X = \text{Log}[(\text{Tensión (kPa)} \cdot 9.8) + 1]$, y los parámetros a , b , c y d son desconocidos y se determinan por ajuste.

Entre los modelos experimentales no lineales, seleccionan el desarrollado por Van Genuchten (1980), que viene dado por la ecuación:

$$(110) \quad \Theta = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

Donde Θ es el contenido de humedad a la tensión h , Θ_r es el porcentaje de humedad asintótica residual, y Θ_s es el contenido de humedad a saturación. Van Genuchten (1980) establece una única relación entre n y m , $m = 1 - (1/n)$. Posteriormente, y para mejorar la flexibilidad, Van Genuchten y Nielsen (1985) eliminaron esta restricción entre n y m , dejando así los cinco parámetros independientes.

Van Genuchten indica que Θ_r puede calcularse junto con α , n , y m . Sin embargo, Stephens y Rehfeldt (1985) demostraron que se mejora la exactitud del modelo usando un Θ_r empírico.

Milks *et al.* (1989a) siguieron este criterio, por lo que los valores Θ_r y Θ_s son parámetros conocidos empíricamente, mientras que α , n y m son desconocidos, y se determinan utilizando los métodos de estimación paramétrica no lineal de mínimos cuadrados.

Milks *et al.* (1989a) concluyen que el ajuste de los datos experimentales al modelo de Van Genuchten es mejor que el ajuste al modelo polinómico de tercer grado, por lo que consideran adecuado emplear el modelo de Van Genuchten para el ajuste de los datos experimentales de la curva de retención de agua de los sustratos de cultivo hortícolas.

2.4.5 Propuesta metodológica (Descripción del estatus hídrico)

Con objeto de aportar una solución a los problemas planteados, y considerando los condicionantes mencionados anteriormente, en el congreso de Florencia (1992), Fonteno (1993)

ofreció como base de partida los trabajos desarrollados en el Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte (EEUU).

El objetivo es describir el status hídrico de un sustrato bajo unas condiciones definidas de forma precisa.

Fonteno propone mantener constante la definición de los términos, aunque los métodos utilizados para la obtención de los datos pueden variar, dependiendo del objetivo para el que se toman dichos datos.

Para describir el status hídrico, Fonteno propone las variables incluida, en el modelo de variables en equilibrio (2.4.2.3), que incluye medidas de capacidad de agua, porosidad de aire y disponibilidad de agua. Respecto a la metodología de medida, propone varias opciones para medir la porosidad total y la capacidad de contenedor. A partir de la curva de retención de agua se puede obtener la porosidad total. Usando los modelos desarrollados por Van Genuchten (1980), y modificados por Milks *et al.* (1989a y b), se puede obtener la capacidad de contenedor. Finalmente, utilizando el porómetro (Fonteno, 1993), se pueden obtener los valores de la porosidad total y de la capacidad de contenedor.

Fonteno indica que al status hídrico le afectan, además de las propiedades físicas, varias variables que deben ser definidas para cada experimento (Milks *et al.*, 1989c) como la geometría del contenedor, el manejo del sustrato previo al enmacetado (principalmente el contenido de humedad y agentes humectantes), la densidad aparente del sustrato en el contenedor, el método de aplicación del agua y la densidad de raíces.

2.4.6 *Aplicación de la teoría de modelo*

La aplicación de la teoría de modelos a la caracterización física incluye el desarrollo de la metodología de laboratorio para determinar las propiedades físicas y la realización de ensayos de campo, que permitan relacionar estas propiedades físicas con la respuesta del cultivo.

En los párrafos anteriores se han desarrollado los aspectos relativos a la metodología empleada en laboratorio para determinar las propiedades físicas.

Respecto a la relación de las propiedades físicas con la respuesta del cultivo, cuando se desarrolló esta metodología, ya se contaba con una amplia documentación bibliográfica relativa a ensayos de campo realizados con este fin. Además, el equipo de trabajo del Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte realizó varios ensayos de campo entre los que podemos citar:

- Ensayo con tres sustrato, empleando como planta testigo la Poinsettia (Fonteno *et al.*, 1981)
- Relación de 5 medios de cultivo con el crecimiento de azalea. Incidencia de cada uno en las condiciones creadas en el entorno radicular (Bilderback *et al.*, 1982).
- Relación entre el criterio de riego y la respuesta de la planta (crisantemo). Se evalúa el crecimiento controlando la producción de peso seco, el peso fresco y el nº de flores cuando se deja secar el sustrato antes del riego hasta 5, 10, 20 y 30 kPa. Se estudia la relación de humedad y el crecimiento de la planta para determinar los criterios de riego (Karlovič y Fonteno, 1986).

2.4.7 *Factores limitantes en la aplicación de modelos*

La metodología que nos ocupa presenta unas características propias que le diferencian claramente de las anteriores:

2.4.7.1 Factor limitante 1: Variables no consideradas en la metodología

A diferencia de las metodologías anteriores, la del Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte considera el estudio de la conductividad hidráulica, que amplía el campo de aplicación a la dinámica del agua en el medio de cultivo. La falta de una metodología específica para medir la conductividad hidráulica en sustratos de cultivo limita su aplicación en este campo. El cálculo indirecto, aplicando los modelos empleados en suelos, permite realizar una primera aproximación en este sentido.

El modelo de variables de capacidad en equilibrio tiene en cuenta la forma del contenedor, con lo que se obtiene una mayor aproximación a la situación real de campo.

2.4.7.2 Factor limitante 2: Intervalos de validez del modelo

Las limitaciones relativas a la saturación, y la determinación de las densidades real y aparente consideradas en el caso de la metodología de De Boodt, son de aplicación en este caso (2.1.5.2.2).

Respecto al tensionado el sistema utilizado es diferente, y se aplica presión en lugar de succión. Al igual que en aquel caso, se debe asegurar que la tensión alcanzada en el sustrato se corresponde con el valor previamente fijado.

El intervalo de tensión de humedad es más amplio que en las metodologías estudiadas anteriormente. En este caso, se llega hasta 15.000 cm de columna de agua.

Respecto al gradiente de humedad dentro de la muestra sometida a tensionado, es de aplicación en este caso la consideración hecha para la metodología de De Boodt y la de ISHS, con el agravante de que la altura es mayor y, por lo tanto, es más probable que el gradiente se desvíe de la recta.

2.4.7.3 Factor limitante 3: Errores de medida

La relación entre las determinaciones de laboratorio y el reparto volumétrico calculado es más directa que en el caso de las metodologías de De Boodt y de referencia. En consecuencia, la magnitud de los errores cometidos será, en general, inferior.

Fonteno *et al.* (1981) y Bilderback *et al.* (1982) especifican claramente la metodología de laboratorio seguida, pero no el procedimiento de cálculo aplicado para obtener el reparto volumétrico. Sin embargo, no es difícil deducir este procedimiento de cálculo, que es necesario para calcular la incidencia de los errores de las medidas de laboratorio en el cálculo volumétrico.

Las densidades aparente y real se emplean de forma similar a las metodologías de De Boodt e ISHS. El cálculo de la incidencia de errores en el volumen ocupado por material sólido es similar al de las metodologías mencionadas. Sin embargo, es importante destacar que los

métodos empleados para la medida de la densidad real tienen en cuenta la estructura física de las partículas que constituyen el sustrato, y consideran como porosidad al volumen de poros que interviene en el intercambio aire-agua.

Los volúmenes de aire y agua se obtienen directamente a partir del volumen de agua drenado por la muestra. Los errores cometidos en la medida del volumen de agua inciden en el cálculo de ambos volúmenes, pero el error de esta medida de laboratorio es el único que incide en estos volúmenes. En el caso de las metodologías de De Boodt e ISHS, los mayores errores eran los debidos a la determinación de D_a , D_r y $\%S$. En el cálculo de los volúmenes de aire y agua por la metodología en estudio, no interviene la D_a la D_r $\%S$, por lo que se han eliminado las mayores fuentes de error.

3 DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUSTRATOS DE CULTIVO

3.1 Introducción

La determinación de las propiedades físicas del sustrato y la interpretación de los resultados analíticos obtenidos se puede plantear como un modelo de comportamiento. En un modelo, las variables de entrada permiten predecir el comportamiento del sistema. En la caracterización física de los sustratos, los valores obtenidos en el laboratorio permiten establecer los criterios de manejo del sustrato, para obtener un resultado satisfactorio en el desarrollo del cultivo.

El modelo se ha definido como una representación simplificada de un sistema (1.2.3.1). La simplificación constituye el aspecto central del proceso de modelización (1.2.3.1). Los criterios a considerar en esta simplificación son (1.2.3.2.2): el sistema a modelizar, la disponibilidad de datos, el objetivo del modelo, y el uso que se le va a dar.

- g) El sistema a modelizar es el propio cultivo, cuya evolución está relacionada con los factores de producción como suministro de agua y nutrientes, factores ambientales, etc. En el caso que nos ocupa, el sistema se limita a los aspectos físicos del sustrato relacionados con el suministro de aire y agua a la planta.
- h) Conocimiento del sistema: Como ya se ha visto en 1.2.3.2.2, este criterio encierra una cierta subjetividad, puesto que relaciona al observador (elemento subjetivo) con el sistema (elemento objetivo).
- i) La disponibilidad de datos se refiere no solo a la cantidad sino también a la calidad (1.2.3.2.2.2). Los errores experimentales de medida de las variables físicas consideradas, pueden llegar a actuar como factor limitante de la utilidad de la caracterización física.
- j) El objetivo del modelo es predecir el comportamiento del sustrato respecto a la disponibilidad de aire y agua para el sistema radicular de la planta.
- k) El uso que se va a dar al modelo es la obtención de criterios para el manejo del sustrato y del agua de riego, que permitan mantener las disponibilidades de aire y agua en el entorno radicular -dentro de unos márgenes previamente fijados- adecuados a las necesidades de la planta cultivada.
- l) Escenarios de aplicación del modelo: Cuando se desarrolla un modelo es necesario definir los escenarios en los que está prevista su utilización (1.2.3.2.2). En el trabajo experimental se han empleado sustratos de características muy diversas. La finalidad de esta diversidad es ampliar los escenarios de aplicación de la metodología de medida y del modelo de porosidad desarrollado.

Las características del sistema, el objetivo planteado y el uso que se va a dar al modelo, hacen necesario estudiar la disponibilidad de aire y agua en el entorno radicular.

Respecto a la disponibilidad de datos, los errores experimentales de medida juegan, en este caso, un papel muy importante. Por ello, se ha hecho un análisis detallado de la rutina de laboratorio para detectar, y en su caso corregir, las fuentes de error más importantes.

El estudio de estos errores pone de manifiesto la necesidad de diseñar nuevas estrategias de laboratorio, que permitan disponer de medidas independientes para el volumen total y para los volúmenes ocupados por material sólido, agua y aire. Para conseguir este objetivo, se plantea como alternativa la pycnometría de gases para obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire.

3.2 Disponibilidad de aire y agua

El sustrato debe proporcionar al sistema radicular de la planta el aire necesario para la respiración de las raíces y el agua necesaria para el desarrollo de la planta. El estudio de la relación sustrato – planta aporta información sobre la capacidad del sustrato para cubrir estas necesidades.

La relación entre el estado energético y el contenido de agua en el medio del cultivo es la base fundamental para explicar el reparto de fases (aire, agua y material sólido) en el entorno radicular.

Las relaciones hídricas en el sustrato están estrechamente relacionadas con las características del espacio poroso, como son la distribución del tamaño de poro, la forma de los poros y la comunicación de cada uno de ellos con el resto del espacio poroso.

3.2.1 *Relación sustrato – planta*

3.2.1.1 Funciones del sustrato

De Boodt (1975) define el sustrato como el medio poroso en el que está anclada la planta, que debe atender sus necesidades físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico, el sustrato debe suministrar al sistema radicular el agua necesaria para el desarrollo de la planta y el aire necesario para la respiración de las raíces. Por ello, De Boodt considera que en la optimización del sustrato para el cultivo inciden, entre otros, la economía del agua y la economía del aire.

Fonteno también otorga una gran importancia a las relaciones agua - aire en el sustrato. De hecho, el objetivo que se plantea para la investigación en sustratos es hacer mezclas más eficientes para proporcionar a la planta disponibilidad de agua (Fonteno, 1993). Para ello, es necesario entender las propiedades físicas e hídricas de los sustratos, y evaluarlos adecuadamente a partir de estas propiedades físicas (Fonteno, 1993).

Son varios los autores que inciden en la importancia de las propiedades físicas relacionadas con el reparto volumétrico de fases en los sustratos de cultivo. Además de De Boodt (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1972) y Fonteno (Milks *et al.*, 1989a; Fonteno, 1989), podemos citar a Bunt (1961) y a Puustjärvi y Robertson (1975), entre otros.

3.2.1.2 Relaciones hídricas sustrato – planta: Disponibilidad de agua

La absorción de agua por las raíces de la planta depende de la capacidad de la planta para absorber agua, de la capacidad del sustrato para suministrar al sistema radicular el agua que necesita la planta y de la interacción entre el sistema radicular de la planta y el sustrato.

La capacidad de la planta para absorber agua depende de factores genéticos (especie, variedad), estado sanitario, estado fenológico, etc.

La capacidad del sustrato para suministrar agua a la planta depende de sus propiedades físicas, como la capacidad de almacenamiento y la capacidad de transporte de agua. El agua se almacena en los poros del sustrato. Las raíces absorben el agua de los poros más próximo; esto desequilibra el sistema, que tiende a reponer el agua, transportándola de los poros más alejados. La capacidad para transportar el agua, y en consecuencia para reponer el equilibrio, es una característica propia del sustrato que depende de las características del espacio poroso y se mide mediante la conductividad hidráulica.

La interacción entre el sistema radicular de la planta y el sustrato puede entenderse si se tiene en cuenta la actividad respiratoria de las raíces y la complementariedad de los volúmenes ocupados por aire y por agua en el espacio poroso. El sistema radicular tiene actividad respiratoria; en consecuencia, se produce un intercambio gaseoso con el entorno, con una demanda neta de oxígeno y producción de anhídrido carbónico. El consumo de oxígeno produce una situación de asfixia radicular, que reduce la capacidad de la planta para absorber el agua disponible en el sustrato. Para un sustrato determinado, cuanto más elevada es la disponibilidad de agua, menor es la disponibilidad de aire, y más probable es alcanzar esta situación de asfixia, en la que, a pesar de la alta disponibilidad del agua, ésta no es útil para la planta, por la reducción de la capacidad de absorción.

La multitud de factores que inciden en la absorción de agua, supone un importante problema para definir el agua disponible de un sustrato. Así lo puso de manifiesto Fonteno (1993) quien concluye que dentro del término agua disponible deben considerarse los de disponibilidad de agua y capacidad de agua disponible.

De Boodt considera que el agua del sustrato tiene que estar disponible a un nivel energético tan bajo como sea posible, considerando que, al mismo tiempo, debe haber aire disponible suficiente en los poros de la zona radicular (De Boodt y De Waele, 1968; De Boodt y Verdonck, 1971 y 1972; De Boodt *et al.*, 1974a).

La incidencia en la absorción de agua de los factores mencionados hace muy complejo su estudio, pero éste se simplifica si se acomete por fases. Podemos considerar que las características de la planta determinan las condiciones físicas, disponibilidad de aire y de agua, que debemos disponer en el entorno radicular para cubrir las necesidades de dicha planta. Los instrumentos disponibles para conseguir estas condiciones son las características físicas del sustrato y el manejo del agua de riego.

Asumiendo este planteamiento, el modelo de cultivo que relaciona las propiedades físicas del sustrato y el manejo del riego con la respuesta de la planta, lo podemos desglosar en dos submodelos. Uno en el que las propiedades físicas del sustrato y el manejo del riego intervienen como variables independientes, y las condiciones físicas del entorno radicular como función. Y otro, en el que las condiciones físicas del entorno radicular intervienen como variables independientes y la respuesta del cultivo como función. Las características de la planta marcan

las condiciones físicas que se deben procurar al entorno radicular y los intervalos de variación de las mismas. Una vez determinadas estas condiciones, se debe elegir la combinación de propiedades físicas del sustrato y riego que permitan mantener las condiciones físicas dentro de los intervalos marcados.

3.2.2 *Relaciones energéticas*

El comportamiento hídrico de un sustrato es consecuencia de las variaciones del status energético en el sistema poroso. Este comportamiento se puede explicar a partir de las leyes de la Termodinámica.

- Primera ley. Principio de conservación de la energía: La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma.
- Segunda ley: La dirección de los cambios en un sistema aislado tiende siempre al equilibrio.

Hillel (1980c) parte de estas leyes para explicar el concepto de potencial hídrico y de sus componentes y, a partir de ellos, las relaciones hídricas en el sustrato. Baber *et al.* (1991b) parten de la energía potencial y cinética para explicar los mismos conceptos, y aplican implícitamente las mismas leyes de la Termodinámica.

3.2.2.1 Fundamentos

3.2.2.1.1 *Energía cinética y potencial*

La energía cinética es la contenida en una materia, en virtud de su movimiento. La energía potencial es la contenida en un cuerpo, en virtud de su posición en un campo de fuerza; se mide por la fuerza requerida para mover el cuerpo contra el campo de fuerza y es el producto de la fuerza por la distancia recorrida (Baber *et al.*, 1991b).

La energía potencial absoluta es difícil de definir; en la práctica, cada potencial se define con respecto a un nivel arbitrario de referencia (Baber *et al.*, 1991b). El potencial así entendido es la diferencia entre el potencial en el estado actual y el potencial del nivel de referencia. Si el primero es mayor que el segundo, el potencial es positivo, y el paso del estado actual al de referencia supone una disminución de la energía potencial, y, en consecuencia, un aumento de otra forma de energía (por ejemplo, energía cinética). Si por el contrario, el primero es menor que el segundo el potencial es negativo, el paso del estado actual al de referencia supone un aumento de la energía potencial, que implica la disminución de otra forma de energía.

3.2.2.1.2 *Primera ley de la Termodinámica*

Principio de conservación de la energía: El agua contenida en el medio poroso está sometida a la acción de diversos campos de fuerza. En virtud de su posición en estos campos, tiene una energía potencial. El movimiento del agua en el medio poroso implica una variación de su posición en los campos de fuerza mencionados y, en consecuencia, una variación de la energía potencial. El principio de conservación de la energía indica que este incremento de energía se corresponde con un incremento - de la misma magnitud y signo contrario- de otra forma de energía, de tal forma que el balance neto sea nulo. Normalmente, la variación de la energía potencial del agua se corresponde con una variación igual y de signo contrario de la energía cinética.

3.2.2.1.3 Segunda ley de la Termodinámica

Tendencia al equilibrio: El agua contenida en un sustrato tiende a un estado en el que la energía potencial sea la misma para todas las partículas de agua. Cuando se presenta una situación de desequilibrio, se produce un movimiento del agua, desde los puntos de potencial más elevado hacia aquellos en los que el potencial es menor. El flujo de agua cesa cuando se alcanza el equilibrio, en el que la energía potencial es igual para toda el agua contenida en el sistema.

En el caso de las relaciones hídricas en el medio poroso hay dos factores externos al sistema, que intervienen alterando el equilibrio:

- El sistema radicular de la planta: actúa como demandante de agua. La absorción de agua por la raíz provoca un descenso local del potencial hídrico, desequilibrando el sistema. El equilibrio se restablece, redistribuyéndose el agua disponible en el resto del sustrato.
- Aporte de agua de riego: la aplicación de un riego supone la entrada en el sistema de agua, con una energía potencial considerablemente más elevada que la que previamente había en el medio poroso. Se presenta, por lo tanto, una situación de desequilibrio, que nuevamente tenderá al equilibrio.

3.2.2.2 Unidades

La descripción cuantitativa de la energía potencial del agua del suelo requiere expresarla en términos de masa o volumen del agua que la contiene. De la definición de energía potencial (3.2.2.1.1) se deduce que su magnitud corresponde a trabajo. El potencial hídrico (Ψ_h) corresponde a la energía potencial por unidad de masa o de volumen de agua. Las unidades de potencial referido a masa son $F \cdot L \cdot M^{-1} = L^2 \cdot T^{-2}$. Las unidades de potencial referido a volumen son las mismas de la presión, $F \cdot L \cdot L^{-3} = F \cdot L^{-2} = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$ (Baber *et al.*, 1991b; Hillel, 1980c).

En el Sistema Internacional de medidas (MKS), las unidades de las magnitudes básicas y de las relacionadas con el potencial hídrico son:

- Longitud (L): Magnitud elemental.
 - Unidad: metro (m)
- Masa (M): Magnitud elemental.
 - Unidad: Kilogramo (kg)
- Tiempo (T): Magnitud elemental.
 - Unidad: segundo (s)
- Fuerza (F)=Masa · aceleración = $M \cdot L \cdot T^{-2}$.
 - Unidad: Newton (N): Fuerza que comunica a una masa de un kg una aceleración de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
- Presión = Fuerza /superficie = $F \cdot L^{-2}$.
 - Unidad: Pascal (Pa): Presión que ejerce una fuerza de 1 Newton sobre una superficie de 1 m^2
- Trabajo = Fuerza · desplazamiento = $F \cdot L$.
 - Unidad: Julio (J): Trabajo producido por una fuerza de 1 Newton al desplazarse un metro
- Potencial referido a volumen = Trabajo / volumen = $F \cdot L \cdot L^{-3} = F \cdot L^{-2}$.

- Unidades: Conceptualmente, la unidad es Julio/m³. Dimensionalmente, esta unidad equivale a la medida de presión: 1 julio/m³=1 pascal

El valor de la energía potencial puede expresarse en unidades de presión, y de hecho son las medidas empleadas habitualmente. Sin embargo, es importante resaltar que, aunque las medidas son dimensionalmente iguales, las magnitudes son distintas; en un caso es fuerza por unidad de superficie (presión), y en otro trabajo por unidad de volumen (potencial). Si se tiene en cuenta esta importante matización, es fácil entender la existencia de potenciales negativos sin un límite inferior definido. Cuando la magnitud es la presión, no tiene explicación la existencia de valores inferiores a -100 kPa. La presión atmosférica se corresponde con una presión absoluta de aproximadamente 100 kPa. Por lo tanto, el mínimo valor que puede alcanzar una presión es de -100 kPa, correspondiente al cero absoluto y, por lo tanto, físicamente imposible de superar. Un potencial de -600 kPa significa que, para pasar del estado actual al de referencia, es necesario aportar al sistema una energía de 600 kJulios por m³ de agua.

3.2.2.3 Componentes del potencial

Cada campo fuerza que actúa sobre el agua corresponde a un potencial. El potencial hídrico total se obtiene como suma de los potenciales debidos a los diferentes campos de fuerza que actúan sobre el agua del medio poroso. Los campos de fuerza que intervienen son: el matricial, de presión, osmótico y gravitacional, que dan lugar a los correspondientes potenciales.

3.2.2.3.1 *Potencial matricial Ψ_m*

El potencial matricial es el debido a la atracción del agua por la superficie sólida y a la atracción mutua de las moléculas de agua; comprende las fuerzas no equilibradas en la interfase aire-agua, que dan origen a la tensión superficial (Baber *et al.*, 1991b).

La International Society of Soil Sciences (ISSS) define el potencial matricial como la cantidad de trabajo que debe efectuarse por cantidad unitaria de agua para transportar - de modo reversible e isotérmico- una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito que contiene una solución de composición idéntica a la del agua del suelo con la altura y presión externa del punto considerado hasta el agua del suelo. De esta definición se infiere que los potenciales matriciales son negativos, puesto que el agua fluirá desde el depósito de referencia al suelo seco con liberación de energía en forma de calor. El potencial matricial del agua por encima del nivel de agua subterránea es negativo, y por debajo del nivel de agua libre es igual a cero (Baber *et al.*, 1991b).

3.2.2.3.2 *Potencial de presión Ψ_p*

El potencial de presión es el debido al peso del agua en el punto considerado (Baber *et al.*, 1991b). En este caso, el nivel energético de referencia es el agua a la misma altura y presión gaseosa externa del punto considerado.

Si el sustrato está saturado, el agua que está por debajo del nivel libre del agua está sometida a una presión mayor que la atmosférica. La energía potencial en este caso es superior a la del nivel de referencia, por lo que el potencial de presión es siempre positivo. Si el suelo no está saturado no hay presión debida al peso de la columna de agua y el valor del potencial de presión es cero.

Hillel (1980c) menciona un caso en el que el potencial de presión puede ser negativo: Cuando la presión hidrostática es menor que la atmosférica (succión), el potencial de presión es negativo. Este caso se da en el ascenso capilar; la presión hidrostática es negativa para el agua del capilar situada por encima del nivel libre del agua (Hillel, 1980c).

3.2.2.3.3 Potencial osmótico Ψ_{π}

El campo de fuerza que interviene en el potencial osmótico es el generado por la disolución de sales en el agua del suelo. El nivel energético de referencia corresponde al agua pura a la misma altura y presión que la del punto del sustrato considerado.

La ISSS define el potencial osmótico como la cantidad de trabajo que debe efectuarse por cantidad unitaria de agua para transportar de modo reversible e isotérmico una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito de agua pura de altura especificada y a presión atmosférica hasta un depósito que contiene una solución idéntica en composición al agua del suelo (en el punto considerado) y que en los demás aspectos es idéntica al depósito de referencia. El potencial osmótico resulta de la hidratación de los iones en la solución del suelo y corresponde al trabajo requerido para separar el agua de estos iones (Baber *et al.*, 1991b).

El potencial osmótico no afecta de forma significativa al fluido de agua en el suelo; para que intervenga, se necesita la presencia de una membrana semipermeable (Hillel, 1980c).

3.2.2.3.4 Potencial gravitacional Ψ_g

El campo de fuerza considerado en este caso es el campo gravitatorio terrestre. El plano de referencia es un nivel arbitrario previamente fijado (Baber *et al.*, 1991b; Hillel, 1980c).

La ISSS define el potencial gravitacional como la cantidad de trabajo que debe efectuarse por cantidad unitaria de agua para transportar de modo reversible e isotérmico una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito que contiene una solución de composición idéntica a la del agua del suelo a la altura considerada como nivel de referencia, hasta la elevación considerada del agua en el suelo. El potencial gravitacional será positivo o negativo, en función de que el nivel de referencia esté por debajo o por encima del punto considerado (Baber *et al.*, 1991b).

A una altura z por encima del nivel de referencia, el potencial de energía (E_g) de una masa (M) de agua que ocupa un volumen (V) es:

$$(111) \quad E_g = Mgz = \rho_a Vgz$$

Donde ρ_a es la densidad del agua, y g la aceleración de la gravedad. Si se expresa en términos de energía por unidad de volumen:

$$(112) \quad \frac{E_g}{V} = \frac{Mgz}{V} = \rho_a gz$$

Esta expresión coincide con la de la presión hidrostática: $p = \rho gh$, donde p es la presión, ρ la densidad del fluido considerado, g la aceleración de la gravedad, y h la altura de la columna de líquido. Por lo tanto, deducimos que el potencial gravitacional equivale a la presión ejercida por

una columna de agua de una altura equivalente a la diferencia de cotas entre el punto en cuestión y el plano de referencia.

3.2.2.3.5 Otros potenciales

Los cuatro potenciales considerados son los que, en general, intervienen en las relaciones hídricas del sustrato. Con ellos se pueden resolver la mayoría de las situaciones que se presentan en las relaciones aire-agua en el medio poroso. En algunos casos particulares pueden incidir otras fuerzas, que dan lugar a los correspondientes potenciales:

- Potencial neumático: es el debido a la presión del aire (o de otro gas). El nivel de referencia es la presión atmosférica (Baber *et al.*, 1991b). En raras ocasiones se presenta en el suelo o sustrato. En trabajos de laboratorio, la aplicación de presión neumática es un método para tensionar las muestras y obtener la curva de retención de agua.
- Potencial de sobrecarga: Baber *et al.* (1991b) lo definen como el debido a la fuerza que ejerce el peso del suelo sobre el agua. Este potencial no se suele considerar y, cuando existe, queda implícito en el potencial de presión o en el matricial.

3.2.2.4 Aplicaciones

3.2.2.4.1 Movimiento del agua dentro de un sustrato

En situación de equilibrio, la energía potencial es la misma en todos los puntos. Cuando el potencial en un punto varía, se produce una situación de desequilibrio, que tiende a establecer un nuevo equilibrio (segunda ley de la Termodinámica). Este razonamiento es aplicable al movimiento de agua en el sustrato de cultivo. Cuando se presenta una situación de desequilibrio, la transformación reversible de energía potencial en cinética (primera ley de la Termodinámica) actúa como medio para restablecer el equilibrio.

El agua, con una energía potencial más elevada, transforma parte de ésta en energía cinética. Se produce el desplazamiento hacia los puntos de potencial más bajo, donde la energía cinética se transforma en potencial. De esta forma, disminuye el potencial en el punto de potencial más elevado y aumenta en el punto de potencial más bajo. El movimiento cesa cuando el potencial en ambos puntos se iguala. Este razonamiento explica el funcionamiento hídrico del sustrato en las dos situaciones de desequilibrio planteadas: la actuación del sistema radicular como sumidero y el aporte de agua mediante el riego.

Tomamos como punto de partida una situación de equilibrio, en la que el potencial hídrico es igual en todo el sustrato. La absorción de agua por la raíz provoca un descenso local del potencial hídrico, mientras que el resto del sustrato permanece momentáneamente con el potencial inicial más elevado. El mecanismo explicado de transformación de energía potencial en cinética, y viceversa, tiende a restablecer el equilibrio, provocando el flujo de agua hacia las raíces.

El riego se aplica cuando la disponibilidad de agua es baja. Esta baja disponibilidad es consecuencia del bajo contenido hídrico y del bajo potencial hídrico. El aporte del agua de riego supone la entrada en el sistema de agua, con un potencial hídrico muy superior al del agua del sustrato. El mencionado mecanismo de transformación reversible de energías es el responsable de la redistribución del agua en todo el volumen de sustrato, de su re-equilibrio, del aumento del potencial hídrico y, en definitiva, del aumento de la disponibilidad de agua.

3.2.2.4.2 *Equilibrio hídrico en un sustrato: diferencia de potencial matricial entre dos puntos = diferencia de cotas*

El potencial hídrico total se obtiene como suma de los diferentes potenciales que intervienen y que se han detallado en el apartado anterior:

$$(113) \quad \Psi_h = \Psi_m + \Psi_p + \Psi_o + \Psi_g$$

En un sustrato se producirá movimiento de agua entre dos puntos si los potenciales hídricos no son iguales. En condiciones de equilibrio, el potencial hídrico de ambos puntos es igual ($\Psi_{h1}=\Psi_{h2}$) y no se produce movimiento de agua entre ambos. Si se cumple esta igualdad se obtiene:

$$(114) \quad \Psi_{m1} + \Psi_{p1} + \Psi_{o1} + \Psi_{g1} = \Psi_{m2} + \Psi_{p2} + \Psi_{o2} + \Psi_{g2}$$

En el caso del medio poroso no saturado, se cumplen las siguientes condiciones:

- Potencial de presión: En condiciones de medio no saturado, el valor de este potencial es cero ($\Psi_{p1}=\Psi_{p2}=0$).
- Potencial osmótico: Entre dos puntos del sustrato no se presenta ninguna membrana semipermeable; en consecuencia, se llegará a un equilibrio en el que la concentración de sales será la misma en todos los puntos del sustrato. Por lo tanto: $\Psi_{o1}=\Psi_{o2}$.

$$(115) \quad \Psi_{m1} + \Psi_{g1} = \Psi_{m2} + \Psi_{g2} \therefore \Psi_{m1} - \Psi_{m2} = -(\Psi_{g1} - \Psi_{g2})$$

Aplicando estas dos condiciones a la ecuación anterior se obtiene:

Es decir, en condiciones de equilibrio, la diferencia de potencial matricial entre dos puntos de un sustrato es igual a la diferencial de potencial gravitacional, pero de signo opuesto.

El potencial matricial es tanto más bajo cuanto mayor es la cota del punto considerado. La diferencia de potencial gravitacional entre dos puntos es igual a la diferencia de cota entre ellos cuando la unidad empleada es la altura de columna de agua.

3.2.2.4.3 *Relación entre tamaño de poro lleno de agua y estado energético*

El espacio poroso del sustrato está ocupado por aire y agua. Las relaciones energéticas en la interfase entre dos fluidos está regida por la ecuación de tensión superficial de Laplace (Laliberte, 1969).

$$(116) \quad p_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Donde p_c es la diferencia de presión entre las dos caras de la interfase, σ es la tensión superficial, y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de la interfase medidos en dos planos ortogonales (Laliberte, 1969). Por lo tanto, la curvatura de la interfase en equilibrio está relacionada con la diferencia de presión en la interfase. Si la interfase es plana, la diferencia de presión es cero; si es curva, la presión es mayor en el lado cóncavo y la diferencia depende del

radio de curvatura y de la tensión superficial del líquido (Baber *et al.*, 1991b). Si la superficie de la interfase es esférica, $R_1 = R_2$ y la ecuación queda:

$$(117) \quad p_c = \frac{2\sigma}{r}$$

Esta ecuación aplicada a suelo y sustrato determina la forma de la interfase aire – agua en el medio poroso y la altura del ascenso capilar.

El ascenso capilar en un líquido puede obtenerse calculando la presión ejercida por la columna de agua pendiente. [...]. La presión es la masa de líquido por unidad de superficie multiplicada por la aceleración de la gravedad (Baber *et al.*, 1991b):

$$(118) \quad p_c = \frac{\pi r^2 h \rho}{\pi r^2} g$$

Por otra parte, la interfase aire – agua se corresponde con un casquete esférico cuyo radio R está relacionado con el radio del capilar r y con el ángulo de contacto α entre el líquido y la pared del capilar por la ecuación:

$$(119) \quad R = \frac{r}{\cos\alpha}$$

Sustituyendo los valores de p_c y R en la ecuación de Laplace, se obtiene (Baber *et al.*, 1991b; Hillel 1980a):

$$(120) \quad \frac{\pi r^2 h \rho}{\pi r^2} g = \frac{2\sigma}{\frac{r}{\cos\alpha}} \therefore h \rho g = \frac{2\sigma \cos\alpha}{r}$$

Y por lo tanto:

$$(121) \quad h = \frac{2\sigma \cos\alpha}{\rho g r}$$

3.2.3 Características del espacio poroso

Las propiedades hídricas de un sustrato son consecuencia de las características del espacio poroso. El espacio poroso de un sustrato podemos considerarlo como un conjunto de poros individuales interconectados entre sí, formando un sistema único ocupado por aire y agua.

La dimensión de los poros, y la distribución de tamaños, condicionan la capacidad de almacenamiento y transporte de agua en el medio poroso. La distribución del tamaño de poro da lugar a la curva de retención de agua que relaciona el contenido volumétrico de agua con el estado energético (Milks *et al.*, 1989a; Fonteno, 1989). Su utilización en suelos se ha extendido al estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo (Bunt, 1961; De Boodt y Verdonck, 1972; Puustjärvi y Robertson, 1975; Fonteno *et al.*, 1981; entre otros).

La comunicación de cada poro con el resto del espacio poroso condiciona las posibilidades de intercambio de la masa, aire y/o agua, contenida en su interior.

3.2.3.1 Dimensión de los poros

El contenido de humedad de un sustrato se relaciona con el potencial matricial mediante el tamaño del poro. Como consecuencia, la variación de las relaciones aire-agua en función del potencial matricial es función de la distribución del tamaño de poro.

La sección de los poros no tiene porqué ser circular. Sin embargo, cualquiera que sea su forma, se puede asimilar a una sección circular equivalente a efectos hidráulicos. La variación de esta sección a lo largo del poro da lugar al fenómeno de la histéresis (Muñoz – Carpena y Ramos 1997).

3.2.3.1.1 *Distribución del tamaño de poro*

Los poros que constituyen el sistema poroso del sustrato están constituidos por los espacios interparticulares y por los poros internos de las propias partículas que constituyen el sustrato. El tamaño de los primeros depende del tamaño de las partículas y de su grado de empaquetamiento. El tamaño de los poros internos depende del tamaño de las partículas, pero sobre todo, de los procesos que han dado lugar a la estructura de la partícula, sean naturales o artificiales. Tanto el empaquetamiento de las partículas como la estructura de las mismas dan lugar a poros de diferentes tamaños, con una distribución de tamaño característica de cada sustrato.

3.2.3.1.2 *Relación aire-agua. Curva de retención de agua*

El agua almacenada en el sustrato es igual al volumen de poros ocupado por agua. Dada la relación entre el potencial matricial y el diámetro del poro lleno de agua (3.2.2.4.3), se deduce que el volumen ocupado por agua es igual al volumen de los poros cuyo diámetro es menor o igual que el valor de diámetro correspondiente al potencial matricial del sustrato. Si se conoce la función de distribución del tamaño de poro, el volumen de agua vendrá dado por el sumatorio de frecuencias de los poros de diámetro menor o igual que el valor mencionado.

Aplicando este criterio se obtiene una curva de contenido hídrico en función del potencial matricial, que corresponde a la curva de retención de agua.

Aunque para simplificar los razonamientos se ha considerado el volumen de agua, debe tenerse en cuenta que, desde el punto de vista agronómico, la disponibilidad de aire es tan importante como la disponibilidad de agua. Los volúmenes de aire y agua son complementarios, por lo que el estudio de uno de ellos incluye el otro. La curva de retención de agua informa sobre la disponibilidad de aire y agua en el entorno radicular.

3.2.3.1.3 *Capacidad de transporte de agua. Conductividad hidráulica*

La incidencia de factores externos, como el aporte de agua de riego y la absorción de agua por las raíces, ocasiona desequilibrios hídricos. El flujo de agua necesario para el restablecimiento del equilibrio se produce a través de los poros. Los poros actúan, por lo tanto, como conducciones hidráulicas. Las dimensiones de estas características inciden en la capacidad de transporte.

3.2.3.2 Forma de los poros: Accesibilidad de los poros al intercambio aire - agua

La forma de cada poro y, sobre todo, su interconexión con el resto del sistema poroso, condicionan la posibilidad de intercambio de masa con el resto del sistema poroso. Desde este punto de vista, podemos clasificar los poros en tres grandes grupos: Poros totalmente accesibles, poros de accesibilidad condicionada y poros no accesibles. El volumen de poros que interviene en el intercambio aire – agua está relacionado con esta clasificación, por lo que ha de tenerse en cuenta en el estudio de las relaciones aire – agua y en el riego.

3.2.3.2.1 *Poros totalmente accesibles*

No presentan ningún obstáculo al intercambio de masa entre el interior del poro y el resto del sistema poroso. Podríamos representarlo, por ejemplo, como un poro cilíndrico, con los dos extremos abiertos al sistema poroso.

Cuando se produce la saturación, el agua entra por uno de los extremos del poro mientras que el aire sale por el otro. Cuando se produce la desecación, la entrada de aire por un extremo, permite la salida del agua por el otro.

3.2.3.2.2 *Poros de accesibilidad condicionada*

Estos poros permiten el intercambio de masa con el resto del sistema poroso, pero su forma no permite la sustitución total del fluido que ocupa el interior del poro.

Siguiendo el esquema anterior, podríamos representarlo como un poro cilíndrico con uno de los extremos ciego y el otro comunicado con el sistema poroso.

Cuando se produce la saturación, en el momento que el agua llega a la altura del extremo abierto, el aire queda atrapado en el interior, y el intercambio del aire interior por el agua exterior no es posible por la imposibilidad del dar salida al aire. Los sistemas de saturación empleados tratan de evitar o, al menos, reducir este problema.

- Cuando la saturación se realiza por inundación, el agua cierra la única comunicación del poro con el sistema poroso y deja atrapado todo el aire contenido inicialmente en el interior del poro.
- Si la saturación se realiza lentamente, por capilaridad, de abajo hacia arriba, los poros con aberturas grandes sustituirán parcialmente el aire de su interior por el agua exterior, pero los poros con una sola abertura pequeña, no permitirán la sustitución del aire de su interior por el agua exterior.
- Si una vez realizada la saturación por uno de los métodos anteriores se aplica calor, el aire atrapado en el interior de los poros aumentara de volumen, siguiendo la ley de los gases perfectos. Este aumento de volumen provoca la salida parcial del aire del interior del poro, evacuándolo a través del sistema poroso exterior. Cuando la temperatura disminuya de nuevo, el volumen del aire que ha quedado atrapado disminuirá y obligará a la entrada de agua en el interior del poro. La relación aire-agua en el interior del poro, al final del proceso, dependerá principalmente de la relación entre la temperatura máxima alcanzada y la temperatura final.
- De la ley de los gases perfectos se deduce que el volumen es función de la temperatura y la presión. En el caso anterior se ha aplicado una variación de

temperatura para disminuir el volumen final de aire, pero también se puede actuar sobre la presión, haciendo que la presión de saturación sea inferior a la presión final. Una vez sumergido el sustrato en agua, se puede aplicar vacío, obteniendo sobre el aire atrapado, un efecto similar al de la elevación de la temperatura. También se puede aplicar vacío antes de inundar el sustrato, inundándolo en unas condiciones de presión inferior a la atmosférica. En estas condiciones, el aire se queda atrapado a la presión de saturación. Cuando se vuelve a las condiciones normales de presión, el aire atrapado disminuye de volumen y el agua ocupa parcialmente el poro.

Cuando se produce la desecación del sustrato, la única comunicación del poro con el sistema poroso exterior impide la entrada del aire necesario para ocupar el espacio que dejaría libre la salida de agua, impidiendo así la sustitución del segundo por el primero. Para poder hacer esta sustitución en laboratorio, la única posibilidad que hay es hacer pasar el agua contenida en el poro al aire del sistema poroso, bajando la humedad relativa de ese aire mediante la aplicación de calor.

3.2.3.2.3 *Poros no accesibles*

Estos poros no permiten el intercambio de la masa contenida en su interior con la contenida en el resto del sistema poroso. Están constituidos por espacios rodeados totalmente por paredes impermeables al paso del aire y del agua. La imposibilidad de intervenir en el intercambio de aire y agua hace que estos poros no sean efectivos desde el punto de vista agronómico.

3.2.3.2.4 *Volumen de poros accedido*

El motivo por el que se estudian las características del sistema poroso es su relación con las propiedades hídricas del sustrato. El interés de las primeras es tanto mayor cuanto mayor sea su relación con las segundas.

El volumen de poros que se debe considerar en un sustrato es, por tanto, el volumen de los poros que intervienen en el intercambio aire-agua, es decir, el volumen de poros totalmente accesibles más el volumen de poros de accesibilidad condicionada, que interviene en el intercambio aire-agua.

La proporción del volumen de poros de accesibilidad condicionada que interviene en el intercambio aire – agua varía en función del método de saturación empleado. En condiciones de campo, cuando se aplica el riego, esta proporción puede variar también en función de varios factores, como el sistema de riego aplicado, el contenido de humedad del sustrato en el momento del riego, etc.

En condiciones de campo, podemos considerar que el volumen de poros que interviene en el intercambio aire – agua varía entre el volumen de poros totalmente accesibles y la suma de éste más el volumen de poros de accesibilidad condicionada. Cuando menor sea este último, menor será la variabilidad del volumen efectivo de poros

3.2.3.2.5 *Porosidad total y porosidad efectiva*

La suma de los volúmenes ocupados por el aire y por el agua constituye la porosidad total, que se define normalmente como el volumen de medio no ocupado por la fracción sólida. Algunos autores, como Handreck y Black (1991), incluyen en este concepto todos los poros con

independencia de su accesibilidad. Otros, como Blake y Hartge (1986), la definen como el volumen total del medio no ocupado por partículas orgánicas o minerales, refiriéndose a la porosidad accesible. Los conceptos utilizados por Bunt (1988), Milks *et al.* (1989a), Martínez (1992), y la porosidad efectiva definida por Ansorena (1994), entre otros, coinciden con el concepto de Blake y Hartge.

Desde el punto de vista de su utilización agrícola, el valor de porosidad que tiene interés es el correspondiente al volumen que interviene en el intercambio aire-agua, coincidiendo con el concepto de porosidad accesible o porosidad efectiva descrita en el párrafo anterior. En este concepto también inciden Ordovás *et al.* (1996), quienes concluyen que para determinar la porosidad efectiva debemos recurrir a técnicas que impliquen el desplazamiento de fluidos, tales como picnometría de líquidos o gas, o inmersión. El aire atrapado en el interior de los poros también desplaza agua y, por lo tanto, el volumen desplazado corresponde al volumen de material sólido más el volumen de aire atrapado en los poros.

Considerando que el volumen de poros que interesa medir es el que interviene en el intercambio aire-agua, y que el volumen de fluido intercambiado es función del método de saturación empleado, se llega a la conclusión de que el valor de la porosidad efectiva no corresponde a un valor único, sino que varía en un intervalo más o menos amplio, en función del método de saturación (en laboratorio) o de riego (en cultivo) empleado para aportar el agua.

Así pues, podemos considerar que, además de otros factores, la accesibilidad del agua a los poros está relacionada con la variabilidad del nivel de saturación alcanzado por el sustrato empleando diferentes métodos, y con la variabilidad del valor de la porosidad efectiva en función del método empleado. En consecuencia, saturación y porosidad son efectos de una misma causa, que es la accesibilidad del agua a los poros, y ésta, a su vez, es una causa más de la morfología de los poros. Por lo tanto, el estudio de accesibilidad, saturación y porosidad total debe acometerse conjuntamente.

En sentido estricto, la porosidad total incluye el volumen total de poros de un sustrato, independientemente de su accesibilidad. Por lo tanto, la porosidad total está constituida por la suma de la porosidad totalmente accesible más la porosidad de accesibilidad condicionada más la porosidad no accesible (o porosidad ocluida).

Sin embargo, la porosidad efectiva que interviene en el intercambio aire - agua, no tiene por qué coincidir con la porosidad total. El valor de la porosidad total es útil siempre que sea similar a la porosidad efectiva. Para ello, los valores de las porosidades de accesibilidad condicionada y ocluida deben ser próximos a cero. Si el valor de estas dos últimas es elevado, la diferencia entre porosidad total y efectiva también lo será, y el valor de la porosidad total pierde interés.

En consecuencia, más que el valor de la porosidad total en sí misma, interesa conocer sus componentes, y en caso de que no se puedan conocer todos, deben conocerse, al menos, los valores de la porosidad accesible y los de la porosidad de accesibilidad condicionada, puesto que de esta forma tendremos los límites superior e inferior de la porosidad efectiva del sustrato.

3.2.3.2.6 *Relación entre métodos de laboratorio y porosidad medida*

El valor de la porosidad total se obtiene, en general, a partir de los valores de las densidades aparente y real. En general hay unanimidad sobre el método a emplear para la medida de la densidad aparente de los sustratos de cultivo. Se sigue el criterio de De Boodt,

aunque, según los autores, pueden variar las medidas de los anillos empleados como contenedores.

La medida de la densidad real presenta una gran diversidad de criterios. Los métodos empleados los podemos clasificar en dos grandes grupos: destructivos y no destructivos, en función de si destruyen o no la estructura física propia del material sometido a análisis.

Entre los métodos destructivos para medir la densidad real, la incineración de la muestra (Verdonck y Gabriëls 1992) está ampliamente difundida en los trabajos con sustratos, cuando se trata de materiales orgánicos. Su utilización presenta numerosas limitaciones (Martínez 1992), pero tiene la gran ventaja de ser un método sencillo, rápido y de fácil aplicación.

Los métodos basados en la ley de los gases perfectos (picnometría de gases), o en el desplazamiento de fluidos (picnometría de líquido, desplazamiento por inmersión, etc), respetan la estructura física de las partículas y son sensibles a la diferente accesibilidad de los poros. Estos métodos son más complejos y lentos que los anteriores, pero no presentan las limitaciones de aplicación de los métodos destructivos

El valor de la densidad real se emplea como instrumento para evaluar la porosidad. Considerando los razonamientos del apartado 3.2.3.2.5, se deduce, sin lugar a dudas, que el método empleado para la medida de la densidad real debe respetar la estructura propia de las partículas de sustrato, y por lo tanto, se deben emplear métodos no destructivos. Los valores obtenidos con los métodos destructivos son tanto más válidos cuanto menor sea el valor de las porosidades ocluida y de accesibilidad condicionada. La aplicación de unos métodos u otros dependerá de diversos factores, como: precisión y exactitud exigidas, valores previsibles de las porosidades ocluida y de accesibilidad condicionada, tiempo y recursos disponibles para la determinación, etc; y, en cualquier caso, de los objetivos marcados en el trabajo para el que se hace la determinación.

3.2.4 *Aplicación a la modelización del comportamiento hídrico del sustrato*

Para modelizar el comportamiento hídrico es necesario tener en cuenta la evolución del agua almacenada y la conductividad hidráulica. En el caso de sustratos, normalmente no se considera la conductividad hidráulica y se recurre a modelos matemáticos referidos a la evolución del contenido hídrico en función del potencial matricial, es decir, la curva de retención de agua.

Teniendo en cuenta que las propiedades hídricas son consecuencia de las características del espacio poroso, el comportamiento hídrico del sustrato se puede modelizar a partir de éste. Si se conoce la distribución del tamaño de los poros, se puede predecir el comportamiento hídrico del sustrato. Algunos autores han seguido esta estrategia para explicar las propiedades hídricas del medio poroso, es el caso de Brooks y Corey (1964), Brutsaert (1966) y Laliberte (1969).

3.3 Errores de medida: Análisis de procedimientos

La fiabilidad de un modelo viene dada por la similitud entre los valores calculados por el modelo y los observados en el sistema real (1.2.3.4). Las diferencias entre unos y otros son consecuencia de la propia estructura del modelo, de los criterios de simplificación y de los

errores experimentales inevitables en la toma de datos del sistema real (1.2.3.4.1). Estos errores afectan tanto a los datos obtenidos para la construcción y evaluación del modelo, como a los datos obtenidos para la utilización del modelo (1.2.3.4.1.2).

La construcción de un modelo es un proceso iterativo. Esta iteratividad proporciona una herramienta muy útil para la mejora continua del modelo (3.2.4.3). Los errores de medida de las variables del modelo inciden tanto en la elaboración como en la aplicación de dicho modelo. La fiabilidad de los criterios de interpretación de los datos analíticos está condicionada por la fiabilidad de los datos utilizados en la elaboración de estos criterios. Una vez establecidos estos criterios, la fiabilidad de las conclusiones obtenidas de la interpretación de unos determinados datos analíticos está condicionada por la fiabilidad de los datos analíticos empleados.

La disminución de los errores de medida aumenta la fiabilidad de los datos analíticos. Como consecuencia, aumenta la fiabilidad de la interpretación de los resultados, aplicando los criterios establecidos. Por otra parte, aplicando el proceso iterativo de construcción de modelos, la disminución de los errores permite redefinir los criterios de interpretación de los datos analíticos, aumentando el poder predictivo y la utilidad del modelo de caracterización.

3.3.1 Incidencia de errores en las metodologías de laboratorio

Las metodologías de laboratorio aplicadas en la actualidad al estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo, permiten conocer la precisión, pero no la exactitud, de las mediciones efectuadas.

Las diferencias entre los valores obtenidos para las repeticiones de un mismo sustrato proporcionan información sobre la precisión de las lecturas. Para tener información sobre la exactitud es necesario conocer un valor de referencia, que se pueda considerar como verdadero. Este valor de referencia puede ser absoluto o relativo. El valor absoluto se obtiene a partir de patrones de medida contrastados. El valor relativo se obtiene aplicando distintas estrategias de medición y cálculo posterior, que permiten obtener un valor de referencia cierto (itinerarios cerrados de topografía).

Los errores experimentales de medida son consecuencia de los procedimientos seguidos y del instrumental empleado. En la metodología de caracterización física se pueden distinguir varios procedimientos consecutivos: saturación de las muestras de sustrato, tensionado, control de peso y proceso de cálculo. De todos ellos, la saturación del sustrato es el que mayor incidencia tiene en los errores.

El análisis de los procesos seguidos y los métodos de cálculo utilizados pone de manifiesto el arrastre de errores y su ocultación por compensación. A continuación se analizan las posibles alternativas a seguir, para evitar esta ocultación de errores.

3.3.2 Saturación del sustrato

Las diferentes metodologías de laboratorio empleadas para estudiar las propiedades físicas del sustrato emplean métodos diferentes para hacer la saturación previa, necesaria para obtener la curva de retención de agua por desorción.

El método de saturación y la rutina de laboratorio están estrechamente relacionados. A este respecto, se distinguen dos estrategias de trabajo:

- La muestra de sustrato se coloca en un recipiente que incorpora el sistema de tensionado (De Boodt).
- La muestra de sustrato se coloca en un recipiente que pasa sucesivamente por un sistema de saturación, tensionado y secado de la muestra (Gabriëls y Verdonck; Fonteno).

Las consecuencias a considerar son la saturación deficiente de la muestra de sustrato y la pérdida de parte del material de la muestra durante la saturación.

3.3.2.1 Métodos de saturación

3.3.2.1.1 *Saturación en recipiente con sistema incorporado de tensionado (De Boodt et al., 1974b)*

El recipiente en el que se satura la muestra consta de un embudo, prolongado hacia arriba con un cuerpo cilíndrico. La base común al cilindro y al cono tiene una placa porosa, con un potencial de entrada de aire superior a la tensión a la que se va a someter la muestra de sustrato.

La parte cónica del embudo, por debajo de la placa porosa, debe permanecer siempre llena de agua. La muestra de sustrato se coloca en la parte cilíndrica del embudo, sobre la placa porosa.

En estas condiciones, el método empleado para saturar la muestra del sustrato consiste en provocar un flujo de agua desde la placa porosa, que sirve de soporte a la muestra, hacia arriba. Se deja durante 24 horas.

3.3.2.1.2 *Saturación en recipientes independientes (Verdonck y Gabriëls, 1992)*

En este caso se emplean dobles anillos metálicos. La utilización de dos anillos superpuestos garantiza el mantenimiento de la altura de la muestra en el momento del control del peso de la muestra tensionada.

La muestra de sustrato se coloca dentro del doble anillo, cuyas caras abiertas se cierran con sendas mallas. La muestra así preparada se satura normalmente por inmersión durante 24 horas.

3.3.2.1.3 *Doble saturación*

Las características del espacio poroso dificultan la sustitución total del aire contenido en los poros por agua, para obtener una saturación completa (3.2.3.2). Para evitar los problemas que presenta la saturación deficiente, Verdonck y Gabriëls (1992) proponen una doble saturación de las muestras de sustrato, o dicho de otra forma, una saturación en dos etapas. Esta metodología propone una primera saturación de la muestra por inmersión en agua, en un recipiente voluminoso, durante un periodo prolongado de tiempo. Posteriormente, estos recipientes se dejan drenar durante 24 horas, y la muestra drenada se homogeneiza y se llenan los dobles anillos, donde se realiza una segunda saturación.

3.3.2.2 Problemática que se presenta

3.3.2.2.1 *Saturación deficiente*

En el apartado correspondiente a accesibilidad se ha visto que el nivel de saturación de un sustrato depende del método de saturación empleado (3.2.3.2.2). No se discutirá aquí un tema que se trata ampliamente en otro apartado, pero sí es importante señalar que la saturación deficiente plantea problemas tanto en los trabajos de laboratorio como en campo, en el manejo del agua de riego.

En los trabajos de laboratorio, hay que señalar que la curva de retención de agua se obtiene por desorción de la muestra saturada. El punto inicial de la curva corresponde al contenido hídrico de la muestra saturada. Una saturación deficiente tiene como consecuencia que el punto inicial obtenido experimentalmente para la curva no coincida con el punto inicial de saturación completa buscado. Consecuentemente la curva de retención de agua obtenida experimentalmente no coincide con la buscada. La diferencia entre ambas será tanto mayor cuanto mayor sea la deficiencia en la saturación.

Respecto al trabajo de campo, durante el riego se produce la sustitución del aire contenido en los poros por el agua aportada por el sistema de riego. La eficacia de esta recarga depende, entre otros, de factores como el sistema de riego empleado, el estado hídrico inicial del sustrato, o la condición hidrófoba o hidrófila del material que forma el sustrato. Además, si el volumen de poros de accesibilidad condicionada es elevado, el porcentaje de estos poros que queda saturado puede presentar una variación importante. El resultado final es que el contenido de agua de un sustrato después de un riego es tanto más variable cuanto mayor sea el volumen de accesibilidad condicionada.

La saturación total del sustrato, es decir, la sustitución total del aire contenido en los poros por agua, es una tarea prácticamente imposible, por lo que la obtención de la curva de retención de agua buscada también lo es. Aún contando con esta limitación, se puede hacer una distinción entre los métodos que permiten controlar el nivel de saturación y aquellos en los que este control no es posible.

El nivel de saturación de las muestras es variable cuando se aplican métodos que no permiten controlar dicho nivel de saturación. Esta variabilidad se traslada a los valores de la curva de retención de agua, cuando se obtenga con distintos lotes de saturación. Es decir, la curva de retención de agua obtenida depende en mayor o menor medida de factores no controlados, que inciden durante el proceso de saturación.

La situación cambia cuando se emplean métodos que permiten controlar el nivel de saturación. En este caso, aunque no se conozca exactamente el nivel de saturación alcanzado, sí se puede obtener una buena repetitividad de este nivel. Esta repetitividad se traslada a los valores obtenidos para la curva de retención de agua, obteniéndose así una considerable mejora con respecto a los métodos anteriores. El control del nivel de saturación proporciona, además, dos ventajas con respecto a los métodos anteriores. Por una parte, se pueden obtener curvas de retención de agua para distintos niveles de saturación y estudiar su variación según va aumentando este nivel. Por otra parte, se puede llegar a niveles de saturación próximos al límite y se pueden obtener niveles de saturación cuya diferencia con el límite sea inferior a un valor previamente fijado.

3.3.2.2 *Pérdidas de material*

Como ya se ha visto, hay metodologías en las que la muestra se coloca en un doble anillo cilíndrico, cerrado en ambas caras con sendas mallas. La muestra así preparada se sumerge en agua, por uno u otro método, para que se sature. De esta forma, se pueden producir pérdidas de material a través de la malla, que lógicamente corresponden a la fracción más fina. Si la cantidad perdida es importante y altera significativamente el reparto granulométrico de la muestra, las características obtenidas en el laboratorio serán diferentes a las que realmente corresponden al sustrato.

Por lo tanto, es importante evaluar las pérdidas de material que se producen durante la saturación del sustrato a través de las mallas de cierre del doble anillo metálico.

3.3.3 *Incidencia de la instrumentación en los errores de medida*

Para determinar en laboratorio las propiedades físicas de los sustratos, es necesario emplear recipientes adecuados para el manejo de las muestras. Las características propias de los materiales empleados como sustratos, y las rutinas empleadas, hacen necesario medir los pesos y volúmenes de cada muestra con su respectivo recipiente. Los valores netos correspondientes a las muestras de sustratos se obtienen restando a los pesos y volúmenes anteriores, los correspondientes a los recipientes.

Los valores de los pesos se obtienen con una balanza de 0,01 g de precisión. Los volúmenes se obtienen por desplazamiento de fluidos, aplicando directamente el principio de Arquímedes. Para ello, es necesario conocer la densidad del fluido desplazado, en nuestro caso el agua.

3.4 Estrategias de medida

Las metodologías de laboratorio empleadas en la medida del reparto volumétrico de fases, proporcionan información sobre la precisión de las medidas realizadas, pero no sobre su exactitud. Se produce un arrastre de errores al valor obtenido para el volumen ocupado por aire. Cuando el valor verdadero del volumen ocupado por aire es próximo a cero, el arrastre de errores puede dar lugar a valores negativos para este volumen. Esto indica que la magnitud del error cometido es al menos igual a la magnitud del valor negativo obtenido para el volumen de aire.

En este apartado, se hace un análisis de las posibles causas de estos errores y se analizan las posibles alternativas.

3.4.1 *Errores experimentales*

Las mediciones de laboratorio están afectadas por los errores experimentales, que inciden en la precisión y exactitud de los valores obtenidos (1.2.3.5.3).

3.4.1.1 Precisión

Todas las metodologías de laboratorio empleadas en la caracterización física de los sustratos, realizan las determinaciones sobre varias muestras de un mismo sustrato. La

variabilidad de los valores así obtenidos, informa sobre la precisión del método de medida empleado.

La variabilidad de los valores obtenidos para las diferentes muestras, puede verse afectada por factores como la heterogeneidad del sustrato y el manejo de la muestra.

Si la muestra de laboratorio no es homogénea, la variabilidad de los datos experimentales es consecuencia de la metodología de laboratorio y la heterogeneidad propia de la muestra. Si la muestra de laboratorio es homogénea, la variabilidad de los datos depende fundamentalmente de la metodología y del instrumental de laboratorio.

Desde el punto de vista de la precisión, es deseable la obtención de muestras de laboratorio homogéneas. Esto, que normalmente no presenta problemas, en ocasiones puede suponer un objetivo difícil de conseguir.

En el apartado 7.5.1 se analiza la incidencia en la precisión de la heterogeneidad del sustrato, de la heterogeneidad de la muestra y de los errores de medida, la incidencia de cada uno de ellos, y el interés por evaluarlos adecuadamente.

3.4.1.2 Exactitud

Para conocer la exactitud de una medición es necesario conocer un valor de referencia verdadero. Este valor puede ser un valor absoluto o relativo. El primer caso se aplica cuando se dispone de patrones de medida, de valor conocido; el segundo, cuando los valores obtenidos están relacionados entre sí, mediante una relación de tipo conceptual.

3.4.1.2.1 *Patrones de referencia*

Los patrones de referencia son ampliamente utilizados en los trabajos de laboratorio. En análisis químicos se emplean soluciones de concentración conocida para el calibrado de los instrumentos de medida. También se dispone de pesos calibrados para contrastar las balanzas.

En el caso de sustratos, no se dispone actualmente de patrones de referencia que permitan contrastar los valores obtenidos experimentalmente, para conocer así la exactitud de las mediciones realizadas. En este sentido, ha habido un intento por parte de la ISHS para definir unos materiales como patrón de referencia, para ponerlos a disposición de los laboratorios de análisis (2.3.3). Desconocemos la problemática que puede presentar su utilización, pero el hecho es que en este momento no es fácil encontrar laboratorios de caracterización que dispongan de estos patrones de referencia, para contrastar la metodología seguida.

3.4.1.2.2 *Valor de referencia relativo*

3.4.1.2.2.1 Planteamiento

Cuando no se dispone de patrones de referencia, se puede recurrir a métodos que permiten hacer una estimación de la exactitud de los valores obtenidos. La utilización de relaciones conocidas entre variables proporciona una estimación de la exactitud del conjunto de los valores obtenidos.

Los itinerarios cerrados de topografía son una clara aplicación de esta forma de evaluar la exactitud de las medidas. En este caso, se parte de un punto al que se le asignan unas

coordenadas con respecto a un sistema de referencia. A partir de este punto, se establece un itinerario, pasando por todos los puntos de interés y retornando al punto inicial. Las coordenadas de cada punto se obtienen a partir de las del punto anterior, y de las distancia y ángulos entre ambos. El itinerario se cierra, incluyendo el punto de partida como punto final del itinerario. Esto permite recalcular las coordenadas del punto de partida, proporcionando unos valores de referencia ciertos, dados por las expresiones: $x_n - x_1 = 0$, $y_n - y_1 = 0$ y $z_n - z_1 = 0$.

El error de medida de cada punto del itinerario es igual a la suma, con su correspondiente signo, de los errores de medida de todos los puntos anteriores. En consecuencia, el error en las coordenadas del último punto del itinerario es igual a la suma, con su correspondiente signo, de los errores de medida de todos los puntos del itinerario. De esta forma, los valores obtenidos para las coordenadas del punto inicial son diferentes de los originales, por lo que la diferencia es distinta de cero (valor de referencia cierto), proporcionando una estimación de la exactitud global del método de medida empleado.

Este método produce una ocultación parcial, por compensación, de los errores y no permite conocer la exactitud de cada una de las mediciones efectuadas, pero al menos proporciona una estimación de la exactitud global.

3.4.1.2.2 Aplicación a la caracterización física de los sustratos de cultivo

En el caso de los sustratos, también se dispone de una relación que proporciona un valor de referencia cierto: la suma de los volúmenes ocupados por material sólido, agua y aire es igual a al volumen total de la muestra, es decir:

$$(122) \quad V_{MS} + V_{AG} + V_{AI} - V_T = 0$$

Sustituyendo en esta expresión los valores V_{MS} (Volumen ocupado por material sólido), V_{AG} (Volumen ocupado por agua), V_{AI} (Volumen ocupado por aire) y V_T (volumen total) por los valores obtenidos experimentalmente para V_{ms} , V_{ag} , V_{ai} y V_t , el resultado de la expresión puede ser distinto del valor de referencia cierto cero, y proporcionar una estimación de la exactitud del método empleado.

$$(123) \quad \varepsilon = V_{ms} + V_{ag} + V_{ai} - V_t \neq 0$$

Las metodologías empleadas en la caracterización física de los sustratos de cultivo, obtienen el volumen de aire como diferencia entre el volumen total de la muestra y la suma de volúmenes de material sólido y agua.

$$(124) \quad V_{ai} = V_t - (V_{ms} + V_{ag})$$

Sustituyendo en (123) el valor del volumen de aire obtenido en (124):

$$(125) \quad \varepsilon = V_{ms} + V_{ag} + [V_t - (V_{ms} + V_{ag})] - V_t = 0$$

Como puede verse en (125), la diferencia entre el valor experimental del volumen total de la muestra y la suma de los valores experimentales de los volúmenes ocupados por material sólido, aire y agua, es siempre igual a cero. El método de obtención del volumen de aire produce

compensación de errores -y su ocultación total- cuando se aplica (123), para evaluar la exactitud global del método experimental.

La aplicación de (123) para estimar la exactitud global del método de medida, exige que los valores de V_t , V_{ms} , V_{ag} y V_{ai} , se obtengan a partir de determinaciones independientes entre sí. Esta condición de independencia se cumple en el caso de los itinerarios topográficos, donde las coordenadas de cada punto se obtienen a partir de las mediciones efectuadas, haciendo estación en el punto anterior del itinerario.

3.4.1.2.2.3 Alternativas para la obtención del volumen ocupado por aire

La medida de volúmenes por desplazamiento de fluidos proporciona una medida directa del volumen conjunto, ocupado por material sólido y agua. El volumen de aire se puede obtener por diferencia entre dos medidas directas: la del volumen de la muestra y la del volumen conjunto de material sólido y agua. Sin embargo, esta vía tampoco resuelve el problema puesto que, como se demostrará, se produce la misma situación que en el caso anterior, y la aplicación de (123) vuelve a proporcionar como resultado $\varepsilon = 0$.

Otra posible alternativa se deriva también de la medida de volúmenes por desplazamiento de fluidos. A partir de los valores obtenidos para cada una de las muestras, se obtienen los valores medios de la densidad del sustrato seco respecto al volumen total (densidad aparente), del sustrato seco respecto al volumen ocupado por el material sólido (densidad real), y del sustrato tensionado (considerando la mezcla del material sólido más agua). A partir de estos valores medios, y de los pesos seco y tensionado, se recalculan los volúmenes de cada muestra. La aplicación de (123) proporciona un resultado $\varepsilon \neq 0$, pero es una solución ficticia, puesto que se sigue produciendo la misma ocultación de errores; el resultado $\varepsilon \neq 0$ se debe a las diferencias entre repeticiones, es consecuencia de la precisión de las medidas y no de la exactitud, que es lo que se pretende conocer.

3.4.1.2.2.3.1 Volumen de aire por diferencia entre volúmenes obtenidos por desplazamiento de fluidos

En la metodología desarrollada, la medición de volúmenes se obtiene por aplicación directa del principio de Arquímedes, es decir, dividiendo el empuje experimentado entre la densidad del agua del baño en el que se sumerge el cuerpo problema. El empuje se obtiene directamente, por diferencia entre el peso fuera del agua y el peso dentro. La densidad del agua del baño (d_a) se obtiene previamente, empleando los patrones de volumen.

El empuje del sustrato seco se obtiene por diferencia entre el peso seco (P_s) y el peso dentro del agua (P_d). El volumen de material sólido (V_{ms}) se obtiene por la expresión:

$$(126) \quad V_{ms} = \frac{P_s - P_d}{d_a}$$

El empuje conjunto del sustrato y el agua contenida en él, sustrato tensionado, se obtiene por diferencia entre el peso tensionado (P_t) y el peso dentro del agua (P_d). Por lo tanto, el volumen conjunto de material sólido más agua (V_{msa}) se obtiene de la expresión:

$$(127) \quad V_{msa} = \frac{P_t - P_d}{d_a}$$

El volumen ocupado por agua se obtiene como diferencia entre el peso tensionado y el peso seco. Para obtener el volumen, esta diferencia hay que dividirla por el valor de la densidad del agua. Se asume que este valor es $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Esta diferencia es igual a la diferencia entre los valores V_{msa} y V_{ms} , en el supuesto de que la densidad del agua del baño en el que se mide el empuje sea igual a $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

$$(128) \quad V_{ag} = V_{msa} - V_{ms} = \frac{P_t - P_d}{d_a} - \frac{P_s - P_d}{d_a} = \frac{P_t - P_s}{d_a}$$

El volumen de aire se obtiene como diferencia entre el valor del volumen total y el valor obtenido para el volumen conjunto de material sólido y agua:

$$(129) \quad V_{ai} = V_t - V_{msa} = V_t - \frac{P_t - P_d}{d_a}$$

Sustituyendo en (123) los valores de V_{ms} , V_{ag} , y V_{ai} obtenidos en (126), (128) y (129):

$$(130) \quad \varepsilon = \frac{P_s - P_d}{d_a} + \frac{P_t - P_s}{d_a} + \left(V_t - \frac{P_t - P_d}{d_a} \right) - V_t = 0$$

El valor de la expresión (130) es igual a cero, independientemente de los errores que afectan a los valores experimentales. En este caso, se vuelve a producir la ocultación de errores por compensación. Como consecuencia, esta estrategia tampoco permite obtener la evaluación de la exactitud del método de caracterización.

3.4.1.2.2.3.2 Volumen de aire a partir de los valores medios de las densidades

En este caso se obtienen, para cada muestra, los volúmenes ocupados por el material sólido (V_{ms}) y el material sólido más agua (V_{msa}), aplicando la metodología del desplazamiento de fluidos. El volumen total de la muestra (V_t) se considera igual al volumen interno del anillo metálico del contenedor portamuestras. Con estos volúmenes y el peso seco y tensionado se obtienen, para cada muestra, los valores de la densidad real ($D_r = P_s/V_{ms}$), del sustrato tensionado ($D_t = P_t/V_{msa}$) y de la densidad aparente ($D_a = P_s/V_t$). Con los valores obtenidos para todas las muestras de un mismo tratamiento, se obtienen los correspondientes valores medios (D_r , D_t , D_a). Con los valores medios así obtenidos y los pesos seco y tensionado de cada muestra, se recalculan los valores de V_{ms} , V_{msa} y V_t , y a partir de ellos el reparto volumétrico de fases:

$$(131) \quad V_{ms} = \frac{P_s}{D_r} \therefore V_{msa} = \frac{P_t}{D_t} \therefore V_t = \frac{P_s}{D_a}$$

En estas expresiones, ya se tienen los valores del volumen ocupado por el material sólido y el volumen total; y el volumen ocupado por aire como diferencia entre el volumen total (V_t) y el volumen de material sólido más agua (V_{msa}).

$$(132) \quad V_{ai} = V_t - V_{msa} = \frac{P_s}{D_a} - \frac{P_t}{D_t}$$

El volumen de agua se puede obtener por dos vías diferentes. La primera, directamente, como diferencia entre los pesos tensionado y seco, dividiendo por la densidad del agua contenida en los poros (d_a , que se asume $=1 \text{ g*cm}^{-3}$):

$$(133) \quad V_{ag} = \frac{P_t - P_s}{d_a}$$

Otra forma de obtener el volumen ocupado por agua es como diferencia entre los volúmenes de material sólido mas agua y de material sólido, obtenidos por desplazamiento de fluidos:

$$(134) \quad V_{ag} = V_{msa} - V_{ms} = \frac{P_t}{D_t} - \frac{P_s}{D_r}$$

Las expresiones (133) y (134) son equivalentes. Se demuestra que si en (134) se emplean los valores de las densidades obtenidos para cada repetición, estas dos ecuaciones son idénticas. La sustitución de los valores correspondientes a cada repetición por los valores medios de las densidades, proporciona unos valores diferentes para V_{ag} . La diferencia entre los primeros y los segundos depende de las diferencias entre los valores de las densidades para cada repetición y su correspondiente valor medio, y, por lo tanto, de la precisión de las medidas, no de la exactitud.

Sustituyendo en (123) los valores de V_{ms} , V_{ag} , y V_{ai} obtenidos en (131), (132) y (133):

$$(135) \quad \varepsilon = \frac{P_s}{D_r} + \frac{P_t - P_s}{d_a} + \left(\frac{P_s}{D_a} - \frac{P_t}{D_t} \right) - \frac{P_s}{D_a}$$

Si en lugar de emplear (133) para el volumen ocupado por agua se emplea la ecuación (134), se obtiene:

$$(136) \quad \varepsilon = \frac{P_s}{D_r} + \left(\frac{P_t}{D_t} - \frac{P_s}{D_r} \right) + \left(\frac{P_s}{D_a} - \frac{P_t}{D_t} \right) - \frac{P_s}{D_a} = 0$$

El valor de la expresión (136) es igual a cero, independientemente de los errores que afectan a los valores experimentales. En este caso se vuelve a producir la ocultación de errores por compensación. Como consecuencia, esta estrategia tampoco permite obtener la evaluación de la exactitud del método de caracterización.

El valor de la expresión (135) es distinto de cero; por lo tanto, podría servir para evaluar la exactitud global del método. Sin embargo, esta utilidad es tan solo aparente. La diferencia entre (135) y (136) está en la sustitución de la expresión del cálculo del volumen de agua; en un caso se emplea (133) y en otro (134). Como se ha visto, estas dos ecuaciones son equivalentes y la diferencia entre ambas se debe únicamente al empleo de los valores medios de las densidades. De ello se deduce que si bien es cierto que el valor de la expresión (135) es distinto de cero, esta diferencia depende de la variabilidad de los valores de las densidades. Por lo tanto, el valor de ε en (135) está relacionado con la precisión del método de medida y no con la exactitud, que es lo que se busca.

En consecuencia, esta estrategia de cálculo tampoco es válida para evaluar la exactitud del método de medida empleado.

3.4.2 *Alternativa propuesta*

La falta de un patrón de referencia absoluto y la imposibilidad de aplicar valores de referencia relativos con las metodologías seguidas, obliga a desarrollar nuevas alternativas para poder evaluar la exactitud de las mediciones efectuadas.

Para poder evaluar la exactitud aplicando la ecuación (123), es necesario disponer de medidas del volumen total, del volumen ocupado por material sólido, del volumen ocupado por agua y del volumen ocupado por aire, independientes entre sí. Las metodologías aplicadas proporcionan valores independientes para los tres primeros, pero no para el volumen ocupado por aire.

La búsqueda de una alternativa para la medida del volumen ocupado por aire no es nueva. En 1936 Torstensson y Eriksson, plantearon el mismo problema, revisaron métodos alternativos empleados hasta entonces y propusieron la medida del volumen ocupado por aire empleando el “porosímetro”. En Torstensson y Eriksson (1936) se describe el aparato y método empleado para la determinación del volumen de aire contenido en una muestra de suelo

Proponemos la utilización de la picnometría de gases para obtener una medida del volumen ocupado por aire, independiente de las anteriores. De esta forma, la ecuación (123) proporciona un valor $\varepsilon \neq 0$, que evalúa la exactitud global del método de medida empleado.

3.5 Picnometría de gases: Fundamento, diseño y desarrollo del picnómetro de gas de doble cámara para medida de volúmenes en sustratos de cultivo

La picnometría de gases se presenta como alternativa para la medida del volumen ocupado por aire, tal como se ha detallado en el apartado 3.4.2.

3.5.1 *Introducción*

La picnometría de gases aplica la ley de Boyle - Mariotte de los gases perfectos para medir el volumen de gas contenido en una cámara (Danielson y Sutherland, 1986).

$$(137) \quad \frac{P \times V}{T} = n \times R$$

El producto de la presión (P) por el volumen (V) dividido por la temperatura (T) es igual al producto del número de moles del gas (n) por la constante universal de los gases perfectos (R). Si se dispone de una cámara cerrada herméticamente, n permanece constante, y por lo tanto el término de la derecha de la igualdad permanece constante.

Los diseños realizados para aplicar este principio son varios. En esencia, todos se basan en dos criterios:

1. El control de n mediante el uso de una o varias cámaras herméticas, para poder considerar constante el término a la derecha de la igualdad (137).
2. Se provoca una variación conocida de presión (P) o de volumen (V), y se mide la variación producida en la otra variable (V ó P, respectivamente) y en la temperatura (T).

En todos los casos, el picnómetro consta de dos recipientes. Uno de ellos constituye el recipiente de la muestra. La función del otro es variable y puede actuar de dos formas diferentes:

1. Como un depósito adicional, que en un momento determinado del proceso se comunica con el recipiente de la muestra, formando una sola cámara.
2. Como un recipiente de referencia, que en ningún momento del proceso de medida se comunica con el recipiente de la muestra. De esta forma, el segundo recipiente forma una cámara totalmente aislada del recipiente de medida.

3.5.2 Tipos de picnómetros de gases

La forma en que se utiliza el depósito adicional, permite clasificar el picnómetro de gas en dos tipos. En el primer tipo considerado, el depósito se comunica con el recipiente de la muestra; ambos pasan a formar una sola masa de gas, por lo que los denominaremos picnómetros de una cámara. En el segundo tipo, el depósito adicional no se comunica con el recipiente de medida en ningún momento del proceso de medición, las dos masas de gas permanecen independientes durante todo el proceso de medida, por lo que los denominamos picnómetros de dos cámaras.

3.5.2.1 Picnómetros de una cámara (Kummer y Cooper, 1945; Page, 1947; Vomocil 1965; Danielson y Sutherland, 1986; Baver et al., 1991a)

Los picnómetros de una cámara están constituidos básicamente por un recipiente de medida y un depósito auxiliar. Es condición necesaria que ambos sean herméticos. Se dispone de una conducción entre ambos, con una válvula.

Con este diseño se pueden aplicar dos criterios de medida, que dan lugar a dos tipos de picnómetro. El primer criterio es variar el volumen y medir el cambio de presión, y da lugar a los picnómetros de una cámara de volumen variable. El segundo criterio es mantener constante el volumen total, iniciar el proceso con diferentes presiones en los dos recipientes, y conectarlos.

3.5.2.1.1 Picnómetro de gas de una cámara de volumen variable

En este caso, se parte de una situación inicial en la que el recipiente de medida está conectado al depósito auxiliar. El volumen de gas (V_1) es desconocido y es el valor a obtener. La presión (P_1) es conocida. Se provoca una variación del volumen total (ΔV) conocida y se mide la nueva presión (P_2). A partir de estos datos se obtiene el valor del volumen (V_1) problema, aplicando la expresión:

$$(138) \quad V_1 = P_2 \times \frac{\Delta V}{-\Delta P}$$

Los incrementos de volumen y de presión se han obtenido como diferencia entre el valor final y el valor inicial. El signo negativo (-) se debe a que cuando la cantidad de gas permanece constante, los incrementos de presión y temperatura son de signo contrario.

Para obtener el volumen de la muestra problema es necesario hacer dos mediciones. Una sin muestra, en el recipiente de muestra, para obtener el volumen total de la cámara. La segunda medición se efectúa con la muestra en el recipiente de medida. La diferencia entre los dos valores obtenidos corresponde al volumen de la muestra problema.

Las condiciones de aplicación de este método son que la cantidad de gas permanece constante, ($n=$ constante) y la temperatura no varía, todos los materiales están a la temperatura ambiente, y los cambios de temperatura resultantes de los cambios de presión se neutralizan con la temperatura ambiente.

3.5.2.1.2 *Picnómetro de volumen constante*

En este caso se parte de una situación en la que el recipiente de medida está aislado del depósito auxiliar. El volumen de depósito auxiliar (V_{da}) es conocido. El volumen del recipiente de medida (V_{rm}) es desconocido y el valor a obtener. En esta situación inicial, la presión del depósito auxiliar (P_{da}) y del recipiente de medida (P_{rm}) son distintas y conocidas. Una vez sellado el sistema, se abre la válvula de conexión entre las dos cámaras, el volumen total se mantiene constante y las presiones de los dos recipientes se igualan, alcanzando un valor (P_f) intermedio entre ambas. A partir de estos datos se obtiene el valor del volumen problema, aplicando la expresión:

$$(139) \quad V_{rm} = \frac{V_{da} \times (P_{da} - P_f)}{P_f - P_{rm}}$$

Al igual que en el caso anterior, el volumen de la muestra problema se obtiene como diferencia entre dos determinaciones: una sin la muestra y otra con la muestra. También son de aplicación las condiciones de hermeticidad ($n=$ constante) y no variación de la temperatura.

3.5.2.2 *Picnómetro de gas de doble cámara (Biolders et al., 1990)*

Al igual que los picnómetros de una cámara, el picnómetro de doble cámara está constituido básicamente por dos recipientes herméticos.

A diferencia de los picnómetros de una cámara, en el picnómetro de doble cámara se trabaja con dos masas de gas claramente diferenciadas, independientes entre sí, y cada una de ellas permanece constante a lo largo del proceso de medida. Para conseguir esto se dispone de dos cámaras herméticas, una de referencia y otra de medida, independientes entre sí, que no se comunican en ningún momento del proceso de medida. Ambas cámaras son de volumen variable.

Una característica muy importante del picnómetro de doble cámara es el criterio de medida empleado, consistente en igualar la presión de la cámara de medida a la presión de la cámara de referencia previamente fijada. El empleo de un manómetro diferencial para conseguir esta igualdad, proporciona una elevada precisión de las mediciones efectuadas.

En la situación de partida, se iguala la presión de ambas cámaras y después se cierran herméticamente. A continuación se varía el volumen de la cámara de referencia en una proporción K previamente fijada. Se varía el volumen de la cámara de medida hasta que se alcance una presión igual a la de la cámara de referencia. Se mide la variación de volumen de la cámara de medida. Para calcular el volumen problema se aplica la ecuación (152) de la , cuyos fundamentos se detallan en el apartado 3.5.4.

Al igual que en los casos anteriores, para conocer el volumen de la muestra es necesario efectuar una doble medición , con y sin muestra en la cámara de medida, o bien partir de un valor previamente calibrado para el volumen de la cámara de medida.

3.5.3 *Características de la medida por picnometría de gases*

La picnometría de gases se ha empleado en el estudio de las propiedades físicas de los suelos, para medir densidades, porosidad y superficie específica. En la bibliografía se destacan varias ventajas de la picnometría de gases. Como inconvenientes, se menciona la incidencia de las variaciones de temperatura y la adsorción de gases por la superficie de los sólidos.

3.5.3.1 Ventajas

La principal ventaja del picnómetro de gas es que se trata de una técnica simple y rápida, que proporciona una medida directa del volumen de aire de un suelo o sustrato (Kummer y Cooper, 1945; Page, 1947; Biolders *et al.*, 1990).

La utilización de la picnometría de gas para medir la porosidad de suelos y sustratos, evita el efecto de hinchado que se presenta con otros métodos de medida (Vomocil, 1965; Baber *et al.* 1991a)

Finalmente, Biolders *et al.* (1990) presentan como ventajas la posibilidad de emplear tanto aire como cualquier otro gas, y la elevada precisión que se puede obtener (superior a 0,05 cm³).

3.5.3.2 Control de temperatura

La ley de Boyle – Mariotte de los gases perfectos incluye la temperatura como variable. En las ecuaciones consideradas hasta el momento se parte de la hipótesis de que la temperatura permanece constante durante todo el proceso. Por tanto, estas ecuaciones llevan implícita la hipótesis de que la temperatura permanece constante. Sin embargo, la variación de volumen, y la consiguiente variación de presión, de una masa de gas confinada tiene como consecuencia una variación de temperatura. Para poder aplicar las ecuaciones anteriores, es necesario favorecer el flujo de calor entre el sistema y el entorno, para que se alcance nuevamente la temperatura de equilibrio.

En los picnómetros de una cámara, se requiere que la temperatura sea la misma antes y después del cambio de presión (Danielson y Sutherland, 1986). En este sentido, el picnómetro de doble cámara representa una ventaja importante. Como se verá mas adelante (5.5.5.2.1), la restricción de temperaturas no es tan severa como en el caso de los picnómetros de una cámara. El factor de corrección por variación de temperatura se obtiene aplicando la ecuación (147). Son varias las combinaciones que pueden dar lugar a un valor 1 para el factor de corrección.

3.5.3.3 Adsorción de gases

Algunos autores, como Danielson y Sutherland (1986) y Biolders *et al.* (1990), presentan el fenómeno de adsorción de gases como el principal inconveniente de la picnometría de gases. Efectivamente lo es para la medición de volúmenes, pero esta característica resulta una herramienta muy útil para medir la superficie específica (Carter *et al.*, 1986).

La adsorción de gases por la superficie de la fase sólida se debe a la atracción de las moléculas de gas por los campos de fuerza generados por los átomos situados en la superficie de dicha fase sólida. En general, todos los gases tienden a ser adsorbidos en las superficies sólidas (Carter *et al.*, 1986).

El volumen de gas adsorbido es directamente proporcional al área superficial de la muestra (Carter *et al.*, 1986; Bielders *et al.*, 1990). A partir de la relación entre la superficie y la cantidad de gas adsorbido, se puede medir la superficie del sólido. Carter *et al.* (1986) proporcionan dos posibilidades para medir esta área superficial: la ecuación de Langmuir (1918) y la de Brunauer, Emmett y Teller (1938), conocida como BET.

La naturaleza del gas también incide en la cantidad de gas adsorbido. Los tres gases más adsorbibles son el vapor de agua, el nitrógeno y el oxígeno, siendo probablemente el primero el más importante (Bielders *et al.*, 1990).

Cuando la medición se efectúa con aire atmosférico, se presentan fluctuaciones en la presión, que no se dan cuando se emplea helio. Estas fluctuaciones corresponden a la disminución del volumen de aire en la cámara de medida (Bielders *et al.*, 1990). Este mismo autor comparó medidas sobre gel de sílice, obtenidas con aire y con helio como gases picnométricos. El gel de sílice es muy ávido de vapor de agua; las fluctuaciones de presión eran muy fuertes cuando la medición se realizaba con aire atmosférico, cosa que no ocurría cuando el gas empleado era helio. Los valores obtenidos con aire atmosférico son valores absurdos, como una densidad de $20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el gel de sílice.

Bielders *et al.* (1990) verificaron con este trabajo la incidencia de la adsorción de gases en las medidas por picnometría de gases. El helio es un gas noble, que sólo es adsorbido en cantidades mínimas (Russell, 1961; Bielders *et al.*, 1990), por lo que se emplea como gas de referencia de adsorción nula.

3.5.4 *Fundamento de la medición de volumen en picnómetro de doble cámara*

3.5.4.1 Selección del picnómetro de doble cámara

Hemos seleccionado el picnómetro de doble cámara para la medición del volumen ocupado por aire en muestras de sustrato tensionadas, fundamentalmente por las siguientes razones:

1. Incidencia de temperaturas: La similitud de las dos cámaras hace prever que el comportamiento térmico también sea similar en ambos casos. En la situación de partida, las temperaturas de ambas cámaras son iguales a la temperatura del laboratorio. Si las cámaras son similares, una variación de volumen similar tiene como consecuencia una variación de temperatura similar para ambas cámaras. Si las temperaturas iniciales de ambas cámaras (T_{m0} , T_{r0}) son iguales ($T_{m0}=T_{r0}$), y las temperaturas finales de ambas cámaras (T_{m1} , T_{r1}) también son iguales entre sí ($T_{m1}=T_{r1}$), la incidencia de la temperatura en el proceso de medida es nula, aunque las temperaturas finales sean distintas de las iniciales ($T_{m0}\neq T_{m1}$, $T_{r0}\neq T_{r1}$).
2. Precisión de la medida de presión. El criterio de medida empleado, igualar la presión de la cámara de medida a un valor idéntico al de la cámara de referencia previamente fijado, facilita la obtención de medidas muy precisas para la presión. El empleo de un manómetro diferencial de columna de agua permite discriminar diferencias de presión de 1 mm de columna de agua (10 Pa), sobre un valor de la presión que puede llegar hasta 10 atmósferas (1 MPa)
3. Precisión en la medida del volumen. El empleo de cilindros de émbolo móvil de distinto diámetro, permite una elevada precisión en la medida de la variación del volumen de la cámara de medida.

3.5.4.2 Desarrollo de las ecuaciones a aplicar para el cálculo de volúmenes

La medición de volúmenes por picnometría de gases se basa en la ley de Boyle – Mariotte de los gases perfectos planteada en (137). El valor obtenido corresponde al volumen de gas presente en la cámara de medida.

El volumen, la presión y la temperatura de la cámara de referencia en la situación inicial son V_{r0} , P_{r0} y T_{r0} , respectivamente. En la situación final, los valores son V_{r1} , P_{r1} y T_{r1} , respectivamente. La hermeticidad de la cámara mantiene constante la masa de gas y, por tanto, el valor de n . Aplicando la ley de Boyle – Mariotte, estos cambios se representan con las siguientes ecuaciones:

$$(140) \quad \frac{P_{r0} V_{r0}}{T_{r0}} = n R \therefore \frac{P_{r1} V_{r1}}{T_{r1}} = n R \Rightarrow \frac{P_{r0} V_{r0}}{T_{r0}} = \frac{P_{r1} V_{r1}}{T_{r1}}$$

El comportamiento de la cámara de medida es similar al de la cámara de referencia. Representando los valores de la cámara de medida con el subíndice ‘m’, los cambios se representan con las siguientes ecuaciones:

$$(141) \quad \frac{P_{m0} V_{m0}}{T_{m0}} = n R \therefore \frac{P_{m1} V_{m1}}{T_{m1}} = n R \Rightarrow \frac{P_{m0} V_{m0}}{T_{m0}} = \frac{P_{m1} V_{m1}}{T_{m1}}$$

Operando en (140) y (141) se obtiene:

$$(142) \quad \frac{P_{r1}}{P_{r0}} = \frac{V_{r0}}{V_{r1}} \times \frac{T_{r1}}{T_{r0}}$$

$$(143) \quad \frac{P_{m1}}{P_{m0}} = \frac{V_{m0}}{V_{m1}} \times \frac{T_{m1}}{T_{m0}}$$

El funcionamiento del picnómetro de doble cámara se basa en la igualdad de las presiones iniciales de las dos cámaras, y en la igualdad de las presiones finales de ambas. Por lo tanto, se cumple:

$$(144) \quad P_{r0} = P_{m0} \therefore P_{r1} = P_{m1}$$

De (144) se deduce que la expresión a la izquierda del signo igual de (142) es igual a la expresión a la izquierda del signo igual de (143). Por lo tanto, las expresiones a la derecha de ambas ecuaciones también son iguales. Operando a partir de esta igualdad se obtiene:

$$(145) \quad \frac{V_{m0}}{V_{m1}} = \frac{V_{r0}}{V_{r1}} \times \frac{T_{r1}}{T_{r0}} \times \frac{T_{m0}}{T_{m1}}$$

Esta expresión nos permite calcular la relación entre el volumen inicial y final de la cámara de medida. Para ello, es necesario conocer la relación entre el volumen inicial y final de la cámara de referencia, y las temperaturas iniciales y finales de ambas cámaras.

La variación del volumen de la cámara de referencia es un dato del proceso de medida. De (145) se deduce que el dato necesario es la relación entre el volumen inicial y el final. Esta relación se puede fijar inicialmente como constante del aparato, utilizando en todos los procesos de medida el mismo valor. Además, la medición se puede repetir con distintos valores previamente fijados de esta relación.

Por lo tanto, definimos:

$$(146) \quad K_i = \frac{V_{r0}}{V_{ri}}$$

El resto de los valores que intervienen se refieren a las temperaturas iniciales y finales de ambas cámaras. Estos valores se toman con las correspondientes sondas en el momento de la medición. En consecuencia, podemos definir el factor de corrección por variación de temperaturas, que viene dado por la siguiente expresión:

$$(147) \quad K_T = \frac{T_{r1}}{T_{r0}} \times \frac{T_{m0}}{T_{m1}}$$

Sustituyendo en (145) las expresiones (146) y (147), se obtiene:

$$(148) \quad \frac{V_{m0}}{V_{mi}} = K_i \times K_T$$

El proceso de medida incluye la medición del incremento de volumen en la cámara de medida (ΔV_i):

$$(149) \quad \Delta V_i = V_{m0} - V_{mi}$$

A partir de (148) y (149) se deduce:

$$(150) \quad V_{m0} = \frac{\Delta V_i}{1 - \frac{1}{K_i \times K_T}}$$

El valor V_{m0} corresponde al volumen de gas que hay en la cámara de medida en el momento inicial, a la presión inicial. Si esta cámara está vacía, el volumen medido corresponde al volumen de la cámara. Si, por el contrario, la cámara de medida contiene un objeto o muestra problema, el volumen V_{m0} corresponde al volumen de la cámara no ocupado por el objeto o muestra problema. El volumen (V_p) de éste se obtiene como diferencia entre el volumen total de la cámara de medida (V_{CM}) y el volumen V_{m0} así obtenido.

$$(151) \quad V_p = V_{CM} - V_{m0}$$

Sustituyendo en (151) el valor de V_{m0} obtenido en (150), se obtiene finalmente:

$$(152) \quad V_p = V_{CM} - \frac{\Delta V_i}{1 - \frac{1}{K_i \times K_T}}$$

3.5.4.3 Variables a medir para el cálculo de volúmenes en el picnómetro de gas de doble cámara

El picnómetro de gas de doble cámara proporciona el valor del volumen de la muestra aplicando (152). Para ello, es necesario obtener experimentalmente cuatro valores:

1. V_{CM} : Volumen total de la cámara de medida.
2. K_i : Relación entre el volumen inicial y final de la cámara de referencia (ver (146)).
3. ΔV_i : Variación de volumen en la cámara de medida, entre la situación inicial y final (ver(149)).
4. K_T : factor de corrección por incidencia de los cambios de temperatura durante el proceso de medida (ver (147)).

Los valores V_{CM} y K_i dependen del diseño del aparato; una vez finalizada la construcción, estos dos parámetros permanecen constantes para todas las mediciones. Forman parte del calibrado del aparato.

Los valores de ΔV_i y K_T dependen de cada medición. El primero se obtiene por medición directa del incremento de volumen de la cámara de medida. El segundo se calcula a partir de los valores de las temperaturas inicial y final de las dos cámaras del picnómetro.

3.5.4.4 Condiciones de aplicación

La aplicación de la ley de Boyle – Mariotte para medición de volúmenes por picnometría de gases se basa en que el valor de n (número de moles de gas) es constante. Esto exige la hermeticidad total de las cámaras empleadas.

La puesta a punto del sistema requiere el calibrado de los distintos elementos que constituyen el sistema de medida. También se puede recurrir a curvas de calibrado, que permiten obtener el volumen de la cámara de medida directamente a partir de un incremento de volumen o de presión (Danielson y Sutherland, 1986).

La picnometría de gases se basa en la ley de Boyle – Mariotte de los gases perfectos. En el caso de que el gas picnométrico sea aire, su comportamiento es asimilable al de un gas perfecto, siempre que la presión no supere las 8-10 atm. En consecuencia, estas ecuaciones son de aplicación cuando el gas picnométrico es el aire, siempre que la presión sea inferior a 8 atm.

4 OBJETIVOS DE LA TESIS

El control del riego de un sustrato será tanto más eficaz cuanto más precisa sea la respuesta a las preguntas ¿Cuándo regar? y ¿Cuánto regar?. Las propiedades hídricas del medio poroso -en el que se desarrollan las raíces- informan sobre la evolución de las relaciones aire-agua en el entorno radicular, y sobre la disponibilidad de ambos componentes, lo que va a marcar el momento del riego y la cantidad de agua a aplicar. Estas propiedades hídricas son consecuencia de las características del espacio poroso, y por lo tanto, el conocimiento de las primeras implica el estudio previo de las segundas.

La caracterización de las propiedades físicas del sustrato, y la interpretación de los resultados analíticos, se puede plantear como un modelo de cultivo, en el que las medidas de laboratorio intervienen como variables independientes, y la respuesta del cultivo como variable dependiente. La aplicación de este modelo proporciona la herramienta idónea para responder adecuadamente a las dos cuestiones planteadas en el control de riego. A su vez, dicho modelo puede desglosarse en dos sub-modelos de aplicación consecutiva. En el primero, las propiedades físicas del sustrato y el manejo del riego intervienen como variables independientes, y las condiciones físicas del entorno radicular como función; y en el segundo, las condiciones físicas del entorno radicular intervienen como variables independientes, y la respuesta del cultivo como función.

Los trabajos desarrollados en esta Tesis se centran sobre el desarrollo del primer sub-modelo planteado, que relaciona las propiedades físicas del sustrato y el manejo del riego con las condiciones físicas del entorno radicular. Se trata, en definitiva, de que el sustrato cumpla adecuadamente la función de poner a disposición del sistema radicular el agua y el aire necesarios para el desarrollo óptimo de la planta y el correcto funcionalismo de su sistema radical.

Por otro lado, la utilidad de la aplicación de un modelo está estrechamente relacionada con la fiabilidad de las medidas obtenidas en laboratorio -y por tanto, con la fiabilidad de la metodología empleada para su determinación- y con la fiabilidad del propio modelo desarrollado.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, esta Tesis Doctoral plantea un doble *objetivo global*:

1. Desarrollar una metodología de laboratorio para una determinación fiable de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo, y
2. Desarrollar un modelo de comportamiento que, a partir de estas variables, permita predecir el comportamiento hídrico del sustrato.

Para alcanzar estos dos objetivos globales, se han abordado los siguientes *objetivos parciales*:

1. Desarrollar una metodología de laboratorio que tenga en cuenta la accesibilidad de los poros al intercambio aire-agua.
2. Evaluar los errores experimentales de medida
3. Valorar la picnometría de gases como alternativa metodológica para obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire.

4. Desarrollar un modelo logarítmico normal para simular el comportamiento hídrico del sustrato, y compararlo con otros modelos experimentales y semi-experimentales descritos en la bibliografía.
5. Desarrollar una nueva estrategia de análisis de datos que permita controlar, o al menos evaluar, los errores de medida

5 EXPERIMENTACIÓN

5.1 Introducción

En el apartado 3, Desarrollo metodológico para la caracterización física de sustratos de cultivo, la caracterización física de los sustratos se ha planteado como un modelo de cultivo. Los valores de las variables medidas en laboratorio permiten predecir el comportamiento del cultivo. La interpretación de los resultados del análisis consiste, precisamente, en predecir el comportamiento del cultivo a partir de estos datos analíticos.

La consecuencia de este enfoque (3.1) ha sido el planteamiento de unos temas de estudio: disponibilidad en el sustrato de aire y agua para la planta (3.2), y análisis de los métodos analíticos para detectar y evaluar los errores de medida (3.3). Este estudio ha puesto de manifiesto la necesidad de buscar una nueva estrategia de medida (3.4). Esta nueva estrategia hace necesario obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire, para lo cual se ha propuesto la picnometría de gases (3.4.2). En el apartado 3.5 se han estudiado las características, posibilidades y limitaciones de este sistema de medida.

Teniendo en cuenta este desarrollo, en el apartado 4 se han planteado unos objetivos para esta tesis (4 Objetivo). En este apartado de experimentación presentamos los trabajos relacionados con el primer objetivo de la tesis. El segundo objetivo, sobre desarrollo del modelo se deja para capítulos posteriores (6 y 7).

La estructuración de este apartado está estrechamente relacionada con la estructura presentada en el apartado 3 y con los cuatro puntos del primer objetivo de la tesis.

En el apartado 5.2 se presenta la experimentación relativa a la accesibilidad de los poros, al intercambio aire – agua , y al desarrollo correspondiente a la disponibilidad de aire y agua.

En el apartado 5.3 se analizan las distintas fuentes de error que inciden en la metodología de laboratorio empleada para determinar las propiedades físicas de los sustratos. En el apartado 5.4 se hace una evaluación de los errores experimentales de la metodología en su conjunto.

Finalmente, en el apartado 5.5, se propone y evalúa la picnometría de gases como alternativa para obtener una medida independiente del volumen de aire. La validez de esta alternativa proporcionaría una rutina de laboratorio que informaría tanto de la precisión como de la exactitud de las mediciones efectuadas.

5.2 Trabajo experimental: Accesibilidad

5.2.1 Introducción

5.2.1.1 Antecedentes

En el apartado 3.2, Disponibilidad de aire y agua, se ha visto que el sustrato debe suministrar al sistema radicular de la planta el agua necesaria para su desarrollo y el aire necesario para la respiración y correcto funcionamiento de las raíces

El reparto del espacio poroso entre aire y agua está regido por relaciones energéticas . Los potenciales matricial, de presión, osmótico y gravitacional permiten explicar la mayor parte de los procesos hídricos que se dan en el sustrato . La distribución del agua en el sustrato se puede explicar a partir de los potenciales matricial y gravitacional. El drenaje del agua de riego aportada en exceso se puede explicar por los dos potenciales anteriores más el potencial de presión. El potencial osmótico tiene un importante papel en la absorción del agua presente en el sustrato por la raíz.

En el mismo apartado se ha visto, finalmente, que las relaciones hídricas en el sustrato están condicionadas, además, por la morfología de los poros, su forma y su tamaño . Teniendo en cuenta las relaciones energéticas, la distribución de tamaño de poro característica de cada sustrato da lugar a su curva de retención de agua, que relaciona el potencial matricial con el reparto del espacio poroso entre aire y agua . La morfología de los poros condiciona su accesibilidad al intercambio de masa, aire – agua, con el exterior .

El volumen de poros al que accede el agua durante el proceso de saturación está relacionado con el método de saturación empleado . En el apartado 3.3.2.1 se han presentado los métodos de saturación empleados en las metodologías de laboratorio. En el apartado 3.3.2.2 se ha visto la problemática que presentan, saturación deficiente y pérdida de material durante el proceso de saturación. La saturación deficiente tiene una incidencia directa en la fiabilidad de la curva de retención de agua obtenida por desorción de la muestra saturada.

En este apartado experimental se abordan las problemáticas derivadas de la accesibilidad de los poros y los métodos de saturación, estrechamente relacionadas entre sí. La porosidad de un sustrato se estima a partir de densidad real. Cuando ésta se mide por desplazamiento de fluidos, la problemática que se presenta está relacionada con la accesibilidad y con los métodos de saturación.

5.2.1.2 Trabajo experimental

La metodología de laboratorio empleada para el estudio de las relaciones aire – agua en el sustrato de cultivo, debe tener en cuenta su función como suministrador de aire y agua al sistema radicular de la planta, las relaciones energéticas que regulan el reparto de aire y agua, y la accesibilidad de los poros al intercambio aire-agua.

El trabajo experimental desarrollado parte de los métodos utilizados para medir el reparto de volumen entre material sólido y poros (5.2.2), comparando los métodos de incineración (Verdonck *et al.*, 1978) y pycnometría (MAPA, 1994a) para evaluar la densidad real.

El ensayo diferencia claramente entre el método de incineración y los métodos picnométricos. Los objetivos planteados para el estudio de las propiedades físicas indican que es más adecuado utilizar estos métodos picnométricos, u otros, basados en la medida de volúmenes por desplazamiento de fluidos, que no implican la destrucción de la estructura física de las partículas que componen el sustrato. Las características metodológicas de la medida de volúmenes por picnometría de agua aconsejan buscar una alternativa, que reduzca su laboriosidad y subjetividad. Se plantea una alternativa de saturación de las muestras por ebullición y medida de volúmenes por aplicación directa del principio de Arquímedes.

En el segundo ensayo (5.2.3), se comparan los valores de densidad obtenidos por picnometría y por inmersión, saturando por ebullición y por inmersión simple.

En este punto se produce la convergencia de dos problemas que se plantean en el estudio de las características hídricas: la medida de la densidad del sustrato para la estimación de la porosidad total, y la saturación previa a la determinación de la curva de retención de agua por desorción.

Teniendo en cuenta los resultados de este ensayo, se pone en marcha el tercero (5.2.4), en el que se plantea una nueva estrategia de medida. Se aplica, como en el caso anterior, el principio de Arquímedes para medir el volumen ocupado por la muestra, pero la saturación por ebullición se sustituye por la saturación en condiciones de vacío. En la ebullición, se produce la inundación de la muestra, arrastrando parte del aire en los poros. El aumento de volumen provocado por el aumento de temperatura evacua al exterior el aire atrapado. En la saturación por vacío, primero se evacua el aire y después se produce la inundación. La vuelta a la temperatura ambiente en un caso, y a la presión atmosférica en otro, provoca la reducción del volumen de aire residual y el llenado de los poros por agua.

En el cuarto ensayo (5.2.5), se estudia la incidencia del vacío aplicado durante la saturación en el valor obtenido para la densidad real. En varios trabajos de laboratorio se puso de manifiesto la dificultad de saturación de los sustratos con granulometrías muy finas cuando el estado de humedad inicial era muy bajo. Este hecho se puso claramente de manifiesto en este ensayo. Cuando se dan estas circunstancias, puede presentarse una burbuja de aire en el interior del sustrato, que deja una parte importante del sustrato totalmente seco.

Con objeto de evitar el problema de saturación detectado anteriormente, en el quinto ensayo (5.2.6) se introducen dos variantes metodológicas: la saturación lenta y la doble saturación. La doble saturación ya se plantea en el método de referencia de la ISHS (Verdonck y Gabriëls, 1992), pero la variante considerada en este trabajo, saturación por vacío, reduce considerablemente los tiempos de saturación necesarios. Los distintos niveles de vacío considerados en este ensayo tienen como objetivo evaluar la incidencia en las medidas del aire residual cuando se satura por vacío.

En el último ensayo presentado 5.2.7, se estudia la incidencia del vacío aplicado en la saturación de sustratos por doble saturación en vacío. Se estudia la validez del modelo de relación lineal entre el valor obtenido para la densidad y el vacío aplicado durante la saturación. Se plantea un modelo alternativo de relación lineal entre el valor obtenido para el volumen específico y el vacío aplicado durante la saturación.

5.2.2 *Comparación de métodos para la determinación de la Densidad Real (I)*

5.2.2.1 Introducción

En los sustratos orgánicos, la densidad real o de las partículas se estima a menudo en función del contenido en cenizas del sustrato; bien estableciendo una relación lineal entre estas dos características (Puustjärvi y Roberson, 1975), o bien como el resultado de suponer que la matriz sólida está compuesta por una mezcla de materiales minerales y orgánicos. Ordovás *et al.* (1996) encontraron que la relación entre el valor de la densidad de partícula y el valor experimental del contenido en cenizas se ajusta más a una relación lineal que al arco parabólico resultante de la ecuación de Gabriëls y Verdonck (1991). Finalmente, aquellos mismos autores concluyen que el método de incineración es un buen método para evaluar la densidad de partícula del corcho, cuando su organización física ha sido destruida mediante molienda, y que este método puede utilizarse para calcular la porosidad total. Sin embargo, debemos abstenernos de utilizar este método en corcho para estimar la porosidad efectiva, puesto que este material tiene una elevada cantidad de poros ocluidos y la aplicación de tal metodología puede llevar a una sobreestimación de la capacidad de aireación del sustrato (Ordovás *et al.* 1996).

La picnometría de líquidos calcula el volumen ocupado por el sustrato por desplazamiento de fluidos. En este ensayo se han empleado el agua y el alcohol como líquidos picnométricos.

Guerrero (1987) midió la densidad de partícula de las turbas mediante picnometría de alcohol, introduciendo algunas variantes que simplifican la rutina de laboratorio.

Para poder estudiar la sensibilidad de los métodos a la porosidad ocluida, se debe trabajar con sustratos que presenten una amplia gama de variación de dicha porosidad ocluida. La estructura física de la corteza de pino puede asemejarse a la del corcho; el origen del material es idéntico, se trata de cortezas de árbol, aunque pueden presentar diferencias importantes. En estos casos, el volumen de poros ocluidos aumenta con el tamaño de partícula (Ordovás *et al.*, 1996). Por lo tanto, se puede disponer de muestras que representen una gama de porosidad ocluida con corteza de pino de diferentes granulometrías.

5.2.2.2 Objetivo

El objetivo de este ensayo es comparar distintos métodos para la medida de la densidad real de los sustratos de cultivo y evaluar las diferencias que presentan los diferentes métodos en función de la porosidad ocluida.

5.2.2.3 Materiales y métodos

5.2.2.3.1 *Planteamiento estadístico*

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación, método de medida (4 niveles) y corte granulométrico de corteza de pino compostada, incluyendo la mezcla original (11 niveles), con un total de 44 tratamientos.

El planteamiento se hace inicialmente con 3 repeticiones, pero las incidencias ocurridas durante el desarrollo del ensayo han hecho necesaria la repetición adicional de algunos tratamientos. Como consecuencia, el número final varía para los diferentes tratamientos entre 2

y 10. Esta variabilidad en el número de repeticiones se ha tenido en cuenta en el análisis estadístico realizado.

5.2.2.3.1.1 Sustratos

Con objeto de conseguir una gradación de la porosidad ocluida, las muestras se obtienen por tamizado de una muestra íntegra de corteza de pino (*Pinus radiata*) compostada. Para ello, se parte de 150 l de corteza, suministrada por la empresa IMC de Jardinería. Para obtener un nivel de humedad que permita el tamizado de la muestra, ésta se seca al aire. Posteriormente, se pasó por una serie de tamices, obteniéndose los diez siguientes cortes granulométricos:

- Menor de 0,1 mm
- De 0,1 a 0,2 mm
- De 0,2 a 0,5 mm
- De 0,5 a 1 mm
- De 1 a 2 mm
- De 2 a 3 mm
- De 3 a 4 mm
- De 4 a 5 mm
- De 5 a 6 mm
- Más de 6 mm

5.2.2.3.1.2 Métodos de medida

Se comparan 4 métodos de medida de la densidad real de los sustratos:

- Incineración (Martínez, 1992)
- Picnometría de agua (MAPA, 1994a)
- Picnometría de alcohol (MAPA, 1994a)
- Picnometría de alcohol de Guerrero (1987)

5.2.2.3.2 Metodología de laboratorio

Los métodos empleados para determinar la densidad real de los sustratos son: la picnometría de líquidos, con dos variantes, en función del líquido picnométrico empleado, agua o alcohol; el método descrito por Guerrero (1987), desarrollado como una variante de la picnometría de alcohol; y, finalmente, la determinación a partir del contenido en cenizas, descrito por Martínez (1992).

Para la medida de la densidad real por picnometría, se ha partido del Método Oficial del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 1994a) descrito para suelos. Este método contempla la posibilidad de utilizar un picnómetro o un matraz aforado. En nuestro caso, hemos utilizado matraces aforados de 50 ml. Por otra parte, el método oficial determina el peso de sustrato a partir del peso húmedo y de la humedad, determinada en una alícuota. En nuestro caso, se parte de sustrato seco en estufa a 105 °C, con lo que se obtiene una medida directa del peso seco de la muestra empleada. Esta variante tiene como ventaja una mejor estimación del peso seco y, como inconveniente, la posible incidencia del secado en la densidad del sustrato. Asumimos que ésta última incidencia es mínima y que, en cualquier caso, el posible error debido a ello es menor que el debido al método alternativo de obtener indirectamente el peso seco a partir del peso húmedo y de la humedad de la muestra.

El método oficial establece que cuando se utilice un matraz aforado de 100 ml, se añada una cantidad de suelo de unos 50 g. Esta proporción es inviable en el caso de los sustratos, debido al valor de la densidad aparente. Dada la variabilidad de la densidad aparente entre sustratos, es más adecuado definir el tamaño de la muestra en volumen, empleando un tamaño de muestra tal que ocupe aproximadamente un tercio del volumen del matraz.

5.2.2.3.2.1 Incineración (Martínez, 1992)

5.2.2.3.2.1.1 Principio

El cálculo de la densidad real por incineración parte de la hipótesis de que el sustrato está formado por una mezcla de material orgánico y mineral. En esta hipótesis, el peso y el volumen de la mezcla se obtienen como suma de los pesos y volúmenes de los componentes.

La pérdida de peso por incineración corresponde a la materia orgánica. La materia mineral corresponde al peso que permanece tras la incineración (cenizas). Los volúmenes de materia mineral y orgánica se obtienen a partir de estos pesos anteriores, asignando unos valores de densidad real previamente fijados para cada una de ellas.

5.2.2.3.2.1.2 Material y aparatos

- Crisol
- Estufa de secado a 105 °C
- Mufla para incineración de la muestra a temperatura de 550±25°C
- Balanza de precisión
- Desecador

5.2.2.3.2.1.3 Procedimiento

- Pesar el crisol limpio y seco (P_c)
- Añadir el sustrato con su estado actual de humedad y pesar (P_{sh})
- Secar en estufa a 105 °C durante 24 horas
- Enfriar en el desecador y pesar (P_{ss})
- Calcinar en mufla a 550±25°C durante cuatro horas
- Pesar (P_{cen})

5.2.2.3.2.1.4 Cálculos

$$(153) \quad Mo = 100 \frac{P_{ss} - P_{cen}}{P_{ss} - P_c}$$

$$(154) \quad Mm = 100 \frac{P_{cen} - P_c}{P_{ss} - P_c}$$

$$(155) \quad Dr = \frac{100}{Mo \frac{1}{1,50} + Mm \frac{1}{2,65}}$$

Donde:

- Mo = Porcentaje en peso de materia orgánica

- Mm = Porcentaje en peso de materia mineral (cenizas)
- Dr ($g \cdot cm^{-3}$) = Densidad real
- $1,50 g \cdot cm^{-3}$ = Densidad de la materia orgánica
- $2,65 g \cdot cm^{-3}$ = Densidad de la materia mineral

5.2.2.3.2.2 Picnometría de líquidos (MAPA, 1994a)

En este ensayo se comparan tres variantes de la picnometría de líquidos. Las dos primeras, detalladas en este apartado, se corresponden con los métodos oficiales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), empleando agua y alcohol como líquidos picnométricos. Se han introducido algunas variantes metodológicas, para adecuarla a las características propias de los sustratos.

5.2.2.3.2.2.1 Principio

En picnometría de líquidos se mide el volumen de líquido desplazado por la muestra problema. El volumen de la muestra es igual al volumen de fluido desplazado, obtenido a partir de su peso y su densidad. El valor de la densidad se obtiene mediante el cociente entre el peso de la muestra y este volumen.

El cálculo de volúmenes se basa en el valor previamente conocido de la densidad del líquido picnométrico. Los errores cometidos en la determinación de esta densidad se arrastran en todo el proceso de cálculo. El empleo de baños termostáticos tiene como objetivo reducir al mínimo posible la incidencia de las variaciones de temperatura en la densidad de dicho líquido picnométrico. Una vez fijado el valor de la densidad, el volumen problema se estima a partir del peso de líquido picnométrico.

5.2.2.3.2.2.2 Material y aparatos

- Estufa de secado a 105 °C
- Matraz aforado de 50 ml
- Baño termostático a 20 °C
- Balanza

5.2.2.3.2.2.3 Procedimiento

- Secar el sustrato en estufa a 105 °C durante 24 horas
- Pesar el matraz limpio y seco (Pm)
- Añadir el sustrato seco al matraz y pesar (Ps)
- Añadir el líquido picnométrico (alcohol o agua hervida) hasta la mitad del volumen del matraz aproximadamente, arrastrando hacia el interior las partículas de sustrato que se hayan podido adherir al cuello del matraz
- Dejar reposar durante 24 horas
- Expulsar el aire retenido por el sustrato por debajo del nivel de líquido
 - Si el líquido es alcohol, el matraz se sumerge en un baño de ultrasonidos, hasta que dejen de salir burbujas de aire
 - Si el líquido es agua, hervir suavemente el matraz con su contenido durante unos minutos, hasta la evacuación del aire atrapado. Esta operación se debe realizar con gran cuidado, agitando el contenido del matraz suavemente,

para evitar la formación de espuma y la pérdida de sustrato por rebosamiento del matraz, causado por la espuma

- Enfriar en baño termostático hasta 20 °C
- Añadir líquido picnométrico a 20 °C hasta enrasar
- Secar el exterior del matraz con un paño seco y pesar (P_{sa})
- Limpiar el matraz y llenar hasta la mitad del volumen de su volumen con el líquido picnométrico
- Llevar a 20 °C en baño termostático y enrasar con líquido picnométrico a 20 °C
- Secar el exterior del matraz y pesar (P_a)

5.2.2.3.2.2.4 Cálculos

El peso de sustrato se obtiene por diferencia entre el peso del matraz con sustrato seco y la tara. El volumen del matraz se obtiene a partir del peso de líquido picnométrico necesario para llenar el matraz y de su densidad, conocida previamente. Por el mismo método se obtiene el volumen de líquido picnométrico necesario para completar el volumen del matraz con el sustrato. La diferencia entre estos dos volúmenes proporciona el volumen ocupado por la muestra de sustrato problema. Finalmente, el valor de la densidad del sustrato se obtiene dividiendo los valores de peso y de volumen del sustrato así obtenidos.

$$(156) \quad \text{Peso de sustrato} = P_s - P_m$$

$$(157) \quad \text{Volumen de sustrato} = \frac{(P_a - P_m) - (P_{sa} - P_s)}{d_a}, \text{ Siendo } d_a \text{ la densidad del líquido picnométrico}$$

$$(158) \quad D_r = \frac{d_a (P_s - P_m)}{(P_a - P_m) - (P_{sa} - P_s)}$$

5.2.2.3.2.3 Guerrero (1987)

La tercera variante picnométrica considerada corresponde al método descrito por Guerrero (1987), que introduce variaciones metodológicas importantes en la picnometría con alcohol.

5.2.2.3.2.3.1 Principio

El principio aplicado es el mismo que en la picnometría de líquidos. La diferencia está en la simplificación de la rutina de laboratorio.

5.2.2.3.2.3.2 Material y aparatos

- Estufa de secado a 105 °C
- Matraz aforado de 50 ml
- Pipeta

5.2.2.3.2.3.3 Procedimiento

- Secar el sustrato en estufa a 105 °C durante 24 horas
- Pesar el matraz limpio y seco (P_m)
- Añadir el sustrato seco al matraz y pesar (P_s)

- Añadir alcohol con la pipeta hasta la mitad del volumen del matraz, arrastrando hacia el interior las partículas de sustrato que se hayan podido adherir al cuello del matraz. Anotar el volumen de alcohol añadido
- Dejar reposar durante 24 horas
- Añadir alcohol con pipeta hasta enrasar, anotando el volumen de alcohol añadido (*Psa*)

5.2.2.4 Resultados y discusión

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se muestra en Tabla 19. El análisis presenta diferencias significativas ($\alpha < 0,01$) entre métodos ($\alpha < 0,0001$), y entre los diferentes cortes granulométricos ($\alpha < 0,0001$); el efecto interacción también es significativo ($\alpha = 0,0023$).

Estos resultados indican claramente que el valor medido de la densidad real es función de la granulometría y del método de medida empleado. Además, la significación del efecto interacción indica que la relación entre el valor medido y la granulometría no es del mismo tipo para todos los casos, sino que depende del método de medida empleado. Lógicamente, el efecto interacción también indica que la relación entre el valor medido y el método empleado no es única, sino que varía con el corte granulométrico considerado.

Del estudio del reparto de la suma de cuadrados entre las tres fuentes de variación (Tabla 19) se desprende que el factor que tiene mayor incidencia es el corte granulométrico, siguiéndole en importancia el efecto interacción y, por último, el método de medida empleado.

Cuando se hace intervenir el número de grados de libertad y se calcula el cuadrado medio, el valor correspondiente al factor método de medida es similar al del corte granulométrico, mientras que el efecto interacción presenta un valor del cuadrado medio considerablemente más bajo que los anteriores. Esta relación se mantiene para el valor de F y de α , siendo en todos los casos inferior a 0,01.

Considerando los objetivos planteados para este ensayo, las diferencias entre los distintos cortes granulométricos y su incidencia en el reparto de la variabilidad no es trascendente; en todo caso, podría considerarse tanto más positiva cuanto más amplias sean estas diferencias o cuanto mayor sea su incidencia en el reparto de la variabilidad, puesto que nos permite evaluar los métodos de medida en un intervalo amplio de la variable medida.

La significación del factor método tiene una gran importancia, puesto que indica que los métodos empleados no son equivalentes, o al menos uno de ellos no lo es y, por lo tanto, en la interpretación de los resultados analíticos deberá considerarse siempre el método de medida empleado.

La significación del efecto interacción indica que la relación entre el valor obtenido y el método de medida empleado no es única, sino que depende de la granulometría de la corteza analizada. Un efecto interacción no significativo indica que los valores obtenidos por los distintos métodos están relacionados por una función independiente de la granulometría empleada. Si fuera éste el caso, se podría calcular la relación entre los métodos y, en base a ello, comparar los valores obtenidos por los distintos métodos de medida empleados. La significación del efecto interacción impide establecer esta relación. La única posibilidad de disponer de datos comparables es empleando la misma metodología de medida.

Desde el punto de vista del análisis estadístico de los datos, la significación del efecto interacción tiene dos consecuencias importantes.

La primera es que no se pueden comparar los valores medios obtenidos para los distintos niveles de un solo factor, puesto que la diferencia de los valores obtenidos para dos cortes granulométricos concretos depende del método de medida considerado, pudiendo ser positiva, negativa o cero en función de los métodos de medida incluidos en el ensayo. El razonamiento también es válido si en el ejemplo se intercambian los factores de variación.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α	MDS
Modelo	43	18.3899	0.4276	6.54	0.0001	
Sustrato	10	8.3157	0.8316	12.72	0.0001	0.180
Método	3	2.9911	0.9970	15.25	0.0001	0.108
Sus*Método	30	4.0999	0.1366	2.09	0.0023	
	138	9.0239	0.06539			
Total	181	27.4138				
$R^2= 0.6708$		C.V.=18.91				

Tabla 19: Comparación de métodos utilizados para medir la densidad real: incineración y picnometría. Análisis de varianza de los valores obtenidos por incineración y picnometría de agua y alcohol, en diferentes cortes granulométricos de corteza de pino.

La segunda es consecuencia de la anterior y es que la comparación se debe hacer para las diferentes combinaciones de los dos factores estudiados, o bien se pueden comparar los distintos niveles de uno de los factores para cada uno de los niveles del otro factor. Este estudio puede abordarse bien mediante un test t de Student, de comparación de medias dos a dos, o mediante un test de comparación de medias para cada uno de los niveles de un factor determinado. En uno y otro caso se produce una pérdida de potencia del test estadístico. Si se hace un test de t de Student, la probabilidad de error de tipo α aumenta considerablemente, debido a la acumulación de las probabilidades de error de tipo α de cada una de las parejas de valores consideradas. Si se hace un test de comparación de medias para cada uno de los niveles de uno de los factores, por una parte se produce un efecto similar al anterior, aunque en menor medida, y por otra parte, la partición del lote de datos inicial en varios grupos, se traduce en una disminución de la potencia del test, que se refleja en una disminución del valor de R^2 , y un aumento de la desviación estándar, del coeficiente de variación y de la mínima diferencia significativa.

Otra herramienta que permite explicar las causas que provocan el efecto interacción es la representación gráfica de los resultados que, si bien tiene el inconveniente de perder fiabilidad desde el punto de vista estadístico, presenta la ventaja de proporcionar una interpretación clara de los resultados obtenidos.

En la Figura 2 se observan dos tipos de relación entre los valores obtenidos y el método de medida empleado. Por una parte, los valores obtenidos por incineración son independientes de la granulometría; únicamente en el caso del corte granulométrico más fino, se observa un valor ligeramente más elevado. Por otra parte, los métodos que miden la densidad real por desplazamiento de fluidos responden en general a un mismo tipo de comportamiento, con valores de la densidad real que disminuyen con el aumento de la granulometría.

Cabe pensar que la significación del efecto interacción es debida, en gran parte, al diferente comportamiento entre el método de incineración por un lado, y los métodos de desplazamiento de fluidos por otro. Si así fuera, podemos suponer que los valores obtenidos por los distintos métodos de desplazamiento de fluidos están relacionados entre sí, y una vez obtenido el valor correspondiente a uno de los métodos, se puede calcular el correspondiente a los demás. En cambio, no podríamos relacionar los valores obtenidos por incineración con los obtenidos por los métodos de desplazamiento de fluidos. Los datos obtenidos no son suficientes para probar la validez de esta hipótesis, que no estaba incluida entre los objetivos del ensayo; no obstante, y para tener una primera aproximación, se ha hecho una regresión lineal para los datos obtenidos con los seis posibles emparejamientos de métodos.

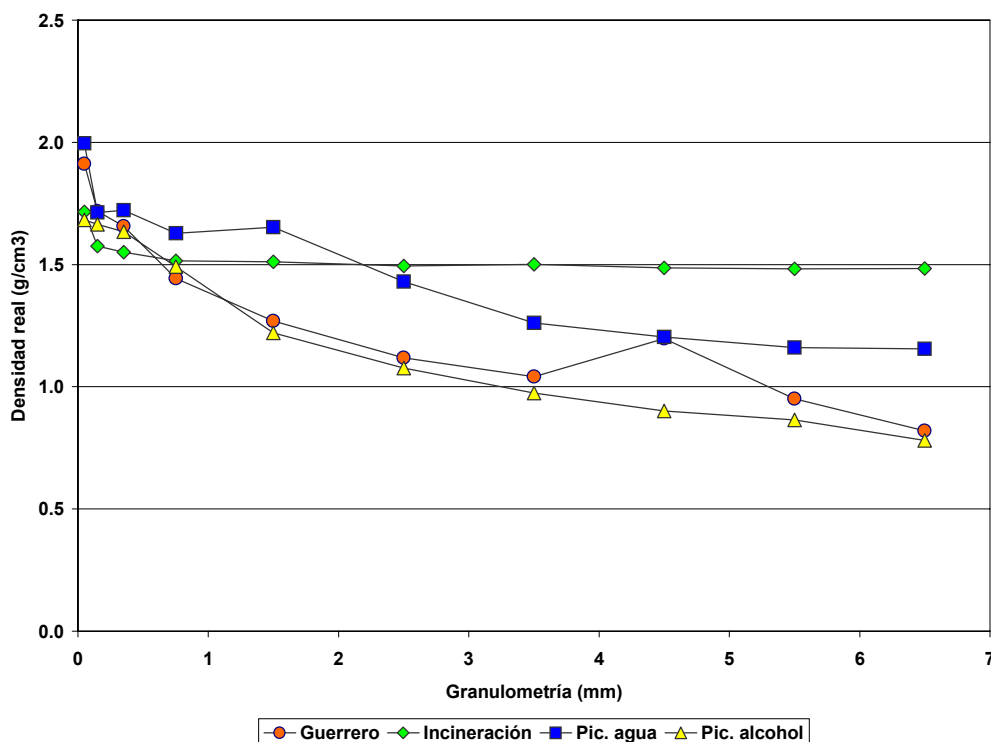


Figura 2: Comparación de métodos utilizados para medir la densidad real: incineración y picnometría. Evolución de los valores obtenidos para la densidad real en función de la granulometría del sustrato –corteza de pino compostada- y del método de medida empleado

Cuando se comparan los métodos de desplazamiento de fluidos entre sí, se obtienen unos valores de R^2 entre 0,86 y 0,92. El valor de la pendiente (b) oscila alrededor de 1, con unos intervalos de confianza del 99% muy lejanos al valor 0, sin incluirlo, lo que indica que se puede desechar la hipótesis $b=0$. El término independiente (a) presenta, en general, un valor próximo a cero, con un intervalo de confianza del 99% que incluye este valor, por lo que no se puede desechar la hipótesis $a=0$. El valor de la pendiente próximo a 1 indica que una variación en el valor medido por un método se corresponde con una variación del mismo orden de magnitud en los otros métodos. Una vez obtenido el valor por un determinado método, se puede obtener una estimación de los valores correspondiente a los otros métodos con un alto grado de fiabilidad, multiplicando por un factor próximo a 1 y sumando o restando una constante de un orden de magnitud menor que el producto anterior.

Cuando se compara el método de incineración con los métodos de desplazamiento de fluidos, se obtienen unos valores de R^2 entre 0,56 y 0,71, claramente inferiores a los encontrados

para las regresiones entre métodos de desplazamientos de fluidos. El valor de la pendiente oscila entre 0,15 y 0,20 con unos límites de confianza del 99%, que no llegan a incluir el valor 0, pero quedan muy próximos. El término independiente presenta unos valores entre 1,22 y 1,35, con unos intervalos de confianza que oscilan entre 1 y 1,5. El valor de pendiente próximo a cero indica que las variaciones en el valor medido por desplazamiento de fluidos no se reflejan en los valores obtenidos por incineración, que oscilan entre 1,20 y 1.40.

A partir de los resultados obtenidos, podemos considerar que los métodos de medida empleados en este ensayo están midiendo dos tipos de variable diferentes. Por una parte, los métodos de desplazamiento de fluidos miden variables que están relacionadas entre sí mediante una función lineal, con un valor de la pendiente próximo a 1 y un término independiente próximo a cero. Por otro lado, el método de incineración mide una variable que no está relacionada con las anteriores y proporciona un valor prácticamente constante para todos los cortes granulométricos de la corteza de pino.

Para poder explicar este comportamiento se debe tener en cuenta que la corteza de pino tiene una estructura celular. Esta formada por los restos de las células muertas, que en su momento formaron el tejido vegetal. Estos restos están constituidos por las paredes celulares suberificadas o lignificadas, que forman vacuolas. Estas vacuolas dificultan el intercambio de aire y agua entre su interior y el exterior, llegando a estar, en ocasiones, totalmente ocluidas.

Cuando se emplea el método de incineración, no se mide el peso y el volumen de la muestra, sino que el valor de la densidad se obtiene a partir del contenido de materia mineral y de materia orgánica. El modelo aplicado para el cálculo de la densidad no contempla la posibilidad de que haya poros no accesibles al intercambio de aire y de agua. El método evalúa la densidad real como cociente entre peso seco y volumen ocupado, en sentido estricto, por el material sólido, excluyendo cualquier volumen ocupado por aire o por agua, independientemente que esté o no comunicado con el exterior.

Cuando la densidad real se mide por desplazamiento de fluidos, se mide el peso seco de la muestra y el volumen de fluido desplazado por la muestra. Este volumen está constituido por el espacio no accesible al intercambio aire-agua, es decir, el volumen ocupado en sentido estricto por el material sólido, más el volumen ocupado por aire o por agua que, por la morfología de la partícula sólida, no interviene en el intercambio aire - agua. El volumen considerado en este caso es, pues, diferente del considerado en el caso de la incineración y, en consecuencia, el valor obtenido por la aplicación de uno u otro método de medida también lo es.

Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Ordovás *et al.* (1996), quienes discriminan claramente entre los métodos de desplazamiento de fluidos y la incineración, para determinar la densidad de los sustratos. Estos autores consideran que, en sustratos con porosidad ocluida, la es incorrecto determinar la capacidad de aireación del sustrato en función del contenido en cenizas, que, añaden, es el método utilizado habitualmente.

Las diferencias entre los valores obtenidos para los diferentes métodos de desplazamiento de fluidos, se deben principalmente al empleo de diferente líquido. Los valores obtenidos por los dos métodos que emplean alcohol son prácticamente iguales, si exceptuamos el dato correspondiente al corte granulométrico 0,5 - 1 mm. Los valores obtenidos con agua son ligeramente superiores. Esto puede deberse a las propiedades de cada uno de los dos líquidos, alcohol y agua, que inciden en la mojabilidad y, como consecuencia de ello, en el volumen de líquido desplazado.

En el caso de sustratos, la densidad real se emplea para el cálculo de la porosidad total. A efectos agronómicos, la porosidad tiene interés por ser el volumen en el que se produce el intercambio aire-agua en los sucesivos ciclos de humectación (riego) y desecación (consumo de agua por la planta), que se dan a lo largo del cultivo. Interesa, pues, conocer el volumen útil para este intercambio y, por lo tanto, debe emplearse el concepto de volumen medido por desplazamiento de fluidos, como también concluyen Ordovás et al. (1996).

Respecto al empleo de agua o alcohol como líquido picnométrico, debemos considerar que el líquido con el que va a estar en contacto el sustrato es el agua y, por lo tanto, interesa conocer su comportamiento con respecto a dicho líquido.

5.2.2.5 Conclusiones del ensayo

1. El valor obtenido para la densidad real es función del método de medida empleado.
2. La significación del efecto interacción implica que los métodos empleados no son equivalentes. No hay una norma que permita transformar los valores obtenidos por un método en los equivalentes de otro método y, en consecuencia, la única posibilidad de comparar valores, es aplicando los mismos métodos de medida.
3. El análisis detallado de los datos indica la existencia de dos grupos de métodos de medida: por un lado, el método de incineración, y por otro, los métodos de desplazamiento de fluidos.
4. Los dos grupos de métodos indicados miden variables distintas; en el caso de incineración, el valor de la densidad real está referido al volumen ocupado, en sentido estricto, por el material sólido, mientras que en el caso de los métodos de desplazamiento de fluidos, el valor de la densidad real está referido al volumen accesible al intercambio aire-agua.
5. Teniendo en cuenta la aplicación agronómica, el líquido picnométrico a utilizar debe ser el agua. Las medidas con alcohol proporcionan valores más bajos de la densidad, debidas posiblemente a la diferente mojabilidad del sustrato por alcohol y por agua.

5.2.3 *Comparación de métodos para la determinación de la Densidad Real (II)*

5.2.3.1 Introducción

El ensayo anterior puso de manifiesto la diferencia entre el método de incineración y los métodos picnométricos para la determinación de la densidad de los sustratos. Estos últimos se ajustan mejor a las necesidades planteadas en el estudio de las propiedades hídricas de los sustratos de cultivo.

La picnometría de líquidos es un método muy laborioso y, en ocasiones, subjetivo. El método obliga al tratamiento individualizado de cada muestra y al control riguroso de la temperatura de medida. Respecto a la subjetividad, las muestras deben hervirse hasta la evacuación total del aire, evitando la formación de espuma, que derrame parte de la muestra de sustrato. La determinación del punto en el que se ha evacuado el aire no presenta problemas cuando la densidad de las partículas del sustrato es claramente superior a la del agua, y se hunden. Cuando todas las partículas del sustrato, o parte de ellas, quedan flotando sobre el agua, la determinación del punto en el que se ha evacuado todo el aire es prácticamente imposible, proporcionando un elevado grado de subjetividad al método de medida.

Para evitar los problemas que se presentan en la picnometría, se propone una metodología de medida en la que distinguiremos dos partes, la saturación y la medida del volumen ocupado por el material sólido.

La saturación de las muestras se lleva a cabo, al igual que en picnometría, sometiéndolas a ebullición. Las muestras, convenientemente preparadas para evitar la pérdida de material, se sumergen en agua y se someten a ebullición, durante un tiempo lo suficientemente largo como para provocar la salida de todo el aire atrapado. La inmersión conjunta de varias muestras, 20 ó 40 según los casos, reduce considerablemente la laboriosidad del tratamiento individualizado de las muestras en picnometría. Además la posibilidad de someter las muestras a largos periodos de ebullición, sin riesgo de pérdida de material, permite asegurar la evacuación total del aire atrapado, eliminando la subjetividad de la picnometría.

Una vez saturadas las muestras, el valor del volumen ocupado se obtiene por aplicación del principio de Arquímedes. Blake y Hartge (1986) describen un método similar de medida de la densidad real en suelos por inmersión aplicando el principio de Arquímedes.

En este punto, se produce la convergencia de dos problemas que se plantean en el estudio de las propiedades hídricas: la medida de la densidad del sustrato para la estimación de la porosidad total, y la saturación previa a la medida de la curva de retención de agua. La medida de la densidad por inmersión requiere la saturación del sustrato. En el caso de la curva de retención de agua, ésta se obtiene por desorción de la muestra previamente saturada. Las deficiencias en la saturación previa de la muestra, dan lugar a curvas diferentes.

Las diferencias entre métodos de saturación fueron estudiadas por Wever (1995). Comparó varios métodos, midiendo la velocidad de saturación. El resultado fue que existe una buena correlación entre los métodos empleados, pero se presentan diferencias importantes en la velocidad de saturación. De estos resultados se deduce que si el tiempo de saturación es insuficiente para el método considerado, el nivel de saturación es insuficiente. La obtención de la curva de retención de agua por desorción de la muestra de sustrato saturada es el motivo por el que la curva obtenida esté fuerte condicionada por el nivel de saturación alcanzado (Wever 1995).

5.2.3.2 Objetivos

El objetivo de este ensayo es evaluar la eficacia de la ebullición como método de saturación del sustrato. Se considera como referencia la saturación obtenida por picnometría, y se compara, además, con la eficacia de la saturación por inmersión de la muestra en agua, a temperatura ambiente durante 24 horas.

Para evaluar la eficacia de la saturación, se emplea el valor de la densidad obtenido como cociente entre el peso de la muestra y el volumen medido por picnometría o por desplazamiento de fluidos, según los casos.

5.2.3.3 Material y métodos

5.2.3.3.1 *Planteamiento estadístico*

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación, método de medida (3 niveles) y sustrato (6 niveles). El número de repeticiones es tres.

La elevada variabilidad de los valores obtenidos en uno de los tratamientos, ha hecho aconsejable cambiar el planteamiento inicial. En primer lugar, se analiza el efecto de la

ebullición sobre la saturación. En el análisis factorial, se consideran dos métodos de medida en lugar de los tres originales.

5.2.3.3.1.1 Sustratos

Para comparar los métodos de medida, se han empleado 6 sustratos de cultivo con características muy diferentes:

- Corteza de pino (*Pinus radiata*) compostada
- Turba *Sphagnum* rubia
- Mezcla de corteza de pino (50% en volumen) y escoria cristalizada de horno alto (50% en volumen)
- Perlita B-12 (Agroperl)
- Lana de roca: mezcla de lana de roca hidrófila (50% en volumen) e hidrófuga (50% en volumen)
- Lana de escoria

5.2.3.3.1.2 Métodos de medida

Los métodos de medida considerados son:

- Picnometría de agua
- Medida de la densidad por aplicación directa del principio de Arquímedes. Se comparan dos métodos para la saturación de las muestras previa a la obtención del peso dentro del agua:
 - Saturación por inmersión en agua y posterior ebullición del baño con las muestras sumergidas
 - Saturación por inmersión simple en agua y mantenimiento del baño a presión atmosférica y temperatura ambiental.

5.2.3.3.2 Metodología de laboratorio

5.2.3.3.2.1 Picnometría de agua

Corresponde al método descrito en 5.2.2.3.2.2, empleando agua como líquido picnométrico.

5.2.3.3.2.2 Medidas por inmersión

5.2.3.3.2.2.1 Principio

El volumen de la muestra problema se obtiene por aplicación directa del principio de Arquímedes. El empuje se obtiene por diferencia entre el peso fuera y dentro del agua. Dividiendo empuje entre densidad del agua, se obtiene el volumen. El peso de la muestra se obtiene directamente por gravimetría. El cociente entre ambos proporciona el valor correspondiente a la densidad de la muestra.

Para aplicar el principio de Arquímedes en la medida de volúmenes es necesario conocer el valor de la densidad del fluido que provoca el empuje, en este caso del agua. El empleo de valores tabulados de la densidad del agua destilada se ha descartado por varias razones, entre otras: la dificultad para mantener la temperatura del baño constante y la inutilidad de utilizar agua destilada en un baño en el que tienen que sumergirse las muestras de sustrato. Como alternativa se ha optado por emplear agua corriente, a temperatura ambiente. El valor de la

densidad del agua en cada baño se obtiene por aplicación del mismo principio de Arquímedes, empleando patrones de volumen conocido.

5.2.3.3.2.2 Material y aparatos

- Dos patrones de volumen, contruidos en redondo de acero inoxidable (AISI 304L) de 70 mm de diámetro, y 52 y 78 mm de altura, respectivamente. El volumen de cada uno de los patrones ha sido medido en un laboratorio de metrología
- Anillos metálicos portamuestras, obtenidos a partir de tubo sin soldadura de acero inoxidable (AISI 304L) de 3" SCH10 (88.9 mm x 3.05 mm), cortados a 40 mm
- Tela tupida de nilón para el cierre de las muestras en el anillo metálico
- Alambre de acero para sujeción de las telas al anillo metálico
- Recipiente voluminoso y resistente al fuego para someter las muestras a ebullición
- Baño de agua
- Balanza con capacidad para obtener peso suspendido, colocada sobre el baño de agua
- Estufa para secado de las muestras a 105 °C

5.2.3.3.2.3 Procedimiento

El método descrito a continuación corresponde a la medida por inmersión, previa saturación por ebullición. Los pasos marcados con (*) no se aplican al de saturación por inmersión sin ebullición.

- Se cierra una de las caras del anillo metálico con un disco de tela tupida de nilón y se sujeta con el alambre de acero
- Se llena de muestra sin ejercer presión, hasta ocupar todo el volumen del anillo metálico
- Se cierra la cara libre del anillo con otro disco de tela y se sujeta con un alambre de acero
- En el recipiente voluminoso y resistente al fuego se sumergen las muestras y se mantienen durante 24 horas
- (*) Se someten a ebullición durante 45 minutos, cuidando de que el agua cubra completamente las muestras en todo momento.
- (*) Se deja enfriar a temperatura ambiente
- Se comprueba si ha quedado atrapada alguna burbuja de aire dentro del anillo metálico. En caso afirmativo se evacua, abriendo la tela por un lado, con cuidado de que no salga el sustrato
- Se evalúa la densidad del agua del baño con los dos patrones de volumen
- Los anillos metálicos, incluidas las telas y alambres que los cierran, y con las muestras de sustrato, se pesan dentro del agua ($P1_{da}$)
- Una vez pesadas dentro del agua todas las muestras de todos los sustratos y repeticiones, se vuelve a evaluar la densidad del agua del baño con los dos patrones de volumen
- El valor medio de densidad al inicio y final del proceso se emplea como densidad del fluido en el cálculo de volúmenes (D_{a1})
- Los anillos metálicos, incluidas las telas y alambres, y con las muestras, se secan en estufa a 105 °C hasta peso constante
- Se pesan los anillos metálicos, incluidas las telas y alambres, con el sustrato seco ($P1_{fa}$)
- Se limpian los anillos metálicos, telas y alambres
- Se prepara un nuevo baño de agua
- Se evalúa la densidad del agua con los dos patrones de volumen
- Se pesa dentro del agua cada anillo metálico, con sus correspondientes telas y alambres ($P2_{da}$)
- Se vuelve a evaluar la densidad del agua del baño con los dos patrones de volumen

- El valor medio de densidad al inicio y final del proceso se emplea como densidad del fluido en el cálculo de volúmenes (D_{a2})
- Los anillos metálicos, telas y alambres se secan en estufa a 105 °C hasta peso constante
- Se pesa cada anillo metálico con sus correspondientes telas y alambres ($P2_{fa}$)

5.2.3.3.2.4 Cálculos

Volumen del anillo metálico con mallas, alambres y sustrato

$$(159) \quad V_A = \frac{E1}{D_{a1}} = \frac{P1_{fa} - P1_{da}}{D_{a1}}$$

Volumen del anillo metálico con mallas y alambres

$$(160) \quad V_B = \frac{E2}{D_{a2}} = \frac{P2_{fa} - P2_{da}}{D_{a2}}$$

Densidad del sustrato

$$(161) \quad D = \frac{P_s}{V_s} = \frac{P1_{fa} - P2_{fa}}{V_A - V_B}$$

5.2.3.4 Resultados y discusión

En la Tabla 20 se detallan los valores obtenidos para la densidad real medida por los tres métodos ensayados, así como los coeficientes de variación correspondientes. Los elevados coeficientes de variación obtenidos en el caso de inmersión a temperatura ambiente obligan a un estudio particular del mismo. El estudio de los datos obtenidos por inmersión e hirviendo en comparación con la picnometría, utilizada como referencia, se hace por análisis de varianza.

Sustrato	Picnometría		Inmersión hirviendo		Inmersión sin hervir	
	$g \cdot cm^{-3}$	%	$g \cdot cm^{-3}$	%	$g \cdot cm^{-3}$	%
C Pino	1,59	3,58	1,42	0,90	1,15	17,95
Turba	1,66	2,95	1,37	2,51	0,86	21,46
C50-E50	2,69	1,84	2,52	2,99	1,84	24,16
Perlita	0,87	15,67	0,94	0,69	0,86	21,40
L Roca	2,53	15,27	2,72	1,68	0,44	4,47
L Escoria	2,68	0,51	2,76	1,04	2,20	4,47

Tabla 20 : Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Valor medio ($gr \cdot cm^{-3}$) y coeficiente de variación (%) obtenidos para la densidad real determinada por picnometría, inmersión hirviendo e inmersión a temperatura ambiente

5.2.3.4.1 *Efecto de la ebullición durante el proceso de saturación*

Comparando los valores obtenidos por inmersión en agua a temperatura ambiente con los obtenidos por inmersión hirviendo y picnometría, se observan unos coeficientes de variación muy altos y unos valores bajos para la densidad real (Tabla 20).

Los valores de densidad más bajos obtenidos con la inmersión a temperatura ambiente, pueden explicarse por una saturación deficiente de las muestras de sustrato. En este caso, el volumen de aire atrapado en los poros ocupa un volumen que se incluye en el volumen medido por desplazamiento de fluidos. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos por Wever (1995). En ese trabajo, el tiempo requerido para saturar el sustrato por inmersión en agua a temperatura ambiente es de 311 horas (\cong 13 días). Las 24 horas consideradas en nuestro trabajo, están muy alejadas de estas 311 horas. La consecuencia lógica es una saturación deficiente del sustrato, dejando aire atrapado en el interior de los poros, que puede explicar el comportamiento observado.

La variabilidad de los valores observados es debida por una parte, a la variabilidad propia del material poroso y, por otra, a las diferencias en la sustitución de aire por agua durante el proceso de saturación. La variabilidad del material poroso es una característica física propia del mismo que, dentro de ciertos límites, se puede reducir con un proceso de homogeneización adecuado.

Las diferencias en la proporción de sustitución de aire por agua durante el proceso de saturación, dependen del propio método de saturación. En la saturación por ebullición, las diferencias en la proporción de sustitución se deben a diferencias de temperatura; si todas las muestras se hierven en un mismo recipiente, la uniformidad está asegurada, la propia ebullición evita la estratificación del agua por temperatura y tiene como consecuencia una temperatura constante en toda la masa de agua.

Cuando las muestras se hierven en recipientes diferentes, las diferencias de temperatura se deben a diferencias del punto de ebullición del agua por diferencias en la concentración de solutos. La incidencia de este factor en la proporción de sustitución de aire por agua la podemos considerar despreciable. Por una parte, debe tenerse en cuenta que la variación del punto de ebullición por variación de concentración de solutos en el intervalo de trabajo es pequeña. Por otra, debe tenerse en cuenta que el aire contenido en el poro está saturado de humedad, por lo que tiene una gran incidencia la reducción del volumen. Finalmente, la temperatura de ebullición del agua no destilada es ligeramente superior a 100 °C, correspondientes a 373 °K; la variación de 1° en la temperatura de ebullición supondría una variación de 1/373 en la tasa de sustitución de aire por agua (aplicación de la ley de Boile-Mariotte), que podemos considerar despreciable.

Cuando las muestras se saturan a temperatura ambiente, el proceso de sustitución de aire por agua es menos enérgico y pequeñas diferencias durante el proceso de saturación, pueden suponer diferencias importantes en la tasa de sustitución de aire por agua.

Las diferencias comentadas pueden explicar por sí mismas las diferencias de los coeficientes de variación, más elevados en el caso de la saturación a temperatura ambiente que en los otros dos casos considerados.

5.2.3.4.2 Comparación saturación con ebullición versus picnometría

La comparación entre estos dos métodos se hace mediante análisis de varianza, cuyos resultados se muestran en la Tabla 21

El análisis presenta diferencias significativas entre sustratos ($\alpha < 0,01$); no presenta diferencias significativas entre métodos, pero el efecto interacción presenta un nivel de significación $\alpha < 0,05$. Teniendo en cuenta lo argumentado en el apartado 5.2.2.4, la significación del efecto interacción obliga a un estudio pormenorizado de los datos. Los valores de R^2 y CV indican un elevado control de los factores de variación (R^2 elevado) y una baja variabilidad entre las diferentes repeticiones de un mismo tratamiento, proporcionando al análisis estadístico una elevada fiabilidad y precisión.

La descomposición de la suma de cuadrados total entre los diferentes factores de variación pone claramente de manifiesto, al igual que en el ensayo anterior, la fuerte incidencia del factor sustrato como fuente de variabilidad. Supone por si solo casi el 95 % de la suma total de cuadrados. Esta importancia del factor sustrato, con respecto a los demás factores de variación, se mantiene cuando se hacen intervenir los grados de libertad para calcular la suma de cuadrados, y posteriormente en el valor de la F y en el nivel de significación.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α	MDS
Modelo	11	17,0800	1,5527	88,61	0,0001	
Sustrato	5	16,5103	3,3021	188,44	0,0001	0,1667
Método	1	0,0171	0,0171	0,98	0,3338	0,9589
Sus*Método	5	0,2418	0,0484	2,76	0,0455	
Error	21	0,3680	0,0175			
Total	32	17,448				

$R^2 = 0,9789$ C.V.=6,67

Tabla 21 : Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Análisis de varianza de los valores obtenidos por picnometría y saturando por ebullición, con 6 sustratos diferentes.

En la Tabla 20 se observa que los sustratos minerales presentan valores de densidad real más elevados cuando se mide por inmersión que cuando se emplea la picnometría, mientras que en el caso de los sustratos orgánicos ocurre exactamente lo contrario. Para contrastar si el efecto tipo de sustrato (orgánico, mineral) es el causante del efecto interacción, se ha realizado un análisis de varianza en el que se consideran como factores de variación el método de medida, el tipo de sustrato y el sustrato encajado o anidado dentro del tipo, se considera además el efecto interacción método * tipo.

El resultado de este análisis se muestra en la Tabla 22. El reparto de la variabilidad entre los diferentes factores de variación es similar al análisis anterior. El nivel de significación del tipo de sustrato $\alpha < 0,01$, los niveles de significación de sustrato y de método son similares a los encontrados en el análisis anterior, pero el nivel de significación del efecto interacción aumenta, pasando de $\alpha > 0,05$ a $\alpha < 0,01$. La significación de este efecto no deja pues lugar a dudas y obliga a un estudio separado para cada uno de los tipos de sustrato. En el análisis de varianza de cada uno de los dos tipos (Tabla 5) se consideran como fuentes de variación el método de medida, el

sustrato y el efecto interacción. Tanto en el caso de los sustratos orgánicos como minerales, el efecto interacción no es significativo ($\alpha > 0,1$); el factor sustrato es significativo en ambos casos, mientras que el factor método no es significativo en el caso de los sustratos minerales ($\alpha > 0,1$) y si lo es, en el caso de los sustratos orgánicos ($\alpha < 0,01$). Los valores de R^2 son en los dos casos elevados (0,9729 para los sustrato minerales y 0,9942 para los sustratos orgánicos), y los CV bajos (8.59% y 2.74% respectivamente).

Los valores obtenidos en estos análisis apoyan la hipótesis de que la significación del efecto interacción es debida al diferente comportamiento de los dos métodos empleados con los sustratos orgánicos y minerales. Sin embargo, estos resultados no se deben de considerar concluyentes. La realización de tests a *posteriori* tiene una fiabilidad menor que los tests a *priori*, y exige la confirmación de los resultados mediante la realización de ensayos específicos para el estudio del comportamiento de los dos tipos de sustratos, y diseñando los ensayos específicamente para este fin; mientras tanto, estos resultados deben considerarse orientativos.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α	MDS
Modelo	7	17,0548	2,4364	154,91	0,0001	
Tipo	1	0,3632	0,3632	23,09	0,0001	0,08997
Sustrato (Tipo)	4	16,5752	4,1438	263,46	0,0001	
Método	1	0,0152	0,0152	0,97	0,3352	0,08997
Tipo*Método	1	0,2166	0,2166	13,77	0,0010	
Error	25	0,3932	0,0157			
Total	32	17,448				
$R^2 = 0,9775$		C.V.=6,32				

Tabla 22 : Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Análisis de varianza de los valores obtenidos por picnometría y saturando por ebullición, considerando los dos tipos de sustrato: orgánico y mineral.

Tipo sustrato	R^2	C.V.	Nivel de significación		
			Sustrato	Método	Sus*Met
Mineral	0,9729	8,59	0,0001	0,2007	0,8164
Orgánico	0,9942	2,74	0,0001	0,0001	0,1559

Tabla 23: Medida de la densidad real por inmersión. Saturación por ebullición. comparación con picnometría de líquidos (testigo): Estudio de la interacción sustrato*método en la comparación de picnometría y saturación por ebullición: Parámetros estadísticos de los análisis de varianza para cada uno de los tipos de sustratos: orgánico y mineral.

La obtención de densidades más bajas por inmersión en el caso de los sustratos orgánicos puede explicarse por la pérdida de material de la muestra, bien sea por disolución en el agua del baño de saturación, o bien por pérdida a través de la malla de cierre. En el primer caso se trataría principalmente de sales minerales solubles (fertilizantes) y en el segundo, de la pérdida a través de la malla de la fracción más fina, con una proporción de materia mineral más elevada que la

media de la muestra. La densidad de la materia mineral es más elevada que la de la materia orgánica. Las pérdidas de material mineral inciden en la disminución de la componente mineral de la muestra y, en consecuencia, en el descenso del valor de la densidad real.

En el caso de los sustratos minerales, las diferencias entre métodos no son significativas. Las diferencias observadas podrían deberse a una deficiente evacuación del aire en el caso de la picnometría. Recuérdese que en este proceso hay un elevado grado de subjetividad, y que el operario puede dar por finalizada la saturación cuando todavía queda aire atrapado. Este hecho no se produce en el caso de la saturación por ebullición, al no existir el riesgo de derrame; como en el caso de la picnometría, las muestras se pueden someter a ebullición un periodo de tiempo lo suficientemente prolongado para asegurar la evacuación total del aire de los poros.

Los valores de los coeficientes de variación para el método de inmersión hirviendo son muy bajos (ver Tabla 20), siempre inferiores al 3%. En el caso de la picnometría, los valores son bajos, excepto para los casos de la perlita y lana de roca. En el caso de la lana de roca, el elevado valor del coeficiente de variación puede deberse a la dificultad que supone saturar un material hidrófobo, mientras que en el caso de la perlita se presenta un problema de enrase, puesto que al tener menor densidad que el agua, se acumula en la superficie y dificulta considerablemente el correcto enrase del matraz.

Desde el punto de vista de la rutina de laboratorio, es importante señalar que el método de inmersión supone una simplificación del método de medida de la densidad con respecto a la picnometría. Esta simplificación se basa en cuatro razones:

1. Saturación del sustrato. En ambos métodos la saturación del sustrato se lleva a cabo por ebullición. La picnometría exige la ebullición individualizada de cada muestra y requiere la atención continua del operario para evitar la pérdida de material. En el método de inmersión, la ebullición se aplica conjuntamente a todas las muestras, una sola vez para 18 muestras en nuestro caso, y no exige mayor atención que la del control de tiempo de ebullición y la reposición del agua evaporada para mantener las muestras completamente sumergidas.
2. Densidad del agua. En ambos métodos es necesario conocer el valor de la densidad del agua. En el caso de picnometría, hay que determinar la densidad del agua de cada uno de los picnómetros (uno por muestra); por ello, se trabaja a una temperatura determinada, que se consigue mediante baño termostático y se aplica el valor tabulado correspondiente. En el caso de la inmersión se utiliza una única masa de agua (la del baño de inmersión), cuya densidad se mide por cuadruplicado con dos patrones de volumen.
3. La picnometría de líquidos requiere llenar el picnómetro, o enrasar el matraz, dos veces para cada una de las muestras: una vez con el picnómetro sin sustrato y otra vez con la muestra problema. En ambos casos debe de trabajarse a una temperatura previamente determinada, por lo que se utiliza baño termostático. Antes de pesar el picnómetro cada una de estas dos veces, debe de secarse cuidadosamente, para evitar lecturas erróneas. En el caso de la inmersión, esta tarea se elimina sin sustituirla por otra.
4. Por último, en el caso de la medida por inmersión puede ahorrarse un trabajo considerable, utilizando material calibrado para el manejo de las muestras, es decir, anillos metálicos, mallas y cierres, puesto que así se evita la necesidad de evaluar el volumen de los envases en cada proceso de medida

5.2.3.5 Conclusiones del ensayo

1. La saturación de las muestras de sustrato por simple inmersión en agua tiene como consecuencia una evacuación de aire menor que cuando las muestras se someten a ebullición. La evacuación de aire es más sensible a pequeñas variaciones en las condiciones de trabajo.

La consecuencia es la obtención de valores sensiblemente menores para el valor de la densidad medida y coeficientes de variación sensiblemente más elevados.

2. Los valores obtenidos por picnometría y por inmersión hirviendo son similares, aunque se observa una tendencia a obtener valores más elevados por inmersión en el caso de los sustratos minerales, y en sentido contrario en el caso de los sustratos orgánicos.
3. El método de inmersión supone, con respecto a la picnometría, una simplificación importante de la rutina de laboratorio

5.2.4 *Comparación de métodos para la determinación de la Densidad Real (III).*

5.2.4.1 Introducción

En el ensayo anterior se ha visto la eficacia de la ebullición como método para saturar las muestras de sustratos de cultivo. Además, el método de inmersión -para evaluar el volumen ocupado por la muestra de sustrato- supone una simplificación notable del trabajo de laboratorio, en comparación con la picnometría de líquidos. El siguiente paso ha consistido en cambiar la estrategia de saturación, es decir en sustituir el aire contenido en los poros por agua.

Tanto en la picnometría de agua como en la saturación por ebullición, la inmersión de la muestra en el agua arrastra parte del aire contenido en los poros, que queda atrapado en su interior por cierre hidráulico. La ebullición provoca el aumento de volumen de este aire, que sale al exterior, y la formación en el interior del poro de una atmósfera saturada de vapor de agua. El descenso de temperatura provoca la reducción del volumen de aire saturado del interior de los poros, y su llenado con agua.

En la bibliografía se emplea una estrategia similar a ésta, sustituyendo la ebullición por la aplicación de vacío. Algunas veces la muestra se introduce en un matraz, se cierra y se aplica vacío, hasta que deja de burbujear aire. Este método de saturación es similar al de picnometría de líquidos, sustituyendo la ebullición por la aplicación de vacío. Las ventajas e inconvenientes son similares en ambos casos.

Wever (1995) utilizó el vacío para saturar las muestras de sustrato. Para ello, emplea una estrategia similar a la empleada en ebullición, pero sustituyendo la ebullición por la aplicación de vacío. Las muestras se sumergen en agua a presión atmosférica dentro de una campana de vacío. La campana se cierra y se aplica vacío. Éste tiene un efecto similar a la ebullición: el descenso de presión provoca un aumento del volumen de aire atrapado (ley de Boyle - Mariotte), que se evacua al exterior. La vuelta a la presión atmosférica provoca la reducción del volumen de aire residual de los poros y el llenado de éstos por el agua del exterior.

Se plantea como alternativa la evacuación del aire antes de sumergir la muestra de sustrato en agua. Para ello, se hace vacío, se sumerge la muestra en agua y después se vuelve a la presión atmosférica.

Este método es diferente a los métodos de vacío mencionados más arriba. En el método propuesto la inmersión de las muestras de sustrato en agua se lleva a cabo a la presión de vacío prefijada, mientras que en los otros, la inmersión se hace a presión atmosférica. En un caso, la dilatación, y consiguiente evacuación, del aire se produce antes de la inmersión. En el otro caso, esta dilatación y evacuación se produce dentro del agua. En el primer caso, la evacuación del aire resultante de la dilatación no encuentra resistencia, mientras que en el segundo debe vencer la resistencia que supone el cierre hidráulico del poro. En el primer caso, el vacío aplicado es el mismo para todas las muestras. En el otro, el vacío aplicado depende de la situación de la

muestra dentro del agua. A la presión en la superficie del agua se debe sumar la debida a la columna de agua. Si se trabaja con un vacío de -0,9 atmósferas y un altura de agua de 40 cm, la presión absoluta resultante en las muestras colocadas más arriba es de 1 m de columna de agua ($\cong 10$ kPa), mientras que en las de la base, la presión absoluta es de 1,4 m de columna de agua ($\cong 14$ kPa).

5.2.4.2 Objetivos

Se compara la eficacia de dos métodos de saturación; la saturación por ebullición de las muestras y la saturación por vacío, en la que la inmersión de las muestras en agua se produce a un valor de vacío previamente fijado.

Se consideran dos valores de vacío diferentes y la picnometría de agua como referencia.

5.2.4.3 Materiales y métodos

5.2.4.3.1 *Planteamiento estadístico*

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación: método de medida (4 niveles) y sustrato (6 niveles). El número de repeticiones es 6, que hacen un total de 144 muestras.

5.2.4.3.1.1 Sustratos

Los sustratos empleados en este ensayo son:

- Corteza de pino (*Pinus radiata*) fina ($<0,2$ mm)
- Corteza de pino gruesa (*Pinus radiata*) (0,5 – 5 mm)
- Turba *Sphagnum* rubia
- Perlita B6
- Lana de roca
- Lana de escoria

5.2.4.3.1.2 Métodos de medida

Se comparan un total de tres métodos de medida de la densidad real: picnometría, inmersión previa saturación de las muestras por ebullición e inmersión previa saturación de las muestras por vacío. En este último caso, se consideran dos niveles de vacío durante la saturación, por lo que el número resultante de tratamientos es de cuatro:

- Picnometría de agua
- Inmersión previa saturación por ebullición
- Inmersión previa saturación a vacío de -72 cm de mercurio respecto a la presión atmosférica
- Inmersión previa saturación a vacío de 2 –5 mbares de presión absoluta

5.2.4.3.2 *Metodología de laboratorio*

5.2.4.3.2.1 Picnometría

Se sigue el método descrito en 5.2.2.3.2.2, empleando agua como líquido picnométrico.

5.2.4.3.2.2 Medida por inmersión saturando por ebullición

Se sigue el método descrito en 5.2.3.3.2.2, reduciendo el tiempo de ebullición a 15 minutos. El alambre de acero utilizado para sujetar la tela al anillo metálico se sustituye por una junta tórica de silicona resistente a temperaturas superiores a 200 °C. Si queda alguna burbuja atrapada dentro de la tela, se evacua por succión.

5.2.4.3.2.3 Medida por inmersión saturando por vacío

El método es igual al anterior, salvo en lo relativo a la saturación de las muestras, que se hace por aplicación de vacío.

5.2.4.3.2.3.1 *Material y aparatos*

- Compresor y venturi de aire comprimido para obtención de vacíos de hasta -70 cm de Hg (equivalente a 80 mbares de presión absoluta)
- Máquina de alto vacío que permite llegar a vacíos inferiores a 1 mbar de presión absoluta, provisto de manómetro de medida de alto vacío
- Campana de vacío fabricada en tubo de polipropileno de 315 mm de diámetro interior y 600 mm de altura
- Depósito auxiliar de agua, fabricado en tubo de PVC de 150 mm de diámetro y 1200 mm de altura, provisto de visor exterior de nivel de agua
- Campana de vacío y tubo auxiliar conectados por su parte inferior para el paso de agua por un tubo provisto de válvula
- Ambos recipientes están también conectados por su parte superior, para igualar las presiones de ambos, mediante un tubo provisto de válvula de conexión a la atmósfera
- Manómetro de columna de mercurio para la medida de la presión diferencial con respecto a la presión atmosférica

5.2.4.3.2.3.2 *Procedimiento*

- La válvula de la conexión inferior entre campana de vacío y depósito auxiliar se cierra
- El depósito auxiliar se llena de agua, dejando una pequeña cámara de aire, y se cierra, dejando abierta únicamente la conexión superior con la campana de vacío
- Las muestras a saturar se colocan en la campana de vacío y se cierra herméticamente
- Ambos recipientes se someten al nivel de vacío previamente fijado, de 2 a 5 mbares en un caso, y de 50 mbares en otro
 - El vacío de 2 – 5 mbares se aplica con la máquina de alto vacío y se controla con el manómetro incorporado
 - El vacío de 50 mbares se aplica con el venturi y se controla con el manómetro diferencial de mercurio
- Una vez alcanzado el vacío, se abre la válvula de la conexión inferior entre ambos recipientes, para que pase el agua a la campana de vacío hasta que el nivel de la misma sea superior a la altura que alcanzan las muestras en el interior de la campana
- Se abre la válvula de conexión a la atmósfera para que la presión de la campana y del depósito auxiliar alcancen lentamente la presión atmosférica
- Si ha quedado alguna burbuja de agua atrapada en el interior de las telas de cierre, se elimina por succión

5.2.4.4 Resultados y discusión

En la Tabla 24 se detallan los valores obtenidos para la densidad real, medida por los diferentes métodos ensayados, así como los coeficientes de variación correspondientes. En primer lugar analizaremos los valores de los coeficientes de variación, para posteriormente comparar -mediante análisis de varianza- los valores obtenidos.

5.2.4.4.1 Variabilidad de los datos observados

La variabilidad de los valores obtenidos es baja; sólo en dos casos el coeficiente de variación supera ligeramente el 4%, con un valor máximo ligeramente superior al 5%. Si comparamos estos resultados con el ensayo anterior, podemos ver que han desaparecido los valores superiores al 15%, que se presentaban en el caso de la inmersión a temperatura ambiente y en dos sustratos cuando se aplicaba la picnometría. En ese caso, el coeficiente de variación estaba más relacionado con el método de medida que con el sustrato; en este ensayo, por el contrario, parece que el valor del coeficiente de variación está más relacionado con el sustrato que con el método de medida. En la Tabla 24 se observa que la corteza de pino fina tiene los coeficientes de variación más bajos, siguiéndole la corteza gruesa y la turba; los sustratos minerales presentan, en general, unos intervalos para el coeficiente de variación más amplios, pero siempre dentro de unos valores que podemos considerar bajos.

Sustrato	Picnometría		Ebullición		Vacío 72 cm Hg		Vacío 2-5-mb	
	g*cm ⁻³	%	g*cm ⁻³	%	g*cm ⁻³	%	g*cm ⁻³	%
C Fina <0.2	1,97	0,47	2,02	0,36	1,98	1,84	1,99	1,31
C Gruesa 0.5-5	1,54	2,25	1,68	1,86	1,46	2,26	1,39	1,34
Turba TKS1	1,62	1,97	1,71	2,39	1,57	2,93	1,57	2,89
L R hidrófila	2,77	3,96	2,92	3,75	2,85	2,91	2,84	2,19
L Escoria	2,75	2,80	2,92	4,36	2,91	3,24	2,94	2,84
Perlita B6	1,26	3,68	0,98	1,59	1,16	5,08	1,16	1,62

Tabla 24 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Valores de la densidad real (gr*cm⁻³) y coeficientes de variación (%), obtenidos picnometría e inmersión con tres sistemas de saturación

Dada la dependencia que existe entre el coeficiente de variación y el sustrato, es posible que se esté reflejando la variabilidad propia del material poroso (7.5.1.1). La corteza de pino fina corresponde a la fracción granulométrica que pasa a través de un tamiz de 0,2 mm de luz; el material obtenido es muy uniforme y estaría en consonancia con los bajos valores del coeficiente de variación. En el caso de la corteza gruesa, la explicación es similar; los coeficientes de variación ligeramente más elevados se pueden explicar por el aumento de la granulometría y del intervalo granulométrico. La turba puede presentar diferencias importantes entre los distintos lotes de material, sobre todo si se trabaja con distintas turberas; en este caso, se ha partido de una bala de turba, que antes del análisis se había homogeneizado y, por lo tanto, se pueden obtener unos coeficientes de variación bajos. En el caso de los sustratos minerales, su origen industrial

hace suponer que se trate de productos muy uniformes, y es un tanto extraño que los coeficientes de variación, aun siendo bajos, sean superiores a los de los productos orgánicos.

5.2.4.4.2 Comparación de los valores obtenidos por diferentes métodos

La comparación de métodos de medida de la densidad real se hace, como en casos anteriores, mediante análisis de varianza, cuyos resultados se muestran en la Tabla 25.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α	MDS
Modelo	23	60,1070	2,6133	699,66	0,0001	
Sustrato	5	59,0787	11,8157	3163,35	0,0001	0,03559
Método	3	0,0823	0,0274	7,34	0,0002	0,02908
Sus*Método	15	0,7089	0,0473	12,65	0,0001	
Error	115	0,4296	0,003735			
Total	138	60,5365				
R ² =0,9929		C.V.=3,08				

Tabla 25 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Análisis de varianza del valor de densidad real determinada por picnometría, e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío, con 6 sustratos diferentes.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α	MDS
Modelo	11	59,5963	5,4178	731,82	0,0001	
Tipo	1	11,5385	11,5385	1558,58	0,0001	0,02889
Sustrato (Tipo)	4	47,9705	11,9926	1619,92	0,0001	
Método	3	0,0843	0,0281	3,80	0,0120	0,04089
Tipo*Método	3	0,1982	0,0661	8,92	0,0001	
Error	127	0,9402	0,007403			
Total	138	61,4359				
R ² = 0,9844		C.V.=4,34				

Tabla 26: Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Análisis de varianza -incluyendo como variable el tipo de sustrato- del valor de la densidad real determinada por picnometría e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío

Como se puede apreciar, las tres fuentes de variación, sustrato, método e interacción sustrato * método, tienen un nivel de significación $\alpha < 0,01$. Teniendo en cuenta lo argumentado en el apartado 5.2.2.4, la significación del efecto interacción obliga a un estudio pormenorizado de los datos.

Los indicadores de la fiabilidad estadística del ensayo son más favorables que en el caso anterior, con un valor de R^2 superior a 0,990, un coeficiente de variación próximo al 3% y la mínima diferencia significativa del orden de $0.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Tabla 25).

La descomposición de la suma de cuadrados total entre los diferentes factores de variación sigue poniendo de manifiesto la fuerte incidencia del factor sustrato como fuente de variabilidad: supone por sí sólo casi el 97.6 % de la suma total de cuadrados. Esta importancia del factor sustrato con respecto a los demás factores de variación se mantiene cuando se hacen intervenir los grados de libertad para calcular los cuadrados medios, y, posteriormente, en el valor de la F y en el nivel de significación.

Tipo sustrato	R^2	C.V.	Nivel de significación		
			Sustrato	Método	Sus*Met
Mineral	0,9920	3,56	0,0001	0,2277	0,0001
Orgánico	0,9813	1,90	0,0001	0,0001	0,0001

Tabla 27: Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Estudio de la interacción sustrato*método en el ensayo de densidad real, determinada por picnometría e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío: Parámetros estadísticos de los análisis de varianza para cada uno de los tipos de sustratos.

Sustrato	R^2	C.V.	F	α	MDS	Media
C. Fina	0,5300	1,12	7,14	0,0021	0,0276	1,99
C. Gruesa	0,9394	1,98	103,36	0,0001	0,0362	1,52
Turba TKS1	0,7028	2,56	15,76	0,0001	0,0499	1,62
L Roca	0,2955	3,29	2,66	0,0778	0,1160	2,84
L Escoria	0,4084	3,42	4,14	0,0213	0,1249	2,88
Perlita B6	0,8951	3,35	54,05	0,0001	0,0471	1,14

Tabla 28: Saturación de sustratos por vacío. Comparación con saturación por ebullición y picnometría de líquidos: Estudio de la interacción sustrato*método en el ensayo de densidad real, determinada por picnometría e inmersión, saturando por ebullición y por dos niveles diferentes de vacío: Parámetros estadísticos de los análisis de varianza para cada sustrato.

El elevado control de la variabilidad del ensayo proporciona un valor bajo de la suma de cuadrados del error y, en consecuencia, del cuadrado medio del error y de la mínima diferencia significativa. Esto proporciona una sensibilidad muy elevada al ensayo y hace que, aún siendo pequeñas las sumas de cuadrados correspondientes, los efectos método e interacción resulten con un elevado nivel de significación ($\alpha < 0,01$).

Para estudiar el efecto interacción, se han tenido en cuenta los resultados de ensayos anteriores y se ha considerado el tipo de sustrato (orgánico o mineral) como fuente de variación

en el análisis de varianza, considerando el sustrato como factor anidado o encajado dentro del tipo (Tabla 26). Los factores tipo de sustrato, sustrato(tipo) e interacción método * tipo presentan un nivel de significación $\alpha < 0,01$, y el método de medida un nivel de significación $\alpha = 0,07$. La significación del efecto interacción obliga, como en casos anteriores, a un análisis más detallado. En la Tabla 27 se facilita un resumen de los resultados del análisis de varianza realizado para cada uno de los dos tipos de sustrato. Los valores de R^2 son elevados y los de coeficiente de variación bajos. A diferencia del ensayo anterior, en este caso el efecto interacción método * sustrato es, en los dos casos, significativo ($\alpha < 0,01$). Esto obliga a particularizar el estudio caso por caso, con los inconvenientes que esto tiene desde el punto de vista estadístico, como ya se comentó en 5.2.2.4 y 6.2.1.4. En la Tabla 28 se detallan los parámetros estadísticos de los análisis de varianza correspondientes a cada uno de los sustratos. Se aprecia un descenso generalizado del valor de R^2 , el mantenimiento del coeficiente de variación en niveles bajos (por debajo del 4%), bajando también en términos generales el valor de F y, en consecuencia, el nivel de significación, aunque en todos los casos las diferencias entre métodos son significativas, con $\alpha < 0,01$ en 4 casos.

Las dos lanas minerales tienen comportamientos similares. Los valores obtenidos por picnometría son inferiores a los obtenidos por inmersión. Respecto a los datos obtenidos por vacío, son intermedios entre los dos anteriores en el caso de la lana de roca, y prácticamente iguales a los de ebullición en el caso de la lana de escoria.

En el caso de los sustratos orgánicos, los valores más elevados se obtienen con el método de ebullición. Este resultado es contrario al del ensayo anterior, en el que los valores obtenidos por inmersión con ebullición eran inferiores a los obtenidos por picnometría, por lo que no se confirma la hipótesis anterior sobre la diferencia de comportamiento de los métodos en función de la naturaleza orgánica o mineral del sustrato.

La saturación por ebullición proporciona valores más elevados que el resto de los métodos en todos los casos, excepto en la perlita. Los dos métodos en los que se utiliza el vacío dan resultados prácticamente iguales en todos los casos, excepto en la perlita.

5.2.4.5 Conclusiones del ensayo

1. La variabilidad de los resultados obtenidos es baja. El coeficiente de variación de los valores de densidad para cada sustrato no supera normalmente el 4%. El valor del coeficiente de variación es independiente del método de medida empleado.
2. Cabe la posibilidad de que el valor del coeficiente de variación sea reflejo de la variabilidad propia del sustrato.
3. El trabajo experimental proporciona un elevado control de la variabilidad, que se refleja en un valor de R^2 muy elevado. Dentro de esta variabilidad, el factor sustrato es el que más influye, y supone, por sí solo, más del 97% de la variabilidad medida como suma de cuadrados.
4. Como consecuencia del elevado control de la variabilidad, el test realizado es muy sensible, con unos valores para la mínima diferencia significativa del orden de $0,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Este elevado control de la variabilidad permite poner de manifiesto que el efecto interacción es significativo, a pesar de su escasa incidencia en la suma de cuadrados.
5. Los valores de densidad obtenidos cuando se satura por ebullición son más elevados que los obtenidos por los otros métodos, excepto en el caso de la perlita, que proporciona el valor más bajo.

5.2.5 *Incidencia del vacío aplicado durante la saturación en la densidad real.*

5.2.5.1 Introducción

En el ensayo anterior se han comparado los dos métodos de saturación, ebullición y vacío. El siguiente paso ha sido estudiar la incidencia del nivel de vacío aplicado en la eficacia de la saturación. Partimos de la hipótesis de que cuanto más nos acerquemos al vacío absoluto, menor será la cantidad de aire residual y, por lo tanto, menor el error cometido al considerar que el volumen de aire atrapado es cero. Pretendemos conocer el nivel de vacío que debemos alcanzar para considerar que el volumen de aire atrapado es despreciable.

5.2.5.2 Objetivos

Evaluar la incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación.

5.2.5.3 Material y métodos

5.2.5.3.1 *Planteamiento estadístico*

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación: nivel de vacío durante la saturación (3 niveles) y sustrato (7 niveles). El número de repeticiones es cuatro.

5.2.5.3.1.1 Sustratos

Los sustratos empleados en este ensayo han sido:

- Corteza de pino fina (<3 mm)
- Corteza de pino gruesa (>3 mm)
- Turba *Sphagnum* rubia
- Perlita B6
- Escoria de horno alto
- Escoria granulada
- Lana de escoria

5.2.5.3.1.2 Niveles de vacío

Los valores del vacío empleados en la saturación, referidos a la presión atmosférica, son:

- -30 cm de mercurio
- -60 cm de mercurio
- -70 cm de mercurio

5.2.5.3.2 *Métodos de saturación*

Las muestras se saturan por vacío aplicando la metodología descrita en 5.2.4.3.2.3. El valor de la densidad del sustrato se obtiene a partir del peso seco de la muestra y el volumen medido por aplicación del principio de Arquímedes, según la metodología descrita en 5.2.3.3.2.2, con la variante de saturación por vacío ya comentada.

Los niveles de vacío considerados en la saturación son 30, 60 y 70 cm de columna de mercurio, aplicados en todos los casos con el venturi de aire comprimido y controlando mediante manómetro diferencial de mercurio.

5.2.5.4 Resultados y discusión

En la Tabla 29 se muestra el resultado del análisis de varianza de los valores obtenidos. El modelo presenta diferencias significativas ($\alpha < 0,01$). Todas las fuentes de variación presentan diferencias significativas para $\alpha < 0,01$. Esto indica que el valor obtenido es función del sustrato y del vacío aplicado durante el proceso de saturación, y, además, que la evolución del valor obtenido para diferentes vacíos no es uniforme para los diferentes sustratos (efecto interacción significativo).

Al igual que en los casos anteriores, en el análisis de varianza se pone claramente de manifiesto la incidencia del sustrato como fuente de variación más importante. Este factor representa por sí solo casi el 93 % de la suma de cuadrados, correspondiéndole también los valores más elevados de cuadrado medio y de F.

Los valores de R^2 y CV indican un elevado control de la variabilidad de los datos y una buena precisión del test. Con relación a los ensayos anteriores, estos valores indican un ligero descenso en el control del ensayo y en la fiabilidad del mismo; sin embargo, aún los podemos considerar como muy buenos, sobre todo el valor de R^2 , que indica un control de más del 98% de la variabilidad del ensayo medida como suma de cuadrados.

Para estudiar el efecto interacción hemos recurrido a la representación gráfica de los valores obtenidos. En la Figura 3 se detalla la evolución del valor obtenido en función del vacío aplicado durante la saturación. En general, se observa una tendencia al crecimiento lineal del valor obtenido con el aumento de vacío. Únicamente la lana de escoria y la turba se apartan de esta tendencia lineal.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α
Modelo	20	59,1683	2,9584	196,30	0,0001
Sustrato	6	55,7594	9,2922	616,58	0,0001
Vacío aplicado	2	1,0308	0,5154	34,20	0,0001
Sus*Vacío	12	0,6217	0,0518	3,44	0,0008
Error	57	0,8590	0,01507		
Total	77	60,0273			
$R^2=0,9857$		C.V.=7,88			

Tabla 29 : Saturación de sustratos por vacío. Incidencia del nivel de vacío aplicado durante la saturación: Análisis de varianza del valor de densidad real determinado por inmersión sobre muestras saturadas a distintos niveles de vacío, con 7 sustratos diferentes.

Los valores del coeficiente de variación entre las repeticiones de cada saturación son muy bajos para los casos de las cortezas y escorias. En el caso de la corteza fina saturada a un vacío de 30 cm de Hg, se obtiene un valor anormalmente alto (19.36%). En los otros dos casos, el valor está comprendido entre 4% y 6%, siendo en el resto de los casos el valor del CV siempre inferior al 1.5%.

En los casos de la lana de escoria, perlita y turba, los valores del CV son considerablemente más elevados que en los casos anteriores; sólo en un caso es inferior al 5%

(Vacío 30 cm Hg para perlita, $CV=3.2$) y en el resto de los casos el valor del CV es superior al 5%, y normalmente inferior a 10%, excepto en tres casos, que oscila alrededor del 20%; esto ocurre en 60 cm Hg para lana de escoria (20.29%), 70 cm Hg en Perlita (23.07%) y 70 cm Hg en turba (19.64%).

La precisión de los valores obtenidos es tanto mayor cuanto menor es el CV. Un CV elevado indica una baja precisión del valor medio. Los sustratos que presentan valores de CV elevados se corresponden con los que más se apartan de la recta en la Figura 3. Si recalculamos el valor medio, desechando algunos valores aberrantes claramente diferenciados del resto, disminuimos el CV y la evolución se aproxima más a una recta (líneas de puntos en Figura 3).

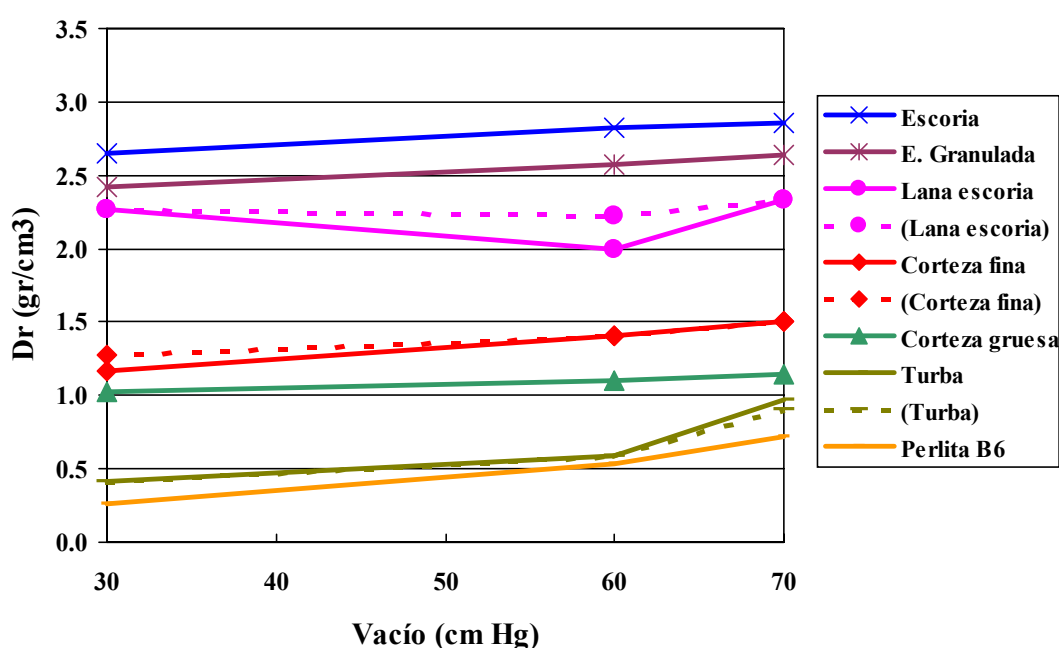


Figura 3 : Saturación de sustratos por vacío. Incidencia del nivel de vacío aplicado durante la saturación: Variación del valor de densidad real determinado por inmersión sobre muestras saturadas a distintos niveles de vacío. Las líneas de puntos corresponden al mismo sustrato que la correspondiente línea continua, pero sin considerar algunos valores aberrantes

5.2.5.5 Conclusiones del ensayo

1. Los valores obtenidos para la densidad real son tanto mayores cuanto mayor es el vacío aplicado. En general, se observa una respuesta lineal en función del vacío aplicado.
2. La variabilidad de los valores obtenidos es, en general, muy baja para las dos granulometrías de la corteza y para las dos escorias estudiadas.
3. La variabilidad de los valores obtenidos para la lana de escoria, perlita y turba es considerablemente más elevada que para los otros sustratos.

5.2.6 *Factores que inciden en la eficacia de la saturación por vacío: nivel de vacío, saturación lenta y saturación doble.*

5.2.6.1 Introducción

El resultado del ensayo precedente parece indicar que el valor de la densidad obtenido es función lineal del vacío aplicado. En este ensayo pretendemos acercarnos lo más posible al vacío absoluto, con objeto de dimensionar la incidencia del aire residual en el valor de la densidad del sustrato. Para estudiar la tendencia se utiliza un venturi de aire comprimido, para obtener los vacíos de 60 y 70 cm de mercurio, y una máquina de alto vacío para obtener el valor de referencia más próximo al vacío absoluto.

Por otra parte, en los trabajos de laboratorio y en el ensayo precedente se ha observado que, en ocasiones, las muestras de sustrato saturadas por vacío dejan en su interior una burbuja más o menos grande sin saturar, con el sustrato completamente seco. Esto se produce, sobre todo, cuando se trabaja con sustratos de granulometría muy fina y con un estado de humedad inicial muy bajo. Con el objetivo de evitar este problema, en este ensayo se introducen dos variantes metodológicas: la saturación lenta y la doble saturación. La doble saturación se plantea en el método de referencia de Verdonck y Gabriëls (1992), pero la variante considerada en este trabajo, saturación por vacío, reduce considerablemente los tiempos de saturación necesarios.

5.2.6.2 Objetivos

Se plantea un doble objetivo:

- Evaluar la incidencia del volumen de aire residual en el valor de la densidad del sustrato obtenido por inmersión, previa saturación por vacío.
- Evaluar la eficacia de la saturación lenta y de la saturación doble en la sustitución del aire contenido en los poros.

5.2.6.3 Material y métodos

5.2.6.3.1 *Planteamiento estadístico*

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación, sustrato (6 niveles) y método de saturación (5 niveles). El número de repeticiones es cinco.

5.2.6.3.1.1 Sustratos

Los sustratos empleados en este ensayo son:

- Corteza de pino fina (<3 mm)
- Corteza de pino gruesa (>3 mm)
- Turba *Sphagnum* rubia
- Perlita B6
- Escoria granulada
- Lana de escoria

5.2.6.3.1.2 Métodos de saturación

Se consideran un total de 5 métodos de saturación. Tres de ellos corresponden a saturación simple por vacío con distintos niveles de vacío. Los otros dos, saturación lenta y

saturación doble, corresponden a nuevas variantes planteadas para aumentar la eficacia de la saturación.

- Saturación simple a vacío de 60 cm de mercurio
- Saturación simple a vacío de 70 cm de mercurio
- Saturación simple a vacío de 76 cm de mercurio
- Saturación simple lenta a vacío de 70 cm de mercurio
- Saturación doble a vacío de 70 cm de mercurio

5.2.6.3.2 Metodología

El valor de la densidad real se obtiene por aplicación del principio de Arquímedes, siguiendo la metodología descrita en 5.2.3.3.2.2, pero saturando las muestras por vacío siguiendo la metodología descrita en 5.2.4.3.2.3.

En este ensayo se introducen algunas variantes en el equipamiento y en el método de laboratorio utilizado para aplicar la saturación lenta y la saturación doble.

5.2.6.3.2.1 Equipamiento

5.2.6.3.2.1.1 Equipo de saturación

- Se fabrica una cesta en chapa de acero inoxidable para contener las muestras en su interior
- A la campana de vacío se le dota de un mecanismo de ascenso – descenso de la cesta portamuestras
- Las juntas tóricas de silicona, para sujeción de los cierres de los anillos metálicos, se sustituyen por bandas elásticas de caucho
- Contenedor en tubo de PVC de 110 mm de diámetro y 280 mm de altura, con cierre de tela de nilón de 75 μm de luz

5.2.6.3.2.1.2 Metodología de laboratorio

a) Saturación de las muestras

- Las muestras se colocan en el interior de la cesta portamuestras. Esta se engancha al mecanismo de ascenso – descenso, y se coloca en su posición más alta, pegada a la tapa de cierre de la campana de vacío
- La campana de vacío se llena hasta la mitad de agua
- Se coloca la tapa con la cesta, quedando ésta en la parte superior de la campana sin contacto con el agua
- La campana se cierra herméticamente
- Se aplica el vacío
- Una vez alcanzado el vacío prefijado, se activa el mecanismo de descenso de la cesta portamuestras. El tiempo de descenso oscila entre 1 y 2 minutos. La saturación de las muestras se realiza de abajo hacia arriba
- Una vez que la cesta ha llegado hasta abajo, se deja reposar durante 15 – 20 minutos
- Se abre la comunicación con la atmósfera, para que se alcance lentamente la presión atmosférica (aproximadamente 3 – 5 minutos)
- Una vez alcanzada la presión atmosférica, se retira la tapa de cierre de la campana y se sacan las muestras para continuar el proceso

b) *Saturación lenta*

El proceso es similar al anterior, salvo que el tiempo empleado en el descenso de la cesta es aproximadamente 30 minutos

c) *Saturación doble*

El sustrato se satura dos veces con un drenado entre ambas

- Se llenan los contenedores de PVC con sustrato
- Se saturan en la campana de vacío siguiendo la metodología descrita en 5.2.6.3.2.1.2a)
- Se dejan drenar libremente durante 24 horas
- El sustrato saturado y drenado se deposita sobre una superficie limpia y se homogeneiza
- Se llenan los anillos metálicos con el sustrato saturado, drenado y homogeneizado
- Se vuelve a saturar, siguiendo el mismo método que en el caso anterior

5.2.6.4 Resultados y discusión

5.2.6.4.1 *Resultados obtenidos*

Con el objeto de tener una visión global de los datos, se considera, en primer lugar, el estudio de todos los tratamientos incluidos en el ensayo. Los coeficientes de variación son bajos, siendo su valor en general inferior al 3%. Los coeficientes de variación son inferiores al 1% para la escoria granulada, y oscilan entre 1 y 2% para la corteza fina. En el caso de la corteza gruesa son ligeramente más elevados, superando ligeramente el valor 2,5% en un caso. En los otros tres sustrato estudiados, el coeficiente de variación para la saturación a 60 cm Hg toma valores entre 3 y 5%. Algo similar ocurre con la saturación lenta para la lana de escoria y turba, que llega a superar ligeramente el valor de 5%. Finalmente, es de destacar el valor del coeficiente de variación anormalmente elevado obtenido para el caso de la saturación doble de la turba.

El valor de densidad obtenido en el caso de la escoria granulada es prácticamente constante, no presenta sólo variaciones entre los diferentes métodos de medida empleados. Por el contrario, la turba presenta un amplio espectro de variación, entre $0,57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ en el caso de la saturación a 60 cm Hg de vacío, y $1,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ para la saturación a 76 cm Hg.

5.2.6.4.2 *Análisis estadístico*

Se ha hecho el análisis de varianza, considerando conjuntamente los cinco métodos de saturación empleados y los seis sustratos. En la Tabla 31 se presentan los resultados de este análisis.

Todas las fuentes de variación presentan nivel de significación $\alpha < 0,01$, lo que indica que el valor obtenido es función del sustrato y del método de saturación empleado. La significación del efecto interacción indica, además, que la relación no es uniforme, sino que depende del sustrato considerado.

El reparto de la suma de cuadrados indica un elevado control de la variabilidad del ensayo, explicando el modelo el 99,55% de la suma total del cuadrados ($R^2 = 0,9955$). Como en casos anteriores, el factor sustrato tiene una gran incidencia en la variabilidad de los datos y explica por sí solo el 91,54% de la suma total de cuadrados.

5.2 Trabajo experimental: Accesibilidad

El valor del coeficiente de variación es bajo (3,12%), en clara consonancia con los bajos valores obtenidos para cada una de las combinaciones sustrato*método, anteriormente comentados (ver Tabla 30). Este valor del coeficiente de variación se corresponde con un valor de $0,0537 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

Sustrato	60 cm Hg		70 cm Hg		76 cm Hg		Sat lenta		Sat Doble	
	Dr	C.V.	Dr	C.V.	Dr	C.V.	Dr	C.V.	Dr	C.V.
Corteza <0.3	1,39	1,03	1,57	2,08	1,67	1,71	1,61	1,50	1,71	1,29
Corteza >0.3	1,10	1,72	1,25	1,47	1,37	2,62	1,38	2,23	1,43	2,16
E. granulada	2,62	0,46	2,67	0,43	2,68	0,51	2,66	0,39	2,68	0,37
Lana escoria	2,34	4,33	2,64	1,83	2,84	2,36	2,64	3,52	2,79	2,70
Perlita B6	0,59	3,65	0,95	2,05	1,11	2,68	0,98	2,40	1,07	1,97
Turba TKS2	0,57	4,77	1,06	1,54	1,65	0,45	1,03	5,32	1,58	12,79

Tabla 30: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Valores de la densidad real ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y coeficientes de variación (%) obtenidos.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α
Modelo	29	77,3809	2,6683	924,74	0,0001
Sustrato	5	71,1555	14,2311	4932,00	0,0001
Mét sat	4	4,0247	1,0062	348,71	0,0001
Sus*Mét	20	2,2006	0,1100	38,13	0,0001
Error	120	0,3863	0,002885		
Total	149	77,7271			

$$R^2=0,9955 \quad C.V.=3,12 \quad \sqrt{(CME)}=0,0537$$

Tabla 31: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Análisis de varianza del valor de densidad real para todas las variantes de saturación consideradas en el ensayo, con 6 sustratos diferentes.

Como en ocasiones anteriores, la significación del efecto interacción obliga a un análisis en detalle. Como primera medida hemos tenido en cuenta que este trabajo consta, en realidad, de dos ensayos:

- Respuesta del valor obtenido a niveles de vacío crecientes
- Respuesta del valor obtenido a diferentes estrategias de saturación

En el primer caso, se consideran como fuentes de variación el sustrato y el vacío aplicado, con tres niveles de 60, 70 y 76 cm Hg, así como la interacción entre ambos. El factor nivel de vacío se considera como una variable continua. En el segundo caso, las fuentes de

variación consideradas son sustrato, método de saturación (normal, lenta o doble) y la interacción entre ambas. El vacío aplicado para la saturación ha sido en todos los casos de 70 cm Hg.

En la Tabla 32 se presentan los resultados del análisis de varianza correspondiente al primer caso y en la , los relativos a los distintos métodos de saturación. En ambos casos, el efecto interacción sigue siendo significativo, lo que obliga a un estudio detallado para cada sustrato.

Los valores de R^2 obtenidos en ambos casos (Tabla 32 y Tabla 36) son similares a los obtenidos para el conjunto de los datos (Tabla 31), lo que indica que se sigue manteniendo un elevado control de la variabilidad. Asimismo, los valores obtenidos para el coeficiente de variación y para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error son similares a los valores obtenidos para el conjunto de los datos, lo que indica que la precisión también es similar.

5.2.6.4.2.1 Respuesta a diferentes niveles de vacío

La significación del efecto interacción (Tabla 32) obliga a un análisis detallado. En función de los resultados obtenidos, este análisis puede abordarse de diferentes maneras (en casos anteriores se ha recurrido a la representación gráfica de los resultados). En este caso, hemos considerado más interesante analizar separadamente los datos correspondientes a cada sustrato. Teniendo en cuenta que tanto la variable independiente (vacío aplicado durante la saturación) como la variable dependiente (densidad real) son variables cuantitativas, el análisis que se debe aplicar es la regresión.

Se plantea la hipótesis de que la relación entre el vacío aplicado y el valor medido es lineal.

En la Tabla 33, se detallan los parámetros estadísticos correspondientes a la regresiones lineales estudiadas. En todos los casos, el ajuste de los datos a la recta es elevado ($\alpha < 0,01$). El valor de R^2 indica que un elevado porcentaje de la variabilidad de los datos se debe a la propia variación de la recta. Este valor sigue siendo elevado aún cuando se corrige en función de los grados de libertad (R^2 Ajustado). Respecto a la precisión, el valor del coeficiente de variación es inferior al 3%, salvo en el caso de la turba, que sube hasta el 10,40%. Como consecuencia de todo ello, podemos deducir que no se puede rechazar la hipótesis de que los valores de densidad obtenidos siguen una función lineal en relación al vacío aplicado durante la saturación.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α
Modelo	11	49,5512	4,5047	1307,63	0,0001
Vacío	1	3,0515	3,0515	885,80	0,0001
Sustrato	5	2,5447	0,5089	147,73	0,0001
Sus*Vacío	5	1,4589	0,2918	8470	0,0001
Error	78	0,2687	0,003445		
Total	89	49,8199			

$R^2=0,9946$ C.V.=3,51 $\sqrt{(CME)}=0,0587$

Tabla 32: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Análisis de varianza del valor de densidad real para la saturación simple.

En la Tabla 34 se presentan los valores de los parámetros a y b correspondientes al ajuste lineal de los resultados obtenidos, siendo a el término independiente y b la pendiente de la recta, es decir $D_r = a + b * \text{Vacío}$. Así mismo, se muestra el error de estima de cada uno de los parámetros y el nivel de significación (α).

La pendiente (b) presenta en todos los casos un nivel de significación $\alpha < 0,01$, lo que indica que el valor obtenido para la densidad real es función del vacío aplicado en todos los casos. El parámetro b corresponde al valor de esta variación para un incremento unitario del vacío aplicado. Cuanto mayor sea este parámetro, más sensible será el valor obtenido a la variación del vacío aplicado durante la saturación. En la Tabla 34 podemos observar que el menor valor de b corresponde a la escoria granulada. Las dos granulometrías de la corteza de pino presentan valores similares entre sí, y más elevados que el de la escoria granulada. Lana de escoria y perlita tienen valores similares entre sí, pero más elevados que los de las cortezas. Por último, el valor más elevado corresponde a la turba.

	α	$\sqrt{\text{CME}}$	Media	C.V.	R^2	R^2 Ajuste
Cor fina	0,0001	0,02544	1,54	1,64	0,9603	0,9573
Cor gruesa	0,0001	0,02866	1,24	2,31	0,9448	0,9406
E granulada	0,0001	0,01232	2,66	0,46	0,8235	0,8099
L Escoria	0,0001	0,07460	2,61	2,86	0,8963	0,8883
Perlita B6	0,0001	0,02355	0,88	2,66	0,9901	0,9894
Turba	0,0001	0,11371	1,09	10,40	0,9427	0,9383

Tabla 33: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Ajuste lineal, por sustrato, de los valores obtenidos en función del vacío aplicado. Parámetros estadísticos.

Los niveles de vacío que han intervenido en el ensayo oscilan entre 60 y 76 cm Hg. La diferencia de los valores obtenidos para los extremos del intervalo se obtiene multiplicando por 16 el valor de b . Esto proporciona una diferencia de $0,064 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el caso de la lana de escoria, $0,30$ y $0,28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para las cortezas fina y gruesa, respectivamente, $0,52$ y $0,56$ para la lana de escoria y para la perlita, y, finalmente, $1,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para la turba. Si bien la diferencia en el caso de la escoria granulada, aún siendo significativa, la podemos considerar despreciable para el intervalo de medida considerado, no ocurre lo mismo con el resto de los sustratos, siendo las diferencias especialmente elevadas en el caso de la turba.

	a	Error a	α_a	b	Error b	α_b
Cor fina	0,267665	0,07227795	0,0027	0,018689	0,00105335	0,0001
Cor gruesa	0,030808	0,08143381	0,7113	0,017707	0,00118678	0,0001
E granulada	2,38378	0,03499876	0,0001	0,003972	0,00051006	0,0001
L Escoria	0,371586	0,21194555	0,1031	0,032741	0,00308881	0,0001
Perlita B6	-1,519952	0,06689277	0,0001	0,035177	0,00097487	0,0001
Turba	-3,613362	0,32304131	0,0001	0,068877	0,00470787	0,0001

Tabla 34 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Ajuste lineal, por sustrato, de los valores obtenidos en función del vacío aplicado. Valores del término independiente (a) y la pendiente (b), errores de estima y nivel de significación.

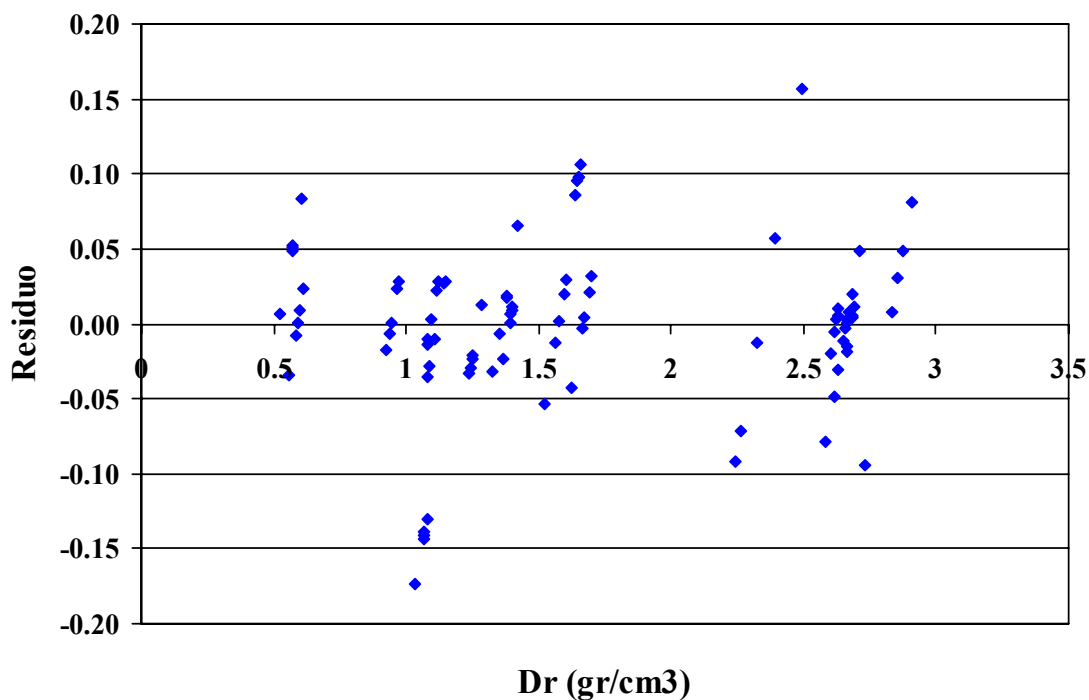


Figura 4 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Residuos de las regresiones lineales en función del valor de la densidad real

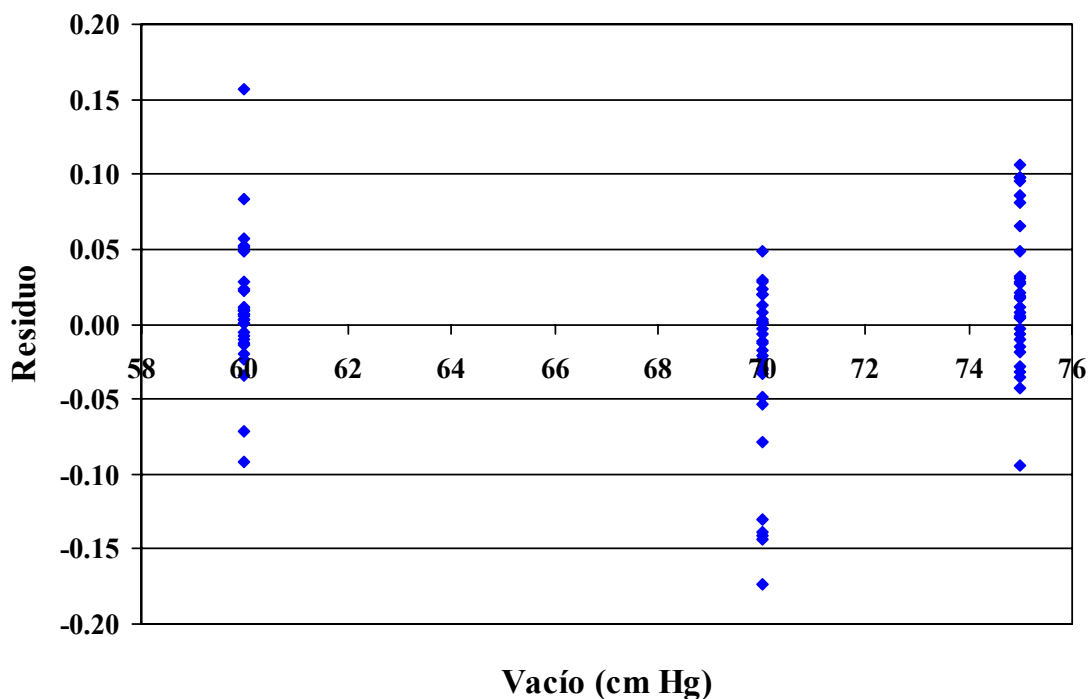


Figura 5: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Residuos de las regresiones lineales en función del vacío aplicado

Respecto al valor del término independiente (a), nos encontramos con tres tipos de valores.

En el caso de la escoria granulada, el valor del término independiente es muy elevado y constituye el componente principal del valor medido. La variación obtenida en el valor medido de la densidad real por incremento del valor del vacío aplicado es pequeño, en comparación con el valor del término independiente.

En el caso de lana de escoria, corteza fina y corteza gruesa, el valor del término independiente es próximo a cero, y sólo en el caso de la corteza fina la diferencia con este valor es significativa. Debe recordarse que la aplicación de los modelos experimentales se limita al intervalo en el que se ha realizado el ajuste. En este caso, el intervalo en cuestión oscila entre 60 y 76 cm Hg. En consecuencia, el valor próximo a cero del término independiente es una herramienta útil para calcular la densidad real en el intervalo entre 60 y 76 cm Hg, no permitiendo predecir el valor de la densidad real fuera de este intervalo, y, en consecuencia, de este resultado no se deduce que el valor de la densidad real de estos sustratos es próximo a cero cuando se satura sin aplicar vacío.

Finalmente, en el caso de la perlita y de la turba, el valor del término independiente es negativo. Los argumentos detallados en el punto anterior son de aplicación general, pero especialmente en este caso. Si no se aplica esta limitación, se llegaría al absurdo de obtener densidades reales negativas para valores de vacío inferiores a 40 y 50 cm Hg respectivamente.

El análisis de las regresiones lineales se completa con el estudio de los residuos (Valor Observado - Valor Calculado).

En la Figura 4 se representa la distribución de los residuos en función del valor de la densidad real. La representación gráfica presenta una distribución más o menos simétrica con respecto al valor cero para todo el intervalo de densidad real medido, por lo que cabe suponer que los valores obtenidos son igualmente fiables en todo el intervalo de densidad real.

Sustrato	Vacío aplicado expresado en cm de Hg		
	60	70	76
Corteza<3mm	0,001004	-0,00301	0,002008
Corteza>3mm	0,00626	-0,018782	0,012522
Escoria Granulada	-0,001338	0,004022	-0,00268
Lana de escoria	0,00744	-0,022318	0,014878
Perlita B6	-0,00194	0,005818	-0,003878
Turba TKS2	0,04838	-0,145142	0,096762

Tabla 35: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Saturación simple: Valores medios de los residuos para cada una de las combinaciones sustrato * vacío

No ocurre lo mismo en la Figura 5, en la que se representa el valor de los residuos en función del vacío aplicado durante la saturación. Se pueden apreciar claras asimetrías en los tres valores de vacío aplicados. En los valores extremos del intervalo, los residuos tienden a ser positivos, mientras que a 70 cm Hg (punto interior del intervalo) ocurre lo contrario y se presentan residuos claramente negativos. Para estudiar esta tendencia, se han obtenido los valores medios de los residuos para cada combinación sustrato * vacío, que se presentan en la

Tabla 35. A excepción de los casos de escoria granulada y perlita, estos valores medios son positivos para los valores extremos del intervalo, y negativos para el punto intermedio. En los casos mencionados de escoria granulada y perlita, se produce la situación contraria.

Un residuo positivo indica que el valor observado es mayor que el calculado, es decir el modelo infravalora el valor de la densidad real. Por lo tanto, deducimos que, en general, se observa una tendencia a infravalorar los valores en los extremos del intervalo, y a sobrevalorar en los puntos intermedios. La obtención de valores negativos para el término independiente de la regresión apunta en la misma dirección.

5.2.6.4.2.2 Respuesta a diferentes métodos de saturación

Al igual que en el caso anterior, el efecto interacción es significativo (Tabla 36) y también en este caso se ha recurrido al análisis estadístico de los resultados correspondientes a cada sustrato.

En este caso, la variable independiente no es cuantitativa sino cualitativa, por lo que se debe aplicar el análisis de varianza.

En la Tabla 37 se presenta el resultado de los análisis de varianza realizados con los datos de cada sustrato.

Las diferencias entre métodos son significativas para $\alpha < 0,01$ en los casos de las cortezas fina y gruesa, perlita y turba. La lana de escoria presenta un nivel de significación $0,01 < \alpha < 0,05$. En el caso de escoria granulada, las diferencias entre métodos no son significativas ($\alpha > 0,1$).

El valor de R^2 es inferior al valor obtenido en el análisis conjunto de los datos (Tabla 36). Resulta muy bajo el correspondiente a la lana de escoria (0,5177) y sobre todo el correspondiente a la escoria granulada (0,2247). Para el resto de los sustratos, el valor de R^2 oscila entre 0,84 y 0,90, y los podemos considerar como aceptables.

F. V.	G. L.	S. C.	C. M.	Valor F	α
Modelo	17	42,3541	2,4914	673,00	0,0001
Sustrato	5	41,1647	8,2330	2223,95	0,0001
Mét sat	2	0,5955	0,2977	80,42	0,0001
Sus*Mét	10	0,5939	0,0594	16,04	0,0001
Error	72	0,2665	0,003702		
Total	89	42,6207			
$R^2=0,9937$		C.V.=3,46	$\sqrt{(CME)}=0,0608$		

Tabla 36: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Análisis de varianza para distintos métodos de saturación por vacío. El vacío aplicado en todos los casos es de 70 cm Hg.

Los valores del coeficiente de variación son bajos ($CV < 3\%$), excepto en el caso de la turba, debido al elevado coeficiente de variación obtenido en la saturación doble de este sustrato.

El valor de la mínima diferencia significativa (MDS) es elevado para los casos de lana de escoria y turba (superiores a $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Los valores de la MDS son similares para las dos cortezas, y los valores más bajos corresponden a la perlita (0,029) y la escoria granulada (0,015)

Las dos cortezas y la perlita presentan unos valores óptimos para R^2 y C.V., con una MDS entre $0,03$ y $0,04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, que podemos considerar aceptable. La turba presenta un valor aceptable para R^2 , y un valor elevado para el C.V., consecuencia este último del elevado valor que toma $\sqrt{\text{CME}}$, consecuentemente, el valor de la MDS es también elevado. La lana de escoria presenta un valor aceptable del C.V. En este caso, cuando se calcula el C.V., el elevado valor de la densidad real enmascara el valor también elevado del $\sqrt{\text{CME}}$. Consecuencia directa de esto último es el valor que toma la MDS.

	α	R^2	CV	$\sqrt{\text{CME}}$	Media	MDS
Cor fina	0,0001	0,8576	1,64	0,0267	1,63	0,03676
Cor gruesa	0,0001	0,9013	2,02	0,0273	1,35	0,03760
E granulada	0,2171	0,2247	0,40	0,0105	2,67	0,01522
L Escoria	0,0126	0,5177	2,77	0,0754	2,69	0,1027
Perlita B6	0,0001	0,8832	2,14	0,0214	1,00	0,02946
Turba	0,0001	0,8430	9,90	0,1210	1,22	0,1667

Tabla 37: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Estudio de la interacción sustrato*método de saturación: Estudio de la interacción método*sustrato. Análisis de varianza por sustratos. Parámetros estadísticos

En el caso de la escoria granulada, las diferencias no son significativas, el valor de R^2 es muy bajo, y el modelo solo explica el 21,71% de la suma de cuadrados total. Con estos datos cabría pensar que, si bien las diferencias no son significativas, podrían llegar a serlo si en ensayos posteriores se consigue un mayor control de la variabilidad, aumentando el valor de R^2 . Sin embargo, el coeficiente de variación es muy bajo (0,40%), debido por una parte al elevado valor de la densidad real ($2,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y por otra, al valor de la $\sqrt{\text{CME}}$, que es el más bajo de los obtenidos para los diferentes sustratos. Esto tiene como consecuencia un valor también bajo para la MDS. Comparando con el resto de los sustratos, la escoria granulada presenta el valor más bajo para la MDS (Tabla 37), proporcionando, por lo tanto, el test más sensible de todos los casos estudiados.

Lo que refleja el análisis estadístico es que se controla un porcentaje bajo (21,71%) de una variabilidad que es también baja (la desviación estándar solo supone el 0,40% del valor de la media). El resultado de todo ello es una gran sensibilidad del test a las diferencias entre las medias ($0,015 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Aún con esta elevada sensibilidad, las diferencias entre los diferentes tratamientos no son significativas. Todo ello es debido a la baja variabilidad de los resultados obtenidos, que también la podemos ver en el valor de la suma de cuadrados total. Teniendo en cuenta que el planteamiento es el mismo para todos los ensayos, con el mismo número de repeticiones y de tipos de saturación, los valores de la suma de cuadrados obtenidos son comparables. El valor de la suma de cuadrados total en el caso de la escoria granulada es 0,0017224; para la perlita y las dos cortezas esta suma oscila entre 0,047 y 0,091. En el caso de la lana de escoria, es de 0,138 y, por último, para la turba, llega hasta 1,119. Estos datos ponen de manifiesto la gran homogeneidad de los datos obtenidos para la escoria granulada, en comparación con el resto de los sustratos. Por todo ello, podemos considerar que el análisis

estadístico realizado para la escoria granulada tiene una elevada fiabilidad a pesar del bajo valor de R^2 .

En la Tabla 38 se detallan los resultados del test de Duncan, de separación de medias aplicado a cada uno de los sustratos.

En la comparación entre la saturación normal y la saturación lenta, únicamente en el caso de la corteza gruesa la diferencia es significativa; la diferencia entre los valores medios correspondientes (0,13) supera ampliamente el valor de la mínima diferencia significativa (0,0376). En el resto de los sustratos, la diferencia entre estos dos tratamientos no supera en ningún caso el valor de la MDS correspondiente.

La saturación doble, por el contrario, proporciona valores de densidad real superiores a los obtenidos por los otros dos métodos. Las diferencias son significativas en todos los casos, excepto en la escoria granulada. Este último sustrato presenta unos valores prácticamente constantes, con independencia del método de saturación empleado. Hay que recordar que cuando se estudió la incidencia de los niveles de vacío en el valor obtenido, en el caso de este sustrato esta incidencia fue mínima.

De estos resultados se desprende que la metodología seguida para saturar el sustrato incide en el valor obtenido. Esta incidencia varía para los diferentes sustratos. La saturación lenta no aporta, en general, ninguna diferencia con respecto a la saturación simple rápida. La saturación doble, por el contrario, proporciona valores de la densidad real más elevados que los obtenidos por cualquiera de los dos tipos de saturación simples ensayados.

	Cor fina	Cor gruesa	E. gran.	L Escoria	Perlita B6	Turba
Sat doble	1,710 A	1,425 A	2,676 A	2,788 A	1,071 A	1,576 A
Sat lenta	1,606 B	1,382 B	2,665 A	2,642 B	0,976 B	1,027 B
Sat normal	1,573 B	1,252 C	2,666 A	2,641 B	0,948 B	1,063 B

Tabla 38: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación. Estudio de la interacción sustrato*método de saturación: Test de Duncan de separación de medias. En la columna correspondiente a cada sustrato, los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas.

Estos resultados muestran que la saturación lenta no aumenta la eficacia de la saturación sencilla, mientras que con la saturación doble se consigue un notable aumento en la eficacia de la sustitución -por agua- del aire atrapado en los poros del sustrato.

5.2.6.5 Conclusiones del ensayo

1. Los análisis de varianza realizados presentan un elevado control de la variabilidad y una alta precisión.
2. En todos los análisis de varianza en que intervienen dos factores de variación (sustrato y método de saturación o vacío aplicado durante el mismo), el efecto interacción presenta un nivel de significación $\alpha < 0,01$.
3. Respuesta a diferentes niveles de vacío
 - 3.1. Los valores de R^2 y CV descienden con respecto a los valores obtenidos para el conjunto global de los datos, pero tanto el control de la variabilidad como la precisión del análisis se mantienen dentro de niveles aceptables.
 - 3.2. La tendencia de los resultados obtenidos para cada sustrato se ajusta a una recta.

- 3.3. El valor de la pendiente de la recta presenta diferencias importantes entre los diferentes sustratos estudiados.
- 3.4. El modelo lineal infravalora la densidad real en los extremos del intervalo de niveles de vacío y la sobrevalora en los puntos intermedios. Una consecuencia de esto es la obtención de valores negativos para el término independiente.
- 3.5. El modelo lineal obtenido no es aplicable para determinar la densidad real cuando el vacío aplicado durante la saturación es inferior a 60 cm Hg.
4. Comparación de métodos de saturación
 - 4.1. El control de la variabilidad y la precisión del análisis se mantiene dentro de niveles aceptables.
 - 4.2. La saturación lenta no presenta diferencias con respecto a la saturación normal.
 - 4.3. La saturación doble supone un aumento de la eficacia de la saturación, que se refleja en un aumento del valor obtenido para la densidad real.
5. La incidencia de los métodos de saturación y de los niveles de vacío empleados en este ensayo presentan grandes diferencias entre los sustratos ensayados. Esta incidencia es máxima para la turba, mientras que es prácticamente nula en la escoria granulada.

5.2.7 Incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación doble por vacío

5.2.7.1 Introducción

5.2.7.1.1 Antecedentes

En el ensayo precedente se ha estudiado el ajuste lineal de la densidad en función del vacío aplicado. Se ha evaluado, además, la incidencia de las nuevas variantes metodológicas en la eficacia de la saturación.

Los parámetros estadísticos del ajuste lineal no permiten descartar esta hipótesis. Sin embargo, el análisis de los residuos indican que el ajuste lineal puede no ser correcto, por lo que es necesario buscar alternativas a esta hipótesis. Respecto a los métodos de saturación, la doble saturación proporciona una mayor eficacia en la sustitución del aire contenido en los poros por agua.

En este ensayo, se estudia la incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación doble. Los datos correspondientes a la saturación simple del ensayo anterior se incluyen como referencia. El indicador empleado es, al igual que en los otros casos, el valor de la densidad obtenido como cociente entre el peso seco y el volumen de la muestra saturada, medido por desplazamiento de agua.

5.2.7.2 Objetivo

Los objetivos que se plantea en este ensayo son:

- Evaluar la incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación doble.
- Buscar una alternativa al modelo de ajuste lineal de la densidad en función del vacío aplicado durante la saturación.

5.2.7.3 Material y métodos

5.2.7.3.1 *Planteamiento estadístico*

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación, método de saturación (3 niveles) y sustrato (6 niveles). El número de repeticiones es cinco.

Los tres niveles considerados en el método de saturación son: la saturación simple correspondiente al ensayo anterior y dos tandas de saturación doble .

5.2.7.3.1.1 Sustratos

Los sustratos empleados en este ensayo son:

- Corteza de pino fina (<3 mm)
- Corteza de pino gruesa (>3 mm)
- Turba *Sphagnum* rubia
- Perlita B6
- Escoria granulada
- Lana de escoria

5.2.7.3.1.2 Métodos de saturación

Se compara la eficacia de la saturación simple con la saturación doble. Los problemas surgidos la primera vez que se aplicó la saturación doble, obligaron a repetir esta variante. Se presentan los resultados de ambos procesos de saturación.

5.2.7.3.1.3 Niveles de vacío durante la saturación

El vacío aplicado para saturar las muestras ha sido 60, 70 y 76 cm de mercurio, en el caso de la saturación simple. En la saturación doble, se han hecho dos remesas. La primera saturación en ambas remesas se hace a 70 cm de mercurio. El vacío aplicado en la segunda saturación es 60, 70 y 76 cm de mercurio en una remesa, y 50, 60 y 70 cm de mercurio en la otra.

5.2.7.3.2 *Metodología*

El valor de la densidad real se obtiene por aplicación del principio de Arquímedes, siguiendo la metodología descrita en 5.2.3.3.2.2, pero saturando las muestras por vacío, siguiendo la metodología descrita en 5.2.4.3.2.3 con las variantes consideradas en 5.2.6.3.2.

5.2.7.4 Resultados y discusión

5.2.7.4.1 *Medida de la densidad real*

En la Tabla 39 se detallan los valores obtenidos para la densidad real en todos los tratamientos considerados, así como los respectivos coeficientes de variación.

Los coeficientes de variación obtenidos son, en general, bajos. De los 54 casos considerados (6 sustratos * 3 métodos de saturación * 3 niveles de vacío en cada método), en 39 casos (72.22%) el coeficiente de variación es inferior al 3%, en 6 casos (11.11%) el coeficiente

de variación está comprendido entre el 3 y el 5%, y en 9 casos (16.67%) el coeficiente de variación supera el 5%.

Los sustratos que presentan un coeficiente de variación más bajos son la escoria granulada y la corteza >3mm, mientras que la lana de escoria y la perlita B6 presentan los valores más elevados.

Respecto a los niveles de vacío, el coeficiente de variación es, en general, más bajo cuanto más profundo es el vacío aplicado durante la saturación.

Por último, y respecto a los métodos de saturación empleados, la saturación simple presenta unos valores bajos para el coeficiente de variación, como ya se ha explicado en el ensayo anterior. El primer ensayo, en el que se aplica la saturación doble, refleja una elevada variabilidad de los datos. Estos valores descienden cuanto se repite el ensayo (2ª saturación doble).

El primer ensayo, en el que se aplica la saturación doble, la variabilidad de los datos es, en general, elevada. En algunas ocasiones se observan valores similares para todas las repeticiones, excepto para un valor. Es el caso de la saturación a 60 cm Hg de escoria granulada, lana de escoria y perlita B6, con coeficientes de variación 21.99%, 29.98% y 32.57%, respectivamente. La eliminación de un dato fuera de tipo en cada uno de los casos tiene como consecuencia el descenso del valor del coeficiente de variación a 2,02%, 18,90% y 18,01%, respectivamente (Tabla 39) que, aun siendo importantes, únicamente en el caso de la escoria granulada baja hasta niveles aceptables.

Aun en el caso de no considerar válidos estos datos, la variabilidad de este primer ensayo con doble saturación sigue siendo elevada. De los 9 casos en los que el coeficiente de variación es mayor del 5%, 6 corresponden a este primer ensayo con doble saturación. Cuando la saturación se hace a 60 cm Hg, son cuatro los sustratos en los que el coeficiente de variación supera esta cifra; cuando se hace a 70, son dos. Cuando la saturación se hace a 76 cm Hg, los valores del coeficiente de variación están muy por debajo del 1%, excepto en el caso de la perlita B6. Esta elevada variabilidad, resta fiabilidad a los datos obtenidos, circunstancia que deberá tenerse en cuenta en el momento de obtener las conclusiones.

En el segundo ensayo realizado con saturación doble, la variabilidad de los datos obtenidos es menor que en el caso anterior. Los datos fuera de tipo que se presentaban en el anterior, no se dan en este caso. La perlita B6 es el único sustrato en el que el coeficiente de variación supera el 5%. En el intervalo 3-5% solo se presenta un valor (Turba 70 cm Hg), el resto de los valores del coeficiente de variación son inferiores al 3%. La fiabilidad de los resultados obtenidos es, en consecuencia, mayor que en el caso del primer ensayo realizado con saturación doble. En relación a la saturación simple, la variabilidad es en general menor, salvo casos como la perlita y la corteza >3 mm saturada a 60 cm de mercurio. Teniendo en cuenta los problemas que se han presentado en la primera saturación doble, podemos considerar a la segunda como más representativa y concluir que la variabilidad de la saturación doble es menor que la de la saturación sencilla.

Los valores medios obtenidos para la densidad real son mayores cuanto mayor sea el vacío aplicado durante la saturación. Se separan claramente de esta tendencia los datos de la 2ª saturación doble para la Perlita B6, y de la 1ª saturación doble de la lana de escoria. En la Tabla 39 se observa que en el caso de la perlita B6 se dan los coeficientes de variación más elevados en la 2ª saturación doble; en el caso de la lana de escoria en la 1ª saturación doble,

5.2 Trabajo experimental: Accesibilidad

los coeficientes de variación para las saturaciones a 60 y 70 cm Hg superan el 15%. Estos elevados valores de los coeficientes de variación indican que los datos obtenidos son poco precisos.

Sustrato	Vacío cm Hg	Saturación simple		1ª saturación doble		2ª saturación doble	
		Media	C.V.	Media	C.V.	Media	C.V.
Corteza <3 mm	50					1.68	1.05
	60	1.39	0.92	1.48	17.56	1.69	2.08
	70	1.57	2.08	1.69	1.33	1.70	0.87
	76	1.67	1.57	1.74	0.68		
Corteza >3 mm	50					1.34	1.88
	60	1.10	1.43	1.34	2.85	1.42	1.40
	70	1.24	1.96	1.37	1.31	1.50	0.70
	76	1.37	2.75	1.43	0.40		
Escoria gran.	50					2.65	0.67
	60	2.62	0.46	2-38-2.61*	21.99-2.02*	2.66	0.32
	70	2.67	0.43	2.71	4.02	2.69	0.17
	76	2.68	0.46	2.64	0.24		
Lana de escoria	50					2.60	2.89
	60	2.34	4.24	2.71-3.00*	29.98-18.90*	2.75	0.99
	70	2.64	1.83	2.50	15.41	2.76	1.78
	76	2.84	1.94	2.86	0.26		
Perlita B6	50					0.96	10.75
	60	0.58	3.84	0.44-0.49*	32.57-18.01*	0.81	5.04
	70	0.95	2.05	1.06	6.37	1.16	5.22
	76	1.11	2.68	1.07	3.23		
Turba	50					1.50	2.99
	60	0.57	4.77	1.54	9.07	1.61	4.03
	70	1.06	1.54	1.59	2.50	1.54	0.92
	76	1.65	0.43	1.61	0.62		

Tabla 39: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Valores de la densidad real y coeficientes de variación obtenidos en el ensayo 5.2.7. Incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la saturación doble por vacío.

* El primer valor se ha obtenido con todos los datos del ensayo, y en el segundo valor se ha desestimado un dato fuera de tipo

En los casos de la 1ª saturación doble de la escoria granulada y de la segunda saturación doble de la turba, el valor correspondiente al punto intermedio del intervalo es ligeramente superior al valor de la densidad real obtenido para el vacío más profundo. Finalmente, en el caso de la 1ª saturación doble de la perlita, el valor obtenido en la saturación a 60 cm Hg parece anormalmente bajo, pudiendo tener una explicación en la imprecisión derivada del elevado coeficiente de variación observado en este caso.

5.2.7.4.2 *Diferencias entre valores de la densidad real para niveles sucesivos de vacío*

En la Tabla 40 se presentan las diferencias entre los valores de la densidad real obtenidos para dos niveles sucesivos de vacío. Los valores representados en cada nivel de vacío corresponden a la diferencia entre los valores de D_r correspondientes al nivel de vacío correspondiente y el anterior.

Respecto a los sustratos, las mayores diferencias se presentan en el caso de Perlita y Turba y los menores en la escoria granulada. Las diferencias para esta última, en el peor de los casos, llega a 0,1 para la 1ª saturación doble, con 70 cm Hg de vacío.

En el caso de la Corteza >3 , el valor de 0,1 se sobrepasa en la saturación simple para 70 y 76 cm Hg. En la corteza <3 , esta diferencia se sobrepasa en las saturaciones simple y 1ª doble para un vacío de 70 cm Hg. La 2ª saturación doble proporciona unas diferencias menores, que en ningún caso llegan a 0,1

En los casos de la Lana de escoria, Perlita y Turba, las diferencias entre dos niveles sucesivos de vacío son más elevadas. La saturación simple supera, en todos los casos, el valor 0,1, alcanzando los máximos en el caso de la Turba, con diferencias en torno a 0,5, superando este valor para el caso de la diferencia entre los valores obtenidos a 70 y 76 cm Hg. La primera saturación doble presenta diferencias del mismo orden de magnitud que en el caso de la saturación simple. En el caso de la 1ª saturación doble, los máximos son también del orden de 0,5 y se dan para lana de escoria y perlita B6 para las diferencias entre los valores obtenidos a 60 y 70 cm de Hg. La 2ª saturación doble presenta, en estos sustratos, unas diferencias menores que los otros dos métodos empleados. Aún así, las diferencias entre las densidades obtenidas a 50 y 60 cm Hg superan siempre el valor 0,1.

Las diferencias entre las densidades medidas a 60 y 70 cm Hg son inferiores a 0,1 para la lana de escoria y turba, pero supera el 0,3 en el caso de la perlita B6.

Las diferencias de hasta 0,5 que se obtienen en los casos de la saturación simple y 1ª saturación doble, no se pueden admitir en ningún caso como error de estimación. Para obtener en estos casos un valor fiable de D_r , es necesario saturar con un nivel de vacío muy profundo, cuya diferencia con el vacío absoluto sea de unos pocos milibares. En el caso de la 2ª saturación doble, las diferencias son menores, pero se presenta un caso (perlita) en el que la diferencia de 0,3 entre los dos valores de D_r corresponden a los mayores vacíos empleados. Esta diferencia no se puede asumir como posible error de estima, por lo que para tener unas mínimas garantías de que el valor obtenido corresponde al de la D_r de la materia seca, es necesario alcanzar los niveles de vacío comentados para los casos anteriores.

Las diferencias obtenidas en la saturación doble son menores que las obtenidas para la saturación simple. Sin embargo, estas diferencias siguen siendo más elevadas de lo que se puede asumir razonablemente como error. Por otra parte, las diferencias son muy variables y dependen

posiblemente del manejo de la muestra (diferencias entre 1ª y 2ª saturación doble) y de las características de los sustratos.

Como consecuencia, la obtención de una medida directa de la D_r de un sustrato aplicando la metodología objeto de estudio, requiere la saturación de la muestra a un vacío profundo, cuya diferencia de presión con el vacío absoluto sea de unos pocos milibares. Para ello, se requiere la utilización de máquinas de alto vacío.

Sustrato	Vacío Aplicado cm Hg	Saturación simple	1ª saturación doble	2ª saturación doble
Corteza <3	50			
	60			0.01
	70	0.18	0.21	0.01
	76	0.1	0.05	
Corteza >3	50			
	60			0.08
	70	0.14	0.03	0.08
	76	0.13	0.06	
Escoria granulada	50			
	60			0.01
	70	0.05	0.1	0.03
	76	0.01	0.07	
Lana de escoria	50			
	60			0.15
	70	0.3	0.5	0
	76	0.2	0.36	
Perlita B6	50			
	60			0.15
	70	0.37	0.57	0.35
	76	0.16	0.01	
Turba TKS2	50			
	60			0.11
	70	0.49	0.05	0.07
	76	0.59	0.02	

Tabla 40: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Diferencias entre dos valores consecutivos de la densidad real. Los vacíos de saturación corresponden a 50, 60, 70 y 76 cm de mercurio

5.2.7.4.3 *Análisis estadístico de la densidad real*

En el punto anterior se ha puesto de manifiesto la dificultad de obtener una medida directa de la D_r empleando niveles de vacío fácilmente accesibles. Una alternativa es estudiar la tendencia de los valores obtenidos y, a partir de ella, calcular el valor correspondiente de D_r .

En el análisis estadístico de la variable densidad real (D_r) se han considerado los tres factores de variación, así como sus respectivas interacciones. De los tres factores considerados, dos de ellos, sustrato y método de saturación, son variables cualitativas, y uno, el nivel de vacío, es variable cuantitativa. En el análisis estadístico se tienen en cuenta estas circunstancias, y el nivel de vacío se trata como covariable.

5.2.7.4.3.1 Análisis estadístico considerando los tres factores

El análisis de los datos, considerando los tres factores de variación, presenta un valor de $R^2 = 0,9756$ y $C.V. = 6,59$. Esto indica un elevado control de la variabilidad del ensayo (97.56% de la suma total de cuadrados) y un nivel aceptable del coeficiente de variación. El nivel de significación es $\alpha < 0,01$ para todas las fuentes de variabilidad, es decir, cada uno de los tres factores de variación considerados, sus interacciones dobles y la interacción triple. La fuente que aporta más variabilidad es el factor sustrato, que supone por sí solo el 89.93% de la suma total de cuadrados.

5.2.7.4.3.2 Análisis estadístico para cada método de saturación

Dado que los efectos interacción son significativos, es necesario repetir el análisis para cada uno de los niveles de cada factor. De los tres factores considerados, uno, el nivel de vacío aplicado durante la saturación es cuantitativo, y el desglose por niveles no tiene sentido. Las dos combinaciones de factores restantes son Vacío * Sustrato y Vacío * Método de saturación. El estudio de la primera requiere el análisis estadístico para cada uno de los métodos de saturación; para estudiar la segunda, se debe hacer un análisis estadístico para cada uno de los sustratos. El ensayo se ha desarrollado en tres etapas, correspondiendo cada una de ellas a uno de los métodos de saturación. En cada una de estas tres etapas se ha trabajado con todos los sustratos y con los niveles de vacío correspondientes, pudiendo considerarlas como unidades en sí mismas. Es por ello que consideramos más oportuno estudiar las combinaciones Vacío * Sustrato para cada uno de los métodos de saturación empleados.

Los resultados de estos análisis se detallan en la Tabla 41. La variabilidad total de los datos, medida como suma de cuadrados, disminuye considerablemente cuando en lugar de saturar una sola vez se hace una doble saturación a vacío. Si comparamos la saturación simple con la 2ª saturación doble, observamos que este descenso de la variabilidad se debe a un descenso considerable del SC Modelo, mientras que SC Error aumenta ligeramente, manteniéndose en el mismo orden de magnitud. La 1ª saturación doble presenta un valor de SC Modelo superior a la 2ª saturación doble, e inferior a la saturación simple, pero la característica fundamental es el elevado valor de la SC Error, que en este caso es de un orden de magnitud claramente superior a los dos casos anteriores.

El valor de R^2 es muy elevado ($R^2 > 0.99$) para la saturación simple y 2ª saturación doble. El valor obtenido para la 1ª saturación doble es sensiblemente inferior a las anteriores, manteniéndose por encima de 0.90.

El valor de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (Raíz CME) es de un orden de magnitud similar para la saturación simple y para la 2ª saturación doble, y aumenta considerablemente en el caso de la 1ª saturación doble.

El coeficiente de variación obtenido para la densidad real en saturación simple y en la 2ª saturación doble son bajos (entre 3 y 4%), y aumenta considerablemente en el caso de la 1ª saturación doble.

Estos valores ponen de manifiesto los problemas surgidos en el desarrollo de los trabajos de laboratorio durante la primera saturación doble y justifican la repetición del ensayo para obtener los datos de segunda saturación doble.

Respecto al nivel de significación, la probabilidad de error de tipo α es inferior a 0,01, y por lo tanto muy significativo en todos los casos considerados, excepto en el caso de la interacción Vacío * Sustrato en la 2ª saturación doble, cuyo nivel de significación es $\alpha=0,0381$ (significativo).

	Saturación simple	1ª saturación doble	2ª saturación doble
SC Modelo	56.5965	38.8797	33.5227
SC Error	0.2412	2.7056	0.3186
R ²	0.9958	0.9349	0.9906
Raíz CME	0.0509	0.1912	0.0665
Media	1.6775	1.80	1.8647
C.V.	3.03	10.62	3.57
Vacío (Pr α)	0.0001	0.0008	0.0001
Sustrato (Pr α)	0.0001	0.0001	0.0001
Vacío *Sustrato (Pr α)	0.0001	0.0020	0.0381

Tabla 41: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Resultado del análisis estadístico del valor obtenido para la densidad real, para las combinaciones Vacío * Sustrato para cada método de saturación.

La diferencia en la variabilidad total observada en los diferentes métodos de saturación puede ser debida bien a una mayor diferencia entre los valores medios de los tratamientos considerados en el ensayo, o bien, a un aumento en las diferencias entre las distintas repeticiones de un mismo tratamiento. El primer caso tiene como consecuencia un aumento de la SC Modelo, mientras que el segundo aumenta el valor de SC Error. El aumento de la SC Modelo tiene como consecuencia un aumento del control de la variabilidad del ensayo, que se refleja en el aumento del valor R². El aumento de SC Error tiene el efecto contrario en el control de la variabilidad, pero además aumenta la imprecisión de los resultados obtenidos, que se refleja en un aumento de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) y de los intervalos de confianza.

La diferencia más importante entre la saturación sencilla y la doble está en el valor de la suma de cuadrados del modelo (Tabla 41), que baja desde 56,60, para la saturación simple, a menos de 40, para las saturaciones dobles. Este descenso se debe, si tenemos en cuenta lo explicado en el párrafo anterior, al descenso de las diferencias entre los valores medios de los

tratamientos. De esto se deduce que el valor de la densidad real es menos sensible a las variaciones del sustrato y/o del nivel de vacío durante la saturación, cuando se hace doble saturación que cuando se hace saturación simple.

Los indicadores del control de la variabilidad y de la sensibilidad del ensayo son similares para la saturación simple y para la 2ª saturación doble. En el caso de la 1ª saturación doble, estos indicadores son menos favorables. El control de la variabilidad del ensayo (R^2) es ligeramente superior para la saturación simple que para la 2ª saturación doble, consecuencia del mayor valor de la Suma de Cuadrados Modelo y del ligero descenso de la Suma de Cuadrados Error. El valor ligeramente inferior de la Suma de Cuadrados Error para la saturación simple tiene como consecuencia un valor menor de la Raíz CME y, como consecuencia, de la MDS y de los intervalos de confianza, es decir, una mayor precisión.

En el caso de la 1ª saturación doble, el descenso del control de la variabilidad (R^2) es consecuencia del aumento de la Suma de Cuadrados Error. El valor de este último, muy superior a los otros dos casos considerados, es también la causa del mayor valor de la Raíz CME, y, en consecuencia, de la menor sensibilidad del test, que se manifiesta en el mayor valor de la MDS y de los intervalos de confianza.

Como consecuencia podemos decir que, en términos generales, la saturación simple y la 2ª saturación doble tienen una elevada fiabilidad por el elevado control de la variabilidad y por la precisión alcanzada en ambos casos. La fiabilidad de la 1ª saturación doble es menor que las anteriores debido a un menor control de la variabilidad y a una menor precisión de los resultados obtenidos, por lo que los datos de esta 1ª saturación doble no se tendrán en cuenta en los análisis posteriores.

Finalmente, hay que considerar que la significación del efecto interacción refleja, como ya se ha dicho en repetidas ocasiones, que los sustratos no tienen un comportamiento uniforme con respecto al vacío, lo que obliga a un análisis del comportamiento de la variable D_r con respecto al vacío, para cada uno de los sustratos y métodos de saturación.

5.2.7.4.3.3 Análisis estadístico de las combinaciones sustrato * método de saturación

Considerando los resultados del análisis anterior, se ha procedido a realizar el análisis de los datos obtenidos para cada sustrato en cada uno de los métodos de saturación empleados. Las dos variables consideradas en el análisis, densidad real y nivel de vacío, son cuantitativas, por lo que el análisis considerado es la regresión lineal, con el nivel de vacío como variable independiente y la densidad como variable dependiente. Los parámetros estadísticos obtenidos en estas regresiones lineales se detallan en la Tabla 42.

La variabilidad, medida como suma de cuadrados, es considerablemente más elevada para los análisis correspondientes a la saturación simple que para los correspondientes a la saturación doble. El desglose de la suma de cuadrados total en sus componentes permite una interpretación más clara de los resultados obtenidos. En la Tabla 42, se detallan los valores de Suma de Cuadrados Modelo y Suma de Cuadrados Error, cuya suma corresponde a la Suma de Cuadrados Total.

El valor de Suma de Cuadrados Error es, aproximadamente, del mismo orden de magnitud en los casos de saturación simple y de saturación doble. Por el contrario, la Suma de Cuadrados Modelo es considerablemente más elevada en el caso de la saturación simple.

La similitud de los valores de la Suma de Cuadrados Error indica que las diferencias entre las distintas repeticiones de un mismo tratamiento son, en líneas generales, similares. El aumento de valor de la Suma de Cuadrados Modelo indica que las diferencias entre los valores de D_r obtenidos para distintos niveles de vacío son más elevadas en el caso de la saturación simple que en el caso de la saturación doble.

El aumento de la Suma de Cuadrados Modelo, junto con el mantenimiento de la Suma de Cuadrados Error, tiene como consecuencia un aumento importante del valor de R^2 . El mantenimiento del valor de Suma de Cuadrados Error tiene como consecuencia unos valores similares de \sqrt{CME} , y por lo tanto, de la sensibilidad del test. Como consecuencia, el valor del coeficiente de variación también se mantiene dentro de un orden de magnitud similar. El ligero aumento que se produce en el caso de la saturación simple, se debe en parte al menor valor obtenido para el valor medio de la densidad real.

Saturación doble						
Sustrato	Prob α	SC Modelo	SC Error	R^2	\sqrt{CME}	C.V.
Corteza <3mm	0,2231	0,00095	0,00689	0,1209	0,02396	1,42
Corteza >3mm	0,0001	0,06951	0,00456	0,9289	0,01872	1,32
E. granulada	0,0001	0,00500	0,00166	0,7508	0,01176	0,44
L. de escoria	0,0014	0,06438	0,05142	0,5560	0,06286	2,33
Perlita B6	0,1682	0,05093	0,20408	0,1997	0,15058	15,67
Turba	0,3043	0,00440	0,00385	0,0809	0,06201	4,00

Saturación simple						
Sustrato	Prob α	SC Modelo	SC Error	R^2	\sqrt{CME}	C.V.
Corteza <3mm	0,0001	0,24760	0,00863	0,9663	0,2398	1,55
Corteza >3mm	0,0001	0,26321	0,00087	0,9412	0,02943	2,37
E. granulada	0,0001	0,00949	0,00212	0,8173	0,01231	0,46
L. de escoria	0,0001	0,89913	0,08654	0,9122	0,07135	2,74
Perlita B6	0,0001	0,81590	0,01116	0,9865	0,02823	3,26
Turba	0,0001	3,11469	0,11634	0,9640	0,09116	8,08

Tabla 42: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación: Parámetros estadísticos correspondientes a las regresiones lineales entre densidad (variable dependiente) y nivel de vacío (variable independiente), para los diferentes sustrato para los casos de saturación doble (2^a) y saturación simple.

Considerando conjuntamente todos estos valores, en el caso de la saturación simple tenemos unos valores elevados de R^2 , junto con valores bajos del coeficiente de variación. Es decir, se presentan conjuntamente un elevado control de la variabilidad y una elevada precisión, con lo que los resultados obtenidos los podemos considerar como muy fiables. Únicamente en los casos de la perlita y turba, los coeficientes de variación son algo más elevados. El nivel de significación es, para todos los sustratos, $\alpha < 0,01$, lo que indica que no se puede desechar la hipótesis del ajuste lineal entre la densidad real y el nivel de vacío aplicado durante la saturación.

En el caso de la saturación doble, la precisión de los tests realizados es, así mismo, buena. Al igual que en el caso anterior, las excepciones son la perlita y la turba, sobre todo la primera con un coeficiente de variación de 15,67%. El valor de R^2 es bajo. Como se ha visto anteriormente, este descenso se debe al descenso del valor de Suma de Cuadrados Modelo, debido a la disminución de las diferencias de D_r para los diferentes niveles de vacío, es decir, el valor de D_r es menos sensible que en el caso anterior a las variaciones del vacío aplicado durante la saturación. Dado que la sensibilidad de los análisis se mantiene en niveles similares a los del caso anterior, podemos considerar que, al igual que en la saturación simple, los análisis realizados son igualmente fiables.

Los valores obtenidos en la saturación doble para el nivel de significación son $\alpha > 0,1$ (no significativo) para la Corteza > 3 mm, Escoria granulada y Lana de escoria. El nivel de significación es $\alpha < 0,01$ (significativo) para la Corteza > 3 mm, Perlita B6 y Turba. En los tres últimos casos, no se puede desechar la hipótesis de linealidad, pero en los tres primeros esta hipótesis queda claramente descartada.

En este caso, las diferencias son significativas para la Corteza > 3 mm, Escoria granulada y Lana de escoria. En estos casos, los valores de \sqrt{CME} y C.V. son similares para las saturaciones simple y doble. En los casos de la Corteza < 3 mm, Perlita B6 y Turba, las diferencias no son significativas. En el caso de la Corteza < 3 mm y Turba, la \sqrt{CME} es menor que en el caso de la saturación simple, y, en el caso de la corteza, considerablemente menor. Esto indica que la sensibilidad del tests es mayor que en el caso de la saturación simple y, sin embargo, las diferencias no son significativas. La única explicación lógica es que las diferencias entre los tratamientos son menores, hecho que se puede comprobar por el importante descenso que se da en la Suma de Cuadrados Modelo. El caso de la perlita es diferente, se da un descenso importante de la Suma de Cuadrados Modelo y un aumento considerable de Suma de Cuadrados Error, con lo que disminuye el control de la variabilidad y la precisión del test. La falta de significación no nos permite afirmar que, en este caso, el valor de D_r sea función lineal del vacío aplicado, pero, a diferencia de los dos casos anteriores, cabe la posibilidad de que si se diseña un ensayo que aumente la sensibilidad, se puede obtener la mencionada respuesta lineal.

5.2.7.4.4 *Incidencia del aire atrapado en el proceso de medida*

La hipótesis lineal entre el valor de la densidad, medida por desplazamiento de fluidos, y el vacío aplicado durante la saturación ha quedado descartada, al menos en algunos casos.

En 5.2.6.4.2.1 se ha visto que, con los datos obtenidos con saturación simple, los parámetros estadísticos de ajuste no permiten desechar la hipótesis de linealidad. Sin embargo, el comportamiento de los residuos ponen en duda esta hipótesis. En el caso de saturación doble (5.2.7.4.3.3), y en tres de los seis sustratos considerados, los parámetros estadísticos hacen rechazar la hipótesis de linealidad.

El rechazo de la hipótesis lineal obliga a buscar otro modelo, para explicar el comportamiento de la saturación del sustrato en función del nivel de vacío aplicado. Consecuencia de no poder aplicar el vacío absoluto, es que queda una cierta cantidad de aire residual, que incide en la medida de volúmenes. La búsqueda de un modelo alternativo al lineal pasa por el estudio del comportamiento de este aire residual

5.2.7.4.4.1 Comportamiento del aire residual atrapado

Una parte de la porosidad de un sustrato está constituida por poros intraparticulares, comunicados con el exterior. Estos poros pueden estar ocupados por aire. Si este es el caso, cuando la muestra se sumerge en agua se produce un cierre hidráulico del poro, quedando el aire atrapado en su interior. Si después de la inmersión se produce una variación de presión, el volumen del aire atrapado varía siguiendo la ley de los gases perfectos de Boyle - Mariotte y de Gay - Lussac . Si la presión disminuye, el volumen de aire aumenta, éste es superior al volumen del poro y, como consecuencia, se evacua al exterior el volumen de aire excedentario. Si por el contrario, la presión aumenta, el volumen de aire disminuye ocupando un volumen inferior al del poro, y la diferencia entre el volumen del poro y el volumen de aire final es ocupado por el agua exterior.

En nuestro caso, la inmersión se produce en condiciones de vacío y posteriormente se vuelve paulatinamente a la presión atmosférica. En consecuencia, una vez que se produce el cierre hidráulico del poro, tiene lugar un aumento de presión, una disminución de volumen y una ocupación parcial del poro por agua, quedando un cierto volumen de aire atrapado. El volumen medido por el método es igual al volumen ocupado por el material sólido más el volumen de aire atrapado.

Siendo:

- P_1 = Presión del aire durante la saturación, en valor absoluto.
- P_0 = Presión atmosférica, en valor absoluto.
- V_1 = Volumen de poros ocupado por aire a la presión P_1 después de sumergir la muestra en agua.
- V_0 = Volumen de poros ocupado por aire cuando se vuelva a la presión atmosférica (presión P_0) en la muestra sumergida en agua.

En el momento que se sumerge la muestra en agua, se cumple:

$$(162) \quad P_1 \times V_1 = n \times R \times T$$

Admitimos la hipótesis de que durante el proceso de vuelta a la presión atmosférica, la temperatura y la cantidad de aire en el interior de los poros permanecen constantes. En este caso, al final del proceso se cumple:

$$(163) \quad P_0 \times V_0 = n \times R \times T$$

Igualando ambas ecuaciones y operando se obtiene:

$$(164) \quad V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0}$$

Es decir, el volumen de aire atrapado en los poros de un sustrato es proporcional al cociente entre los valores absolutos de la presión de saturación y la presión atmosférica. Si a esta relación la denominamos x , la expresión (164) queda:

$$(165) \quad V_0 = V_1 \times x$$

En condiciones normales de trabajo se cumple $0 \leq x \leq 1$. En el hipotético caso de poder alcanzar el vacío absoluto, $P_1=0 \Rightarrow x=0 \Rightarrow V_0 = 0$. Si por el contrario, la saturación se lleva a

cabo a presión atmosférica $P_1=P_0 \Rightarrow x=1$. Es decir, si la saturación se lleva a cabo en condiciones de vacío absoluto, el volumen de aire que queda atrapado en los poros es cero, lo cual es coherente puesto que corresponde a una situación en la que se ha extraído todo el aire. Si la saturación se realiza a presión atmosférica, el volumen de aire atrapado al final del proceso corresponde al volumen de poros que quedan con aire en el momento de la saturación.

5.2.7.4.4.2 Incidencia en la medida de la densidad real

Considerando que el volumen total medido (V_t) es igual a la suma del volumen ocupado por el material sólido (V_{ms}) más el volumen de aire residual (V_0), y si denominamos P_s al peso seco de la muestra, el valor medido de la densidad real viene dado por la expresión:

$$(166) \quad Dr = \frac{P_s}{V_t} = \frac{P_s}{V_{ms} + V_0}$$

Sustituyendo en (166) V_0 por su valor de (165), el valor de la densidad real viene dado por la expresión:

$$(167) \quad \boxed{Dr = \frac{P_s}{V_{ms} + V_1 \times x}}$$

Cuanto mayor sea el vacío aplicado para saturar el sustrato, menor será el valor de x y el denominador de la ecuación (167), y, en consecuencia, mayor será el valor obtenido para la densidad real. El incremento de la densidad real con respecto al vacío aplicado viene dado por la derivada de Dr con respecto a x , que obtenemos a partir de la misma ecuación (167):

$$(168) \quad \boxed{\frac{dDr}{dx} = -\frac{P_s \times V_1}{(V_{ms} + V_1 \times x)^2}}$$

La pendiente es negativa, es decir el valor de Dr es menor cuanto mayor sea x , como ya hemos deducido de la fórmula anterior. El denominador de la fracción aumenta con el cuadrado de x . En consecuencia, el valor absoluto de la fracción es mayor cuanto menor es x , es decir cuanto más profundo es el vacío aplicado. Esto va en contra de la hipótesis implícita en nuestro planteamiento de trabajo, según la cual, y a partir de un nivel determinado de vacío, la disminución de la densidad real es cada vez menor, lo que nos hubiera permitido estimar su valor con un error suficientemente pequeño.

Si el numerador y el denominador de las ecuaciones (167) y (168) los dividimos por V_{ms} y V_{ms}^2 , respectivamente, obtendremos el valor medido para la densidad real en función de Dr_{ms} , V_1/V_{ms} , y x :

$$(169) \quad \boxed{Dr = \frac{Dr_{ms}}{1 + \frac{V_1}{V_{ms}} \times x}}$$

$$(170) \quad \boxed{\frac{dDr}{dx} = \frac{Dr_{ms} \times \frac{V_1}{V_{ms}}}{\left(1 + \frac{V_1}{V_{ms}} \times x\right)^2}}$$

Donde:

- $Dr_{ms} = \frac{P_s}{V_{ms}}$ es el cociente entre el peso seco y el volumen ocupado por la materia seca, es decir, el valor de la densidad real en sentido estricto.
- $\frac{V_1}{V_{ms}}$ es una característica propia de la estructura del sustrato. Se puede asimilar a la relación entre el volumen de poros internos y el volumen ocupado por el material sólido.
- $x = \frac{P_1}{P_0}$ corresponde, como ya se ha dicho, a la relación entre la presión absoluta de saturación (P_1) y la presión atmosférica, también en términos absolutos (P_0).

La ecuación (169) relaciona el valor de densidad medido por inmersión y el vacío aplicado durante la saturación. La sustitución de esta relación por una lineal, como hemos hecho hasta ahora, supone una aproximación que puede ser válida en un intervalo de valores determinado, pero fuera de él, los errores derivados de esta sustitución pueden llegar a no ser asumibles. En la Figura 6 y Figura 7 se han representado las ecuaciones (169) y (170), respectivamente. En ellas se observa lo siguiente:

1. La pendiente es tanto mayor cuanto más nos acercamos al vacío absoluto ($x=0$), como ya habíamos predicho en el estudio de la derivada (Figura 7).
2. El aumento de la pendiente es tanto mayor cuanto mayor es la relación V_1/V_{ms} (Figura 7).
3. Cuando $V_1=0$, el valor medido es independiente del vacío aplicado durante la saturación ($y=I=\text{constante}$) (Figura 6).
4. Cuando la relación V_1/V_{ms} es baja, la pendiente varía muy poco (Figura 7), y la evolución de Dr se aproxima a una recta (Figura 6). En estos casos, los datos experimentales obtenidos para el intervalo $0 \leq x \leq 1$ pueden ajustarse bien a una recta.
5. Si el intervalo de trabajo ($x=P_1/P_0$) es lo suficientemente estrecho, puede obtenerse un buen ajuste lineal de los datos. Si la amplitud del intervalo de x es menor que 0.1, se obtendrá un buen ajuste lineal, incluso para valores elevado de la relación V_1/V_{ms} .

Inicialmente nos planteamos el objetivo de encontrar un valor de vacío que nos proporcione un valor de Dr suficientemente próximo a Dr_{ms} para poder asumirlo como error. Los puntos 1 y 2 indican que los incrementos en el valor de la Dr medida, son más importantes cuanto más nos acerquemos al vacío absoluto y cuanto más elevada sea la relación V_1/V_{ms} . Para la mayor parte de los sustratos, este método es inaplicable, puesto que la relación V_1/V_{ms} es, en general, elevada y desconocida.

En los casos de los materiales en que la porosidad intraparticular es baja o nula, es previsible que el valor V_1/V_{ms} sea próximo a cero. En estos casos (puntos 3 y 4), se podría considerar válida la hipótesis. El valor de la densidad real se puede obtener, en estos casos, con una buena aproximación, saturando a diferentes niveles de vacío, y aproximándose lo mas posible al vacío absoluto. El valor de la densidad real corresponde al término independiente del ajuste lineal de los datos experimentales.

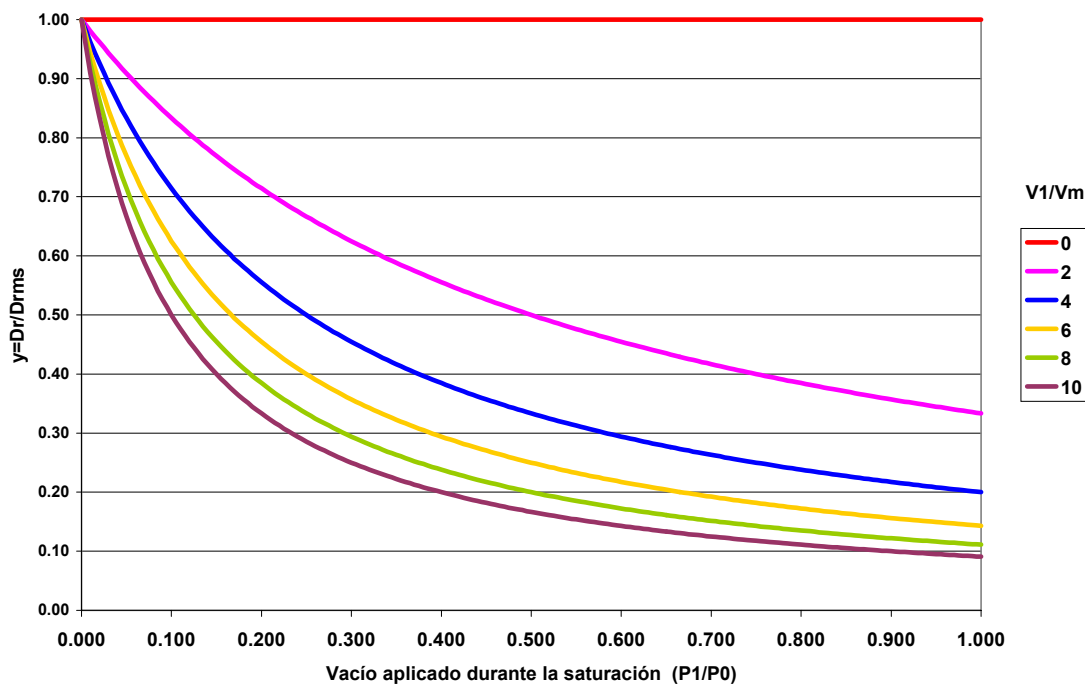


Figura 6 : Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación por vacío: Ecuación (169): Evolución del valor medido para la densidad real (D_r) ($y= D_r/D_{rms}$) en función del vacío aplicado ($x=P_1/P_0$) y de la relación V_1/V_{ms} . El valor medido para la densidad real se obtiene multiplicando la ordenada y por D_{rms} , correspondiente al valor de la densidad obtenida para el supuesto de que el volumen de aire atrapado es cero.

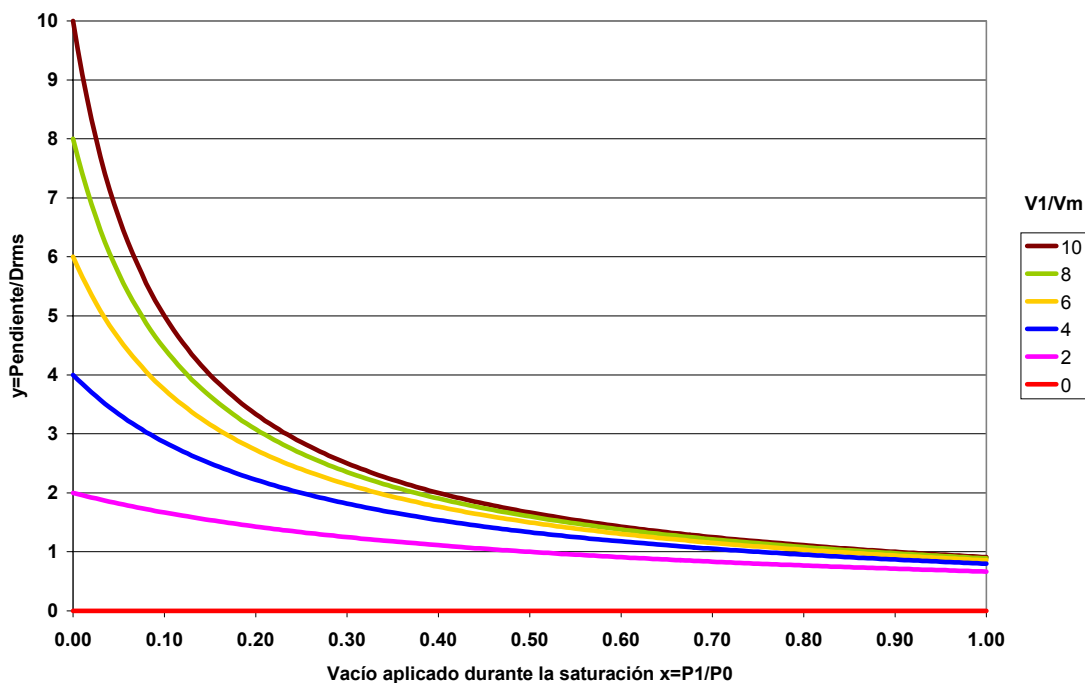


Figura 7: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de diferentes estrategias de saturación por vacío: Ecuación (170): Evolución de la pendiente de la densidad real (D_r) ($y=Pendiente/D_{rms}$) en función del vacío aplicado ($x=P_1/P_0$) y de la relación V_1/V_{ms} .

Cuando el intervalo de medida es suficientemente pequeño (punto 5), el ajuste lineal de los datos experimentales puede ser bueno. En este caso, el término independiente de la recta es un estimador de Dr_{ms} , estimador que será tanto mejor cuanto más próximo a cero sea el intervalo de x . La pendiente de la recta obtenida se corresponde con la pendiente media del intervalo de medida de la curva correspondiente de la Figura 6. La recta obtenida se corresponderá, aproximadamente, con una secante a la curva en el intervalo de medida considerado, su pendiente será tanto más elevada (en valor absoluto) cuanto más próximo a cero sea el intervalo, y cuanto más elevada sea la relación V_1/V_{ms} .

En consecuencia, disponemos de un modelo conceptual dado por la ecuación (169), válido para el intervalo $0 \leq x \leq I$, y un modelo lineal, válido para un intervalo estrecho de medida. El modelo lineal Sirve como aproximación al modelo conceptual en el intervalo de medida considerado. El error de este modelo lineal es igual a la diferencia entre los valores obtenidos con ambos modelos, para un mismo valor de x . Esta diferencia es pequeña y asumible como error en el intervalo de medida, pero se hace cada vez mayor cuando nos alejamos en uno u otro sentido de este intervalo de medida.

La aplicación del modelo lineal fuera del intervalo de medida para el que se ha ajustado, puede dar lugar a resultados absurdos. Si el intervalo considerado corresponde a un vacío profundo, y el valor V_1/V_{ms} es elevado, la pendiente es negativa y con un elevado valor absoluto. El término independiente de la recta es <0 , llegando al absurdo de obtener un valor negativo para la densidad real si la saturación se hubiera hecho a presión atmosférica.

Esta situación se presenta en el ensayo 5.2.6, Factores que inciden en la eficacia de la saturación por vacío: nivel de vacío, saturación lenta y saturación doble.. El valor del término independiente para la Perlita B6 y la Turba son negativos (Tabla 34). En aquella ocasión se tomó como variable independiente el vacío aplicado, tomando como origen la presión atmosférica; el vacío absoluto corresponde, en ese caso, a 76 cm Hg. Si extendemos la validez de este modelo lineal, el valor correspondiente a vacío=0 (saturación a presión atmosférica) proporciona un valor negativo para la densidad real, que evidentemente no se ajusta a la realidad.

5.2.7.4.4.3 Volumen específico. Modelo lineal

La ecuación (167) corresponde a un modelo no lineal del valor de Dr medido. Este modelo se ha obtenido a partir de la ecuación (166). Si calculamos la relación inversa a la ecuación (166), se obtiene:

$$(171) \quad \frac{1}{Dr} = \frac{V_t}{P_s} = \frac{V_{ms} + V_0}{P_s}$$

La inversa de la densidad corresponde al volumen por unidad de peso, por lo que lo denominamos Volumen específico (Ve). Sustituyendo en (171) V_0 por su valor de (165), la expresión (171) queda:

$$(172) \quad Ve = \frac{1}{Dr} = \frac{V_{ms}}{P_s} + \frac{V_1}{P_s} \times x$$

El valor V_{ms}/P_s , corresponde al volumen de material sólido por unidad de peso. La ecuación (172) queda finalmente como:

$$(173) \quad Ve = Ve_{ms+} + \frac{V_1}{P_s} \times x$$

Esto proporciona una respuesta lineal del volumen específico medido (Ve) con respecto a la presión aplicada durante la saturación (x). Por lo tanto, el término independiente del ajuste lineal de los valores experimentales del volumen específico (V/P_s) proporciona una estimación directa del volumen específico del material sólido para el caso en el que el volumen de aire atrapado es cero. La pendiente de este mismo ajuste lineal proporciona la estimación directa del volumen de aire atrapado en el interior de los poros provocado por el cierre hidráulico del mismo durante la inmersión del material poroso en el agua.

La fiabilidad de la estimación de estos dos parámetros depende:

1. Del número de puntos intermedios considerados en el intervalo de medida: Incide en ambos parámetros.
2. De la proximidad del intervalo de medida al valor $x=0$: Incide en la fiabilidad del término independiente.
3. De la amplitud del intervalo: Incide en la fiabilidad de la pendiente.

5.2.7.4.4 Tratamiento de los datos del ensayo

Con este nuevo planteamiento, hemos vuelto a tratar los mismos datos experimentales. Se aplica el modelo lineal con la variable x definida anteriormente como variable independiente y el volumen específico como función. El valor del volumen específico se obtiene para cada repetición a partir de los datos experimentales originales.

5.2.7.4.5 Volumen específico

En la Tabla 43 se detallan los valores obtenidos para el volumen específico en todos los tratamientos considerados, así como los respectivos coeficientes de variación

Como se ha visto en el apartado 5.2.7.4.4, la variable independiente del modelo lineal P_1/P_0 . El desarrollo del modelo lineal ha sido posterior al ensayo y consecuencia del estudio de sus resultados. La medida de esta variable no se tuvo en cuenta en el diseño del ensayo. La variable empleada para medir el vacío ha sido, en unos casos, la presión diferencial con la presión atmosférica medida como cm Hg, y en otros (máquina de alto vacío), la presión absoluta, pero en ningún caso, se tomó el valor de la presión atmosférica con el que calcular el valor P_1/P_0 . Se pueden obtener estimaciones más o menos fiables del valor de P_1 que permitan hacer el cambio de variable, como los datos disponibles en estaciones meteorológicas próximas. Sin embargo, no se ha considerado esta posibilidad porque consideramos que, en una primera aproximación, el empleo de la medida del vacío disponible es suficiente. En ensayos posteriores, la unidad de medida de vacío a considerar es P_1/P_0 , por lo que se tomará el dato de presión atmosférica medida en el laboratorio en el momento de hacer la saturación.

El valor del volumen específico se obtiene en cada dato experimental como la inversa de la densidad real; ambos valores están, por tanto, relacionados. El valor medio del volumen específico no coincide exactamente con $1/Dr$, lógico puesto que la inversa de la media no es igual a la media de las inversas. Si comparamos el valor medio del volumen específico (Tabla 43) con el valor inverso a la correspondiente densidad real obtenida en la Tabla 39, la diferencia es, en general, menor de 0.01 y sólo en un caso esta diferencia es superior a 0.02.

5.2 Trabajo experimental: Accesibilidad

Sustrato	Vacío	Saturación simple		1ª saturación doble		2ª saturación doble	
		cm ³ *g ⁻¹	%	cm ³ *g ⁻¹	%	cm ³ *g ⁻¹	%
Corteza <3mm	50					0,59	1,04
	60	0,72	0,93	0,69	18,96	0,59	2,05
	70	0,64	2,10	0,59	1,33	0,59	0,88
	76	0,60	1,59	0,57	0,68		
Corteza >3mm	50					0,75	1,90
	60	0,91	1,43	0,75	2,94	0,71	1,41
	70	0,80	1,96	0,73	1,31	0,67	0,70
	76	0,73	2,74	0,70	0,40		
Escoria granulada	50					0,38	0,67
	60	0,38	0,46	0,44-0,38*	31,04-2,05*	0,38	0,32
	70	0,38	0,43	0,37	3,87	0,37	0,17
	76	0,37	0,46	0,38	0,24		
Lana de escoria	50					0,39	2,86
	60	0,43	4,18	0,40-0,34*	36,58-20,24*	0,36	0,99
	70	0,38	1,81	0,41	16,32	0,36	1,75
	76	0,35	1,97	0,35	0,26		
Perlita B6	50					1,05	9,86
	60	1,71	3,85	2,56-2,08*	43,68-16,98*	1,24	5,13
	70	1,05	2,05	0,95	6,85	0,86	5,28
	76	0,90	2,68	0,94	3,26		
Turba	50					0,67	3,00
	60	1,76	4,87	0,65	9,24	0,62	3,91
	70	0,94	1,57	0,63	2,56	0,65	0,92
	76	0,61	0,43	0,62	0,62		

Tabla 43: Saturación de sustratos por vacío. Volumen específico obtenido como valor inverso de la densidad real: Valor medio (cm³*g⁻¹) y coeficiente de variación (%) obtenidos para las diferentes combinaciones método*sustrato. * El primer valor se ha obtenido con todos los datos del ensayo, en el segundo valor se ha desestimado un valor fuera de tipo

Respecto a los coeficientes de variación, los valores obtenidos para el volumen específico están estrechamente relacionados con los coeficientes de variación obtenidos para la densidad real correspondiente. Como se ha visto anteriormente (Tabla 39), los valores del coeficiente de variación para la densidad real son >3% en 39 casos, entre 3-5% en 6 casos, y >5% en los 9

casos restantes. Esta relación se repite exactamente en el caso del volumen específico. La diferencia entre el coeficiente de variación obtenido para el volumen específico y el correspondiente de la densidad real es $<0,1$ cuando el valor del coeficiente de variación es $<3\%$. Cuando el coeficiente de variación está entre 3 y 5%, la diferencia entre los valores correspondientes a D_r y V_e está entre 0,1 y 0,15. En los casos en los que el coeficiente de variación está por encima del 5%, la diferencia puede llegar hasta 0,5, si el coeficiente de variación es inferior a 10%; por encima de este valor, la diferencia oscila entre 1 y 1.5.

Dadas las similitudes entre los resultados obtenidos para D_r y para V_e , podemos hacer extensivo al caso del volumen específico, los argumentos detallados en 5.2.7.4.1 para la densidad real.

5.2.7.4.6 *Análisis estadístico del volumen específico*

Al igual que en el caso del análisis de D_r , en el análisis estadístico de la variable volumen específico se han considerado los tres factores de variación, así como sus respectivas interacciones. De los tres factores considerados, dos de ellos, sustrato y método de saturación, son variables cualitativas, y uno, el nivel de vacío, es variable cuantitativa. En el análisis estadístico se tiene en cuenta esta circunstancia y el nivel de vacío se trata como covariable.

5.2.7.4.6.1 Análisis estadístico considerando los tres factores

El análisis de los datos considerando los tres factores de variación, presenta un valor de $R^2 = 0.9553$ y $C.V. = 11.70$. Esto indica un elevado control de la variabilidad el ensayo (95.53% de la suma total de cuadrados), aunque ligeramente inferior al caso de D_r . El coeficiente de variación es superior al obtenido en el caso de D_r . El nivel de significación α es menor que 0.01 para todas las fuentes de variabilidad, es decir, para cada uno de los tres factores de variación considerados, sus interacciones dobles y la interacción triple. Al igual que en el caso de D_r , la fuente que aporta más variabilidad es el factor sustrato, aunque su incidencia es menor que en el caso de D_r , pasando del 89.93% al 60.26% de la suma total de cuadrados (Suma de Cuadrados tipo I).

5.2.7.4.6.2 Análisis estadístico para cada método de saturación

La argumentación desarrollada para el caso de la densidad real es también válida para el caso del volumen específico (5.2.7.4.3.2). Por las mismas razones que allí se detallan, también en este caso se ha realizado el análisis de varianza para cada uno de los métodos de saturación empleados. Los resultados de estos análisis se detallan en la Tabla 44.

El comportamiento de los parámetros considerados es, en líneas generales, igual al detallado para la densidad real, aunque se presentan algunas diferencias, que son necesarias señalar.

El comportamiento de las sumas de cuadrados es similar al observado para la densidad real, aunque se presentan algunas diferencias. Los valores de las Sumas de Cuadrados son inferiores para V_e . La diferencia de la Suma de Cuadrados correspondiente a la segunda saturación doble aumenta con respecto a los otros dos tratamientos considerados. La Suma de Cuadrados de la 1ª saturación doble, que para la D_r era similar a la de la 2ª, ahora está claramente distanciada, quedando en una situación intermedia entre ésta y la saturación sencilla.

Los valores de R^2 son menores que para D_r .

	Saturación simple	1 ^a saturación doble	2 ^a saturación doble
SC Modelo	16,6608	10,6393	4,1418
SC Error	0,1733	1,0845	0,2598
R ²	0,9897	0,9075	0,9410
Raíz CME	0,0432	0,1211	0,0601
Media	0,7498	0,6689	0,6083
C.V.	5,75	18,10	9,8742
Vacío (Pr>F)	0,0001	0,0001	0,0005
Sustrato (Pr>F)	0,0001	0,0001	0,0001
Vacío *Sustrato (Pr>F)	0,0001	0,0001	0,1162

Tabla 44: Saturación de sustratos por vacío. Volumen específico obtenido como valor inverso de la densidad real: Análisis de varianza de la combinación Vacío * Sustrato para cada método de saturación

Sustrato	Saturación doble					
	Prob >F	SC Modelo	SC Error	R ²	√CME	C.V.
Corteza <3 mm	0,2171	0,00012	0,00082	0,1239	0,00827	1,40
Corteza >3 mm	0,0001	0,01487	0,00130	0,9195	0,01001	1,42
E. granulada	0,0001	0,00010	0,000033	0,7477	0,00167	0,45
L. de escoria	0,0015	0,00128	0,00103	0,5527	0,00892	2,40
Perlita B6	0,2527	0,04124	0,24851	0,1423	0,16617	15,57
Turba	0,2608	0,00086	0,00807	0,0961	0,02492	3,86

Sustrato	Saturación simple					
	Prob >F	SC Modelo	SC Error	R ²	√CME	C.V.
Corteza <3mm	0,0001	0,04623	0,00158	0,9670	0,01025	1,57
Corteza >3mm	0,0001	0,11741	0,00519	0,9577	0,01653	2,04
E. granulada	0,0001	0,00019	0,000043	0,8174	0,00175	0,47
L. de escoria	0,0001	0,02101	0,00243	0,8963	0,01196	3,09
Perlita B6	0,0001	2,03034	0,09973	0,9532	0,08440	6,74
Turba	0,0001	3,75527	0,06429	0,9832	0,06777	6,32

Tabla 45 : Saturación de sustratos por vacío. Volumen específico obtenido como valor inverso de la densidad real: Parámetros estadísticos correspondientes a las regresiones lineales entre volumen específico (variable dependiente) y nivel de vacío (variable independiente), para los diferentes sustrato para los casos de saturación doble (2^a) y saturación simple

Los valores de \sqrt{CME} son similares a los obtenidos para Dr, con la única excepción de la 1ª saturación doble, que en el caso de Ve es inferior al obtenido para Dr. Consecuencia de esta similitud, y del menor valor de la media, es el aumento del coeficiente de variación.

Respecto al nivel de significación, la situación es similar a la que se presenta en Dr. La única diferencia se da en el caso de la interacción vacío * sustrato para la 2ª saturación doble. El nivel de significación en el caso de Dr era $\alpha=0.0381$, mientras que en el caso de Ve es $\alpha=0.1162$. Por lo tanto, el efecto interacción no es significativo.

La argumentación desarrollada en el caso de Dr sobre el reparto de la variabilidad entre las Suma de Cuadrados Modelo y Suma de Cuadrados Error, las consecuencias en la MDS, la R^2 , la escasa fiabilidad de la 1ª saturación doble, así como la necesidad de hacer el análisis para cada una de las combinaciones sustrato * método de saturación, son de plena aplicación en este caso. La única diferencia viene dada por la no significación del efecto interacción en la segunda saturación doble. Esto indica que el comportamiento del valor de Ve con respecto al vacío aplicado en la saturación es similar para todos los sustratos estudiados. Por lo tanto, el estudio se puede acometer de forma conjunta para todos los sustratos. Sin embargo, y con objeto de obtener los valores correspondientes a cada sustrato, también en este caso es oportuno hacer el análisis de regresión para cada uno de los sustratos.

5.2.7.4.6.3 Regresión lineal de Ve con respecto al vacío aplicado durante la saturación, para cada una de las combinaciones sustrato * método de saturación

Al igual que en el caso de Dr (5.2.7.4.3.3), se ha procedido a realizar el análisis de regresión lineal de los datos obtenidos para cada sustrato, en cada uno de los métodos de saturación empleados. La variable independiente es el vacío aplicado durante la saturación y la variable dependiente es el valor obtenido para el volumen específico. Los parámetros estadísticos obtenidos en estas regresiones lineales se detallan en la Tabla 45.

El comportamiento de las sumas de cuadrados es similar al caso de Dr, con la salvedad de que la diferencia entre la Suma de Cuadrados Modelo de la saturación doble y de la saturación simple, aún siendo importantes, son menores que en el caso de Dr.

Los valores obtenidos para R^2 , coeficiente de variación y nivel de significación, son similares a los obtenidos en el caso de la densidad real, por lo cual es de aplicación la argumentación allí detallada.

5.2.7.4.7 Comparación de los dos modelos

Los parámetros estadísticos considerados no aportan grandes diferencias entre los dos modelos lineales considerados. La representación gráfica de los valores obtenidos puede aportar información adicional sobre las posibles diferencias entre ambos modelos y de éstos con los valores experimentales. La variable dependiente considerada es distinta para cada modelo, pero ambas están relacionadas por la ecuación (172).

En las Tabla 46 y Tabla 47 se facilitan los valores de los parámetros que definen las rectas obtenidas en las regresiones lineales para las variables Dr y Ve, respectivamente. También se facilitan los correspondientes errores de estima y el nivel de significación.

Sustrato	Saturación doble					
	a			b		
	Estimado	E. estándar	α	Estimado	E. estándar	α
Corteza <3 mm	1,630358	0,0479765	0,0001	0,001030	0,00080200	0,2231
Corteza >3 mm	0,955404	0,0358464	0,0001	0,007714	0,00059798	0,0001
E. granulada	2,534013	0,0225406	0,0001	0,002237	0,00037200	0,0001
L. de escoria	2,217274	0,0124237	0,0001	0,008024	0,00198873	0,0014
Perlita B6	0,453714	0,3415568	0,2168	0,008585	0,00572890	0,1682
Turba	1,425602	0,1187475	0,0001	0,002098	0,00196105	0,3043

Sustrato	Saturación simple					
	a			b		
	Estimado	E. estándar	α	Estimado	E. estándar	α
Corteza <3	0,323537	0,05909898	0,0001	0,017793	0,00085747	0,0001
Corteza >3	0,103868	0,06564404	0,1301	0,016516	0,00094745	0,0001
E. granulada	2,402695	0,03222712	0,0001	0,003672	0,00046408	0,0001
L. de escoria	0,448107	0,16283344	0,0136	0,031421	0,00236418	0,0001
Perlita B6	-1,423724	0,07184285	0,0001	0,033576	0,00104947	0,0001
Turba TKS2	-3,470331	0,23862208	0,0001	0,066527	0,00343626	0,0001

Tabla 46: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Parámetros de la regresión lineal de D_r en función del vacío aplicado durante la saturación, para cada sustrato y método de saturación

El nivel de significación del término independiente (a) y de la pendiente (b) indican la probabilidad de que sean distintos de cero. El nivel de significación de b coincide con el nivel de significación del modelo (ver Tabla 42 y Tabla 46 para D_r , y Tabla 45 y Tabla 47 para V_e). Esto es lógico, puesto que la relación lineal entre la variable dependiente y la independiente viene dada por la pendiente de la recta, es decir, por el valor de b . En el caso de la saturación simple, el parámetro b presenta un nivel de significación $\alpha < 0,01$ para las dos variables dependientes analizadas, es decir, la pendiente es $\neq 0$, y por lo tanto, los valores de D_r y V_e son función del vacío aplicado durante la saturación. En el caso de la saturación doble y para las dos variables dependientes consideradas, el nivel de significación de b es $\alpha < 0,01$ para la Corteza >3 mm, escoria granulada y lana de escoria, y $\alpha > 0,1$ para la corteza <3 mm Perlita B6 y Turba.

La Tabla 46 y Tabla 47 proporcionan los valores de los parámetros de los ajustes lineales de D_r y V_e , respectivamente. Ambas variables están relacionadas por la ecuación (172). Esto nos permite calcular las equivalencias entre ambos modelos y compararlos entre sí.

El modelo lineal de V_e viene dado por la expresión:

$$(174) \quad V_e = a_v + b_v \times x$$

El modelo lineal de D_r viene dado por la expresión:

$$(175) \quad Dr = a_d + b_d \times x$$

A partir de (174) y teniendo en cuenta (172), podemos calcular el valor equivalente de Dr derivado del modelo lineal de Ve :

$$(176) \quad Dr_{Ve} = \frac{1}{a_v + b_v \times x}$$

Los símbolos empleados en las ecuaciones (174), (175) y (176) son:

- a_v y b_v corresponden al término independiente y la pendiente del ajuste lineal de Ve
- a_d y b_d corresponden al término independiente y la pendiente del ajuste lineal de Dr
- Dr_{Ve} es el valor obtenido para Dr a partir del modelo lineal de Ve
- Dr es el valor obtenido para Dr a partir del modelo lineal de Dr

Saturación doble						
Sustrato	a			b		
	Estimado	E. estándar	α	Estimado	E. estándar	α
Corteza <3	0,612698	0,01655656	0,0001	-0,000361	0,00027677	0,2171
Corteza >3	0,937956	0,01916269	0,0001	-0,003856	0,00031646	0,0001
E. granulada	0,393675	0,00319584	0,0001	-0,000314	0,00005274	0,0001
L. de escoria	0,438764	0,01707454	0,0001	-0,001130	0,00028198	0,0015
Perlita B6	1,522640	0,37690699	0,0029	-0,007726	0,00632782	0,2527
Turba TKS2	0,701076	0,04770899	0,0001	-0,000926	0,00078789	0,2608

Saturación simple						
Sustrato	a			b		
	Estimado	E. estándar	α	Estimado	E. estándar	α
Corteza <3	1,179237	0,02526061	0,0001	-0,007688	0,00036651	0,0001
Corteza >3	1,572373	0,03686719	0,0001	-0,011030	0,00053211	0,0001
E. granulada	0,412642	0,00458963	0,0001	-0,000523	0,00006609	0,0001
L. de escoria	0,716633	0,02729397	0,0001	-0,004803	0,00039628	0,0001
Perlita B6	4,861352	0,21477024	0,0001	-0,052965	0,00313734	0,0001
Turba TKS2	6,122326	0,17739145	0,0001	-0,073048	0,00255451	0,0001

Tabla 47: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Parámetros de la regresión lineal de Ve en función del vacío aplicado durante la saturación, para cada sustrato y método de saturación

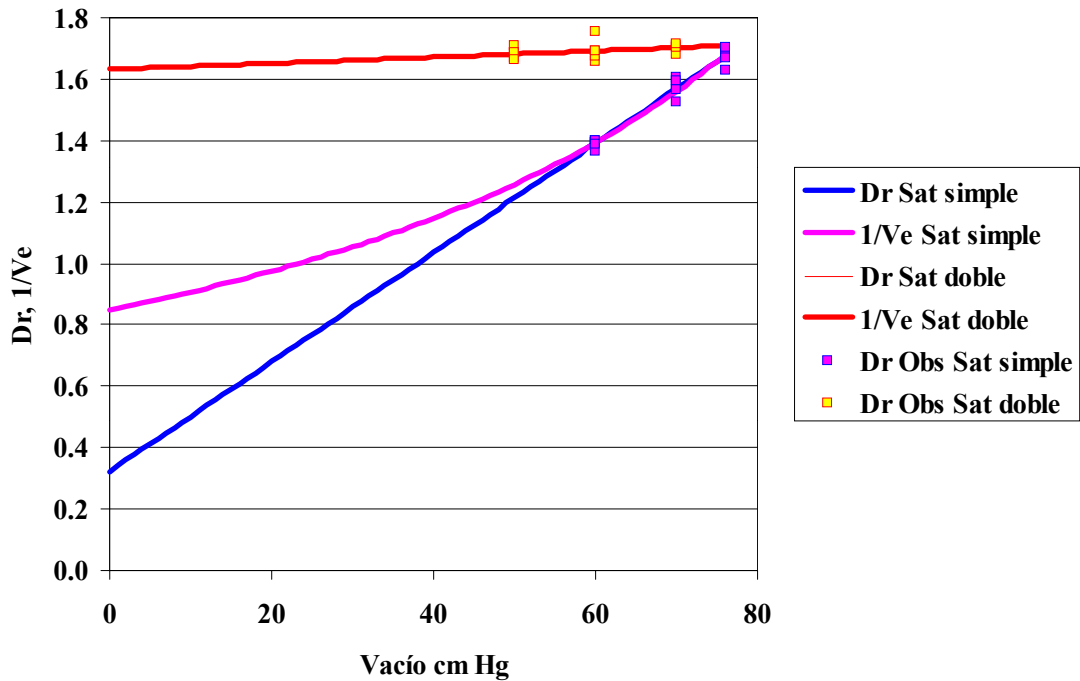


Figura 8: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Corteza <3 mm. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos

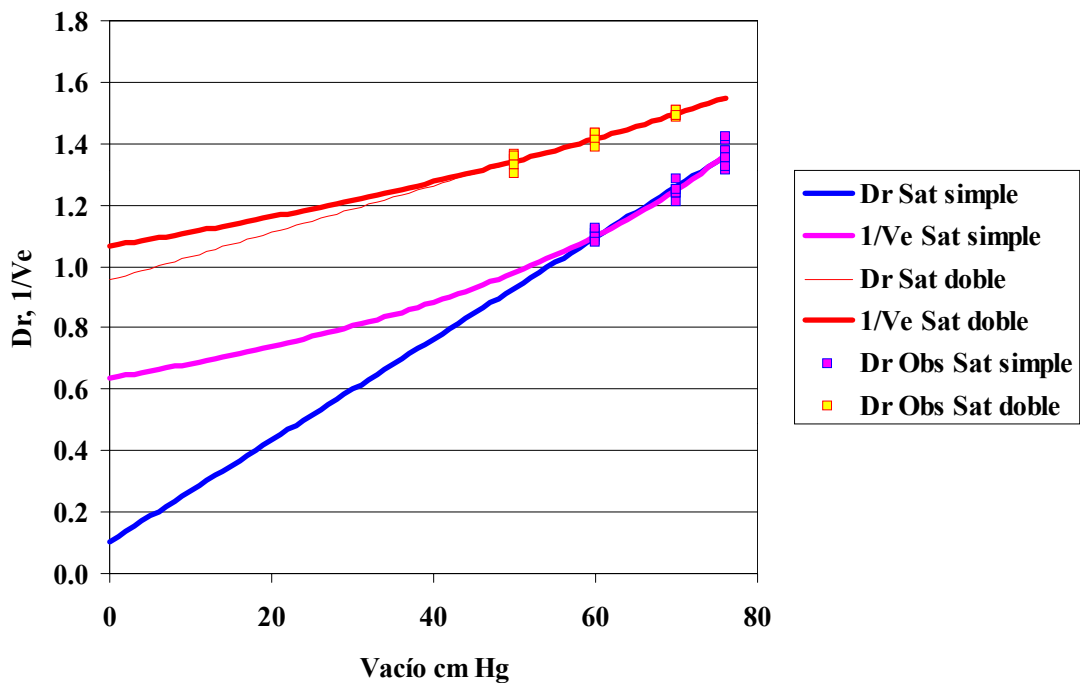


Figura 9: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Corteza >3 mm. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos

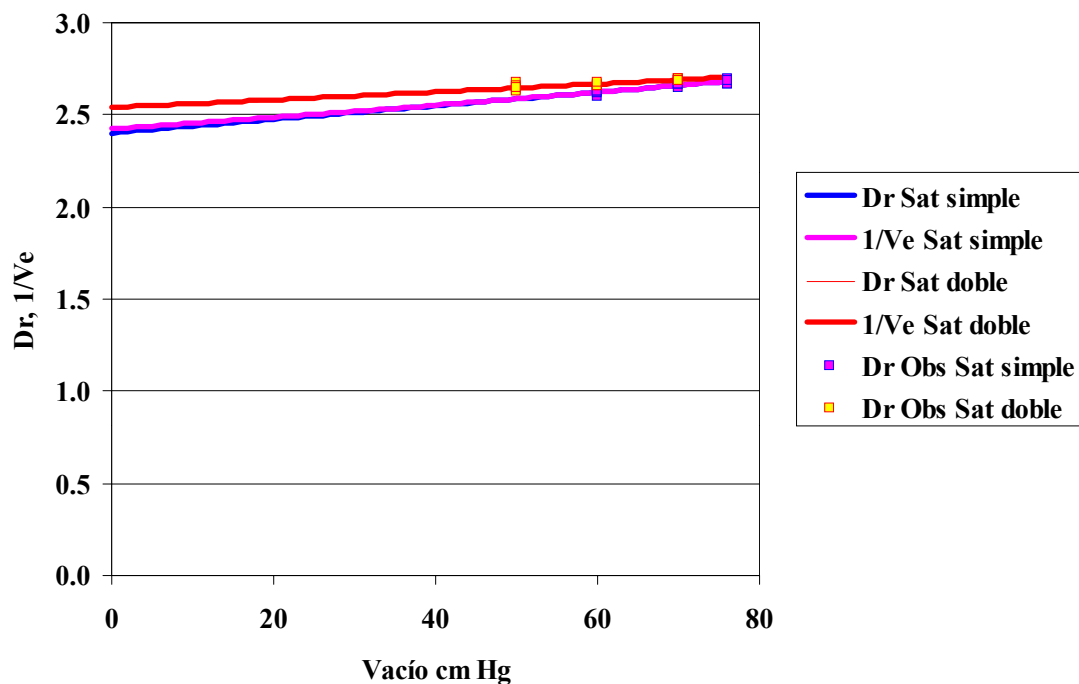


Figura 10: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Escoria granulada. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos

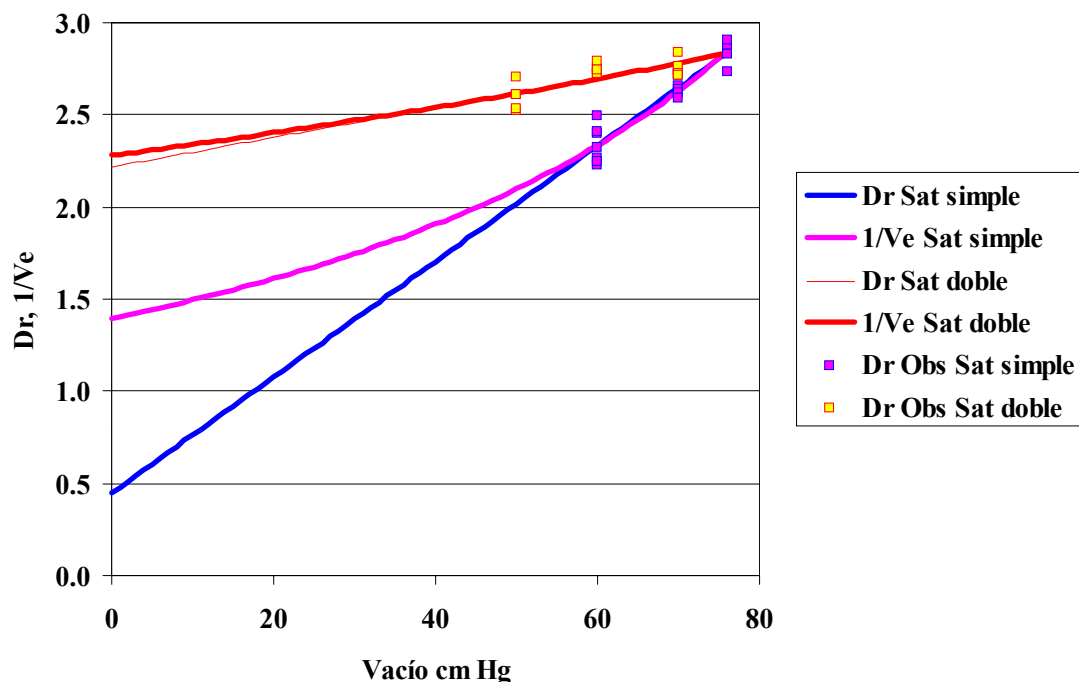


Figura 11: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Lana de escoria. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos

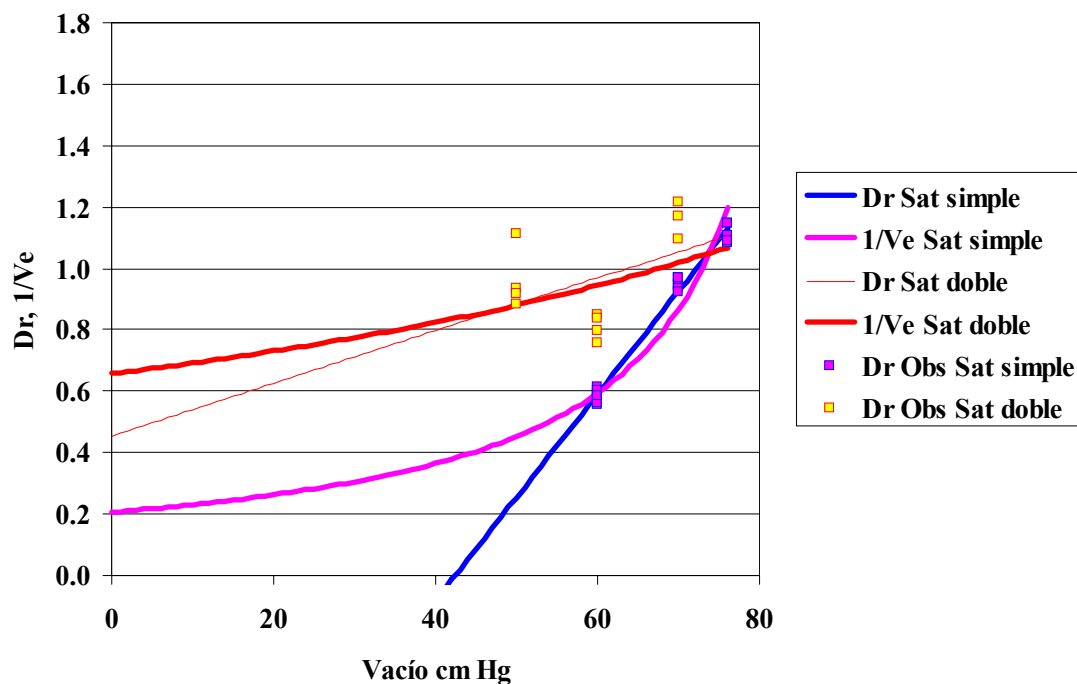


Figura 12: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Perlita B6. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos

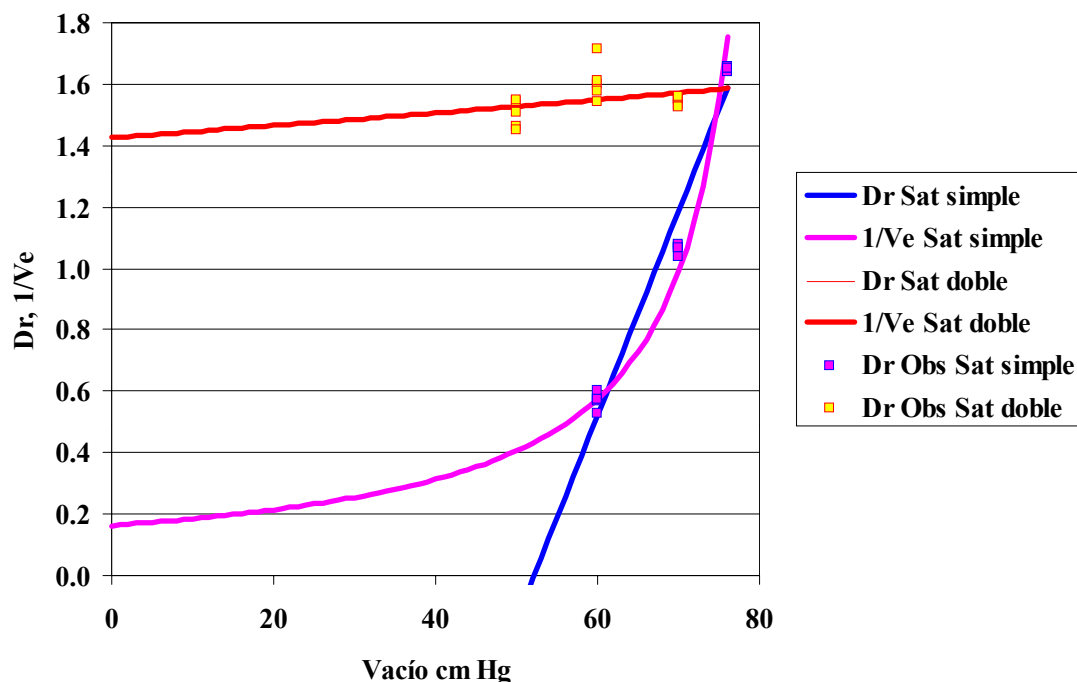


Figura 13: Saturación de sustratos por vacío. Comparación de las variables densidad real y volumen específico: Turba. Comparación de los valores experimentales con los predichos por los dos modelos

En Figura 8 a Figura 13 se representa, para cada sustrato, los siguientes elementos:

- Valores experimentales de Dr correspondientes a la saturación simple y 2ª saturación doble.
- Valores de Dr y Dr_{Ve} para la saturación simple.
- Valores de Dr y Dr_{Ve} para la 2ª saturación doble.

Los valores experimentales representados corresponden al intervalo de medida, es decir entre 50 y 70 cm Hg para la saturación doble, y entre 60 y 76 cm Hg para la saturación simple.

Los valores de Dr calculados a partir de los modelos se han extendido a un intervalo de variación para el vacío aplicado, desde 0 cm Hg (presión atmosférica) hasta 76 cm Hg (vacío absoluto).

En las figuras se observa claramente que, en el intervalo de medida, los valores de Dr calculados por ambos métodos son muy similares y que las diferencias entre los valores experimentales de las distintas repeticiones son mayores que las diferencias entre los valores obtenidos por ambos modelos. Los sustratos que más diferencias presentan en este sentido son la perlita y la turba, que son los que presentaban un mayor valor del coeficiente de variación.

Fuera del intervalo de medida, los dos modelos empleados presentan, en general, valores diferentes para Dr . Estas diferencias son tanto mayores cuanto más nos alejamos del intervalo de medida, y cuanto mayores sean los valores de b_d y b_v . Las diferencias entre los dos modelos empleados son mínimas en los casos de la saturación doble de corteza < 3 mm, saturaciones simple y doble en la escoria granulada y saturación doble en la turba. En el resto de los casos, las diferencias entre los valores calculados por uno y otro método son importantes. Esto confirma la limitación de la aplicación de los modelos fuera del intervalo en el que han sido ajustados. Para obtener resultados fiables en un intervalo más amplio, es necesario hacer las determinaciones necesarias para ajustar ambos modelos en el intervalo de interés, y comparar los datos experimentales con los datos obtenidos por cada uno de los modelos.

En los casos de lana escoria, perlita y turba se presentan los valores más elevados para el valor de b_d (Tabla 46). Este elevado valor se corresponde con una elevada pendiente de la recta correspondiente en Figura 11 a Figura 13, lo que hace que en los casos de perlita y turba, cuando el vacío aplicado durante la saturación es menor de 40 o 50 cm Hg, el valor obtenido para Dr es menor que cero, lo que evidentemente es imposible. En el caso de lana de escoria se tiene una pendiente igualmente pronunciada, pero el valor de partida es lo suficientemente alto para que el valor calculado no llegue a alcanzar valores negativos.

Respecto al valor de b_{Ve} , los valores más elevados (en valor absoluto) corresponden a perlita y turba para la saturación simple. En Figura 12 y Figura 13 puede observarse que la consecuencia de esto es una pendiente muy pronunciada de la curva Dr_{Ve} en las proximidades del vacío absoluto. Si admitimos como válido este modelo, el aumento de la pendiente está indicando una gran sensibilidad del valor de Dr a las pequeñas variaciones del vacío aplicado durante la saturación. Una consecuencia inmediata de esto es que pequeños errores en la medida del vacío aplicado durante la saturación, provocan diferencias importantes en el valor medido de Dr , que se refleja en la pérdida de bondad del ajuste de los datos.

Si se compara la variación de los valores obtenidos para la saturación simple con la doble, se observa que esta variación es más elevada en el caso de la saturación simple que en el de saturación doble. Esta variación viene representada en los gráficos por la pendiente de las rectas y de la tangente a las curvas. Las diferencias de pendientes entre saturación simple y

doble varían considerablemente de unos sustratos a otros. Las diferencias más notables se dan en los casos de lana de escoria, perlita y turba, mientras que en el extremo opuesto, las diferencias son mínimas en el caso de la escoria granulada.

Por último, se observa que tanto los valores experimentales como los valores calculados por los modelos, para las saturaciones simple y doble, tienden a converger en el valor correspondiente al vacío absoluto. Esta convergencia es muy buena en los casos de corteza <3 mm, escoria granulada y lana de escoria. En los casos de perlita y turba, la convergencia no está tan definida, posiblemente debido a la imprecisión de los datos experimentales obtenidos. En el caso de la corteza <3 mm, la convergencia no llega a ocurrir.

Si consideramos que las diferencias entre los valores obtenidos son debidas al aire atrapado en el interior de los poros, la convergencia tiene una explicación clara. Independientemente de las saturaciones realizadas, si en la última se hace el vacío absoluto, el volumen de aire residual es nulo, y el volumen medido por desplazamiento de fluidos se corresponde pues con el volumen de material sólido.

5.2.7.5 Conclusiones del ensayo

1. Densidad real
 - 1.1. Los valores obtenidos para la densidad real son tanto mayores cuanto mayor es el vacío aplicado durante la saturación.
 - 1.2. La variabilidad de los valores obtenidos es tanto menor cuanto mayor es el vacío aplicado.
 - 1.3. La variabilidad en la saturación doble es menor que en la saturación sencilla.
2. La incidencia del volumen de aire residual en el valor de la densidad real es lo suficientemente elevada como para no poder asumirla como error. Para obtener valores de densidad asumibles a un volumen de aire residual cero, es necesario recurrir a vacíos muy profundos, sólo alcanzables con equipos de alto vacío.
3. Análisis estadístico de la densidad real
 - 3.1. El valor de la densidad real es menos sensible a las variaciones del sustrato y/o del nivel de vacío durante la saturación cuando se hace doble saturación que cuando se aplica saturación simple.
 - 3.2. En tres de los seis sustratos estudiados, se desecha la hipótesis lineal para el ajuste entre los valores de densidad y el vacío aplicado durante la saturación.
4. El estudio del comportamiento del aire atrapado indica que, si se considera un modelo lineal en el que la variable independiente es el vacío aplicado durante la saturación, la variable dependiente no corresponde al valor de la densidad, sino al volumen específico obtenido como inversa de la densidad.
5. La relación directa entre los valores de densidad y volumen específico proporciona para éste último las mismas conclusiones detalladas en el apartado 1 para la densidad.
6. Los resultados obtenidos en el análisis de varianza y en la regresión lineal del volumen específico respecto al vacío de saturación proporcionan unas conclusiones similares al caso de la densidad.
7. Comparación de los modelos lineales de densidad y volumen específico respecto al vacío aplicado durante la saturación
 - 7.1. En el intervalo de medida considerado, el valor predictivo de ambos modelos es muy similar. La variabilidad de los valores experimentales es mayor que la diferencia entre los dos modelos.
 - 7.2. Fuera del intervalo de medida, aumentan las diferencias entre los valores calculados por ambos modelos. La magnitud de la diferencia entre ambos modelos depende de las

características propias del sustrato, principalmente del volumen de poros intraparticulares.

- 7.3. Dado su carácter conceptual, el modelo lineal de volumen específico es más adecuado que el modelo lineal de densidad.

5.2.8 *Recapitulación*

El estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo tiene que basarse en las funciones que cumple el sustrato, en las relaciones energéticas que regulan el reparto del espacio poroso entre aire y agua, y en la morfología de los poros, que condicionan su accesibilidad al intercambio aire – agua.

Teniendo en cuenta estos condicionantes, el estudio parte de los métodos disponibles para la medida de la densidad real de los sustratos: incineración y picnometría de líquidos. A lo largo de 6 ensayos, se introducen modificaciones que tienen finalmente como resultado el desarrollo de un método nuevo para determinar el volumen ocupado por el sustrato. El volumen se mide por desplazamiento de fluidos, para lo cual la muestra se pesa dentro del agua después de una saturación en condiciones de vacío. El volumen específico (inverso a la densidad) tiene una relación lineal con el vacío aplicado durante la saturación.

El desarrollo de estos trabajos ha tenido como consecuencia varias repercusiones, como son:

- La modificación de los conceptos considerados en la metodología
- La modificación de las rutinas de laboratorio
- La introducción de nuevos equipamientos

5.2.8.1 Conceptos aplicados en el desarrollo metodológico

En el primer ensayo (5.2.2) se comparan la incineración y la picnometría de líquidos como métodos para medir la densidad real de los sustratos de cultivo. De sus resultados se desprende que estos métodos miden variables distintas. Teniendo en cuenta las funciones que cumple el sustrato, se considera más adecuada la variable medida por los métodos picnométricos.

La metodología para medir volúmenes por picnometría de líquidos es muy laboriosa y con un grado de subjetividad variable, que depende de las características del sustrato sometido a análisis. Se plantea como alternativa un método de saturación de la muestra de sustrato por inmersión en agua y posterior ebullición, y la medida del volumen por aplicación del principio de Arquímedes. En el segundo ensayo (5.2.3) se comparan los valores de densidad obtenidos con la metodología propuesta con los obtenidos por picnometría de agua, empleada como referencia. Se contempla una variante de saturación por inmersión en agua a temperatura ambiente que resulta claramente insuficiente. La saturación por inmersión en agua con posterior ebullición proporciona unos resultados comparables a la picnometría de agua, con una notable simplificación de la metodología de laboratorio y una disminución de la subjetividad.

La saturación de la muestra de sustrato, para medir su volumen, por desplazamiento de fluidos, converge en este punto con la metodología empleada para la determinación de la curva de retención de agua por desorción del sustrato saturado. Los trabajos desarrollados a partir de este punto se orientan a controlar la saturación y los factores que inciden en su eficacia. Para comparar la eficacia de los métodos empleados, se compara el volumen medido con el peso seco de la muestra. El cociente entre el segundo y el primero corresponde a densidad.

En el tercer ensayo (5.2.4) se introduce una nueva variante de saturación, sustituyendo la ebullición por la saturación en condiciones de vacío. El aire contenido en los poros se evacua antes de sumergir la muestra en agua, evitando la necesidad de la evacuación posterior del aire atrapado. Las diferencias entre ambos métodos, aunque significativas en algunos casos, son lo suficientemente pequeñas como para considerar que los dos métodos de saturación empleados son equivalentes.

En el cuarto ensayo (5.2.5) se estudia la incidencia del nivel de vacío aplicado durante la saturación en la eficacia de dicha saturación. Se observa que la eficacia es tanto mayor cuanto mayor es el vacío aplicado durante la saturación. En este ensayo se presentan algunos resultados aberrantes, y se observan deficiencias en la saturación, que es necesario resolver.

El quinto ensayo (5.2.6) evalúa la incidencia del nivel de vacío en el intervalo de valores próximo al vacío absoluto, y estudia dos variantes del método de saturación para resolver los problemas detectados en el ensayo anterior. De las dos variantes de saturación estudiadas, una de ellas, la saturación lenta, tiene una eficacia comparable a la saturación normal. La otra, saturación doble, aumenta considerablemente la eficacia en relación con las otras dos variante ensayadas. El ensayo pone de manifiesto la fuerte incidencia del aire residual en el valor calculado para la densidad del sustrato. Se ha examinado la relación lineal entre el valor de la densidad y el vacío aplicado. Los indicadores estadísticos no rechazan esta hipótesis, pero el estudio de los residuos pone claramente de manifiesto una falta de linealidad entre las dos variables.

En el último ensayo (5.2.7) se estudia la incidencia del nivel de vacío en la eficacia de la doble saturación, considerando la saturación simple como referencia. Se vuelve a examinar la hipótesis de relación lineal entre densidad y nivel de vacío aplicado. La saturación doble proporciona un nivel de saturación superior a la saturación simple. Las diferencias entre ambos métodos dependen de las características del sustrato, siendo tanto mayores cuanto mayor sea el volumen de poros intraparticulares. Cuando se hace saturación doble, la hipótesis lineal se rechaza en tres de los seis sustratos ensayados.

Se ha realizado un análisis del funcionamiento del aire residual, llegándose a la conclusión de que la respuesta lineal con respecto al vacío aplicado durante la saturación no corresponde a la densidad, sino a su inversa, el volumen específico. La variable independiente que se debe considerar no es el vacío, sino la relación entre la presión absoluta de saturación y la presión atmosférica absoluta. En el diseño del ensayo no estaba prevista la medida de esta variable. No obstante, se hace una primera aproximación considerando como variable independiente la diferencia de presiones, en lugar del cociente entre ellas. Desde el punto de vista estadístico, los resultados son similares a los obtenidos para la densidad. En el intervalo de medida considerado en este ensayo, la validez de los dos modelos lineales, densidad y volumen específico respecto a vacío, son similares. Fuera de este intervalo, los dos modelos proporcionan resultados diferentes. Las diferencias entre ambos métodos varían en función de la porosidad intraparticular del sustrato analizado. El carácter conceptual del modelo lineal de volumen específico hace a éste más creíble que el modelo lineal de densidad, que para algunos sustratos llega a dar valores absurdos, fuera del intervalo considerado.

5.2.8.2 Rutinas de laboratorio

La incineración es el método aplicado habitualmente para determinar la densidad real de un sustrato y, a partir de ella, la porosidad total. Se trata de una rutina rápida y sencilla. La

complejidad metodológica de la picnometría hace que ésta sólo se utilice en contadas ocasiones, normalmente en trabajos de investigación y rara vez en trabajos de rutina.

Se plantea una alternativa que aplica los mismos principios que la picnometría de agua: saturación por ebullición y medida de volúmenes por desplazamiento de fluidos. Esta alternativa supone, respecto a la picnometría, una simplificación considerable de la rutina de laboratorio. Un aspecto importante es la posibilidad de tratar conjuntamente un número elevado de muestras, frente al tratamiento individualizado de la picnometría.

La sustitución de la “saturación por ebullición” por la “saturación por vacío” tiene como consecuencia inmediata la reducción del tiempo invertido. Frente a las 24 horas de enfriamiento en la saturación por ebullición, la saturación por vacío no requiere más de 15 o 20 minutos para completar el proceso vacío – inmersión – vuelta a presión atmosférica.

La necesidad de introducir la saturación doble vuelve a alargar el tiempo hasta las 24 horas, debido a la necesidad de dejar drenar el sustrato entre las dos saturaciones. La comparación de las dos metodologías de saturación con este desequilibrio de tiempos, sigue siendo favorable a la saturación por vacío. El mayor control del volumen de aire residual y el desarrollo de modelos que relacionan este volumen con el vacío aplicado, proporcionan una información sobre las características del espacio poroso que no se puede obtener cuando la saturación se hace por ebullición.

5.2.8.3 Equipamiento

El desarrollo de nuevas metodologías de saturación y de medida hizo necesario diseñar nuevos equipamientos.

La determinación del peso de muestra dentro del agua no presenta grandes problemas. Se resolvió empleando una balanza con dispositivo para colocar la carga suspendida en la parte inferior. Se coloca sobre una pila amplia, en la que se sumergen las muestras a pesar.

Para saturar por ebullición, se empleó una caldera autoclave eléctrica, utilizada a modo de caldera atmosférica.

Como campana de vacío se utilizó siempre el tubo de polipropileno descrito en 5.2.4.3.2.3. En los primeros ensayos, después de hacer el vacío, el agua entraba por succión desde la parte inferior. Esto evolucionó hasta colocar un mecanismo de ascenso y descenso de la muestra. Antes de hacer el vacío, la campana se llena de agua hasta la mitad, se coloca la muestra colgada de la parte superior, se cierra, se hace el vacío y después se hace descender la muestra, sumergiéndola en el agua. De esta forma, una vez hecho el vacío, no se produce entrada de masa del exterior, por lo que la presión permanece constante durante todo el proceso de saturación.

La medida de volúmenes por inmersión se hace en muestras de sustrato contenidas en anillos metálicos, cerrados por ambas caras con sendas telas. Éstas eran inicialmente telas tupidas comerciales, pasándose después a utilizar malla de nilón calibrada, con una luz de malla de 75 μm .

En los primeros ensayos la malla se sujetó al anillo con alambre de acero. Su sustitución por juntas tóricas de silicona agilizó el trabajo. La silicona empleada para la fabricación de las juntas es resistente a altas temperatura (más de 200 °C). Sin embargo, el paso por varios ciclos

de secado a 105 °C provoca la pérdida de elasticidad, lo que reduce la eficacia del cierre. Posteriormente se sustituyeron por bandas de caucho, que proporcionan un cierre ajustado al anillo y presenta mejoras importantes respecto a la fiabilidad del volumen de sustrato empleado. El inconveniente que presentan es su nula resistencia a la temperatura, que obliga a modificar la rutina de laboratorio para evitar su entrada en la estufa de secado.

5.3 Trabajo experimental: Errores de medida

5.3.1 *Introducción*

5.3.1.1 Antecedentes

En el apartado 3.3 se ha visto que la disminución de los errores de medida aumenta la fiabilidad de los datos analíticos. Esto aumenta la fiabilidad de los criterios aplicados para interpretar los resultados analíticos y la propia interpretación de los datos. Se ha visto que los errores experimentales son consecuencia de los procedimientos seguidos y del instrumental empleado (3.3.1).

La metodología de saturación (3.3.2) presenta dos problemas relacionados con los errores: la saturación deficiente y la pérdida de material durante el proceso de saturación. La experimentación relacionada con la saturación deficiente se ha tratado en el apartado 5.2. La evaluación de los errores debidos a la pérdida de material durante la saturación se va a abordar en este apartado.

En el apartado 3.3.3 se ha tratado brevemente sobre la incidencia de la instrumentación del laboratorio en los errores de medida. En este apartado se evalúa la magnitud de los errores de medida debidos a este instrumental.

5.3.1.2 Trabajo experimental

El trabajo experimental de este apartado se centra en los dos aspectos mencionados: pérdida de material durante la saturación (5.3.2) e incidencia de la instrumentación en los errores de medida (5.3.3).

5.3.2 *Pérdida de material durante la saturación*

La pérdida de peso durante el proceso de saturación se debe a la salida del material contenido en el anillo metálico. La salida de sustrato está impulsada por el propio sistema de saturación, empleando el agua como vehículo transmisor de la fuerza de expulsión. El cierre del anillo es el medio empleado para evitar la salida del sustrato. En consecuencia, los factores a considerar en el estudio de la pérdida de peso durante la saturación son el propio sustrato, que interesa conservar dentro del recipiente, el método de saturación, como agente causante de la pérdida de material, y el sistema de cierre, como agente que evita la pérdida de sustrato.

Como consecuencia, el análisis de la pérdida de peso del sustrato se aborda estudiando la relación del sustrato, considerado como factor principal, con cada uno de los otros dos factores.

Para estudiar esta relación entre sustrato y cierre se lleva a cabo un primer ensayo, en el que se utilizan cuatro sustratos y tres cierres distintos. Con el resultado de este ensayo decidimos realizar otros dos, que aportarán información sobre las características del material que se pierde. De estos dos, uno de ellos aporta información útil al respecto, mientras que la aportación del otro ensayo es escasa, debido posiblemente al empleo de una metodología inadecuada.

Para estudiar la relación entre sustrato y método de saturación, se lleva a cabo un ensayo en el que se compara la saturación por ebullición con la saturación por vacío.

5.3.2.1 Primer ensayo: Comparación entre distintos tipos de cierre

5.3.2.1.1 *Introducción*

Para saturar las muestras por inmersión, se introducen en un anillo metálico y se cierra con dos telas. Este cierre se hizo inicialmente con tela comercial y posteriormente se sustituyó por malla de nilón calibrada para una determinada luz de malla, en este caso 75 μm .

La sujeción de las telas al anillo metálico se hizo, inicialmente, con un alambre de acero, que posteriormente se sustituyó por una junta tórica de silicona.

El objetivo de los cierres del anillo metálico es permitir el paso de aire y agua, y evitar la salida de sustrato. Las pérdidas pueden depender, además, de las características del sustrato utilizado, por lo que en el ensayo se trabaja con distintos sustratos.

5.3.2.1.2 *Objetivo*

Los objetivos planteados en este ensayo son:

- Evaluar la eficacia de distintos cierres para evitar la pérdida de sustrato durante la saturación por inmersión.
- Evaluar la incidencia del factor sustrato en la pérdida de material a través del cierre.

5.3.2.1.3 *Material y métodos*

5.3.2.1.3.1 Planteamiento estadístico

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación, tipo de cierre (3 niveles) y sustrato (4 niveles). El número de repeticiones considerado es cuatro.

5.3.2.1.3.1.1 *Tipo de cierre*

- Textil comercial A. Sujeción al anillo metálico con alambre de acero
- Textil comercial B. Sujeción al anillo metálico con alambre de acero
- Malla de nilón calibrada de 75 μm de luz. Sujeción al anillo metálico con junta tórica de silicona

5.3.2.1.3.1.2 *Sustratos*

- Lana de roca (mezcla 50% hidrófila y 50% hidrófoba)
- Perlita B12
- Corteza de pino (*Pinus radiata*) compostada
- Turba TKS1

5.3.2.1.3.2 *Metodología de laboratorio*

- Se parte de sustrato secado en estufa a 105 °C
- Se pesan los anillos metálicos portamuestras con sus correspondientes cierres secados en estufa a 105 °C (*T*)
- Se preparan las muestras siguiendo la metodología descrita en 5.2.3.3.2.2.3

- Se pesan los anillos portamuestras cerrados con sus correspondientes muestras secas (P_i)
- Se saturan y secan siguiendo la metodología descrita en 5.2.3.3.2.2.3
- Se pesan los anillos portamuestras cerrados con sus correspondientes muestras secas (P_f)

5.3.2.1.3.3 Cálculo de variables

La variable considerada es porcentaje de pérdida de peso ($\%P$) referido al peso inicial de sustrato:

$$(177) \quad \%P = 100 \frac{P_f - P_i}{P_i - T}$$

5.3.2.1.4 Resultados

Las cantidades de material perdido por los diferentes sustratos con los distintos cierres, se comparan, mediante análisis de varianza, cuyo resultado se detalla en la Tabla 48. En la Tabla 49 se detallan los valores medios obtenidos para la pérdida de peso en los diferentes tratamientos considerados en el ensayo.

El análisis de varianza presenta diferencias significativas entre sustrato y entre los distintos tipos de cierres. El efecto interacción es también significativo, lo que obliga a un análisis detallado para cada uno de los niveles de los tratamientos.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Modelo	11	79,1639	7,1967	8,36	0,0001	
Sustrato	3	47,6091	15,8669	17,43	0,0001	0,7777
Cierre	2	10,5780	5,2890	6,14	0,0052	0,6734
Sus*Cier	6	20,7342	3,4557	4,01	0,0037	
Error	35	30,1368	0,8611			
Total	46	109,3007				
R ² = 0,7243		C.V.=25,89				

Tabla 48 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Análisis de varianza de la pérdida de material en cuatro sustratos utilizando tres cierres diferentes.

	Textil B	Textil A	Malla Nilón	Media
Perlita B-12	4,90	3,22	1,05	3,06
Corteza	2,24	2,43	2,29	2,32
Lana de Roca	4,07	4,24	3,46	3,93
Turba	4,94	5,13	4,92	5,00
Media	4,04	3,76	2,93	3,58

Tabla 49: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Porcentaje de pérdida de peso durante la saturación por ebullición para los sustratos y cierres empleados en el ensayo

La fiabilidad del ensayo, considerada en función del control de la variabilidad, no es muy alta, pero se puede considerar aceptable. El modelo explica el 72.43% de la variabilidad medida como suma de cuadrados ($R^2 = 0.7243$), y el cuadrado medio del error supone el 25.89% del valor de la media (C.V.=25.89).

El reparto de la variabilidad medida como suma de cuadrados, pone claramente de manifiesto la fuerte incidencia del factor sustrato como fuente de variación. Aún sin llegar a alcanzar los niveles de otros ensayos, en este caso la suma de cuadrados correspondiente a este factor supone el 60% de la variabilidad explicada por el modelo. El tipo de cierre empleado no tiene una gran incidencia en la variabilidad: la suma de cuadrados debido a este factor supone únicamente el 13% de la suma de cuadrados explicada por el modelo. El resto de la suma de cuadrados corresponde al efecto interacción.

La variabilidad no explicada por el modelo es relativamente alta, tanto si se mide como suma de cuadrados (27.57%) como si se compara el cuadrado medio del error con el valor de la media (25.89%). La consecuencia es que los valores obtenidos para las Mínimas Diferencias Significativas son elevados (ver Tabla 48). La sensibilidad del test es por lo tanto baja, es decir, es necesario que las diferencias entre los tratamientos sean elevadas para que el test las detecte como significativas.

5.3.2.1.5 *Discusión*

En la Tabla 49 se presentan los datos correspondientes a las pérdidas de peso de cada uno de los tratamientos. En primer lugar hay que destacar que la perlita tiene un comportamiento anómalo, si se compara con el resto de los sustratos. Este comportamiento anómalo incide tanto en la explicación del resultado obtenido para los cierres como en el de los sustratos.

El comportamiento de los casos de los cierres es similar para los otros tres sustratos considerados (corteza, lana de roca y turba). El cierre que más pérdidas tiene es el textil A, seguido del textil B, mientras que la malla de nilón es la que menores pérdidas presenta. La magnitud de las diferencias entre las pérdidas de los distintos cierres es mínima, alrededor de 0.2 unidades porcentuales para la corteza de pino y la turba, y del orden de 0.6 unidades porcentuales para la lana de roca.

Con respecto a los sustratos, las diferencias encontradas entre unos y otros son mayores que las encontradas entre los diferentes cierres. La mayor pérdida de peso se produce para el caso de la turba, que pierde el 5% de su peso inicial; en el caso de la lana de roca, la pérdida es próxima al 4%, y las menores pérdidas corresponden a la corteza de pino con el 2.3%.

La perlita B-12 tiene un comportamiento caótico, al menos en apariencia. Las diferencias entre los diferentes cierres empleados están próximas a las 4 unidades porcentuales que es considerablemente más elevada que las diferencias correspondientes a la lana de roca (0.6) o a la corteza y la turba (0.2).

El comportamiento claramente diferenciado de la perlita es la causa de que el efecto interacción sea significativo. De hecho, si en el análisis de varianza suprimimos los datos correspondientes a este sustrato, el único factor que presenta diferencias significativas es el sustrato, tal como puede verse en la Tabla 50.

Comparando los valores correspondientes a los dos análisis de varianza (Tabla 48 y Tabla 50), puede observarse la gran incidencia que, desde el punto de vista del análisis de varianza,

tiene la perlita. El valor de la suma de cuadrados total desciende de forma considerable, pasando de 109,30 a 67,54. Los otros datos relativos al conjunto del análisis, R^2 y C.V., prácticamente no varían.

Las diferencias importantes entre ambos análisis se derivan del notable descenso detectado para la suma de cuadrados, que se debe fundamentalmente al descenso de las sumas de cuadrados de los tipos de cierre e interacción. Las sumas de cuadrados correspondientes al factor sustrato y error tienen un descenso mucho menos apreciable. Como consecuencia, aumenta considerablemente la incidencia del factor sustrato como fuente de variabilidad, pasando del 60% al 96% de la suma de cuadrados explicada por el modelo. Esta alteración en el reparto de la suma de cuadrados se transmite a los valores de Cuadrado Medio y de F, con las consecuencias ya mencionadas en el nivel de significación.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Modelo	8	45,2257	5,6532	6,84	0,0001	
Sustrato	2	43,6669	21,8335	26,42	0,0001	0,7615
Cierre	2	0,8692	0,4346	0,53	0,5970	0,7615
Sus*Cier	4	0,6896	0,1724	0,21	0,9314	
Error	27	22,3154	0,8265			
Total	35	67,5412				
$R^2=$		0,6696		$C.V.=$		24,25

Tabla 50 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Análisis de varianza del ensayo factorial de sustrato y cierres eliminando del análisis los datos correspondientes a la perlita

Las mayores pérdidas de sustrato se corresponden con la turba, que llegan al 5% del peso inicial. El paso siguiente que se planteó en este trabajo fue estudiar las características del material perdido. Se plantean tres vías de salida de material:

4. Por disolución en el agua de saturación de las sales solubles contenidas en el sustrato.
5. Por paso del material más fino a través de la malla o textil de cierre.
6. Por cesión del cierre a la presión interna.

La primera vía considerada, la disolución, se ve favorecida por el aumento de la temperatura del agua hasta la ebullición, durante el proceso de saturación. Afecta a los nutrientes y enmiendas añadidos al sustrato, y a cualquier otra sal que pueda acompañarle, bien sea por formar parte de la materia prima, o por una contaminación posterior durante el proceso de elaboración.

El paso de material a través de la malla de cierre afecta a la fracción más fina. El paso está limitado por la luz de la malla o del tejido empleado. Cuando las pérdidas por esta vía son importantes, puede llegar a alterar significativamente la curva granulométrica, incidiendo en la curva de retención de agua medida.

La pérdida de material por cesión del sistema que sujeta el textil o malla al anillo metálico, puede afectar a todo tipo de material, soluble e insoluble, de un amplio espectro granulométrico, por lo que es de esperar que su incidencia en la curva de retención de agua sea menor que en el caso anterior.

El aumento de temperatura en el baño de saturación provoca la dilatación del aire contenido en los poros y su salida de los mismos. Para salir del anillo metálico que contiene la muestra, el aire debe vencer la resistencia que opone la tela saturada y cubierta de agua, por lo que se produce una acumulación de aire en la cara superior. Si la luz de la malla del cierre es muy pequeña, la presión necesaria para vencer esta resistencia es grande. Esto puede provocar la salida del aire por los laterales de la malla, arrastrando parte del sustrato.

Para evitar estas pérdidas se han empleado dos sistemas de sujeción, un anillo de alambre de acero para los cierres hechos con textil comercial, y anillo de silicona para el cierre de malla de nilón. Las características que se buscan en estos cierres son: que se ajusten al contorno del anillo metálico y su manipulación no sea excesivamente complicada. El anillo de alambre es difícil de ajustar. Las pequeñas holguras que pueden quedar, son una vía de salida de material. La elasticidad del anillo de silicona proporciona un buen ajuste. Si bien este material puede soportar temperaturas superiores a 200 °C, es posible que con el aumento de temperatura también aumente la elasticidad, haciendo posible así la pérdida de material.

Como se ha visto, las distintas vías de salida de material del anillo metálico, implican la pérdida de material de distintas características, con una incidencia diferente en la curva de retención de agua obtenida. Para estudiar las características del material que sale, se plantean dos nuevos ensayos: uno con el objetivo de conocer el reparto del material entre soluble y en suspensión, y otro, para estudiar la incidencia de la luz de malla en la cantidad de material perdido.

5.3.2.2 Segundo ensayo: Pérdidas de fracción soluble y fracción en suspensión

5.3.2.2.1 *Introducción*

En el ensayo anterior se han puesto de manifiesto las pérdidas de material que se producen durante la saturación por ebullición.

Para evitar las pérdidas de sustrato, es necesario conocer las vías por las que éstas se producen. De esta forma se pueden diseñar variantes en el diseño de los instrumentos y/o en la metodología, que permitan evitar dichas pérdidas.

Teniendo en cuenta la discusión del ensayo anterior, en éste se plantea la evaluación del reparto entre el material que se pierde por disolución y el que se pierde por suspensión.

5.3.2.2.2 *Objetivo*

El objetivo que se plantea en este ensayo es evaluar la fracción soluble y la fracción en suspensión del material perdido durante la saturación del sustrato por ebullición.

5.3.2.2.3 *Material y métodos*

5.3.2.2.3.1 Planteamiento estadístico

Se hacen 9 repeticiones de un único tratamiento, para evaluar las pérdidas de sustrato durante la saturación de una turba fertilizada (TKS2) por ebullición.

5.3.2.2.3.2 Metodología de laboratorio

- Los anillos metálicos se llenan de sustrato seco en estufa a 105 °C. Se cierran con malla de nilón de 75 µm sujetas con junta tórica de silicona.
- El peso seco inicial del sustrato se obtiene por diferencia entre tara y bruto.
- Los anillos metálicos se sumergen en agua desionizada, en recipientes individuales; después de 24 horas se someten a ebullición durante 45 minutos, añadiendo el agua desionizada necesaria para que el anillo metálico este siempre totalmente sumergido.
- Se sacan los anillos metálicos y se lavan con agua desionizada sobre el recipiente en el que se han hervido.
- El anillo metálico se lleva a estufa y se seca a 105 °C hasta peso constante.
- El peso seco final se obtiene por diferencia entre el peso bruto y la tara anteriormente obtenida.
- El agua procedente de la ebullición más el agua del lavado se pasan por un papel de filtro tarado, que retenga el material en suspensión. Este papel se seca en estufa y por diferencia entre peso inicial y final se obtiene el peso del material en suspensión.
- El agua procedente del filtrado anterior se recoge en vasos de precipitados previamente tarados, se hierve para reducir su volumen y posteriormente se pasa a estufa para obtener el residuo seco.

5.3.2.2.4 Resultados

Los resultados obtenidos de este ensayo no permiten obtener conclusiones respecto al objetivo planteado, debido posiblemente a la utilización de una metodología inadecuada para el fin propuesto. No obstante, merecen un comentario.

Se hicieron un total de 9 repeticiones. De ellas 3 se desecharon por errores de procedimiento, y 2 se perdieron porque se abrieron las mallas, por lo que finalmente se aprovecharon los resultados de 4 de ellas, que se presentan en la Tabla 51.

En primer lugar es de destacar que la suma de los pesos en suspensión más disolución queda en todos los casos, muy por debajo de la diferencia entre el peso inicial y el peso final. Entre el 60 % y el 80 % del peso perdido queda fuera del control de este ensayo; de ahí que no se puedan obtener conclusiones.

El peso de material en disolución supone una proporción, sobre el peso seco inicial, variable para las distintas muestra, entre 2.23 y 3.01%. El peso obtenido para el material en suspensión es, en todos los casos, despreciable.

Las posibles vías de pérdida de material no controladas en este ensayo son, por una parte, la posible volatilización de compuestos químicos durante la ebullición o secado, y por otra, la pérdida de material en la estufa en el proceso de secado.

No es de esperar una pérdida importante por volatilización, por lo que es previsible que las pérdidas más importantes se hayan dado en el secado en estufa.

En este ensayo se han podido producir pérdidas de material en estufa en dos momentos claramente diferenciados. Uno, en el secado de los anillos metálicos, y otro, en el secado de los papeles de filtro con el material en suspensión del agua de ebullición y lavado.

En este ensayo no se había previsto el control del material perdido durante el secado de los anillos metálicos. En este proceso, una vez que la muestra se ha secado, las fracciones más

finas salen, en parte a través de la malla. Esta pérdida de material no corresponde al proceso de saturación. Sin embargo, este secado de los anillos metálicos está incluido en la rutina de caracterización como un paso necesario para la evaluación del peso seco, y, por lo tanto, ha de considerarse como una fuente de error de la metodología. Esta vía de pérdida de sustrato no se ha tenido en cuenta en el diseño del ensayo, por lo que los controles realizados no son suficientes para evaluarlo.

La pérdida de material del papel de filtro impide evaluar la cantidad de material en suspensión que se ha perdido durante la saturación. Cabe la posibilidad de que las corrientes de aire del interior de la estufa desplacen del papel de filtro un material ligero, como es la turba seca, produciéndose así la pérdida de la muestra. A diferencia del material considerado en el caso anterior, la pérdida de este material sí corresponde al proceso de saturación.

Nº	Peso inicial	Pérdida de peso		Pérdida en disolución (g)	Pérdida en suspensión (g)	Disolución /inicial (%)	Dis+Sus/ Pérd Peso (%)
		%	g				
1	27,43	14,35	3,95	0,83	0,01	3,01	21,27
2	30,91	5,44	1,68	0,69	0,00	2,23	41,07
3	25,22	5,59	1,41	0,60	-0,01	2,37	41,84
4	31,88	10,46	3,27	0,72	-0,06	2,25	20,18

Tabla 51: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Pérdida de peso en la saturación por ebullición. Material perdido por disolución y en suspensión. Disolución/inicial= porcentaje de material perdido por disolución referido al peso inicial de sustrato. Dis+Sus/Pérd Peso= porcentaje de la pérdida de peso por disolución y suspensión referido a la pérdida de peso total.

5.3.2.3 Tercer ensayo: Incidencia de la luz de malla del cierre en las pérdidas de sustrato

5.3.2.3.1 *Introducción*

Al igual que el anterior (5.3.2.2), este ensayo es consecuencia de los resultados obtenidos en el primero (5.3.2.1.5). En el ensayo anterior se ha intentado evaluar el reparto del material perdido entre fracción soluble y fracción en suspensión. En este caso, se evalúa la incidencia de la luz de malla del cierre en la pérdida de material durante la saturación por ebullición.

En el primer ensayo se ha observado una fuerte incidencia del factor sustrato en la pérdida de material. Por esta razón, en este nuevo ensayo se vuelve a incluir el sustrato como factor de variación. El sustrato que más pérdidas tuvo fue la turba. En este nuevo ensayo se incluye turba fertilizada y sin fertilizar. Si las pérdidas de la primera son mayores que las de la segunda, es previsible que esta diferencia sea debida al material disuelto. Se incluye además la lana de roca, que en el primer ensayo también registró unas pérdidas importantes.

Las diferencias que se puedan presentar entre las distintas luces de malla, es previsible que sean debidas a las diferentes cantidades evacuadas en suspensión a través de las mallas.

5.3.2.3.2 *Objetivo*

El objetivo que se plantea en este ensayo es evaluar la incidencia de la luz de malla en la pérdida de material durante la saturación por ebullición.

5.3.2.3.3 *Material y métodos*

5.3.2.3.3.1 Planteamiento estadístico

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación, luz de malla empleada en el cierre (3 niveles) y sustrato (3 niveles). El número de repeticiones considerado es cuatro.

5.3.2.3.3.1.1 *Sustratos empleados*

- Turba TKS2
- Turba sin fertilizar
- Lana de roca

5.3.2.3.3.1.2 *Luz de malla empleada en el cierre*

- Malla de nilón de 75 μm de luz
- Malla de nilón de 25 μm de luz
- Malla de nilón de 10 μm de luz

Se emplean mallas de nilón calibradas, para poder estudiar la relación entre la luz de malla y la cantidad de material perdido.

La sujeción de las mallas al anillo metálico se hace, en todos los casos, con junta tórica de silicona.

5.3.2.3.3.2 Metodología de laboratorio

Se emplea la misma metodología que en el primer ensayo (5.3.2.1.3.2)

5.3.2.3.4 *Resultados*

Las cantidades de material perdido por los diferentes sustratos con los distintos cierres, se comparan mediante análisis de varianza, cuyo resultado se detalla en la Tabla 52. En la Tabla 53 se detallan los valores medios obtenidos para la pérdida de peso de los diferentes tratamientos considerados en el ensayo.

El análisis de varianza presenta diferencias significativas entre sustratos pero no entre las diferentes luces de malla empleadas en el cierre. El efecto interacción también es significativo.

La fiabilidad del ensayo considerada en función del control de la variabilidad ha aumentado considerablemente con respecto al primer ensayo (5.3.2.1), alcanzando niveles de una elevada fiabilidad. La variabilidad explicada por el modelo supone el 97.77% de la variabilidad total medida como suma de cuadrados ($R^2=0.9777$). También el coeficiente de variación mejora sensiblemente, pasando a ser 14.12%.

La incidencia del sustrato como fuente de variabilidad es muy alta. La suma de cuadrados debida a este factor supone el 97.63% de la variabilidad explicada por el modelo. Como consecuencia, la aportación a la suma de cuadrados de los otros dos factores de variación

es muy pequeña. La debida a la interacción entre los dos factores, aún siendo pequeña (supera ligeramente el 1.6% de la SC del modelo), es suficiente para que la interacción sea significativa.

La variabilidad no explicada por el modelo es muy baja; la suma de cuadrados del error supone únicamente el 2.28% de la suma de cuadrados total. La consecuencia es que los valores obtenidos para las Mínimas Diferencias Significativas son bajos (ver Tabla 52). La sensibilidad del test es por lo tanto alta y permite detectar pequeñas diferencias entre los distintos tratamientos.

Para estudiar las causas de la significación del efecto interacción, se ha hecho el análisis estadístico para cada uno de los niveles de los dos factores considerados. Cuando se estudian los datos correspondientes a cada sustrato, se observan dos tipos de comportamiento. Por una parte, en el caso de las dos turbas, las diferencias entre las pérdidas obtenidas con las distintas luces de malla no son significativas. En el caso de la lana de roca, las pérdidas con las malla de 10 y 25 μm son prácticamente cero y la diferencia entre ellas no es significativa. La diferencia de estas dos mallas con la de 75 μm sí es significativa.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Modelo	8	186,8460	23,3557	136,87	0,0001	
Sustrato	2	182,4160	91,2080	534,51	0,0001	0,3577
Cierre	2	0,2278	0,1123	0,66	0,5265	0,3577
Sus*Cier	4	2,97831	0,7446	4,36	0,0082	
Error	25	4,2659	0,17064			
Total	33	191,119				

$R^2= 0,9777$ C.V.=14,12

Tabla 52 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Análisis de varianza del ensayo factorial de sustrato con cierre de malla de nilón de distinta luz

	Malla 10	Malla 25	Malla 75	Media
TKS2	4,57	4,59	5,31	4,82
Turba sin fertil	4,67	4,33	4,15	4,41
Lana de Roca	0,08	-0,06	-0,67	-0,21
Media	3,11	2,83	2,82	2,92

Tabla 53: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre: Porcentaje de pérdida de peso durante la saturación por ebullición para los sustratos y cierre de malla de nilón de distinta luz.

Cuando se estudian los datos correspondientes a cada luz de malla, tenemos, al igual que en el caso anterior, dos tipos de comportamiento. Por una parte, las dos mallas de luz más pequeña tiene un comportamiento similar. Las pérdidas de sustrato de las dos turbas empleadas son muy superiores a las de la lana de roca, pero las diferencias entre las dos primeras no son significativas. En el caso de la malla de 75 μm , las mayores pérdidas se producen con la turba TKS2, seguida de la turba sin fertilizar, y finalmente la lana de roca. En este caso, todas las diferencias son significativas.

Los dos tipos de comportamiento encontrados en uno y otro caso, explican la significación del efecto interacción.

5.3.2.3.5 *Discusión*

El comportamiento de las dos turbas es similar cuando se emplean mallas de 10 ó 25 μm de luz, pero cuando se emplea una malla de 75 μm , la pérdida de la turba TKS2 es significativamente superior a la de la turba sin fertilizar. El criterio por el que se eligieron estas dos turbas fue la concentración de nutrientes. Sin embargo, esto no explica el comportamiento observado. La distintas luces de malla empleadas en el ensayo no suponen ninguna barrera para la pérdida de material disuelto en agua. Por tanto, las posibles pérdidas por esta causa deberían ser iguales para los tres cierres empleados, cosa que no ocurre.

Las diferencias entre las pérdidas de las dos turbas son tanto mayores cuanto mayor es la luz de malla. Esta diferencia es prácticamente nula para la malla de 10 μm (0,1%), aumenta ligeramente para la malla de 25 μm (0,26%), y para la malla de 75 μm la diferencia ya es importante (1,16%). Esto podría explicarse si los dos sustratos empleados tienen una diferente composición granulométrica. Teniendo en cuenta que los dos sustratos empleados eran mezclas comerciales, es posible que las diferencias en la distribución del tamaño de partícula sea la causa de las diferencias observadas en el comportamiento de las dos turbas.

Las pérdidas de sustrato en el caso de la lana de roca pueden considerarse nulas. Los valores obtenidos para las mallas de 10 y 25 μm están en el intervalo $\pm 0,1\%$, que podemos asimilar a cero. El valor obtenido para la malla de 75 μm está significativamente por debajo de los anteriores. Esto significa que el peso obtenido después de saturación es mayor que el peso del sustrato antes de saturación. Las distintas repeticiones aportan resultados similares, y las diferencias entre antes y después oscilan entre 0,14 y 0,22 g, por lo que no es presumible un error de pesada. Las diferencias podrían ser debida a deficiencias de secado, pero el manejo ha sido igual para todos los tratamientos; además, todos los tratamientos correspondientes a un mismo sustrato se han manejado como un único lote. La explicación por este motivo tampoco está clara.

En cualquier caso, se puede considerar que las pérdidas de sustrato en la lana de roca han sido prácticamente nulas. Esto contrasta con el ensayo anterior, en el que las pérdidas fueron importantes. Este hecho puede ser debido a las diferencias que se hayan podido producir en el manejo de las muestras en uno y otro caso.

5.3.2.4 Cuarto ensayo: Incidencia del método de saturación en las pérdidas de sustrato

5.3.2.4.1 *Introducción*

En el apartado 5.3.2, se han planteado los factores que afectan a la pérdida de sustrato durante la saturación por ebullición. En los tres ensayos anteriores se ha estudiado la incidencia de los cierres, que tienen como función impedir la salida del sustrato.

El método de saturación es el agente causante de la pérdida de sustrato (5.3.2). En este ensayo se estudia la incidencia del método de saturación en la pérdida de material durante ésta.

Las diferencias observadas entre sustratos respecto a la pérdida de material, aconseja incluir el sustrato como factor de variación.

5.3.2.4.2 *Objetivo*

El objetivo de este ensayo es evaluar la incidencia del método de saturación en las pérdidas de material durante la misma.

5.3.2.4.3 *Material y métodos*

5.3.2.4.3.1 Planteamiento estadístico

Se plantea un ensayo factorial con dos factores de variación: método de saturación (3 niveles) y sustrato (6 niveles). El número de repeticiones considerado es seis.

5.3.2.4.3.1.1 *Sustratos*

- Corteza fina <0.2 mm
- Corteza gruesa 0.5 –5 mm
- Lana de escoria
- Lana de roca hidrófila
- Perlita B-6
- Turba TKS1

5.3.2.4.3.1.2 *Métodos de saturación*

- Ebullición
- Saturación por vacío a –72 cm Hg
- Saturación por vacío a 2-5 mbar de presión absoluta

5.3.2.4.3.2 Metodología de laboratorio

Para el tratamiento de saturación por ebullición se emplea la misma metodología que en el primer ensayo (5.3.2.1.3.2).

En los tratamientos de saturación por vacío se emplea la misma metodología, pero saturando las muestras con la metodología descrita en 5.2.4.3.2.3.

5.3.2.4.4 *Resultados*

El análisis de varianza del ensayo factorial sustrato * métodos de saturación se muestra en la Tabla 54. La variable analizada es la pérdida de peso durante la saturación, expresada en porcentaje sobre el peso seco inicial. En Tabla 55, se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los tratamientos considerados en el ensayo. Por último, la Tabla 56 se refiere a la incidencia que tiene en el cálculo de la densidad real la pérdida de material durante la saturación.

El análisis de varianza presenta diferencias significativas únicamente entre sustratos. Las diferencias entre los distintos métodos de saturación y la interacción sustrato * método no son significativas (Tabla 54). La suma de cuadrados del modelo supone el 87,85% de la suma de cuadrados total, que se puede considerar como aceptable. El coeficiente de variación es un poco elevado (30,57%). En su evaluación hay que considerar el bajo valor de la media del ensayo (3,05%).

En el estudio del reparto de la variabilidad se pone, una vez más, de manifiesto la elevada incidencia del factor sustrato como fuente de variabilidad. La suma de cuadrados del factor sustrato supone el 97,81% de la variabilidad explicada por el modelo. El resto se reparte en 1,45% para el efecto interacción y 0,74% para el método de saturación empleado.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Modelo	17	533,9563	31,4092	36,14	0,0001	
Sustrato	5	522,2449	104,4490	120,19	0,0001	0,6332
Método sat	2	3,9576	1,9788	2,28	0,1088	0,4479
Sus*Mét	10	7,7538	0,7754	0,89	0,5439	
Error	85	73,8670	0,8690			
Total	102	607,8233				
$R^2= 0,8785$		C.V.=30,5691				

Tabla 54 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre. Incidencia del método de saturación: Análisis de varianza de la pérdida de sustrato para seis sustratos empleando 3 métodos de saturación.

La variabilidad no explicada por el modelo supone el 12,15% del total si se mide como suma de cuadrados. Consecuencia de ellas son los valores de la mínima diferencia significativa, que es más baja para la comparación de métodos de saturación que para la comparación de sustratos. Este menor valor de la MDS es debido al mayor número de grados de libertad (Tabla 54).

5.3.2.4.5 *Discusión*

En la Tabla 55 se detallan los datos correspondientes a las pérdidas de sustrato durante la saturación para los diferentes tratamientos considerados en el ensayo. En lo referente a las pérdidas de material durante la saturación, el comportamiento de los diferentes sustratos es muy similar. Las diferencias entre el porcentaje de pérdidas obtenidas con los diferentes métodos no llegan a 0,5 %, o sobrepasan ligeramente este valor, en el caso de la turba. El único sustrato que no sigue este comportamiento es la corteza fina. Con este sustrato, se tiene una pérdida de 5,08 % con la saturación por ebullición y 3,41 % para la saturación con un vacío de 2-5 mbares. Dado que el efecto interacción no es significativo, no podemos afirmar, con estos resultados, que el comportamiento de la corteza fina sea diferente al de los otros sustratos considerados.

La significación del factor sustrato y la no significación del factor método de saturación, se ven fortalecidas a la vista de los valores de la MDS. La MDS para sustratos es relativamente elevada (0.63), es decir, para considerar que la diferencia entre dos sustratos es significativa, la diferencia tiene que ser muy grande, y ese test es poco sensible a las variaciones de este factor; aún así el test considera significativas las diferencias encontradas. En el factor método de saturación, la MDS es menor que en el caso anterior (0.45), el test es más sensible a las diferencias entre los distintos métodos, pero las diferencias entre métodos son menores que este valor, por lo que el test no considera significativas las diferencias encontradas.

A diferencia de los ensayos anteriores, en este ensayo se ha evaluado la densidad real del sustrato, además de la pérdida de peso durante la saturación. El cálculo de la densidad real se ha hecho considerando dos hipótesis. Primera, considerando como válidos los valores iniciales y segundo considerando como válidos los valores finales. En la rutina de laboratorio únicamente

5.3 Trabajo experimental: Errores de medida

se dispone de los valores finales. Es importante, sin embargo, evaluar la diferencia con el valor que se hubiera obtenido si se hubieran empleado los valores iniciales que, posiblemente, sería lo correcto.

	Ebullición	Vacío 72 cm Hg	Vacío 2-5-mBar	Media
Corteza fina	5,08	4,69	3,41	4,38
Corteza gruesa	5,25	5,22	4,84	5,14
Lana de escoria	0,33	0,07	-0,05	0,12
Lana de roca	0,16	0,14	-0,17	0,04
Perlita B-6	5,53	5,84	5,78	5,71
Turba	2,81	2,82	2,28	2,64
Media	3,19	3,13	2,68	3,05

Tabla 55: Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre. Incidencia del método de saturación: Porcentaje de pérdida de peso durante la saturación para cada combinación sustrato*método considerados en el ensayo

El estudio de la incidencia de las pérdidas de sustrato en el valor obtenido para la densidad real se ha hecho comparando las densidades reales obtenidas a partir de los datos iniciales y finales. Para cada sustrato se obtienen tres parejas de valores, una por cada método empleado. En la Tabla 56 se detalla, para cada sustrato, la máxima diferencia entre estas tres parejas de valores, así como el valor medio de la densidad real obtenido con los valores iniciales.

La incidencia en los sustratos minerales es mínima, las diferencias no llegan en ningún caso a $0.02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Las diferencias son ligeramente superiores a $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en los casos de la corteza gruesa y de la turba, y es próxima a $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para la corteza fina. Para evaluar la incidencia de estos valores, es necesario hacer un análisis de la sensibilidad de las variables físicas de interés, sobre todo de la curva de retención de agua, a las variaciones del valor de la densidad real.

Sustrato	Máxima diferencia	Dr inicial
Corteza fina	0,09959	1,91295
Corteza gruesa	0,05808	1,47023
Lana de escoria	0,01715	2,91247
Lana de roca hidrófila	0,01107	2,86471
Perlita B6	0,01226	1,09064
Turba	0,05566	1,59249
Máximo	0,09959	
Mínimo	0,01107	

Tabla 56 : Errores de medida. Pérdida de material durante la saturación a través del cierre. Incidencia del método de saturación: Incidencia de la pérdida de sustrato en el cálculo de la densidad real. Diferencias máximas entre los valores de la densidad calculados con los valores iniciales y finales

Es de hacer notar la escasa incidencia en el valor de Dr de la perlita, a pesar de que las pérdidas de material son muy importantes. Para explicarlo hemos de considerar que la diferencia entre los dos valores de la densidad real se puede expresar de la forma:

$$(178) \quad Dr_2 - Dr_1 = \frac{da \times Pd \times (Ps_2 - Ps_1)}{(Ps_2 - Pd) \times (Ps_1 - Pd)}$$

Donde los subíndices 1 y 2 corresponden a los valores inicial y final respectivamente, los valores no afectados de subíndices son comunes a para el cálculo de ambos valores. Dr corresponde a densidad real, Pd a peso dentro del agua, da a densidad del agua del baño y Ps al peso seco.

Se demuestra que el peso dentro del agua (Pd) es igual al peso seco por la diferencia entre la densidad real del cuerpo sumergido y la densidad del agua $Pd=Ps*(Dr-da)$. En el caso de la perlita, su densidad es próxima a la del agua, por lo que el peso obtenido dentro del agua es próximo a cero. Por lo tanto, el numerador de la fracción también será próximo a cero aún cuando al diferencia Ps_2-Ps_1 sea relativamente elevada

5.3.2.5 Discusión general

Los ensayos precedentes aportan información sobre los factores que inciden en la pérdida de sustrato durante la saturación, sobre las características de la misma y sobre su incidencia en el cálculo de la densidad real. Se ha hecho una discusión de resultados para cada uno de los ensayos. En este apartado se desarrolla una discusión adicional que proporciona una visión conjunta de los ensayos realizados.

5.3.2.5.1 Factores que inciden en las pérdidas de sustrato durante el proceso de saturación

Los factores considerados en el estudio de la pérdida de sustrato han sido el propio sustrato, el tipo de cierre empleado y el sistema de saturación.

5.3.2.5.1.1 Factor sustrato

Los análisis estadísticos ponen claramente de manifiesto que el factor que más incidencia tiene es el propio sustrato. A este factor se le puede asignar, normalmente, más del 95% de la variabilidad explicada por los distintos modelos estudiados. El segundo factor considerado en cada ensayo (tipo de cierre o método de saturación) y el efecto interacción, se reparten el pequeño porcentaje restante.

La única excepción se presenta en el ensayo en el que se incluye la perlita B-12. En este caso, el efecto interacción supone más del 26% de la variabilidad explicada por el modelo (primer ensayo). La inclusión de la perlita B-6 no provoca una elevación sustancial de la suma de cuadrados del efecto interacción (cuarto ensayo).

Una posible razón de la diferente incidencia de la perlita B-12 y B-6 puede ser la diferencia en la composición granulométrica. La perlita B-6 es de granulometría fina, en la que las diferencias entre los componentes más gruesos y las más finas es inapreciable a simple vista. La curva granulométrica de la perlita B-12 es mucho más amplia y, a simple vista, se distinguen claramente distintas granulometrías.

La amplitud de la curva granulométrica en el caso de la perlita B-12, junto con su baja densidad, tiene como consecuencia su gran facilidad para decantarse por tamaños, dificultando considerablemente el muestreo representativo y repetitivo. La perlita B-6 no presenta este problema, debido a la homogeneidad de las partículas que la componen.

Si asumimos como cierta esta hipótesis, las distintas muestras obtenidas para la perlita B-12 pueden presentar diferencias en la proporción de finos, inapreciables a simple vista, pero con una gran incidencia en las variables medidas, entre ellas el porcentaje de material perdido durante la saturación. De esta forma, el efecto interacción del análisis de varianza estaría encubriendo un problema de muestreo.

5.3.2.5.1.2 Incidencia de los factores tipo de cierre y método de saturación

Los análisis estadísticos realizados ponen claramente de manifiesto que la incidencia de estos dos factores en la pérdida de sustrato durante el proceso de saturación es mínima.

Esta afirmación la basamos, por una parte, en la escasa incidencia en la variabilidad de estos factores y de sus respectivas interacciones con el factor sustrato. Por otra parte, se puede considerar que no se presentan diferencias significativas ni para estos factores ni para los correspondientes efectos interacción. Las excepciones a esta regla, significación del factor sustrato en el primer ensayo y del efecto interacción en el primer y cuarto ensayo, ya han sido discutidas en los apartados correspondientes.

Esta no incidencia es importante puesto que, desde el punto de vista de la pérdida de material durante la saturación, no hay nada que objetar respecto al método de saturación a emplear ni respecto al cierre a utilizar. Únicamente en el tercer ensayo parece observarse una ligera incidencia de la luz de malla cuando el sustrato utilizado es la turba.

La elección del método de saturación se hará, en consecuencia, considerando otros factores como la eficacia de la saturación obtenida. Respecto al cierre de los anillos metálicos, estos resultados permiten seleccionarlos, considerando otros criterios como puede ser la facilidad de manejo.

5.3.2.5.1.3 Incidencia del manejo y del muestreo

En los ensayos realizados, el manejo de las muestras y el método de muestreo no se han considerado como factores de variación. Sin embargo, cuando se comparan los resultados obtenidos para un mismo sustrato en diferentes ensayos, se observan diferencias que pueden explicarse bien por diferencias en el muestreo o bien, por diferencias en el manejo de la muestra.

La perlita presenta diferencias importantes entre los comportamientos observados en los ensayos primero y cuarto. Los resultados obtenidos en el primer ensayo son muy dispares y varían entre 1,05% para la malla de nilón y 4,90% para el textil B. En el ensayo cuarto, por el contrario, las variaciones entre los distintos métodos de saturación empleados son muy uniformes y varían entre 5.53% para la saturación por ebullición y 5.84% para la saturación a vacío de 72 cm Hg. En el primer caso, se trata de perlita B-12 y en el segundo, de perlita B-6. Este comportamiento es coherente con los problemas de muestreo de la perlita discutidos en el apartado 5.3.2.5.1.1.

Las dificultades de muestreo en el caso de la perlita B-12, derivados de la amplitud de su curva granulométrica y de su baja densidad, interfieren y se enmascaran en los tratamientos

considerados. En el caso de la perlita B-6, su homogeneidad facilita su muestreo y la utilización de muestras similares para los diferentes tratamientos.

Otro hecho que incide en este mismo sentido es la magnitud de las pérdidas de sustrato observadas en uno y otro caso. Las pérdidas observadas para la perlita B-6 son mayores que las observadas para cualquiera de los tratamientos en los que se ha empleado la perlita B-12. Este comportamiento es coherente con la hipótesis de la dificultad de muestreo. Es lógico suponer que las pérdidas se producirán en mayor proporción en las granulometrías finas, como la perlita B-6. Las diferencias entre los distintos tratamientos en el caso de la perlita B-12 serían debidas, si aceptamos esta hipótesis, a la diferente proporción de elementos finos que forman parte de la muestra.

La turba también presenta algunas diferencias entre los diferentes ensayos, aunque en contraste con la perlita B-12, estas diferencias son mínimas para los diferentes tratamientos de un mismo ensayo. Estas diferencias podrían explicarse por los distintos orígenes de las turbas empleadas, bien sea porque son de distinta marca o simplemente, de distinto lote. La uniformidad entre las muestra e incluso entre los distintos tratamientos de un mismo ensayo, pone de manifiesto que no se han presentado problemas en el muestreo.

La lana de roca presenta diferencias de comportamiento entre el primero y el cuarto ensayo. Al igual que en el caso de la turba, la uniformidad dentro de un mismo ensayo nos indica la ausencia de problemas de muestreo. La lana de roca se obtiene mediante un proceso industrial que garantiza una buena homogeneidad entre los diferentes lotes, por lo que tampoco se puede pensar que esto incida en los resultados. La única diferencia controlada es que en el primer ensayo se empleó mezcla de lana de roca hidrófila e hidrófoba, mientras que en el segundo caso se empleó solo hidrófila. Pudiera ser que haya diferencias de tamaño de fibra entre una y otra, que incidieran en el porcentaje de material perdido, pero es poco probable. Es presumible que las diferencias observadas en este caso sean debidas a problemas de manejo de las muestras.

5.3.2.5.2 *Características del material evacuado*

El segundo ensayo se realizó para determinar cómo se reparte el material perdido entre las fracciones soluble y en suspensión. Los resultados obtenidos no tienen la fiabilidad suficiente para obtener conclusiones. Sin embargo, parecen indicar que, en el caso de la turba empleada en el ensayo, se produce una pérdida de material en disolución, que supone un porcentaje más o menos constante del material inicial. La pérdida del material en suspensión no se ha podido evaluar, aunque en el caso mencionado parece que es más importante que la pérdida de material en disolución.

Los resultados de la turba en el ensayo tercero parecen indicar que las pérdidas aumentan con la apertura de la malla utilizada en el cierre. Esto indicaría que se trata de material que se pierde a través de la malla, es decir material en suspensión correspondiente a las granulometrías más finas.

Los materiales perdidos durante la saturación inciden en los cálculos posteriores de diferente manera, si se trata de materiales en suspensión o si se trata de sales solubles. Incluso en este último caso, depende de la forma en que estén presentes en el sustrato. La incidencia es distintas si están en forma de gránulos o fijados en la superficie de las partículas. Tanto los materiales en suspensión como las sales presentes en forma de gránulos ocupan un cierto volumen, y la pérdida de estos materiales implica, por lo tanto, la pérdida de volumen. Si se trata

de sales fijadas en la superficie de las partículas del sustrato, se puede considerar que no ocupan volumen. La pérdida de este material implica una pérdida de peso, pero no una pérdida de volumen. La incidencia en los cálculos posteriores es pues distinta, según se trate de uno u otro caso.

5.3.2.5.3 *Incidencia en el cálculo de la Densidad Real*

En el cuarto ensayo se han tomado medidas adicionales que permiten calcular la densidad real. Los resultados muestran una mayor incidencia en el caso de los sustratos orgánicos. Para evaluar la importancia de estas diferencias, es necesario estudiar su incidencia en la curva de retención de agua.

5.3.2.6 *Recapitulación*

1. Factores que inciden en la pérdida de sustrato durante la saturación
 - 1.1. La cantidad de sustrato perdido durante la saturación depende principalmente del sustrato empleado
 - 1.2. La incidencia del tipo de cierre y del método de saturación empleado es mínima
 - 1.3. El muestreo del sustrato puede tener una incidencia importante en la variabilidad de los resultados obtenidos, cuando se emplean sustratos de difícil muestreo como es la perlita B-12
 - 1.4. El manejo de las muestras en el laboratorio puede aumentar la cantidad de sustrato perdido
2. Características del material perdido
 - 2.1. En el caso de la turba, la componente soluble del material evacuado durante la saturación se mantiene dentro de márgenes estrechos
 - 2.2. Se observa una cierta relación entre la cantidad de material evacuado y la luz de la malla utilizada en el cierre
3. La incidencia de la cantidad de material perdido durante la saturación en el cálculo de la densidad real, no parece muy elevada. Esta incidencia parece que es mayor en para los sustratos orgánicos que para los sustratos minerales

5.3.3 *Incidencia de la instrumentación en los errores de medida*

En este apartado se analizan y evalúan las distintas fuentes de error que inciden en el proceso experimental de medida y su transmisión a los valores netos de las variables medidas. La comparación entre ambos, error valor de la variable medida, proporciona el criterio para considerarlo como asumible o rechazarlo por excesivo.

Se consideran cuatro fuentes de error: la densidad del agua, y los tres componentes del recipientes portamuestras, anillo metálico, tela de cierre y elástico de sujeción de la tela al anillo metálico.

5.3.3.1 *Materiales*

5.3.3.1.1 *Determinación de la densidad del agua*

Se han empleado los datos correspondientes a la determinación de la densidad del agua en 277 casos. En cada uno de estos casos, se hace la evaluación antes y después de la medida de los empujes empleando para ello dos patrones de volumen. Por lo tanto, para cada uno de los 277 casos, se tienen cuatro datos para la densidad del agua.

Se han empleado dos patrones de volumen fabricados en barra calibrada de acero inoxidable AISI 304L de 70 mm de diámetro. Las caras superior e inferior de cada uno de los patrones se trabajaron con torno. La utilización de barra calibrada hizo innecesario trabajar al torno la superficie lateral. Las medidas se calcularon para obtener unos de patrones de 200 y 300 cm³ aproximadamente, que con el diámetro de 70 mm, proporciona unas longitudes de 52 y 78 mm aproximadamente.

Los dos patrones así obtenidos se calibraron en el laboratorio de metrología de TEKNIKER -Asociación de Investigación Tecnológica-. Se midieron los diámetros superior e inferior de cada una de las dos piezas y la altura con una incertidumbre de ± 0.01 mm y un factor de incertidumbre $K=2$, correspondiente a un valor $\alpha=95\%$. El error de paralelismo entre las dos caras planas de cada una de las piezas es de 0,05 mm aproximadamente.

Los volúmenes obtenidos para los valores medios son de 198,918 cm³ y 298,808 cm³ para los patrones 1 y 2, respectivamente. La incidencia en el cálculo del volumen del error de medida de $\pm 0,01$ mm es de $\pm 0,0953$ cm³ para el primer caso, y de $\pm 0,1239$ cm³ para el segundo patrón.

5.3.3.1.2 Anillos metálicos

Los anillos metálicos se han construido en tubo sin soldadura de acero inoxidable AISI 316L SCH10 3", con un diámetro exterior de 88.9 mm y 3.05 mm de pared. Para su construcción se ha partido de una pieza de 6 m de longitud, de la cual se han obtenido parejas de anillos metálicos de 40 y 30 mm de longitud que forman el doble anillo portamuestras. Las piezas resultantes del troceado de la pieza original de 6 m se han trabajado con torno para obtener dos secciones planas perpendiculares al eje del anillo y distanciadas entre si 30 ó 40 mm, según los casos.

Se ha trabajado con dos lotes de anillos, obtenidos en dos ocasiones distintas. En el primer lote, denominado serie 500, se obtuvieron 65 piezas de 40 mm. En el segundo lote, denominado serie 600, se obtuvieron 97 piezas de 40 mm.

5.3.3.1.3 Mallas de nilón

Se ha empleado malla de nilón de 75 μ m de luz en discos de 140 mm de diámetro. El corte de estos discos se ha efectuado con láser por dos motivos: la uniformidad entre las piezas obtenidas, y la soldadura del borde. Este corte con láser produce la soldadura, en el borde del disco, de los extremos de los hilos que componen la malla, que con otros métodos de corte quedarían sueltos. Esta soldadura evita la pérdida de los hilos del tejido y contribuye al mantenimiento de la integridad de la tela.

5.3.3.1.4 Juntas tóricas de silicona

Las juntas tóricas empleadas para la sujeción de las telas al anillo metálico, fueron elaborados con silicona de 70° de dureza. Las dimensiones corresponden a uno de los tamaños comerciales que elabora la empresa suministradora, 82.5 mm de diámetro interior, y 4 mm de diámetro para la sección tórica. El material empleado es resistente a temperaturas superiores a 200 °C, lo que permite someterlas a ebullición junto con la muestra de sustrato, y mantenerlas con la muestra durante el secado en estufa.

Se ha trabajado con dos lotes diferentes. La utilización de ambos lotes se ha solapado en el tiempo. Cada uno de los dos lotes corresponde a un único proceso de fabricación, para obtener así la máxima uniformidad posible entre los diferentes elementos del lote. Con objeto de diferenciar las juntas de uno y otro lote, en un caso se empleó colorante rojo (serie R) y en otro, colorante blanco (serie B).

5.3.3.1.5 Bandas elásticas de caucho

La función del elástico es la sujeción de la tela, para mantener la muestra dentro del anillo metálico. Como ya se ha comentado, inicialmente se empleó alambre, pero pronto se desechó por las dificultades de manejo. El paso siguiente fue el empleo de juntas tóricas de silicona, con una resistencia a temperaturas por encima de 200 °C. Esto nos permitía no solo someterlas a ebullición, sino también introducirlas en la estufa de secado, manteniendo así durante todo el proceso la integridad del conjunto de muestra más contenedor portamuestras. Sin embargo, con el paso sucesivo por la estufa de secado, disminuía la elasticidad de la silicona y con ella, la eficacia de la sujeción a la tela.

El paso de la saturación por ebullición a la saturación por vacío permitió la sustitución de las juntas de silicona por otro material no resistente a altas temperaturas, aunque esto significó modificar la rutina de trabajo, puesto que tampoco se podían introducir en la estufa de secado. A cambio de esta dificultad, los nuevos cierres de caucho proporcionaron una sujeción más eficaz de la tela y un mayor control del volumen de la muestra contenida en el interior del anillo metálico.

	Caucho negro		Caucho marrón	
	Especificación	Valor obtenido	Especificación	Valor obtenido
Características generales				
Caucho base	EPDM		Caucho natural	
Color mezcla	Negro		Caramelo	
Cargas	Negro de humo		Blanca inorgánica (sílice)	
	Blanca inorgánica (caolín)			
Resistencia a la temperatura	Máximo 150°C		Máximo 70°C	
Resistencia a la luz V-UV	Excelente		Mala	
Características mecánicas				
Dureza (Shore A)	40±5	41,8	40±5	40
Alargamiento (%)	≥300%	567	≥450%	700
Res. Rótura (kg*cm ⁻²)	≥70	78,8	≥100	238
D.R.C. 70°C,22H (%)	≤40%	19,8%	≤40%	16%
D.R.C. 100°C,24H (%)	≤50%	27,9%	-	-
Densidad (g*cm ⁻³)	1,05±0,03	1,056	1±0,03	0,980

Tabla 57 : Errores de medida: Características de los dos tipos de caucho empleados para la elaboración de las bandas elásticas de caucho. Datos tomados del informe de laboratorio elaborado por la empresa fabricante Manufacturas Técnicas del Caucho S.A. de Lezama (Bizkaia).

Se emplearon dos calidades de caucho, que denominaremos como negro y marrón, con distintas características que se facilitan en la Tabla 57.

Los elásticos se han obtenido a partir de la fabricación previa de tubo de caucho, que se cortó en bandas manualmente, lo que ha incidido en la heterogeneidad de las piezas obtenidas. Se han fabricado bandas cilíndricas de caucho de aproximadamente 1 cm de ancho, 78 mm de diámetro, y 3 mm de espesor.

Se han fabricado dos lotes de piezas, uno de 80 piezas de caucho negro y otro de 270 piezas de caucho marrón. El caucho marrón es el que emplea como base el caucho natural, es más sensible a la degradación y menos resistente a la temperatura, pero es más elástico como se puede ver en el porcentaje de alargamiento. Esta diferencia en la elasticidad ha sido el factor crítico en la elección del tipo de caucho a utilizar. El caucho negro ha resultado difícil de manipular. La mayor elasticidad del caucho marrón facilita considerablemente la manipulación de los cierres del contenedor y, en definitiva, agiliza el trabajo de laboratorio.

Las posibilidades de fabricación de estas piezas se han limitado a las medidas disponibles en la empresa elaboradora. Quizás si se fabricasen con un diámetro mayor, la limitación que presenta la elasticidad en el caso del EPDM deja de serlo. Si así fuera, la resistencia a la temperatura que presenta este caucho puede suponer una importante ventaja sobre el caucho natural.

5.3.3.2 Métodos

5.3.3.2.1 *Determinación de la densidad del agua*

5.3.3.2.1.1 Metodología

La determinación de la densidad del agua se obtiene a partir del empuje experimentado por los patrones mencionados, cuyo volumen es conocido. Una vez conocidos volumen y empuje, el valor de la densidad viene dado por la expresión:

$$(179) \quad D_{\text{agua}} = \frac{\text{Empuje}(E)}{\text{Volumen}(V)}$$

El volumen se obtiene del calibrado previo. El empuje se obtiene como diferencia entre el peso fuera del agua y el peso sumergido en el agua.

El peso fuera del agua se obtiene por gravimetría directa con una balanza de 0,01 g de precisión. El peso sumergido se obtiene con la misma balanza, en la que se dispone de un soporte suspendido y sumergido en el baño de agua, en el que se coloca el patrón de volumen.

Este proceso se repite 4 veces para cada lote de 20 ó 40 muestras de sustrato o envases. Estas 4 determinaciones corresponden a 2 determinaciones (una con cada patrón) antes de sumergir las muestras y otras 2 (una con cada patrón) después de haber tomado los pesos sumergidos de todas las muestras del lote.

Para el cálculo de volúmenes de cada lote de muestras, el valor de la densidad de agua considerado, es el valor medio de las cuatro determinaciones efectuadas.

5.3.3.2.1.2 Análisis de datos

El estudio de los valores obtenidos para la densidad del agua se ha realizado considerando la incidencia de tres factores: baño, momento y patrón. Para cada una de las combinaciones de los tres factores, se dispone únicamente de un valor sin repeticiones. La situación es similar a la que se presenta en los ensayos de campo con diseño de bloques al azar. En este último caso, la variabilidad correspondiente al efecto interacción bloque * tratamiento se asimila al error. De forma similar, en nuestro caso, la variabilidad del efecto interacción triple se asimila al error. Este planteamiento es válido siempre que el efecto interacción no sea significativo. En nuestro caso, y como se verá más adelante, las interacciones dobles no son significativas. Esto no implica que el efecto interacción triple no sea significativo, pero indica que es una hipótesis viable.

El factor baño identifica a la masa de agua utilizada en cada momento como fluido en el que se realiza la medición de volúmenes. El agua se toma directamente del suministro urbano, pudiendo presentar diferencias de densidad, en función de su composición y temperatura en el momento de la medición.

El factor momento identifica el instante en que se realiza la evaluación de la densidad del agua con respecto a la evaluación de volúmenes: antes, referido a la evaluación de la densidad previa a la entrada de las muestras en el agua; después, referido a la determinación de la densidad al final del proceso, una vez que todas las muestras han pasado por el baño, se han tomado los datos de peso y se han sacado del agua. Se consideran dos posibles causas que pueden alterar el valor de la densidad real entre estos dos momentos. Por una parte, la variación de temperatura a lo largo del proceso. Por otra, el aumento de la cantidad de material disuelto en el agua procedente de las muestras.

El tercer factor considerado es el patrón de volumen empleado para evaluar la densidad del agua.

5.3.3.2.2 *Medida del reparto volumétrico*

5.3.3.2.2.1 Rutina de laboratorio

El contenedor portamuestras consta inicialmente de dos anillos metálicos superpuestos, de 40 mm el inferior y 30 mm el superior, unidos entre sí por una banda elástica de caucho y cerrados en los extremos libres con sendas telas que se sujetan a los anillos metálicos con juntas de silicona o bandas elásticas de caucho. La muestra preparada dentro de este contenedor se somete a una primera saturación. Una vez saturada, se quita la cubierta superior del contenedor y se somete a tensionado en lecho de arena. Una vez tensionado, se quita el anillo superior de 30 mm, quedando únicamente el de 40 mm cerrado en la parte inferior; después se elimina el sustrato sobrante, con lo que el volumen y altura de la muestra coincide con los del anillo de 40 mm de altura. Se vuelve a colocar la cubierta superior y sobre esta muestra se hace la toma de datos.

Por lo tanto, el contenedor portamuestras sobre el que se hace el control consta de 5 piezas: el anillo metálico de 40 mm descrito en 5.3.3.1.2, cerrado por ambas bases con sendas mallas de nilón (5.3.3.1.3), que se sujetan al anillo mediante las correspondientes juntas tóricas de silicona (5.3.3.1.4) o bien, mediante bandas elásticas de caucho (5.3.3.1.5).

La rutina de laboratorio incluye el tratamiento simultáneo de varias muestras. Normalmente hemos trabajado con lotes de 20 muestras. Se pueden llegar a solapar en el tiempo 3 e incluso 4 lotes, lo que supone el empleo simultáneo de 80 contenedores portamuestras.

El trabajo simultáneo con varias muestras exige su identificación inequívoca, lo que se consigue mediante la identificación del anillo metálico. La identificación de los otros componentes del contenedor portamuestras no es necesaria, aunque puede darse. Esta identificación tiene consecuencias importantes tanto para la rutina de laboratorio como para el control de errores, es ventajosa para el control de dichos errores, pero aumenta la complejidad de la rutina de laboratorio.

5.3.3.2.2 Obtención de valores netos

Los valores netos correspondientes al peso y volumen de las muestras de sustrato se obtienen a partir de los valores brutos obtenidos para el conjunto sustrato más contenedor portamuestras, y de los valores tara obtenidos para el contenedor. El error del valor neto es función del error del bruto y del error de la tara.

Con objeto de reducir estos errores al mínimo, en los ensayos llevados a cabo para el desarrollo metodológico, los valores correspondientes a bruto y tara se han obtenido experimentalmente, y, por diferencia entre ellos, los valores netos. Esto obliga a hacer los controles por partida doble, una vez para obtener el valor bruto y otra para obtener las taras.

Las taras pueden obtenerse también por adición de las taras previamente medidas de cada uno de los componentes del contenedor portamuestras. Si estas evaluaciones tienen la suficiente fiabilidad, el trabajo de laboratorio se reduce considerablemente.

5.3.3.2.3 Identificación de los elementos del contenedor

La identificación individualizada de todos los elementos que constituyen el contenedor portamuestras posibilita la evaluación de la tara a partir de los datos propios de cada elemento, es decir de cada tela concreta y de cada junta o elástico concreto. Cuando un determinado componente del contenedor está constituido por elementos no identificados individualmente, el valor a emplear en la tara es el valor medio de todos los elementos de ese componente. Si las telas de cierre no se identifican individualmente, las dos telas necesarias para cerrar un determinado contenedor se eligen al azar. En el cálculo de la tara del contenedor, se emplea como peso de cada tela el valor medio de todas las telas que constituyen el lote.

La identificación de los elementos del contenedor presenta tres condicionantes:

1. El número de datos a manejar es mayor
2. Los elementos individuales deben ser claramente identificables
3. Es deseable que los elementos empleados tengan durabilidad en el tiempo

La importancia del primer factor considerado depende de los medios empleados para los cálculos posteriores. Si se emplean medios informáticos, la utilización de una base de datos, que organiza los datos correspondientes a las taras, no presenta ningún problema.

La posibilidad de identificar individualmente los distintos elementos depende de si disponen o no de una superficie adecuada para marcarlos de forma indeleble.

Por último, la durabilidad en el tiempo rentabiliza el trabajo realizado para obtener las taras. Cuanto más duradero sea, más útil es para aumentar la precisión de las medidas tomadas como taras.

5.3.3.2.3 *Comportamiento y evaluación de los errores*

En el apartado (1.3.5.3.1.1), se ha definido la exactitud como la diferencia entre el valor verdadero y el valor medido. La precisión es el grado de aproximación de un número de resultados similares o repetidos a un valor común de la serie de medidas. Las diferencias entre los valores obtenidos para distintas muestras de un mismo sustrato, informan sobre la precisión de las mediciones realizadas, y, por lo tanto, es a la precisión a la que nos referiremos en lo sucesivo.

En el caso de los componentes del contenedor, se trabaja con elementos similares, cuyas medidas siguen una distribución normal, de media \bar{x} y desviación estándar s . La probabilidad de error $\leq \varepsilon$ es igual a la probabilidad del intervalo $\bar{x} \pm \varepsilon$ de la distribución normal de media \bar{x} y desviación estándar s .

En el caso de mediciones directas se han efectuado medidas repetidas de cada uno de los elementos de un lote. La diferencia entre la primera y la segunda lectura correspondiente a un mismo elemento, sigue una distribución normal de media $\bar{x} = 0$ y desviación estándar s . Al igual que en el caso anterior, la probabilidad de error $\leq \varepsilon$ es igual a la probabilidad del intervalo $\bar{x} \pm \varepsilon$ de la distribución normal de media \bar{x} y desviación estándar s .

Para conocer la probabilidad de error de un valor obtenido como suma de otros dos, es necesario conocer el valor de la desviación estándar. Una vez conocida esta desviación estándar, se aplica el mismo criterio que en los dos casos anteriores.

Cuando se suman dos variables independientes, las varianzas son aditivas, es decir, la varianza de la suma es igual a la suma de las varianzas. Aplicando esta relación y conocidos los valores de las desviaciones estándar de los sumandos, la obtención de la desviación estándar de la suma es inmediata.

Los procesos de medida empleados para cada uno de los componentes del contenedor, son independientes entre sí; en consecuencia, la aditividad de las varianzas es de plena aplicación en este caso. El proceso de medida de pesos y volúmenes brutos es, también, independiente de los anteriores, por lo que la aditividad de las varianzas también es de aplicación en la obtención del peso neto.

En consecuencia, la probabilidad de error de la tara sigue una distribución normal cuya desviación estándar se obtiene a partir de la aditividad de las varianzas de los cinco componentes del contenedor. La probabilidad de error del valor neto sigue una distribución normal, cuya distribución estándar se obtiene a partir de la aditividad de las varianzas de bruto y tara.

5.3.3.2.4 *Criterios para la utilización de datos medios o individualizados*

La opción de identificar o no los elementos de un determinado componente del contenedor, depende:

- De la incidencia del error en uno y otro caso
- De la posibilidad de identificarlo adecuadamente

➤ De su incidencia en la complejidad de la rutina de laboratorio

En ocasiones, algunos de estos factores pueden actuar como limitantes, mientras que otras veces solo supondrá la elección de una alternativa más o menos favorable.

En el caso de elementos individualizados, el error de la tara del componente corresponde al error del método de medida. En el caso de elementos no individualizados, el error corresponde a la diferencia entre el valor medio empleado y el valor verdadero del elemento empleado. El error, en este caso, está relacionado con la variabilidad de los datos. La distribución de probabilidad del error coincide con la distribución de probabilidad de las medidas obtenidas.

Respecto a los condicionantes que se presentan para la identificación individualizada de los elementos, el factor que se puede presentar como limitante es la disponibilidad de una superficie adecuada. Las juntas tóricas de silicona son un claro ejemplo de esta limitación.

La incidencia de la rutina de laboratorio en la complejidad se considera en último lugar. Normalmente esta rutina está condicionada por la elección de los factores anteriores, aunque en ocasiones puede quedar alguna opción dentro de un abanico de posibilidades más o menos amplio.

5.3.3.2.4.1 Evaluación del error debido al empleo de datos medios

5.3.3.2.4.1.1 Anillos metálicos

Se han obtenido los pesos y volúmenes correspondientes a cada uno de los elementos de las dos series, 500 y 600. Los pesos se han obtenido por gravimetría con una balanza de 0,01 g de precisión. Los volúmenes se han obtenido por desplazamiento de fluidos.

En el caso de la serie 500, todas las mediciones se hicieron por duplicado, tomándose como tara la media de las dos determinaciones. En el caso de la serie 600, las mediciones se efectuaron una sola vez para cada elemento.

A partir de los pesos y volúmenes de todos los elementos, se ha obtenido -para cada serie- el valor medio, la desviación estándar y los valores máximo y mínimo. La diferencia entre los valores máximo y mínimo proporciona la amplitud del intervalo de variación de los valores observados. Con los valores de la media y la desviación estándar, se ha calculado la amplitud de los intervalos, simétricos respecto a la media, que contienen el 99%, 95% y 90% de los datos.

5.3.3.2.4.1.2 Mallas de nilón

Se ha controlado el peso de un lote de 126 elementos. Para ello, se ha empleado una balanza analítica de 0,0001 g de precisión. Respecto al volumen, su evaluación por desplazamiento de fluidos presenta grandes dificultades, porque el valor de su densidad (entre 1 y 1,14 g*cm⁻³) es muy próximo a la del agua. Para evaluar su volumen por este método es necesario emplear un lastre, por lo que se ha recurrido a la evaluación conjunta del volumen de las mallas con las juntas de silicona. Se evaluó el volumen de 13 muestras compuestas de 2 juntas tóricas de silicona más dos discos de malla de nilón.

5.3.3.2.4.1.3 Juntas tóricas de silicona

Se ha hecho un control de peso de un lote de 150 elementos. Se ha empleado una balanza con una precisión de 0,01 g.

Para la evaluación del volumen se han hecho dos ensayos. Por una parte, se ha evaluado el volumen ocupado por muestras de 10 juntas de silicona. Se han empleado para ello 8 muestras de 10 juntas procedentes de 2 lotes distintos, 4 muestras de cada uno de los dos lotes. Por otra parte, se ha evaluado el volumen de 13 muestras compuestas por dos juntas de silicona y dos discos de malla de nilón de 75 μm de luz.

5.3.3.2.4.1.4 Bandas elásticas de caucho

Se ha tomado el peso de todas las piezas con una balanza de 0,01 g de precisión.

La densidad del caucho, próxima a 1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (ver Tabla 57), dificulta la evaluación del volumen por desplazamiento de fluidos. La utilización de lastres soluciona este problema. Por ello, se ha evaluado el volumen del conjunto del anillo metálico con las dos piezas correspondientes de caucho empleadas para sujetar las telas de cierre. Esta evaluación se ha hecho una sola vez para cada conjunto de anillo metálico más las correspondientes dos piezas de caucho.

5.3.3.2.4.2 Evaluación del error debido al empleo de métodos de medida directos

La metodología para obtener el reparto volumétrico de fases requiere la medición directa de pesos y volúmenes. Los pesos se obtienen con una balanza de 0,01 g de precisión. Los volúmenes se miden por desplazamiento de fluidos.

La precisión de los métodos de medida directa se ha evaluado mediante la obtención de medidas repetidas de un mismo elemento. Con los datos correspondientes a las mediciones duplicadas, se ha obtenido el valor de la media y de la desviación estándar para las diferencias entre las parejas de valores correspondientes a un mismo elemento. La distribución de probabilidad de esas diferencias se corresponde con la distribución de probabilidad del error de medida.

La evaluación del volumen interno del anillo metálico, coincidente con el volumen de la muestra de sustrato, se ha obtenido a partir de las mediciones de diámetro y altura del anillo.

5.3.3.2.4.2.1 Gravimetría

El control de peso se realizó con una balanza de 0,01 g de precisión. Para obtener la distribución de probabilidad de error, se han obtenido medidas duplicadas de los 65 anillos metálicos de 40 mm que componen la serie 500, de un lote de 80 bandas elásticas de caucho negro, y de un lote de 190 bandas elásticas de caucho marrón.

5.3.3.2.4.2.2 Volumen por desplazamiento de fluidos

El método empleado en todos los casos para evaluar el volumen ha sido el desplazamiento de fluidos.

La distribución de probabilidad de error se ha obtenido a partir de las medidas duplicadas de los volúmenes correspondientes a los 65 anillos metálicos de 40 mm, que componen la serie 500.

5.3.3.2.4.2.3 *Evaluación del volumen interno del anillo metálico*

Se ha hecho un muestreo de 6 anillos metálicos de la serie 500, en los que se ha evaluado el volumen interno a partir de los valores obtenidos para el diámetro y la altura. Las mediciones se ha obtenido con un calibre de 0,1 mm de precisión.

En cada uno de 6 los anillos metálicos que componen la muestra, se han medido 4 diámetros internos y cuatro alturas. Los 4 diámetros medidos corresponden a 2 perpendiculares entre sí en cada cara. Las alturas corresponden a 4 generatrices del cilindro separadas entre sí 90° aproximadamente.

5.3.3.3 Resultados y discusión

5.3.3.3.1 *Evaluación de la densidad del agua*

5.3.3.3.1.1 Precisión de la medida

El volumen de los patrones empleados como referencia se ha obtenido a partir de medidas lineales. La precisión de estas medidas incide en el cálculo del volumen del patrón, proporcionando unos intervalos de $198,918 \pm 0,095 \text{ cm}^3$ y $298,808 \pm 0,124 \text{ cm}^3$ para los patrones 1 y 2, respectivamente, y un valor de $\alpha=0,95$. En el cálculo de la densidad se emplea del valor medio.

Si en lugar del valor medio se emplean los valores extremos del intervalo, se obtendrán los valores extremos del intervalo de densidades. Aplicando este criterio, y en el supuesto de que el valor de densidad medida sea $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, los intervalos obtenidos para densidad son $1 \pm 4,79 \cdot 10^{-4}$ en el caso del patrón 1 y $1 \pm 4,14 \cdot 10^{-4}$ en el caso del patrón 2. Por lo tanto, la precisión de las medidas de la densidad del agua obtenida con estos patrones es del orden de $\pm 4,5 \cdot 10^{-4}$.

5.3.3.3.1.2 Análisis estadístico

En la Tabla 58 se muestra el resultado del análisis de varianza considerando los tres factores señalados, patrón, momento de medida y baño. En la Tabla 59 se resume la incidencia de los tres factores considerados, señalando los valores mínimo y máximo de los valores medios correspondientes a los diferentes niveles de cada factor, así como la diferencia entre ambos.

Las distintas fuentes de variación consideradas presentan una gran diferencia en el número de grados de libertad, existiendo dos grupos con 1 y 276 gl. Esto afecta a la suma de cuadrados, por lo que puede resultar poco representativa del reparto de la variabilidad. El efecto de los grados de libertad se neutraliza en los cuadrados medios, por lo que, en este caso, resulta más representativo que la suma de cuadrados. Atendiendo al valor de los cuadrados medios, el más alto corresponde al factor momento de medida, seguido del factor baño, mientras que el valor más bajo del cuadrado medio corresponde al factor patrón (Tabla 58).

5.3 Trabajo experimental: Errores de medida

Los efectos interacción doble no son significativos, como tampoco son significativas las diferencias debidas al factor patrón. Sí son significativas, en cambio, las diferencias debidas a los factores momento y baño.

El valor de la MDS para los factores patrón y momento son similares a la precisión de la medida de la densidad del agua discutida en el apartado 5.3.3.3.1.1. Esta sensibilidad coincide con la del método experimental de medida de la densidad del agua.

F.V.	G.L.	S.C. (*10 ⁻⁶)	C.M. (*10 ⁻⁶)	Valor F	α	M.D.S. (*10 ⁻⁴)
Modelo	830	9367,67	11,29	1,45	0,0002	
Patrón	1	1,84	1,84	0,22	0,6274	3,31
Momento	1	62,73	62,73	8,05	0,0049	3,31
Baño	276	4685,32	16,98	2,18	0,0001	38,98
Pat*Mom	1	11,28	11,28	1,45	0,2300	
Pat*Bañ	276	2107,20	7,63	0,98	0,5673	
Mom*Bañ	275	2493,53	9,07	1,16	0,1053	
Error	273	2127,34	7,79			
Total	1103	11495,01				

R²= 0,8149 C.V.=27,99

Tabla 58 : Errores de medida. Incidencia de la variación de la densidad del agua empleada para medir el volumen por desplazamiento de fluidos: Análisis de varianza de los valores obtenidos para la densidad del agua considerando tres factores de variación: patrón de volumen, momento de la evaluación (antes y después de la evaluación de volúmenes de las muestras) y “Baño” referido a la masa de agua empleada en cada caso.

La significación del factor baño indica que hay diferencias en la densidad del agua empleada los diferentes baños, es decir los diferentes días. En todos los casos, se ha empleado agua del suministro urbano. Los valores medios correspondientes a los baños de mayor y menor densidad son 1,019921 y 0,992618 respectivamente, con una diferencia entre ambos de $2,73 \cdot 10^{-2}$ (Tabla 59). Esta diferencia es muy superior a la sensibilidad del método de medida y a la sensibilidad del test estadístico, por lo que no deja lugar a dudas sobre la incidencia de circunstancias externas en el valor de la densidad del agua. Esto puede ser debido a variaciones en la composición del agua suministrada y/o en las temperaturas a las que se efectúa la medición.

	Mínimo	Máximo	Diferencia
Patrón	1 0,9974565	2 0,9975359	$7,94 \cdot 10^{-5}$
Momento	Antes: 0,9972573	Después 0,9977359	$4,79 \cdot 10^{-4}$
Baño	0,992618	1,019921	$2,73 \cdot 10^{-2}$

Tabla 59 : Errores de medida. Incidencia de la variación de la densidad del agua empleada para medir el volumen por desplazamiento de fluidos: Valores máximo y mínimo de los valores medios correspondientes a los diferentes niveles de cada factor y diferencia entre ambos.

La significación del factor momento indica que, durante el proceso de medida, se produce una variación de la temperatura y/o de la cantidad de sustancias disueltas, que afectan al valor de la densidad del agua. Los valores antes y después de pasar todas las muestras son 0,9972573 y 0,9977359, respectivamente. Esto representa un aumento de $4,786 \cdot 10^{-4}$, que es mayor que la MDS ($3,31 \cdot 10^{-4}$) y similar a la precisión del método de medida. Por lo tanto, y aunque no se puede descartar la incidencia de agentes externos, como la variación de temperatura y de sólidos en disolución, la contribución de la precisión del método de medida a la diferencia encontrada puede ser importante.

La no significación del factor patrón indica que es indistinto utilizar uno u otro patrón. Los valores medios de densidad correspondientes a los patrones 1 (pequeño) y 2 (grande) son de 0,9974565 y 0,9975359 respectivamente, con una diferencia entre ambos de $7,94 \cdot 10^{-5}$, menor que la MDS, cuyo valor es $3,31 \cdot 10^{-4}$, y menor también que la sensibilidad del método de medida. En consecuencia, podemos suponer que se debe a causas aleatorias. Una diferencia significativa de este factor pondría de manifiesto posibles errores en el calibrado de los patrones.

5.3.3.3.1.3 Incidencia de las variaciones de temperatura y concentración de sales en disolución en la variación de la densidad del agua antes y después de la medición de volúmenes

La variación de la densidad del agua por cambios de temperatura es del orden de $2 \cdot 10^{-4}$ por cada grado de variación. Para el agua destilada, el incremento de 15 a 16 °C, supone un descenso de la densidad de $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. En el aumento de 24 a 25 °C este descenso es de $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Es difícil calcular de forma precisa la incidencia de los cambios de concentración de sales en la densidad del agua, pero se puede hacer una primera aproximación que nos proporcione una idea de la magnitud de su incidencia. Para ello, partimos de la hipótesis de que en los intervalos de concentración en que nos movemos, el volumen de la solución permanece constante. Los compuestos que pueden pasar del sustrato a la disolución son muy diversos, y cada uno puede tener su propio comportamiento. Teniendo en cuenta la diversidad de compuestos, y que el incremento de la masa en disolución es pequeño, la hipótesis planteada presenta una buena aproximación a la realidad.

La variación de densidad entre antes y después de pasar todas las muestras es similar a la precisión del método de medida, por lo que no cabe esperar una incidencia importante de las variaciones de temperatura y concentración de sales.

Con respecto a la temperatura, la variación de densidad ($4,79 \cdot 10^{-4}$) equivale a un descenso de unos 2 °C de la temperatura del agua. Esta variación, aunque posible, es poco probable. Si el agua se toma justo antes de comenzar el proceso, lo normal es que su temperatura sea menor que la del laboratorio, por lo que, en todo caso, se produciría un aumento de la temperatura. Si el agua se ha dejado atemperar desde el día anterior, lo más probable es que la temperatura permanezca constante a lo largo de todo el proceso de medida.

Con respecto al aumento de sales en disolución, si consideramos un volumen de 50 litros de agua, la variación de densidad corresponde a un aumento de la carga de sólidos disueltos de 23,95 g. Este material ha de proceder necesariamente del sustrato que se sumerge. Si suponemos una densidad aparente media de $0,1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, el paso de 20 muestras de 215 cm^3 , supone un peso de sustrato de 430 g. El peso de 23,95 g que ha pasado al sustrato supone el 5,5% del peso de sustrato que ha pasado por el baño de agua. Si en lugar de 20 muestras consideramos 40,

siguiendo el mismo razonamiento, el peso perdido supone el 2,75 % del peso de sustrato. La densidad aparente del sustrato empleado en este cálculo puede ser un poco baja, si se considera que entre los sustratos empleados está la corteza de pino. Si en el cálculo se considera una densidad aparente de 0,2, los porcentajes señalados se reducen a la mitad, 2,75% para 20 muestras y 1,38% para 40 muestras. Ha detenerse en cuenta, sin embargo, que los valores de densidad incluyen evaluaciones de volumen de los contenedores portamuestras limpios, que no dejan material en disolución. En cualquier caso, el cálculo presenta un elevado grado de incertidumbre, con un intervalo de variación muy amplio para el porcentaje de material de sustrato que pasa a disolución del baño.

Las variaciones de densidad observadas para el factor baño son de un orden de magnitud muy superior a las variaciones que se pueden producir por descenso de temperatura. Teniendo en cuenta la incertidumbre en el cálculo de la incidencia de las sales disueltas, nos inclinamos a pensar que la variación de la densidad se debe, en este caso, a la variación de concentración de sales en el agua.

5.3.3.3.2 *Evaluación del error debido al empleo de pesos y volúmenes medios*

5.3.3.3.2.1 Anillos metálicos

En la Tabla 60 se detallan los datos relativos a la medida de pesos y volúmenes ocupados por la parte metálica de las dos series de anillos metálicos empleadas. Los intervalos de variación son en ambos casos amplios, sobre todo los relativos a la variación de peso.

La diferencia entre los pesos máximo y mínimo está por encima de 6 g para la serie 500 y de 7,5 g para la 600. Los extremos del intervalo que contiene el 90% de los datos se distancian de la media $\pm 3,50$ g en el caso de la serie 500, y $\pm 2,38$ g en el caso de la serie 600.

Respecto a los volúmenes ocupados por la parte metálica, las diferencias entre los valores máximos y mínimos están entre $0,98 \text{ cm}^3$ para la serie 500 y $1,78 \text{ cm}^3$ para la serie 600. Los extremos del intervalo que contiene el 90% de los datos se distancian de la media $\pm 0,44 \text{ cm}^3$ para la serie 500 y $\pm 0,35 \text{ cm}^3$ para la serie 600.

El tamaño de la muestra de sustrato sometida a análisis tiene un volumen de 215 cm^3 , y un peso variable en función de la densidad aparente del sustrato. Para una densidad aparente de $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, el peso obtenido para la muestra es de 21,5 g. Un error de 3,5 g supone algo más del 16% de este tamaño muestral, que consideramos inadmisibles. La incidencia del error en el caso del volumen es considerablemente inferior. Aún en el caso de considerar el intervalo más amplio de 99%, el máximo error corresponde a la serie 500 con $0,6926 \text{ cm}^3$ (ver Tabla 60) Esto supone el 0,32% del tamaño muestral.

La incidencia del error de peso y de volumen referidos al tamaño de la muestra de sustrato están relacionadas entre sí. El error se debe en esencia a las diferencias en la cantidad de material empleado para hacer el anillo metálico. En términos absolutos, si la diferencia de volumen es ΔV_c , el valor de la diferencia de peso vendrá dado por la expresión $\Delta P = \Delta V_c \cdot d_c$, siendo d_c la densidad del material con el que está construido el anillo metálico. Estas diferencias inciden como error en la determinación del tamaño de la muestra de sustrato. Estos errores deben referirse al volumen y peso de la muestra de sustrato, que pueden expresarse respectivamente como V_m y $P_m = V_m \cdot d_s$. Siendo V_m el volumen de muestra, P_m el peso de la muestra y d_s la densidad aparente del sustrato. De estas relaciones se deduce:

$$(180) \quad \Delta V(\%) = 100 \times \frac{\Delta V_c}{V_m}$$

$$(181) \quad \Delta P(\%) = 100 \times \frac{\Delta V_c \times d_c}{V_m \times d_s} \Rightarrow \Delta P(\%) = \Delta V(\%) \times \frac{d_c}{d_s}$$

	Peso serie 500 (g)	Peso serie 600 (g)	Volumen serie 500 (cm ³)	Volumen serie 600 (cm ³)
Número	65	97	65	97
Media	259,3858	263,6965	32,7170	33,1875
Desv Estándar	2,1286	1,4473	0,2689	0,2155
Mínimo	257,5500	261,9200	32,2948	32,1296
Máximo	263,9300	269,4700	33,2779	33,9131
Max- Mín	6,3800	7,5500	0,9831	1,7835
Intervalo 99%	±5,4829	±3,7280	±0,6926	±0,5551
Intervalo 95%	±4,1720	±2,8366	±0,5270	±0,4224
Intervalo 90%	±3,5012	±2,3806	±0,4423	±0,3545

Tabla 60 : Errores de medida: Peso de los anillos metálicos y volumen ocupado por la parte metálica de los mismos de las dos series utilizadas. Valores medios y variabilidad de los valores correspondientes a todos los elementos que componen cada una de las series.

Es decir, la incidencia del error en el peso se puede obtener a partir de la incidencia del error en el volumen multiplicando ésta por el cociente d_c/d_s . Si los anillos metálicos son de acero, y el sustrato tiene una densidad aparente de 0,1, la incidencia del error en el peso es del orden de 80 veces superior a la incidencia del error en el volumen.

5.3.3.3.2.2 Mallas de nilón

En la Tabla 61 se detallan los datos relativos a los pesos obtenidos para el lote de 126 discos de malla de nilón de 75 μm de luz. El valor medio obtenido es de 0,5836 g y la desviación estándar de 0,0049 g. Del valor de la desviación estándar se deduce que el 99% de los datos está dentro del intervalo $\pm 0,0126$ g.

Este error supone el 0,06% de peso de la muestra en el supuesto de que la densidad aparente del sustrato sea de 0,1 g/cm^3 . Este error, derivado del empleo del valor medio, es asumible y no justifica el empleo de valores individualizados.

Como ya se ha comentado en el apartado de métodos (5.3.3.2.4.1.2), la evaluación del volumen se ha hecho conjuntamente con las juntas tóricas de silicona, por lo que los resultados se presentan conjuntamente en el apartado 5.3.3.3.2.3.

	Peso unitario (g)
Número	126
Media	0,5836
Desviación estándar	0,004889
Máximo	0,5705
Mínimo	0,6008
Máx-Min	0,0303
Intervalo 99%	$\pm 0,0126$
Intervalo 95%	$\pm 0,0096$
Intervalo 90%	$\pm 0,0081$

Tabla 61 : Errores de medida. Evaluación del peso de los discos de 140 mm de diámetro cortados con láser en malla de nilón de 75 μm de luz empleados en el cierre de los contenedores portamuestras.

5.3.3.3.2.3 Juntas tóricas de silicona

En la Tabla 62 se facilitan los datos relativos a las mediciones efectuadas de pesos y volúmenes de las juntas tóricas de silicona y de éstas junto con las telas. Las características de las series Roja (R) y Blanca (B), se detallan en 5.3.3.1.4.

El valor medio obtenido para el peso de las juntas de silicona es de 4,2143 g y la desviación estándar de 0,0194. Con estos valores, el 90% de los pesos están dentro del intervalo de $\pm 0,0319$ g y el 99% de los datos dentro del intervalo de $\pm 0,0500$ g. Estos datos corresponden a la serie B. Para la serie R se ha obtenido un valor medio de 4,226 g y una desviación estándar de 0,0197, que se pueden considerar similares a los anteriores.

Respecto el volumen, los valores medios y de desviación estándar para muestras de 10 unidades son respectivamente, 34,309 cm^3 y 0,1309 cm^3 para la serie B, y 34,473 cm^3 y 0,122 para la serie R. La diferencia entre ambas medias es de 0,17 cm^3 , y el 99% de los datos entran dentro del intervalo $\pm 0,3372$ cm^3 , como puede verse en Tabla 62. Estos datos se refieren a grupos de 10 elementos.

En la rutina de laboratorio se utilizan 2 elementos para cada muestra. A partir de los datos relativos a las muestras de 10 elementos, se pueden obtener los correspondientes a las muestras de 2 elementos. Para ello, consideramos que la relación entre los tamaños muestrales es de 5:1. Para la muestra de dos elementos, el valor de la media se obtiene dividiendo entre 5 el valor de la media de 10 elementos. La desviación estándar de las muestras de 2 elementos se obtiene dividiendo entre $\sqrt{5}$ el valor de la desviación estándar de las muestras de 10 elementos.

Aplicando este criterio, los valores obtenidos para la media y la desviación estándar de la muestra de dos elementos son 6,862 cm^3 y 0,0585 cm^3 para la serie B, y 6,895 cm^3 y 0,0545 cm^3 para la serie R. La diferencia entre ambas medias es de 0,03 cm^3 . El 99% de los datos entran dentro del intervalo $\pm 0,1578$ cm^3 en el caso de la serie B y $\pm 0,1405$ en el caso de la serie R. La

diferencia entre las medias es despreciable en comparación con la amplitud del intervalo considerado, por lo que ambas medias se pueden considerar equivalentes.

El error arrastrado al cálculo del volumen de muestra por el empleo de valores medio es $\leq 0,1508 \text{ cm}^3$ en el 99% de los casos. Teniendo en cuenta que el volumen total de la muestra es de 215 cm^3 , este error supone un 0,07%, que consideramos asumible.

En la última columna de la Tabla 62 se detallan los datos relativos a la medida del volumen ocupado por muestras de dos juntas tóricas de silicona y dos telas, que constituyen todo el material necesario para cerrar adecuadamente los anillos metálicos.

	Pesos individuales g	Vol 10 uni. (B) (cm^3)	Vol 10 uni. (R) (cm^3)	Vol 2 mallas + 2 juntas (cm^3)
Número	150	4	4	13
Media	4,2143	34,3087382	34,4727259	7,90977565
Desv Estándar	0,0194	0,13089869	0,12193663	0,06678514
Mínimo	4,1697			
Máximo	4,2628			
Max- Mín	0,0931			
Intervalo 99% \pm	0,0500	0,3372	0,3141	0,1720
Intervalo 95% \pm	0,0380	0,2566	0,2390	0,1309
Intervalo 90% \pm	0,0319	0,2153	0,2006	0,1099

Tabla 62 : Errores de medida. Control de pesos y volúmenes de las juntas tóricas de silicona. Pesos y volúmenes para las series Blanca (B) y Roja (R). Estimación del volumen conjunto de las mallas de nilón y de las juntas tóricas.

El valor de la media es ligeramente superior al de los valores medios calculados para muestras de dos juntas de silicona, $7,910 \text{ cm}^3$ frente a $6,862 \text{ cm}^3$ y $6,895 \text{ cm}^3$. Estos resultados son coherentes; la diferencia está en la presencia en un caso del dos discos de tela de nilón de 75 micras. En el apartado 5.3.3.3.2.2 se ha visto que el peso media de las telas es de 0,5836 g, que para dos telas supone 1,1672 g que es, aproximadamente, igual a la diferencia observada.

El valor obtenido para la desviación estándar es ligeramente superior al calculado para la muestras de dos juntas de silicona, $0,06678 \text{ cm}^3$ frente a $0,0585 \text{ cm}^3$ y $0,0545 \text{ cm}^3$. La consecuencia es el aumento de los intervalos y la incidencia de un error mayor cuando se emplean los valores medios en lugar de los valores individualizados. Con este valor obtenido para la desviación estándar, el 99% de las muestras de 2 juntas de silicona más 2 discos de tela de nilón de $75 \mu\text{m}$ de luz están dentro del intervalo $\pm 0,1720 \text{ cm}^3$. Esto supone el 0,08% del volumen de la muestra por lo que, aun siendo ligeramente superior al anterior, lo podemos considerar como asumible.

5.3.3.3.2.4 Bandas elásticas de caucho

En la Tabla 63 se detallan los datos relativos a los pesos de las dos series de elásticos utilizados. La diferencia entre los valores máximos y mínimos alcanzan valores próximos a los 5 g en las dos series, que podemos considerar muy elevada.

La diferencia entre los valores medios de ambas series sobrepasa los 3,5 g, y considerando los valores obtenidos para la desviación estándar, se concluye que ambas series están claramente diferenciadas.

	Pesos indiv (g) Caucho negro	Pesos indiv (g) Caucho marrón
Número	80	270
Media	18,086875	14,5097963
Desv Estándar	0,665254	0,5076805
Mínimo	14,395	10,72
Máximo	19,315	15,44
Max- Mín	4,9200	4,7200
Intervalo 99% \pm	1,7136	1,3077
Intervalo 95% \pm	1,3039	0,9950
Intervalo 90% \pm	1,0942	0,8351

Tabla 63 : Errores de medida: Control de pesos en las dos series de elásticos de caucho.

Los valores obtenidos para la desviación estándar son del orden de 0,5 a 0,7 g. Para la serie de caucho negro, el 90% de los datos está dentro del intervalo $\pm 1,09$ g y el 99% en el intervalo $\pm 1,71$. Para el caucho marrón, los intervalos son de $\pm 0,84$ g y 1,31 g, respectivamente. Los errores derivados de datos medios son muy elevados, por lo que en este caso se emplean los datos individuales correspondientes a cada elástico.

La evaluación del volumen se hace conjuntamente con el anillo metálico, y por una sola vez para el conjunto de cada anillo con sus respectivas bandas elásticas (5.3.3.2.4.1.4). El valor de la desviación estándar a considerar es $0,14 \text{ cm}^3$, que es el correspondiente a la determinación del volumen por desplazamiento de fluidos (Tabla 65).

Para tener el volumen de todo el contenedor portamuestra, al volumen de anillo metálico y elástico hay que añadir el de las dos mallas de cierre. El volumen de las mallas se ha obtenido conjuntamente con las juntas tóricas de silicona. El valor medio se obtiene de la diferencia entre los valores de volumen para dos juntas tóricas más dos mallas, y el valor del volumen para dos juntas tóricas (datos en Tabla 62).

A falta de una evaluación directa, la variabilidad del volumen de las mallas de nilón la podemos estimar a partir de la variabilidad de su peso. Si el valor de una variable se multiplica por una constante, el valor de la desviación estándar se multiplica por la misma constante. El volumen se obtiene dividiendo el peso entre la densidad. En consecuencia, conocida la desviación estándar de los pesos, la desviación estándar de los volúmenes se obtiene dividiendo

la primera por la densidad. La densidad del nilón varía entre 1 y 1,14 g*cm⁻³, por lo que podemos suponer que la variabilidad de los volúmenes es similar a la variabilidad de los pesos de las mallas, es decir 0,0049 (ver Tabla 61).

La sujeción de las telas de cierre del anillo metálico con juntas tóricas de silicona se sustituyó por bandas elásticas de caucho. La silicona empleada es resistente a temperaturas por encima de 200 °C, y esto supone una gran ventaja para la rutina de laboratorio. Sin embargo, el paso sucesivo por temperaturas elevadas provoca la pérdida de elasticidad. Por otra parte, con este método de cierre, se forman pequeñas bolsas entre la tela de cierre y el anillo metálico, que aumentan el volumen de la muestra. Por último, el cambio de sistema de saturación, de ebullición a vacío, ya no hacía necesario que los elementos del sistema de cierre fueran resistentes a la temperatura. El secado de las muestras se simplifica si los cierres son resistentes a la temperatura, pero si esto no es así, es factible un cambio en la rutina de laboratorio para solucionar el problema.

Las bandas elásticas de caucho empleadas como sustitutos, solucionaron totalmente la incidencia en el volumen de la muestra; el cierre proporcionado con estas bandas es seguro y preciso, no se forman bolsas y el volumen de la muestra coincide con el volumen interior del anillo metálico. La no resistencia a altas temperaturas no es problema para la saturación por vacío. Sin embargo, se deben separar de la muestra en el momento del secado. Esto obliga a modificar sustancialmente la rutina de laboratorio, elevando su nivel de complejidad.

5.3.3.3.3 Evaluación del error debido al empleo de mediciones directas

5.3.3.3.3.1 Gravimetría

En la Tabla 64 se facilitan los datos correspondientes a las diferencias entre las parejas de pesos correspondientes a un mismo elemento. Los datos corresponden a 65 anillos metálicos de la serie 500, 80 bandas elásticas de caucho negro y 190 bandas elásticas de caucho marrón.

	Anillo metálico S500 Peso (g)	Caucho negro Peso (g)	Caucho marrón Peso (g)
Número	65	80	190
Desviación estándar	0,0339	0,00661438	0,03054333
Intervalo 99%	±0,0873	±0,0170	±0,0787
Intervalo 95%	±0,0664	±0,0130	±0,0599
Intervalo 90%	±0,0558	±0,0109	±0,0502

Tabla 64 : Errores de medida: Evaluación de los errores debidos a la medida directa de pesos con balanza de 0,01 g de precisión. Desviación estándar de las diferencias entre los valores obtenidos para un mismo elementos. Control realizado sobre un lote de anillos metálicos y dos lotes de bandas elásticas de caucho. Magnitud del error para diferentes intervalos de probabilidad.

Las desviaciones estándar obtenidas son muy similares para los casos de los anillos metálicos y de las bandas elásticas de caucho marrón. El valor obtenido en el caso del caucho negro es inferior. Estos valores dependen del método de medida, y son independientes de las características del material empleado. Esto explica la gran similitud que se presenta entre los

valores de la desviación estándar obtenidos para los anillos de acero inoxidable y las bandas elásticas de caucho marrón. Desde este punto de vista, el valor inferior obtenido para el caucho negro no tiene una explicación clara. Desde el punto de vista de la incidencia de errores, este menor valor es más favorable.

En relación con el cálculo de probabilidad de error de medida, consideraremos los valores obtenidos para el caso de los anillos metálicos por dos razones. La primera es que se trata del caso más desfavorable para el cálculo de errores. La segunda es que coincide prácticamente con el valor obtenido en otra evaluación independiente, como es el caso de las bandas de caucho marrón. Con este criterio hay una probabilidad del 90% de que el error sea $\leq 0,0558$ g. Para una probabilidad del 99%, el error puede llegar hasta $\pm 0,087$ g. Este valor supone el 0,45 del peso de una muestra de sustrato cuya densidad sea de $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

5.3.3.3.2 Medida de volumen por desplazamiento de fluidos

En este caso se ha determinado, por duplicado, el volumen de un lote de 65 anillos metálicos de la serie 500. El resto de las determinaciones de volúmenes se han hecho tomando una sola lectura para cada elemento, por lo que no son útiles para la evaluación del error debido al método de medida.

En la Tabla 65 se detallan los datos relativos al control del lote de anillos metálicos. El valor obtenido para la desviación estándar es de $0,139 \text{ cm}^3$. La magnitud del error es de $0,36 \text{ cm}^3$ para una probabilidad del 99%. Este error supone el 0,06% de los 215 cm^3 del volumen de la muestra de sustrato.

	Volumen (cm^3)
Número	65
Desviación estándar	0,1393
Intervalo 99%	$\pm 0,3588$
Intervalo 95%	$\pm 0,2730$
Intervalo 90%	$\pm 0,2291$

Tabla 65 : Errores de medida: Evaluación de los errores debidos a la medida directa de volúmenes por desplazamiento de fluidos. Desviación estándar de las diferencias entre los valores obtenidos para un mismo elemento. Control realizado sobre un lote de anillos metálicos. Magnitud del error para diferentes intervalos de probabilidad.

5.3.3.3.3 Evaluación del volumen interno de los anillos metálicos

Se han medido un total de 24 diámetros, 4 en cada uno de los 6 anillos metálicos que componen la muestra. La variabilidad de estas medidas ha sido pequeña. El coeficiente de variación de los 4 diámetros correspondientes a cada anillo metálico oscila entre el 0,06% y el 0,2%. Para la altura se ha obtenido en todos los casos exactamente el mismo valor de 40,1 mm.

En la Tabla 66 se proporcionan los resultados obtenidos de esta evaluación. El error de $\pm 0,78 \text{ cm}^3$ correspondiente al intervalo del 99% de los casos, supone el 0,36% del volumen

medio (215,053 cm³). Este error lo podemos considerar como asumible, por lo que en los cálculos se ha empleado un valor único para todos los anillos metálicos.

	Volumen interno (cm ³)
Número	6
Media	215,0527
Desviación estándar	0,3041294
Intervalo 99%	±0,7834
Intervalo 95%	±0,5961
Intervalo 90%	±0,5002

Tabla 66 : Errores de medida: Evaluación del volumen interno de 6 anillos metálicos de la serie 500. Media, desviación estándar y amplitud de los intervalos. El valor de volumen se ha calculado a partir de las medidas lineales obtenidas con calibre de 0,1 mm de precisión.

5.3.3.4 Discusión general

5.3.3.4.1 *Evaluación de la densidad del agua*

El factor baño es el que mayor incidencia tiene en el valor obtenido para la densidad del agua. Esto obliga a evaluar la densidad del agua de cada baño para medir el volumen del sustrato por desplazamiento de fluidos. La incidencia de los otros dos factores considerados es muy inferior, y la diferencia entre los distintos niveles de cada uno de estos dos factores es menor o igual que la sensibilidad del método de medida.

En valor de la densidad de agua empleado en al cálculo de volúmenes, se obtiene como media de las cuatro determinaciones hechas en cada baño, dos antes y dos después una con cada uno de los patrones. Dado que la incidencia de estos dos factores es menor o igual que la sensibilidad del método de medida, el empleo del valor medio está plenamente justificado. El valor medio así obtenido constituye una evaluación muy precisa de la densidad del agua.

5.3.3.4.2 *Utilización de valores individualizados y medios de los componentes del contenedor para el cálculo de taras*

5.3.3.4.2.1 Anillos metálicos

El anillo metálico es el componente principal del contenedor portamuestras, determinando la forma y tamaño de la muestra de sustrato. La disponibilidad de una amplia superficie metálica de forma cilíndrica facilita considerablemente la identificación con una marca indeleble, y la construcción en acero inoxidable le proporciona una gran robustez y durabilidad. Por todo ello, es el elemento del contenedor que se emplea para identificar la muestra de sustrato.

Respecto a su incidencia en los errores, el error inducido por la utilización de los valores medios de los anillos metálicos es elevado, sobre todo en el caso del peso.

Considerando la identificación individualizada que sirve para la identificación de la muestra y el elevado error que se derivaría del empleo de datos medios, resulta evidente que se deben utilizar los valores individualizados.

5.3.3.4.2.2 Mallas de nilón

La desviación estándar de los pesos de las telas es baja, 0,004889 g (Tabla 61), por lo que el empleo de datos medios no incide de forma importante en el error. La identificación individualizada de las telas, solo presenta ligeros problemas, pero su durabilidad es escasa.

Teniendo en cuenta la escasa magnitud del error y los problemas de durabilidad, se ha optado por emplear los valores medios.

Respecto al volumen, como ya se ha comentado, se considera conjuntamente con las juntas tóricas de silicona.

5.3.3.4.2.3 Juntas tóricas de silicona

En este caso, la utilización de pesos y volúmenes individualizados está fuertemente condicionada por la imposibilidad práctica de identificar los elementos individualmente. La escasa superficie disponible es tórica y de pequeño diámetro. En consecuencia, la única opción que queda es la utilización de los datos medios.

La evaluación de volúmenes se hace conjuntamente con las telas, considerando muestras de 2 telas más dos juntas tóricas de silicona. El valor así obtenido contiene, pues, los 4 elementos del contenedor distintos del anillo metálico. El valor de la desviación estándar a considerar por este concepto en el cálculo de la desviación estándar del contenedor es de 0,066785 cm³ (Tabla 62).

5.3.3.4.2.4 Elásticos de caucho

Estos elásticos sustituyen a las juntas tóricas de silicona. La disponibilidad de una amplia superficie cilíndrica elimina el problema de identificación que se daba con las juntas tóricas. Por otra parte, las diferencias de peso entre los diferentes elementos son muy elevadas, por lo que el error inducido por el empleo de un valor medio, es muy elevado. En consecuencia, se decide el empleo de los valores individualizados obtenidos.

5.3.3.4.3 *Métodos de medida directos*

El método de medida interviene en el error tantas veces como intervengan valores obtenidos directamente. El valor neto se obtiene por diferencia entre bruto y tara. El valor bruto de peso y volumen se obtiene por medición directa. Por lo tanto, en el cálculo del valor bruto intervendrá una vez la desviación estándar debida al método de medida correspondiente.

En el cálculo de la tara, intervienen cinco elementos, pero la situación es distinta del caso de pesos y volúmenes. El peso tara se obtiene por adición de 5 sumandos, todos obtenidos independientemente. El error de la tara tendrá, en consecuencia, cinco componentes.

En el caso de volúmenes, se dispone de la medición conjunta de varios elementos. En un caso, se ha evaluado conjuntamente el volumen de cada anillo metálico con las dos bandas elásticas de caucho correspondientes. En otro, las dos juntas de silicona y las dos telas. En cada

caso, el valor conjunto de los elementos considerados corresponde a una sola medición, e interviene una sola vez en el error del volumen tara.

5.3.3.4.4 *Evaluación del volumen interno de los anillos metálicos*

Los valores obtenidos en la evaluación del volumen interno de los anillos metálicos son una media de $215,053 \text{ cm}^3$, y una desviación estándar de $0,3041294 \text{ cm}^3$.

De estos valores se deduce que el intervalo para el 99% de los datos tiene una amplitud de $\pm 0,7834 \text{ cm}^3$ (Tabla 66). Si en lugar de $215,0527 \text{ cm}^3$, se toma como valor de volumen 215 cm^3 , la distancia entre este valor y el extremo más alejado del intervalo mencionado es de $0,8361 \text{ cm}^3$. Así pues, la probabilidad de que el error sea mayor que $0,8361 \text{ cm}^3$, es menor del 1%. Este error supone el 0,39% de los 215 cm^3 de la muestra, que podemos considerar como asumible.

5.3.3.4.5 *Otros errores a considerar*

5.3.3.4.5.1 Error debido a la formación de bolsas de sustrato

El sistema de cierre del anillo metálico también incide en el volumen de la muestra. La sujeción de la tela con la junta tórica de silicona proporciona una escasa superficie para presionar la tela contra el anillo. La junta ha de estar, inevitablemente, separada del borde del anillo. En estas condiciones, es inevitable la formación de una bolsa más o menos grande, en el exterior del anillo, entre el borde de éste, la junta tórica y la tela. La manipulación de la muestra provoca el llenado parcial de esta bolsa con sustrato, con lo que el volumen real de la muestra está constituido por el volumen interno del anillo, más el volumen de sustrato contenido en esta bolsa.

El empleo de la banda elástica de caucho corrige totalmente este problema. La forma de la banda permite ajustarla al borde del anillo, con lo que se imposibilita la formación de estas bolsas. Además, la amplia superficie útil para presionar la tela contra el anillo, proporciona un cierre muy seguro, que permite el tensado de la tela y el mantenimiento de esta tensión.

5.3.3.4.5.2 Error debido a la saturación de la tela de cierre

Además de los errores comentados, hay otro causado por la tela empleada para el cierre. Este error lo hemos detectado en la última fase de los trabajos de desarrollo metodológico y su evaluación no es sencilla, por lo que no se han desarrollado los trabajos experimentales necesarios para estudiar en detalle su incidencia. Únicamente se han hecho algunos controles que permitieran estimar su magnitud.

Cuando se hace el control de peso de la muestra tensionada, la tela está saturada. Cuando se hace el control de peso seco, también la tela está seca. El valor obtenido por diferencia entre ambos corresponde al peso de agua que contiene la muestra tensionada. En consecuencia, este valor obtenido experimentalmente para el peso de agua, está mayorado por el peso de agua retenido por la tela.

En el caso de la malla de $75 \mu\text{m}$ utilizada, la cantidad de agua retenida a saturación sin tensión, es del orden de $0,5 \text{ g}$. Cuando se han buscado materiales alternativos como sustitutos de esta tela, en algunos casos se han observado retenciones de agua de hasta 3 y 4 g para discos de 140 mm de diámetro.

Como consecuencia, en la búsqueda de materiales como sustitutos de la malla de nilón calibrada, se deberá tener en cuenta la cantidad de agua que absorbe. La idoneidad del material estará condicionada por la posibilidad de controlar el error debido a esta absorción de agua.

5.3.3.5 Magnitud de los errores

En este apartado se ha calculado la incidencia en el valor neto de los errores experimentales procedentes de las distintas fuentes de error. Se han considerado dos situaciones. Una, empleando como cierre juntas tóricas de silicona y otra, empleando bandas elásticas de caucho. En ambas situaciones se consideran los casos de peso y volumen. Finalmente, se calcula el error máximo para los intervalos de 90%, 95% y 99%.

5.3.3.5.1 Errores en peso y volumen empleando juntas tóricas de silicona

En la Tabla 67 se detallan los valores de la desviación estándar correspondientes a los diferentes componentes del error del peso y, en la Tabla 68, los correspondientes al volumen. A partir de estos valores se obtienen las desviaciones estándar correspondientes a la tara y valor neto.

En este caso se trabaja con anillos metálicos identificados individualmente. Las juntas tóricas de silicona y las mallas de nilón no se identifican individualmente y se toman al azar.

En el cálculo de la desviación estándar correspondiente a la distribución del error del peso tara (Tabla 67) interviene una vez la desviación estándar del anillo metálico (1 anillo metálico), y dos veces las desviaciones estándar correspondientes a las juntas tóricas de silicona y a las mallas de nilón (2 juntas y 2 mallas).

	Valor medio	Individualizado	Seleccionado
Anillo metálico	2,1286 (1)	0,0339 (1)	0,0339 (1)
Juntas de silicona	0,01936 (2)	0,0339 (2)	0,01936 (2)
Mallas de nilón	0,004889 (2)	0,0339 (2)	0,004889 (2)
Total tara			0,04412067
Bruto		0,0339	0,0339
Neto			0,05564031

Tabla 67 : Errores de medida: Cálculo de errores en el peso, en el caso de emplear juntas tóricas de silicona. Valores de la desviación estándar en g. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.

Desde el punto de vista de los errores, el empleo de los valores individualizados de los anillos metálicos supone un descenso importante de la componente del error (5.3.3.4.2.1). La componente debida a los anillos metálico, a emplear en el cálculo de errores es de 2,1286 g (Tabla 60) si se emplean el peso medio de todos los anillos metálicos, y 0,0339 g (Tabla 64) correspondiente a la medida directa, si se emplean los datos individualizados. En el caso de las juntas tóricas de silicona y las mallas, la dificultad de identificarla, obliga a utilizar la desviación

estándar correspondiente a la distribución de pesos de los elementos del lote, 0,01936 para las juntas tóricas de silicona (Tabla 62), y 0,004889 para las mallas de nilón (Tabla 61).

En el cálculo de la desviación estándar correspondiente a la distribución del error del volumen tara (Tabla 68), se ha evaluado conjuntamente el volumen de las dos juntas de silicona y de las dos mallas.

El empleo de los datos individualizados en el caso de los anillos metálicos supone una mejora con respecto al empleo de los datos medios, aunque menor que la correspondiente al caso de los pesos ya comentado. La medición conjunta de los volúmenes de los otros cuatro elementos del contenedor no da opción a elegir, y debe emplearse la desviación estándar correspondiente a los valores obtenidos para estas muestras de 4 elementos.

En consecuencia, en el cálculo de la desviación estándar correspondiente a la distribución del error del volumen tara, interviene una vez la desviación estándar del anillo metálico, 0,2689 (Tabla 60), y una vez la desviación estándar correspondiente al conjunto de las 2 juntas tóricas de silicona más las 2 mallas de nilón, 0,066785 (Tabla 62 y 5.3.3.4.2.3). La desviación estándar del valor bruto es 0,3041294 correspondiente a la desviación estándar de la evaluación del volumen interno del anillo metálico (Tabla 66).

	Valor medio	Individualizado	Seleccionado
Anillo metálico	0,2689 (1)	0,1393 (1)	0,1393 (1)
Juntas de silicona	0,066785 (1)	0,1393 (2)	0,066785 (1)
Telas		0,1393 (2)	
Total tara			0,15448212
Bruto	0,3041294		0,3041294
Neto			0,34111496

Tabla 68 : Errores de medida: Cálculo de errores en el volumen, en el caso de emplear juntas tóricas de silicona. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.

5.3.3.5.2 Errores en peso y volumen empleando bandas elásticas de caucho

En la Tabla 69 se detallan los valores de la desviación estándar correspondientes a los diferentes componentes del error del peso, y en la Tabla 70 los correspondientes al volumen. A partir de estos valores se obtienen las desviaciones estándar correspondientes a la tara y valor neto.

Teniendo en cuenta la discusión del apartado 5.3.3.4, se trabaja con anillos metálicos y con bandas elásticas de caucho identificadas individualmente, y con mallas de nilón no identificadas que se toman al azar.

En el cálculo de la desviación estándar correspondiente a la distribución del error del peso tara (Tabla 69) interviene una vez la desviación estándar del anillo metálico (1 anillo metálico), y dos veces las desviaciones estándar correspondientes a las bandas elásticas de caucho y a las mallas de nilón (2 juntas y 2 mallas).

La conveniencia de utilizar valores individualizados para los anillos metálicos, también es válida en este caso. La componente debida a los anillos metálicos a emplear en el cálculo de errores es de 2,1286 g (Tabla 60), si se emplean el peso medio de todos los anillos metálicos, y 0,0339 g (Tabla 64) correspondiente a la medida directa, si se emplean los datos individualizados. Respecto a las bandas elásticas de caucho, el valor de la componente a utilizar en el cálculo de errores es 0,665254 g si se utilizan datos medios (Tabla 63) y 0,0339 g (Tabla 64) correspondiente a la medida directa, si se emplean los datos individualizados. Las mallas de nilón se siguen tomando al azar, por lo que el valor a emplear como componente para el cálculo de errores, es la desviación estándar correspondiente a la distribución de pesos de las mallas, 0,004889 (Tabla 61).

El empleo de los pesos individuales de anillos metálicos y bandas elásticas de caucho supone una mejora en el error arrastrado a los cálculos posteriores.

En el cálculo de la desviación estándar correspondiente a la distribución del error del volumen tara (Tabla 70) se ha evaluado conjuntamente el volumen de cada anillo metálico con las dos bandas elásticas de caucho correspondientes. Respecto a las mallas de nilón, el valor de la desviación estándar a emplear corresponde a la distribución de los datos, puesto que se toman al azar.

La evaluación del volumen se hace conjuntamente para el anillo metálico y los dos elásticos correspondientes (5.3.3.3.2.4). La componente del error a considerar por este concepto en el cálculo del error de la tara, es la debida a la evaluación de volúmenes por desplazamiento de fluidos, es decir 0,1393 (Tabla 65), e interviene una sola vez. Si en su lugar se trabaja con los valores individualizados, se debe considerar este mismo valor pero tres veces, una por la evaluación del volumen del anillo metálico y dos por cada uno de los dos elásticos.

	Valor medio	Individualizado	Seleccionado
Anillo metálico	2.1286 (1)	0.0339 (1)	0.0339 (1)
Bandas elásticas de caucho	0.665254 (2)	0.0339 (2)	0.0339 (2)
Telas	0.004889 (2)	0.0339 (2)	0.004889 (2)
Total tara			0.0591222
Bruto		0.0339	0.0339
Neto			0.06815163

Tabla 69 : Errores de medida: Cálculo de errores en el peso, en el caso de emplear bandas elásticas de caucho. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.

La componente del error a considerar por el volumen de las dos telas de cierre lo estimamos a partir de la desviación estándar obtenida para los pesos de estas telas, considerando que la densidad del nilón es $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (5.3.3.2.4). El valor a considerar es pues 0,004889 (Tabla 61), que interviene dos veces. La alternativa es evaluar el volumen para cada una de las mallas, en cuyo caso el error a considerar sería el correspondiente a la evaluación del volumen por desplazamiento de fluidos, 0,1393 (Tabla 65). Sin embargo esta alternativa no es real, como se ha visto en 5.3.3.2.4.1.2.

	Valor medio	Individualizado	Seleccionado
Anillo metálico	0,1393 (1)	0,1393 (1)	0,1393 (1)
Bandas elásticas de caucho		0,1393 (2)	
Telas	0,004889 (2)	0,1393 (1)	0,004889 (2)
Total tara			0,13947148
Bruto	0,3041294		0,3041294
Neto			0,3345848

Tabla 70 : Errores de medida: Cálculo de errores en el volumen, en el caso de emplear bandas elásticas de caucho. La columna *Valor medio* corresponde al error arrastrado en el caso de utilizar los valores medios de los componentes, *Individualizado* al caso de utilizar los valores de cada componente y *Seleccionado* corresponde a la opción seleccionada en cada caso. El número entre paréntesis corresponde al número de veces que interviene en el cálculo del error.

5.3.3.5.3 Evaluación de los errores del valor neto de peso y volumen

En la Tabla 71 se detallan, a modo de resumen, los valores de la desviación estándar de la distribución de probabilidad del error del valor neto para peso y volumen de la muestra, obtenidos en 5.3.3.5.1 y 5.3.3.5.2. Con estos valores se ha calculado el valor del error máximo para unas probabilidades de 90%, 95% y 99%, que se detallan en Tabla 72.

En el caso de sujetar las mallas de nilón con juntas tóricas de silicona, el intervalo simétrico para una probabilidad del 99% está limitado por $\pm 0,1433$ g para el peso neto, y $\pm 0,8787$ cm³ para el volumen neto. Esto significa que la probabilidad de que el error sea mayor que estos valores es del 1%.

	Juntas tóricas de silicona	Bandas elásticas de caucho
Peso (g)	0,05564 (Tabla 67)	0,06815 (Tabla 69)
Volumen (cm ³)	0,34115 (Tabla 68)	0,33455 (Tabla 70)

Tabla 71: Errores de medida: Valores de las desviaciones estándar correspondientes a la distribución de errores de los valores netos de pesos y volúmenes, empleando en el cierre juntas tóricas de silicona y bandas elásticas de caucho.

Probabilidad	Juntas de silicona		Elásticos de caucho	
	Peso (g)	Volumen(cm ³)	Peso (g)	Volumen(cm ³)
99%	$\pm 0,1433$	$\pm 0,8787$	$\pm 0,1755$	$\pm 0,8617$
95%	$\pm 0,1091$	$\pm 0,6686$	$\pm 0,1336$	$\pm 0,6557$
90%	$\pm 0,0915$	$\pm 0,5611$	$\pm 0,1121$	$\pm 0,5503$

Tabla 72 : Errores de medida: Relación entre probabilidad y magnitud del error en la estimación de los valores netos de peso y volumen de la muestra de sustrato. Valores calculados a partir de las desviaciones estándar de la Tabla 71.

En el caso de sustituir las juntas tóricas de silicona por bandas elásticas de caucho, el intervalo para la misma probabilidad del 99% está limitado por $\pm 0,1755$ g para el peso neto y

$\pm 0,8618$ para el volumen neto. El error es ligeramente mayor que para las juntas de silicona en el caso de los pesos y algo inferior en el caso de los volúmenes.

Estos errores se deben referenciar al tamaño de la muestra de sustrato. En la Tabla 73 se detalla el porcentaje que suponen sobre el tamaño de la muestra de sustrato (215 cm^3 y 21.5 g) la amplitud de los intervalos obtenidos en la Tabla 72.

Probabilidad	Juntas de silicona		Elásticos de caucho	
	Peso (g)	Volumen(cm^3)	Peso (g)	Volumen(cm^3)
99%	$\pm 0,67\%$	$\pm 0,41\%$	$\pm 0,82\%$	$\pm 0,40\%$
95%	$\pm 0,51\%$	$\pm 0,31\%$	$\pm 0,62\%$	$\pm 0,30\%$
90%	$\pm 0,43\%$	$\pm 0,26\%$	$\pm 0,52\%$	$\pm 0,26\%$

Tabla 73: Errores de medida: Porcentaje que supone sobre el peso y volumen de la muestra, los intervalos obtenidos en la Tabla 72. Los valores considerados para volumen y peso de la muestra son, 215 cm^3 y $21,5 \text{ g}$ respectivamente, que corresponden a un sustrato con densidad= $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$.

En los casos más desfavorables, y para una probabilidad del 99%, el error el valor neto es $\leq 0,82\%$ del peso de la muestra y $\leq 0,40\%$ del volumen de la muestra. Este error es debido a los métodos de medida empleados, e incluye el cálculo de la tara del contenedor portamuestras a partir de sus componentes. Para una probabilidad del 95%, la magnitud de los errores oscila entre el 0,3% y el 0,6% del tamaño muestral. La mayor incidencia corresponde al error del peso cuando se emplean bandas elásticas de caucho, y la menor al error del volumen también cuando se emplean bandas elásticas de caucho.

5.3.3.6 Recapitulación de incidencia de la instrumentación en los errores de medida

1. Densidad del agua del baño
 - 1.1. Los valores de la densidad del agua obtenidos por desplazamiento de fluidos con los patrones calibrados tiene una precisión de $4.5 \cdot 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
 - 1.2. La sensibilidad del análisis estadístico para los factores patrón y momento de medida es similar a la sensibilidad del método experimental de media.
 - 1.3. El factor baño es el que más incidencia tiene en el valor de la densidad del agua. Esto obliga a evaluar la densidad del agua en cada baño.
 - 1.4. La incidencia de los factores momento de medida y patrón empleado es muy baja. Su orden de magnitud es similar a la precisión del método experimental de medida.
 - 1.5. El valor de la densidad del agua del baño a emplear en el cálculo de volúmenes corresponde al valor medio de las cuatro determinaciones realizadas, 2 patrones*2 momentos.
2. Evaluación de las taras del contenedor. Identificación individualizada de los elementos del contenedor portamuestras.
 - 2.1. El anillo metálico es el elemento principal del contenedor portamuestras, y su identificación individualizada sirve para identificar a la muestra de sustrato. La variabilidad de los anillos metálicos, sobre todo de los pesos, obliga a emplear en el cálculo de taras los pesos correspondientes a cada uno de ellos.

- 2.2. Las dificultades de identificar individualmente las juntas tóricas de silicona obliga a utilizarlas aleatoriamente, y a emplear el valor medio en el cálculo de peso y volumen tara.
- 2.3. La sustitución de las juntas tóricas de silicona por bandas elásticas de caucho, permite la identificación individualizada de este componente del contenedor y aumenta la complejidad de la metodología.
- 2.4. La homogeneidad de los discos de malla de nilón permite utilizar el valor medio de peso y volumen en el cálculo de las taras.
3. Evaluación del volumen total de la muestra o volumen interno del anillo metálico
 - 3.1. La variabilidad de los valores obtenidos permite emplear un valor único como volumen interno del anillo metálico.
 - 3.2. Para el volumen interno del anillo metálico se toma el valor de 215 cm^3 . Esto supone una probabilidad menor del 1% de que el error sea superior a $0,8361 \text{ cm}^3$ (0,39% del volumen interno).
 - 3.3. Las bandas elásticas de caucho eliminan el error en el volumen de la muestra, debido a la formación de bolsas en el cierre que se da en el caso de las juntas tóricas de silicona.
4. Magnitud de los errores
 - 4.1. La magnitud máxima del error para pesos y volúmenes oscila en la banda de 0,4% a 0,8% del tamaño muestral en el 99% de los casos. Si la probabilidad se rebaja al 95%, la magnitud máxima del error oscila en la banda de 0,3% a 0,6% del tamaño muestral.

5.3.4 *Recapitulación de errores de medida*

En los apartados precedentes se ha discutido la incidencia de diferentes factores en los errores de medida. Los ensayos realizados han permitido evaluar la magnitud de los errores debidos a cada uno de estos factores. En algunos casos, no disponemos de datos que nos permitan evaluar la magnitud del error cometido.

La pérdida de sustrato a través del cierre puede suponer hasta el 5-6% del peso de la muestra. La magnitud de este error depende sobre todo del sustrato, siendo la incidencia del tipo de cierre mínima. No se ha evaluado la incidencia que puede tener el manejo de la muestra, pero -de los resultados obtenidos- parece desprenderse que es importante.

La determinación de la densidad del agua empleada para la medida de volúmenes por desplazamiento de fluidos no presenta grandes problemas. Las diferencias entre las medidas realizadas antes y después de pasar todas las muestras, y las debidas a la evaluación con los dos patrones de volumen, son del orden de $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. La media de las cuatro determinaciones realizadas para cada baño presenta una gran precisión.

El cálculo de la tara de pesos y volúmenes a partir de datos previos, tiene una incidencia pequeña en el error. Se han empleado valores individualizados para los anillos metálicos, valores medios para juntas tóricas de silicona y telas, y valores individualizados para las bandas elásticas de caucho, en el caso de emplear este tipo de cierre. En estas condiciones, hay una probabilidad del 1% de que el error sea mayor de $0,1755 \text{ g}$ en la tara de peso y de $0,8617 \text{ cm}^3$ en la tara de volumen, que suponen el 0,82% y 0,40% del peso y volumen de la muestra respectivamente en el caso de utilizar bandas elásticas de caucho. Si se utilizan juntas tóricas de silicona, los valores correspondientes al 1% de probabilidad, son $0,1433 \text{ g}$ y $0,8787 \text{ cm}^3$ para el peso y volumen, que suponen el 0,67% y 0,41% respectivamente del tamaño muestral.

El empleo de un valor único igual a 215 cm^3 como volumen interno del anillo metálico, implica una probabilidad menor del 1% de que el error sea mayor de 0.836 cm^3 , que supone el 0,39% del volumen de referencia.

Por último, hay que considerar otros dos errores, para cuya evaluación no se han desarrollado trabajos específicos.

Uno es el error debido al contenido de agua de las telas que constituyen el cierre. Este contenido de agua es diferente en el momento de controlar el peso tensionado de la muestra y en el momento de determinar el peso seco. Este error puede ser del orden de 0,5 g que sobrevalora el peso de agua contenido por la muestra tensionada.

El otro error no controlado se refiere a la formación de bolsas en el exterior del anillo metálico. La utilización de juntas tóricas de silicona provoca la formación de estas bolsas entre la pared exterior del anillo metálico, la tela y la propia junta de silicona. Estas bolsas pueden contener sustrato, con lo que el volumen real de la muestra es mayor que el volumen interno del anillo metálico. En consecuencia, el valor tomado como volumen de muestra constituye una infravaloración del mismo. El empleo de bandas elástica de caucho corrige totalmente este error.

5.4 Trabajo experimental: Estrategia de medida

En el apartado 3.3 se ha hecho un análisis de los errores que inciden en el proceso de medida. En el apartado 5.2 se ha presentado la experimentación relativa a la accesibilidad, con una incidencia directa en los errores debidos a una saturación deficiente. En el apartado 5.3 se ha presentado la experimentación relativa a la incidencia de errores debidos a la pérdida de material durante la saturación (5.3.2), y a los instrumentos de medida (5.3.3).

En el ensayo que se presenta en este apartado, se pretende hacer una estimación de los errores de la metodología en su conjunto. La estimación de la precisión a partir de medidas repetidas, no presenta problemas. La falta de un patrón de referencia y de un valor de referencia relativo dificultan la evaluación de la exactitud. En este apartado se presenta un ensayo diseñado específicamente para evaluar la exactitud de la metodología de laboratorio empleada para el estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo.

5.4.1 *Evaluación del error en la medida del volumen ocupado por aire*

5.4.1.1 Introducción

Las metodologías de laboratorio utilizadas para el estudio de las propiedades físicas de los sustratos, permiten conocer la precisión, pero no la exactitud, de las mediciones efectuadas (3.4.1). Las mediciones sobre muestras repetidas de un mismo sustrato, permiten evaluar la precisión (3.4.1.1). Respecto a la exactitud, no se dispone de patrones de referencia absolutos (3.4.1.2.1) y la propia estrategia de medida anula la posibilidad de emplear valores de referencia relativos (3.4.1.2.2). La necesidad de tener una estimación de la exactitud de las mediciones efectuadas, obliga a plantear nuevas estrategias de medida (3.4.2).

En el apartado 3.4.1.2.2 se han discutido distintas alternativas para el empleo de valores de referencia relativos, y las limitaciones que presentan en las metodologías de laboratorio empleadas para el estudio de las propiedades físicas.

La ausencia de patrones contrastados impide conocer la exactitud de las mediciones. El volumen ocupado por aire se obtiene indirectamente, por diferencia entre el valor obtenido para el volumen total de la muestra y la suma de los valores obtenidos para el volumen ocupado por el material sólido y el volumen ocupado por agua. Esto impide estimar la exactitud a partir de valores de referencia relativos.

Sin embargo, podemos obtener una aproximación, aprovechando algunas propiedades de los sustratos. Podemos preparar una muestra de sustrato con un tamaño de poro lo suficientemente pequeño para que, a una tensión de humedad determinada, todos los poros estén llenos de agua, en cuyo caso el volumen ocupado por aire será cero. De esta forma fabricamos un patrón de medida que, si bien es cierto que no es viable aplicarlo en las rutinas de laboratorio, puede emplearse en ensayos diseñados específicamente para evaluar la exactitud de una metodología determinada.

La aplicación de esta estrategia tiene limitaciones. Para asegurar que el tamaño de poro es pequeño, la granulometría del sustrato empleado ha de ser muy fina. Aun así, es muy difícil garantizar que el volumen ocupado por aire es cero. En estas condiciones, la obtención de un

valor mayor que cero para el volumen ocupado por aire, puede ser debido a que efectivamente hay un cierto volumen ocupado por aire, o bien a los errores propios del método de medida. La obtención de un valor menor que cero para el volumen ocupado por aire, está detectando una infravaloración de volumen ocupado por aire, mayor o igual al valor negativo obtenido.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, se eligieron dos sustratos de granulometría muy fina, que nos hacían suponer que, a tensiones próximas a cero, el volumen ocupado por aire es cero o un valor muy próximo a cero.

5.4.1.2 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la exactitud de las mediciones efectuadas con la metodología de laboratorio desarrollada para el estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo.

Como consecuencia de las limitaciones comentadas en la introducción, el objetivo de este trabajo se ha restringido a la evaluación de los errores que inciden en la infravaloración del volumen ocupado por aire.

A pesar de las limitaciones que esto representa, consideramos que este objetivo parcial sigue siendo válido.

5.4.1.3 Materiales y métodos

5.4.1.3.1 *Material*

Se utilizaron dos sustratos de granulometría muy fina: perlita B-6 ($\varnothing < 1,5\text{mm}$) y corteza de pino compostada ($\varnothing < 0,2\text{mm}$).

Las muestras de estos sustratos se colocaron en los anillos metálicos dobles descritos en 5.2.3.3.2.2.2, cerrados con tela de nilón de $75\ \mu\text{m}$ y una junta tórica de silicona. El volumen total de muestra (V_T) es igual al volumen interno del anillo inferior ($215\ \text{cm}^3$).

Las muestras se someten a una tensión de 0 cm de columna de agua, referida a la base de la muestra. El tensionado se realiza en un lecho de arena fina. Previamente se ha comprobado la transmisión de la tensión del lecho de arena al sustrato hasta 50 cm de columna de agua.

5.4.1.3.2 *Métodos*

Se establece una metodología básica (Método A) y dos alternativas (Métodos B y C). Para cada método y sustrato se realizan 5 repeticiones.

5.4.1.3.2.1 Preparación de la muestra

1. Los dos anillos de 40 y 30 mm se colocan superpuestos y unidos mediante una banda elástica de caucho.
2. La cara abierta correspondiente al anillo de 40 mm se cierre con una tela de nilón de $75\ \mu\text{m}$ de luz y se sujeta con una junta tórica de silicona.
3. El recipiente se llena con sustrato, tomado de un lote previamente homogeneizado.

4. Se cierra la cara abierta del contenedor correspondiente al anillo de 30 mm. De esta forma, queda el doble cilindro lleno de sustrato y con las dos caras libres cerradas con sendas mallas de nilón sujetas, a su vez, con sendas juntas tóricas de silicona.

5.4.1.3.2.2 Método A

1. Las muestras preparadas según el protocolo anterior, se introducen en una vasija que se llena de agua para su saturación por ebullición.
2. Se satura la muestra hirviendo durante 15-20 minutos. Se enfría durante 24 horas, hasta temperatura ambiente.
3. Se tensionan las muestras a 0 cm de columna de agua referida a la base de la muestra.
4. Se corta la muestra y se pesa el sustrato tensionado más la tara (P_{tt}).
5. Se satura hirviendo durante 15-20 minutos.
6. Se pesa la muestra dentro del baño de agua (P_d).
7. Se mide la densidad del agua del baño con dos volúmenes estándar, antes y después de pesar dentro el lote completo de muestras (d_{b1}).
8. Se seca en estufa a 105°C hasta peso constante.
9. Se obtiene el peso seco de la muestra más la tara (P_{st}).
10. Se limpian los contenedores y se pesan dentro del agua, incluidos los cierres (tela de nilón y junta tórica de silicona) (T_d).
11. Se mide la densidad del baño de agua (d_{b2}) con los dos volúmenes estándar, antes y después de pesar dentro el lote completo de contenedores.
12. Se secan los contenedores en estufa a 105°C.
13. Se pesan los contenedores (T).

5.4.1.3.2.3 Método B

Para evitar las posibles pérdidas de sustrato a través de los cierres, en el paso 5 de la metodología básica, la muestra dentro del anillo cerrado con la tela de nilón y la junta tórica de silicona se introduce dentro de una bolsa de nilón de 75 μm y se cierra. La bolsa se incluye en la tara.

5.4.1.3.2.4 Método C

Para medir las posibles pérdidas de sustrato -por cualquier vía- entre los pasos 4 y 5, se añaden los siguientes pasos intermedios:

- 4.1.- Se seca en estufa hasta peso constante.
- 4.2.- Se obtiene el peso seco de la muestra (P_{s1}).

5.4.1.3.3 Cálculos

El reparto volumétrico de las fases de un determinado tratamiento se obtiene como media de los valores obtenidos para el reparto volumétrico de las distintas muestras de ese mismo tratamiento.

Para obtener el reparto volumétrico de cada una de las muestras, a partir de los datos experimentales, se establecen dos posibles estrategias de cálculo:

1. Empleo exclusivamente los datos experimentales propios de cada muestra.

2. Empleando los valores de la propia muestra y los valores medios de densidades, obtenidos para todas las muestras de un mismo tratamiento.

La primera opción proporciona unos valores obtenidos directamente a partir de los datos experimentales, y afectados por los errores de medida y las diferencias entre muestras, bien sean debidas a la heterogeneidad propia del material o a errores de muestreo.

En la segunda opción se calculan los valores medios de las densidades reales de sustrato seco, de sustrato tensionado y la aparente para cada uno de los tratamientos. Con estos valores medios, y los correspondientes a cada repetición de peso seco y peso tensionado, se calcula el volumen ocupado por el material sólido, el volumen conjunto de material sólido más agua, y el volumen total de la muestra. Operando con estos valores se obtienen los correspondientes al reparto volumétrico de fases para cada muestra.

5.4.1.3.3.1 Cálculos previos

- Volumen del contenedor $V_e = (T - T_d)/d_{b2}$
- Peso seco neto $P_s = P_{st} - T$
- Peso neto succionado $P_t = P_{tt} - T$

5.4.1.3.3.2 Opción 1: Cálculo a partir de los datos propios de cada muestra

- Volumen ocupado por el material sólido $v_{ms} = (P_{st} - P_d)/d_{b1} - V_e$
- Volumen ocupado por el material sólido y el agua $v_{ma} = (P_{tt} - P_d)/d_{b1} - V_e$
- Volumen ocupado por el agua (se asume que la densidad del agua es $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) $V_{ag} = P_t - P_s$

5.4.1.3.3.3 Cálculo de densidades medias

Las densidades se obtienen como media de las muestras correspondientes a cada sustrato y a cada succión:

- Densidad real o densidad del sustrato seco $D_s = (1/n) \cdot \Sigma(P_s/v_{ms})$
- Densidad del sustrato bajo succión $D_t = (1/n) \cdot \Sigma(P_t/v_{ma})$
- Densidad aparente $D_a = (1/n) \cdot \Sigma(P_s/V_T)$

5.4.1.3.3.4 Opción 2: Cálculo a partir de los valores propios de la muestra y de los valores medios de densidades

Las densidades calculadas en el apartado anterior como media de las muestras del mismo tratamiento, permiten una nueva evaluación -para cada muestra- de los volúmenes ocupados por el material sólido y por el material sólido más el agua ($V_{ms} = P_s/D_s$ y $V_{ma} = P_t/D_t$). El volumen ocupado por el aire se obtiene como diferencia $V_{ai} = V_T - V_{ma}$.

El Método C permite corregir los datos en función de la pérdida del material en el paso 4 de la metodología. Para una pérdida de peso $P_p = P_{s1} - P_s$, las diferencias entre los valores real y observado de los distintos volúmenes son:

- Para el volumen ocupado por el material sólido: $+P_p/D_s$
- Para el volumen ocupado por el agua: $-P_p/d_a$ (d_a = densidad del agua)
- Para el volumen ocupado por el aire: $-P_p/d_b$ (d_b = densidad del baño de agua)

5.4.1.4 Resultados y discusión

En la Tabla 74 se proporcionan las relaciones necesarias para calcular el reparto volumétrico de fases a partir de los datos experimentales obtenidos. Como ya se ha discutido, la pérdida de sustrato durante el proceso de saturación y secado supone una importante fuente de error de medida. En la misma Tabla 74, se proporcionan las expresiones que permiten calcular la incidencia de la pérdida de peso en el cálculo del reparto volumétrico.

	A partir de Valores de cada repetición		A partir de Valores de densidad medios	
	Cálculo	Error	Cálculo	Error
Material sólido	$VMS = \frac{Ps - Pd}{D_{baño}}$	$\epsilon_{MS} = -\frac{Pp}{D_{baño}}$	$VMS = \frac{Ps}{Ds}$	$\epsilon_{MS} = -\frac{Pp}{Ds}$
Agua	$VAG = \frac{Pt - Ps}{D_{agua}}$	$\epsilon_{AG} = \frac{Pp}{D_{agua}}$	$VAG = \frac{Pt}{Dt} - \frac{Ps}{Ds}$	$\epsilon_{AG} = \frac{Pp}{Ds}$
Aire	$VAI = VT - (VMS + VAG)$	$\epsilon_{AI} = Pp \times \left(\frac{1}{D_{baño}} - \frac{1}{D_{agua}} \right)$	$VAI = \frac{Ps}{Da} - \frac{Pt}{Dt}$	$\epsilon_{AI} = -\frac{Pp}{Da}$
Suma	VT	0	$VT = \frac{Ps}{Da}$	$\epsilon_{VT} = -\frac{Pp}{Da}$

Tabla 74 : Estrategia de medida: Cálculo del reparto volumétrico de fases e incidencia del error por pérdida de sustrato. Los valores del error (ϵ) se obtienen como diferencia entre el valor observado y el verdadero ($\epsilon = \text{Observado} - \text{Verdadero}$).

- VMS=Volumen ocupado por material sólido
- VAG=Volumen ocupado por agua
- VAI=Volumen ocupado por aire
- VMSA= Volumen ocupado por material sólido + agua, medido conjuntamente por desplazamiento de fluidos
- VT=215 cm³. Volumen total de la muestra
- Ps = Peso seco de la muestra (al final del proceso)
- Pd = Peso del sustrato dentro del agua (Peso sumergido)
- Pt = Peso del sustrato tensionado (Peso de sustrato + agua)
- Pp = Pérdida de peso durante la saturación y secado de la muestra
- Dbaño = Densidad del agua empleada para calcular el volumen por desplazamiento de fluidos
- Dagua = Densidad del agua contenida en los poros del sustrato
- Ds = Densidad del sustrato seco. Obtenida como media de los valores Ps/VMS de todas las muestras de un mismo tratamiento
- Dt= Densidad del sustrato tensionado. Obtenida como media de los valores Pt/VMSA de todas las muestras de un mismo tratamiento
- Da= Densidad aparente. Obtenida como media de los valores Ps/VT de todas las muestras de un mismo tratamiento.
- ϵ_{MS} = Error en el volumen ocupado por material sólido, debido a la pérdida de sustrato durante la saturación y secado de la muestra
- ϵ_{AG} = Error en el volumen ocupado por agua, debido a la pérdida de sustrato durante la saturación y secado de la muestra
- ϵ_{AI} = Error en el volumen ocupado por aire, debido a la pérdida de sustrato durante la saturación y secado de la muestra

5.4.1.4.1 Incidencia de la pérdida de peso en el reparto volumétrico de fases

Para el cálculo de errores se ha partido de la expresión:

$$(182) \quad \text{Observado} = \text{Verdadero} + \varepsilon$$

Como consecuencia

- Si $\varepsilon < 0 \rightarrow$ Observado < Verdadero. La pérdida de sustrato infravalora el volumen medido.
- Si $\varepsilon > 0 \rightarrow$ Observado > Verdadero. La pérdida de sustrato sobrevalora el volumen medido.

5.4.1.4.1.1 Cálculo a partir de los valores de cada repetición

En este caso se asume la hipótesis de que el volumen de la muestra coincide con el volumen interior del anillo portamuestras. Este volumen se reparte entre el material sólido, el agua y el aire. Los dos primeros se obtienen a partir de datos experimentales, y el volumen de aire como diferencia entre éstos y el volumen total.

El peso seco no interviene en el cálculo del volumen de muestra, por lo que el valor considerado para este volumen no está afectado por la pérdida de peso. Teniendo en cuenta el procedimiento de cálculo y el mantenimiento del valor del volumen total, se deduce que la suma de los errores que afectan a los tres volúmenes es cero, como puede comprobarse en la Tabla 74.

En el cálculo de estos errores interviene la densidad del agua empleada para el cálculo de volúmenes por desplazamiento de fluidos (Dbaño) y la densidad del agua contenida en los poros (Dagua). La primera se mide experimentalmente y para la segunda se asume un valor de $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Si asumimos que la diferencia entre ambas es despreciable, se deduce que la pérdida de sustrato produce una infravaloración del volumen ocupado por el material sólido (cm^3) igual al peso de sustrato perdido (g), una sobrevaloración del mismo valor en el volumen ocupado por agua, y no incide en el volumen ocupado por aire.

5.4.1.4.1.2 Cálculo a partir de los valores medios de las densidades

Los datos de partida para el cálculo del reparto volumétrico son los valores de las densidades obtenidos como media de los valores obtenidos para cada una de las repeticiones de un mismo tratamiento. A partir de estos datos medios, y de los pesos de cada muestra correspondientes a sustrato seco y sustrato tensionado, se recalculan los valores del volumen ocupado por material sólido, por material sólido más agua y volumen total, y a partir de éstos, el reparto volumétrico de fases. El valor del volumen ocupado por aire se obtiene por diferencia entre el volumen total calculado y el volumen de agua más material sólido. Las ecuaciones para el cálculo de cada uno de los volúmenes a partir de los datos experimentales se detallan en la Tabla 74

Los valores medios obtenidos pueden estar afectados por diferentes tipos de errores de medida, que incidirán en el cálculo del reparto volumétrico. La formación de bolsas entre la pared exterior del anillo metálico, la junta tórica de silicona y la tela de cierre, trae como consecuencia que el volumen real sea mayor que los 215 cm^3 considerados. Esta infravaloración del volumen de la muestra se transmite al volumen de muestra recalculado a través de una densidad aparente sobrevalorada. La consecuencia final es la infravaloración del volumen ocupado por aire. En este apartado nos ocuparemos únicamente de la incidencia del error por pérdida de sustrato.

A diferencia del caso anterior, en el que el volumen de muestra era constante, en este caso varía con la variación del peso seco de la muestra, puesto que se recalcula dividiendo este valor entre la densidad aparente.

La incidencia de la pérdida de sustrato en los volúmenes de material sólido y de agua, sigue un comportamiento similar al caso anterior. La pérdida de peso infravalora el volumen ocupado por material sólido y sobrevalora, en la misma magnitud, el volumen ocupado por agua. En este caso, el peso del sustrato perdido se divide por la densidad del sustrato seco, en lugar de hacerlo por la densidad del agua.

La incidencia de la pérdida de sustrato en el volumen ocupado por aire, en este caso, no es cero como ocurría en el caso anterior. El volumen total de la muestra se infravalora en un valor que se obtiene dividiendo el peso de sustrato perdido por el valor de la densidad aparente. La compensación entre los errores correspondientes a los volúmenes de agua y material sólido, y el método de cálculo empleado, hace que se arrastre -al volumen ocupado por aire- toda la incidencia de la pérdida de peso en el cálculo del volumen total.

5.4.1.4.2 *Volumen ocupado por aire*

En la Tabla 75 se proporciona el valor de la media y la desviación estándar para el volumen ocupado por aire, obtenido por los tres métodos experimentales aplicados. En una columna adicional (Método C corregido) se proporcionan los valores obtenidos tras aplicar las corrección por la pérdida de peso. Se han empleado los dos métodos de cálculo comentados, a partir de los datos de cada muestra (Vaid) y a partir de los datos de la muestra y de los valores medios de las densidades para cada tratamiento (Vaic).

En el caso de la corteza de pino < 0,2 mm, los valores obtenidos para el volumen ocupado por aire son negativos mientras que en el caso de la perlita todos los valores son superiores a cero.

El motivo por el que se eligieron estos dos sustratos fue su posible utilidad como patrón de referencia, con contenido de aire igual a cero (Ver 5.4.1.2). Como ya se indicó, la obtención de valores negativos para el volumen de aire pone de manifiesto un error por infravaloración de este parámetro, mientras que la obtención de valores positivos no permite obtener conclusiones, puesto que puede ser debido a que, efectivamente, hay un determinado volumen de poros ocupado por aire. La obtención de valores positivos en el caso de la perlita inutiliza a dicho sustrato para los objetivos de este estudio siendo únicamente útiles los datos de la corteza de pino.

El cálculo de volúmenes con los datos propios de cada muestra (Vaid) proporciona valores negativos con todos los métodos experimentales utilizados. El valor cero queda fuera de los intervalos de confianza del 99% para los métodos A, C y C corregido. En el caso del método B, el cero está dentro del intervalo del 99%, pero fuera del intervalo del 95%. Los valores obtenidos son significativamente distintos de cero, y, por lo tanto, se puede considerar que los métodos empleados para la medición y cálculo del volumen ocupado por aire infravaloran este parámetro. La magnitud del error cometido en este sustrato ha sido de al menos 5-6 cm³, equivalente a un 2-3% del volumen total de la muestra.

Cuando el cálculo de volúmenes se realiza a partir de los valores medios de las densidades, el comportamiento de los métodos A, B y C es idéntico al método anterior. Sin embargo, la corrección introducida por la pérdida de sustrato proporciona un valor de 0,07 cm³

5.4 Trabajo experimental: Estrategia de medida

para el volumen ocupado por aire, equivalente al 0,03% del volumen total de la muestra. Este valor se puede considerar como cero.

Valor en cm ³		Método A	Método B	Método C	Método C corregido
Corteza de pino <0,2 mm					
Vaid	Media	-5,71	-5,04	-6,26	-6,26
	Std	1,59	2,14	1,39	1,39
Vaic	Media	-6,12	-5,45	-6,69	0,07
	Std	2,36	2,47	2,08	2,63
Perlita B-6					
Vaid	Media	1,99	5,06	4,40	4,40
	Std	1,75	2,64	2,60	2,60
Vaic	Media	1,51	4,58	4,11	12,44
	Std	2,09	2,49	2,36	1,67

Tabla 75 : Estrategia de medida: Volumen ocupado por aire, obtenido directamente a partir de los datos de cada repetición (Vaid) y a partir de los datos medios de densidades (Vaic) para los tres métodos experimentales aplicados. Corrección de valores en función del sustrato perdido durante el proceso (Método C corregido)

Sustrato	Parámetro	Media	Desviación estándar
Corteza de Pino<0,2	Pérdida de peso	2,622	0,25927
	Volumen considerado (sin corregir)	215	
	Volumen total (corregido)	221,7662	0,66905
	Error	-6,76617	0,66905
	Densidad aparente	0,38752	0,0139
Perlita B-6	Pérdida de peso	0,538	0,04868
	Volumen considerado (sin corregir)	215	
	Volumen total (corregido)	223,3276	0,75355
	Error	-8,32757	0,75355
	Densidad aparente	0,06460	0,0019

Tabla 76: Estrategia de medida: Valores obtenidos para la corrección del Método C. Valores medios y desviación estándar de Peso de sustrato perdido, Volumen total calculado y Error. El valor medio de la densidad aparente relaciona las desviaciones estándar de la pérdida de peso y del volumen total calculado, y, por lo tanto también la del error.

Como ya se ha discutido anteriormente, el volumen de aire calculado a partir de los datos de cada muestra es insensible a la pérdida de peso, mientras que el calculado a partir de los valores de las densidades medias, si que es sensible. Como se puede ver en la Tabla 75, los valores obtenidos por uno y otro método de cálculo son similares, y ambos están afectados de un error de la misma magnitud. El método de cálculo empleado a partir de las medias proporciona el criterio para corregir el valor, obtenido para el volumen ocupado por aire. La aplicación de esta corrección proporciona un valore más elevado para el volumen total de la muestra. La

utilización de este valor corregido en el cálculo del volumen ocupado por aire, traslada a éste la corrección aplicada al primero. Sin embargo, en la rutina normal de laboratorio, la ventaja que supone el poder corregir estos valores puede ser más ficticia que real, por la necesidad de evaluar la cantidad de sustrato perdida durante el proceso.

La aplicación de la corrección por pérdida de sustrato ha corregido, al menos aparentemente, la totalidad del error de infravaloración del volumen ocupado por el aire. Esto parece indicar que la pérdida de sustrato es la causa principal del error cometido en la estimación del volumen ocupado por aire.

En la Tabla 76 se proporcionan los datos relativos a pérdida de peso, volumen calculado, error inducido por la pérdida de peso y densidad aparente. En la Tabla 74 se observa que la incidencia de la pérdida de peso en el volumen total es igual a la incidencia en el volumen ocupado por aire. El valor del error se obtiene dividiendo el peso de sustrato perdido por la densidad aparente del sustrato.

Cuando una variable estadística se multiplica o divide por una constante, los valores de la media y la desviación estándar de la nueva variable se obtienen multiplicando por dicha constante los valores de la media y la desviación estándar de la variable primitiva. En la Tabla 76, puede observarse que se cumple esta relación. Dividiendo la desviación estándar de la pérdida de peso por el valor de la densidad aparente correspondiente, se obtiene el valor de la desviación estándar del volumen total calculado y del error, tanto del volumen total calculado como del volumen ocupado por el aire.

5.4.1.5 Conclusiones del ensayo

1. Incidencia de la pérdida de sustrato durante la segunda saturación y el secado de la muestra
 - 1.1. La pérdida de sustrato tiene como consecuencia la infravaloración del volumen ocupado por el material sólido y una sobrevaloración, de la misma magnitud, del volumen ocupado por agua.
 - 1.2. La pérdida de sustrato provoca una infravaloración del volumen ocupado por aire, en una magnitud igual al valor del peso de sustrato perdido dividido por el valor de la densidad aparente de dicho sustrato.
 - 1.3. La evaluación del error debido a la pérdida de sustrato requiere la evaluación de la cantidad de sustrato perdido. Las limitaciones de las rutinas de laboratorio para conocer la cantidad de sustrato perdido, limitan la posibilidad de evaluar la magnitud de este error.
2. Valor obtenido para el volumen ocupado por aire
 - 2.1. La metodología aplicada infravalora el volumen ocupado por aire. En el caso de la corteza de pino <math><0,2\text{mm}</math>, esta infravaloración es de, al menos, $5\text{-}6\text{ cm}^3$, equivalentes a un 2-3% del volumen total de la muestra.
 - 2.2. La aplicación de la corrección por pérdida de sustrato restablece el valor cero para el volumen ocupado por aire.
 - 2.3. La pérdida de peso durante el proceso de saturación y secado parece ser la principal causa de error en la determinación del reparto volumétrico de fases.

5.4.2 *Recapitulación*

Las metodologías de caracterización física de sustratos no plantean problemas para evaluar la precisión de las mediciones efectuadas. Sin embargo, ninguna de ellas permite evaluar la exactitud.

Se ha comprobado experimentalmente la magnitud del error de la exactitud de las medidas obtenidas. La acumulación de errores en el valor obtenido para el volumen ocupado por aire, provoca su infravaloración debido, principalmente, a la pérdida de sustrato durante el proceso de medida.

La magnitud de los errores encontrados pone de manifiesto la necesidad de establecer una rutina que proporcione una evaluación de la exactitud de los valores obtenidos.

Para evaluar la exactitud se plantean dos posibilidades, el empleo de patrones de referencia, o en su defecto, el empleo de relaciones entre las variables que proporcionen un valor de referencia verdadero. Ante la dificultad que presenta la obtención de patrones de medida contrastados, hemos optado por la comparación de los resultados obtenidos con un valor de referencia verdadero.

Para poder aplicar este criterio es necesario disponer de medidas independientes del volumen total, y de los volúmenes ocupados por material sólido, agua y aire. Ni las metodologías utilizadas actualmente, ni la medición de volúmenes por desplazamiento de fluidos, permiten obtener un valor independiente para el volumen ocupado por aire, por lo que es necesario aplicar una metodología distinta de las anteriores.

En el apartado 3.4.2 se plantea -como solución- la aplicación de la picnometría de gases como método para obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire. De esta forma, se puede obtener una estimación de la exactitud global del método de medida empleado.

5.5 Desarrollo del picnómetro de doble cámara para medición de volúmenes en sustratos de cultivo

5.5.1 Introducción

5.5.1.1 Antecedentes

En el apartado 3.4.2 hemos propuesto la utilización de la picnometría de gases para obtener una medida del volumen ocupado por aire, independiente de las medidas de los volúmenes ocupados por agua y material sólido. De esta forma, la ecuación (123) proporciona un valor $\varepsilon \neq 0$ que evalúa la exactitud global del método de medida empleado.

En el apartado 3.5 se han presentado los fundamentos de la picnometría de gases (3.5.1) y los distintos tipos de picnómetros que se pueden utilizar (3.5.2). En base a las características de estos picnómetros, hemos optado por el picnómetro de doble cámara (3.5.4.1) como el más adecuado para los condicionantes que se presentan en el estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo.

En los apartados 3.5.4.2 a 3.5.4.4 se han desarrollado los cálculos a realizar, las variables a medir y los condicionantes que se presentan en la medición de volúmenes con un picnómetro de gas de doble cámara.

5.5.1.2 Condicionantes

El objetivo del análisis y las características de la muestra condicionan las características del picnómetro a utilizar.

En nuestro caso, aplicamos la picnometría para medir el volumen ocupado por aire en una muestra de sustrato sometida previamente a una determinada tensión de humedad. Dadas las características de los sustratos, es previsible que se presenten gradientes de humedad importantes, por lo que es obligado trabajar con la muestra tensionada íntegra e inalterada.

El objetivo es medir el volumen ocupado por aire en una muestra constituida por una mezcla de un material poroso y agua. Las variaciones importantes de temperatura pueden provocar variaciones sensibles del volumen ocupado por agua y, en consecuencia, del volumen ocupado por aire. Por lo tanto, es conveniente trabajar a temperatura ambiente. Si esto no es posible, las variaciones de temperatura serán las mínimas necesarias y, en ningún caso, se llegará a temperaturas de congelación.

Por otra parte, consideramos interesante trabajar con aire atmosférico.

5.5.1.3 Objetivo

El objetivo que se plantea es desarrollar un picnómetro de gases que nos permita obtener una medida fiable del volumen ocupado por aire en una muestra de sustrato tensionada, empleando como gas picnométrico el aire atmosférico.

5.5.1.4 Trabajo desarrollado

En este apartado (5.5) presentamos el diseño (5.5.2), la metodología de medida (5.5.3), el calibrado (5.5.4) y el estudio de la incidencia de temperaturas en el proceso de medida (5.5.5), de un picnómetro de doble cámara desarrollado para la medida del volumen ocupado por aire de una muestra inalterada de sustrato tensionado.

5.5.2 *Diseño*

5.5.2.1 Elementos básicos

El picnómetro de gas de doble cámara consta de dos cámaras de volumen variable, una de referencia y otra de medida.

5.5.2.1.1 *Cámara de medida*

La cámara de medida (3.5.2.2) tiene como funciones alojar la muestra sometida a análisis y medir las variaciones de volumen. Debe disponer de un sistema que permita variar el volumen asegurando la estanqueidad y proporcionando un sistema fiable de medida de la variación de dicho volumen.

5.5.2.1.2 *Cámara de referencia*

La función de la cámara de referencia (3.5.2.2) es proporcionar unas relaciones de volumen previamente fijadas, que sirvan de referencia para la cámara de medida. Debe disponer de un sistema hermético que permita variar el volumen de la cámara de referencia, en una proporción previamente fijada y conocida, con una precisión elevada.

5.5.2.1.3 *Criterio de medida*

El valor principal a obtener en el picnómetro de gas de doble cámara es la variación de volumen de la cámara de medida necesaria para alcanzar una presión igual a la de la cámara de referencia (3.5.2.2).

Es básico disponer de un sistema que permita comparar las presiones de ambas cámaras, manteniendo la estanqueidad entre ambas. La precisión de los valores obtenidos para el incremento de volumen está fuertemente condicionada por la precisión empleada en la comparación de la presión entre ambas cámaras.

5.5.2.1.4 *Control de temperatura*

Las medidas por picnometría de gases son sensibles a las variaciones de temperatura (3.5.3.2). Se requiere un sistema de control que permita mantener la temperatura constante, o en su defecto, un sistema de registro de temperaturas que permita aplicar los coeficientes de corrección correspondientes (3.5.4.2, ecuación (147)).

5.5.2.2 Soluciones técnicas adoptadas

5.5.2.2.1 Cámara de medida

5.5.2.2.1.1 Descripción

La cámara de medida está constituida por un recipiente portamuestras y dos cilindros de émbolo móvil de diferente diámetro. Estos tres elementos están conectados entre sí, formando una cámara con una masa de gas única.

El recipiente portamuestras está constituido por una base metálica y una carcasa de aluminio, con un diámetro interior de 100 mm y 75 mm de altura. Una vez colocada la muestra, se coloca la carcasa y se atornilla a la base. La estanqueidad está asegurada mediante una junta tórica. Este recipiente dispone además de una válvula de conexión directa a la atmósfera.

El diámetro del primer cilindro (M1) es 50 mm y la carrera del émbolo de 600 mm. Esto proporciona una variación de volumen de $1178,097 \text{ cm}^3$. El diámetro del segundo cilindro (M2) es de 20 mm y la carrera del pistón de 400 mm, lo que proporciona una variación de volumen de $125,664 \text{ cm}^3$.

Los émbolos móviles de los cilindros, están unidos solidariamente a sendos vástagos, que atraviesan la contracámara del cilindro y salen al exterior a través de la base.

5.5.2.2.1.2 Utilidades

Los cilindros de émbolo móvil constituyen el sistema de volumen variable de la cámara de medida. El empleo de un cilindro de diámetro elevado (M1) permite medir incrementos de volumen elevados. El incremento máximo a medir viene dado por la suma de volúmenes de ambos cilindros, es decir, $1303,761 \text{ cm}^3$.

El empleo de un cilindro de pequeño diámetro (M2) permite obtener una elevada precisión en las mediciones efectuadas. La precisión corresponde al volumen del cilindro equivalente al mínimo desplazamiento detectable del émbolo. Con una escala graduada en mm, se puede alcanzar una precisión de lectura de 0,5 mm. Este desplazamiento del émbolo equivale, en el caso del cilindro M2, a $0,157 \text{ cm}^3$.

5.5.2.2.1.3 Elementos auxiliares

En el cilindro M1 se han establecido unos puntos fijos, que actúan como topes del vástago del émbolo. De esta forma, el émbolo se coloca en una posición prefijada a la que le corresponde un volumen conocido por el calibrado previo. La distancia entre dos puntos fijos consecutivos del cilindro M1 esta determinada por el cilindro M2. Para no dejar puntos ciegos de medida, el incremento de volumen por el paso entre dos puntos consecutivos del cilindro M1 ha de ser menor o igual que el incremento de volumen por el paso del émbolo del cilindro M2 de un extremo al otro de su recorrido.

En el cilindro M2 se ha instalado un dial que se desplaza sobre la escala milimétrica, un sistema que permite un desplazamiento rápido y otro de ajuste más lento y preciso, proporcionando una elevada precisión en la variación de volumen necesaria para igualar la presión de la cámara de medida con la de la cámara de referencia.

En el extremo del vástago del cilindro M2 se ha atornillado una lámina metálica circular perpendicular al eje del vástago, que sirve de dial sobre la escala milimétrica en la que se toma la medida. El vástago se prolonga con un tornillo (T1), cuya tuerca puede deslizarse sobre una guía en el sentido del eje del vástago. La tuerca se puede fijar en cualquier posición de la guía mediante un tornillo de presión (T2). De esta forma, el tornillo T2 permite un ajuste grosero mediante desplazamientos rápidos sobre la guía. Una vez realizada una primera aproximación, el tornillo T2 se fija y el tornillo T1 actúa como tornillo micrométrico.

5.5.2.2.2 Cámara de referencia

5.5.2.2.2.1 Descripción

El diseño de la cámara de referencia es similar al de la cámara de medida. Está constituida por un recipiente gemelo del recipiente de medida, y un cilindro (R1) gemelo del cilindro M1 de la cámara de medida. El recipiente y el cilindro están comunicados entre sí, formando una cámara única. Al igual que en el caso de la cámara de medida, el recipiente dispone de una válvula de conexión con la atmósfera.

5.5.2.2.2.2 Utilidades

La función del cilindro de émbolo móvil es variar el volumen de la cámara de referencia de tal forma que la relación (K_i) de la ecuación (146) entre el volumen inicial (V_{r0}) y final (V_{ri}) es conocida con precisión por calibrado previo.

5.5.2.2.2.3 Elementos auxiliares

Al igual que en el caso del cilindro M1, para el cilindro R1 se han establecido unos puntos fijos que actúan como topes del vástago del émbolo. Cada punto de referencia corresponde a una relación K_i , previamente conocida por calibrado, entre el volumen inicial de la cámara de referencia (V_{r0}) y el volumen de la cámara de referencia (V_{ri}) cuando el émbolo se sitúa en la posición prefijada ($K_i = V_{r0}/V_{ri}$).

5.5.2.2.3 Medida de la presión

La fiabilidad de las medidas obtenidas depende en gran medida de la fiabilidad con la que se consigue igualar la presión de la cámara de medida con la presión de la cámara de referencia. Para ello, se han instalado dos tipos de sensores de presión que permiten trabajar por aproximaciones sucesivas en dos etapas. En la primera etapa se emplean transductores de presión comerciales con una escala de medida de 0 a 10 bares, que permiten hacer una primera aproximación de las presiones. En la segunda se emplea un manómetro diferencial de columna de agua, que permite un ajuste preciso de la presión de la cámara de medida a la presión de la cámara de referencia.

Los transductores de presión empleados en la primera etapa tienen un rango de medida de 0 a 10 bares, una precisión de 0.25% sobre fondo de escala y una temperatura de trabajo entre -40 °C y $+125$ °C. Estos transductores se han colocado en el recipiente de medida y en su gemelo de la cámara de referencia. La lectura se obtiene mediante “display” con precisión de centibares.

El manómetro diferencial de presión se ha fabricado en tubo de nilón. Tiene sendas ramas verticales conectadas a la cámara de medida y a la cámara de referencia. Las dos ramas

están unidas en su parte inferior, donde se dispone del sistema de llenado de agua y de una válvula de bloqueo. Esta válvula, en su posición de cierre, deja incomunicadas las dos ramas del manómetro y debe permanecer cerrada cuando la diferencia de presión entre las dos cámaras es elevada. Una vez que, con ayuda de los transductores de presión, se ha producido la primera aproximación, la válvula se abre. El manómetro diferencial es funcional y se realiza el ajuste fino de presiones.

Por último, las conexiones entre las dos cámaras del picnómetro y las ramas correspondientes del manómetro diferencial están protegidas con sendas válvulas antirretorno. Si por error o accidente el manómetro está conectado con una diferencia de presión excesiva, el agua contenida en el manómetro es empujada a la cámara cuya presión es menor. La función de estas válvulas antirretorno es evitar el paso del agua del manómetro a las cámaras del picnómetro.

5.5.2.2.4 *Control de temperatura*

Las sondas de temperatura están situadas en el interior del recipiente de medida y de su gemelo de la cámara de referencia. Se dispone de sendos “displays”, que proporcionan la lectura con una precisión de 0,1 °C.

5.5.2.2.5 *Elementos auxiliares*

5.5.2.2.5.1 Depósito auxiliar de helio

El empleo de gases diferentes al aire atmosférico (en nuestro caso helio) requiere la adquisición de estos gases en envases de alta presión. El paso a la presión de trabajo puede provocar un enfriamiento brusco y un posterior calentamiento, hasta alcanzar el equilibrio. La utilización de estos gases, pasando directamente del envase de alta presión al picnómetro, puede dar lugar a variaciones de temperatura, que interfieren con el proceso de medida.

Para evitar estos problemas se ha incluido un cilindro de émbolo móvil de 80 mm de diámetro y 320 mm de carrera, que proporciona un volumen de 1608,495 cm³. Este cilindro actúa como almacén auxiliar de helio a una presión de 6-8 bares. Esto permite el reequilibrio de la temperatura del helio con el ambiente y un manejo más cómodo.

5.5.2.2.5.2 Conexión auxiliar entre la cámara de referencia y la cámara de medida

Se dispone de una comunicación entre las dos cámaras con una válvula. Esto permite asegurar la igualdad de presiones entre ambas cámaras en el inicio del proceso de medida. Una vez que las dos cámaras tienen la misma presión, se cierra la válvula, independizando las masas de gas contenidas en ambas cámaras.

5.5.2.2.5.3 Válvulas de tres vías

Las contracámaras de los cilindros de émbolo móvil están conectadas a un equipo de aire comprimido. En la conexión se interpone una válvula de tres vías, que posibilita un manejo cómodo y ágil.

5.5.3 Metodología de medida

Se han efectuado mediciones empleando aire atmosférico y helio como gases picnométricos. Cuando el gas utilizado es helio, es necesario sustituir el aire por helio

5.5.3.1.1 Preparación

1. La muestra se coloca sobre la base metálica del recipiente de la muestra: a continuación se coloca la carcasa y se atornilla.
2. Se abren las válvulas de conexión con la atmósfera del recipiente de medida y de su gemelo de la cámara de referencia, la válvula de conexión entre las dos cámara y la válvula de desbloqueo del manómetro diferencial.

5.5.3.1.2 Medición con aire atmosférico

1. Con las válvulas abiertas, como se indica en el apartado anterior, se sitúan los émbolos de los cilindros en la posición inicial: los cilindros M1 y R1 con el émbolo en la posición superior y el cilindro M2 con el émbolo en la posición inferior. De esta forma, el volumen de la cámara de medida está constituido por la suma del volumen del recipiente de medida más el volumen máximo del cilindro M1 más el volumen de las conexiones. El volumen de la cámara de referencia está constituido por el volumen del recipiente gemelo al de medida más el volumen máximo del cilindro R1 más el volumen de las conexiones.
2. En esta posición se deja estabilizar el manómetro diferencial y, a continuación, se cierran las válvulas de conexión de los recipientes con la atmósfera, la válvula de conexión entre las dos cámaras y la válvula de bloqueo del manómetro diferencial.
3. Se toman los datos de temperatura de la cámara de referencia (T_{r0}) y de la cámara de medida (T_{m0}).
4. El émbolo del cilindro R1 se pasa de la posición inicial a la posición i , correspondiente al factor K_i , al que se va a efectuar la medición. Para ello, el extremo del vástago se pasa de la posición inicial al tope i correspondiente.
5. Se toma la lectura de presión con el transductor de presión de la cámara de referencia.
6. El émbolo del cilindro M1 se desplaza para disminuir el volumen hasta un punto fijo, que proporcione la presión superior más próxima a la obtenida para la cámara de referencia.
7. El émbolo del cilindro M2 se desplaza para aumentar el volumen hasta que el transductor de presión de la cámara de medida de una lectura similar al de la cámara de referencia. Para ello, se afloja el tornillo T1 que permite el desplazamiento rápido del extremo del vástago sobre la guía.
8. Una vez alcanzada esta primera aproximación, se bloquea el tornillo T1 a la guía fijando la posición del émbolo, y se abre la válvula de bloqueo del manómetro diferencial de presión. Las ramas de este manómetro se desequilibran marcando la diferencia de presiones entre las dos cámaras. Esta operación se debe realizar con cuidado. Si la diferencia de presión es excesiva, se puede producir la inutilización del manómetro. Para evitarlo, se debe desbloquear despacio: si el manómetro tiende a desequilibrarse con rapidez, se bloquea y se retorna al punto anterior.
9. Una vez que el manómetro es funcional, se actúa sobre el tornillo micrométrico T2 hasta que las dos ramas del manómetro alcancen la misma altura.
10. Una vez alcanzada la misma altura, y cuando ésta permanece estable, se hace la lectura de datos: relación K de la cámara de referencia (K_i), punto fijo del cilindro M1, lectura del "dial" del cilindro M2 sobre la regla milimétrica, y temperaturas de la cámara de referencia (T_{ri}) y de la cámara de medida (T_{mi}).

5.5.3.1.3 *Sustitución del aire por helio*

En la preparación de la muestra (5.5.3.1.1), la cámara de medida queda llena de aire atmosférico. Cuando se emplea otro gas para hacer las mediciones, es necesario sustituir el aire por el otro gas, en nuestro caso el helio.

Según las fuentes consultadas (Gutiérrez 1995, comunicación personal), se consigue una buena sustitución de aire por helio realizando cuatro barridos sucesivos con helio. En estos barridos se produce una dilución progresiva del aire atmosférico. Repitiendo esta operación cuatro veces, la cantidad de aire que queda se puede considerar despreciable.

1. En primer lugar se realiza un barrido inicial, dejando correr el helio a través de cada una de las dos cámaras durante aproximadamente medio minuto. Esta operación se realiza con el manómetro diferencial de presión bloqueado, con la válvula de conexión entre las dos cámaras abierta y con los émbolos de los cilindros M1, M2 y R1 en su posición más baja, es decir con el mínimo volumen de la cámara. La entrada y la salida deben situarse en extremos opuestos de la cámara para que el barrido sea eficaz. La presión de entrada debe ser aproximadamente 0,5 bares superior a la presión atmosférica.
2. Una vez transcurrido medio minuto, se cierra la salida a la atmósfera.
3. Se inyecta helio hasta que los cilindros están completamente expandidos y la presión alcanza 5-6 bares sobre la presión atmosférica.
4. Se cierra la entrada de helio y se abren las válvulas de salida a la atmósfera, y se bajan los émbolos de los tres cilindros hasta que alcanzan el volumen mínimo. Las válvulas de salida se cierran cuando los tres émbolos están en su posición más baja y la presión en el interior de las cámaras sea de aproximadamente 1 bar por encima de la presión atmosférica.
5. Los pasos 3 y 4 se repiten 4 veces.

Una vez realizados estos cuatro barridos, se puede considerar que todo el aire atmosférico ha sido sustituido por helio.

5.5.3.1.4 *Medición con helio*

Una vez realizado el último barrido, el sistema está con los émbolos de los cilindros en su posición más baja, a una presión de aproximadamente 1 bar por encima de la presión atmosférica, con la válvula de conexión entre las dos cámaras abierta y con el manómetro diferencial de presión bloqueado.

1. Se colocan los émbolos en la posición inicial; M1 y R1 en su posición más alta y M2 en su posición más baja.
2. Se desbloquea el manómetro diferencial de presión para que alcance el equilibrio.
3. Se cierra la válvula de conexión entre las dos cámaras y después se bloquea el manómetro diferencial de presión.
4. Se toman los datos de temperatura de la cámara de referencia (T_{r0}) y de la cámara de medida (T_{m0}).
5. A partir de este punto, se siguen los mismos pasos que para la medición con aire atmosférico, a partir del punto 4 del apartado 5.5.3.1.2.

5.5.4 *Calibrado del picnómetro*

Para obtener el valor del volumen ocupado por la muestra, es necesario obtener experimentalmente cuatro valores: V_{CM} , K_i , ΔV_i y K_T (3.5.4.3). Los dos primeros son

característicos de la construcción del picnómetro, y, como tales, su evaluación es parte del calibrado del picnómetro. El último, K_T , se obtiene a partir de los valores de las temperaturas proporcionados por las sondas colocadas en el interior de la cámara de referencia y de la cámara de medida.

El valor de ΔV_i se obtiene a partir del volumen correspondiente al punto fijo del cilindro M1, y del desplazamiento del “dial” del cilindro M2 sobre la escala milimétrica (5.5.2.2.1.3).

Los puntos fijos en el recorrido del émbolo del cilindro M1 de la cámara de medida constituyen una característica constructiva del picnómetro. Por ello, al igual que en el caso de K_i y de V_{CM} , su evaluación es parte del calibrado del picnómetro.

5.5.4.1 Material y métodos

5.5.4.1.1 Calibrado de los puntos fijos de la cámara de medida

5.5.4.1.1.1 Materiales

La separación entre dos puntos fijos sucesivos del recorrido del émbolo del cilindro M1 está condicionada por el cilindro M2. El incremento de volumen por el paso del émbolo entre dos puntos sucesivos de M1 ha de ser menor o igual que el incremento de volumen debido a todo el recorrido del émbolo del cilindro M2 (5.5.2.2.1.3). Como consecuencia, se han establecido 11 puntos fijos.

5.5.4.1.1.2 Métodos

El calibrado se lleva a cabo midiendo la diferencia de volumen para cada pareja de puntos fijos consecutivos.

El error total de calibrado se obtiene comparando la suma de volúmenes de todos los intervalos con el volumen calculado a partir de la sección del cilindro y la carrera total del émbolo obtenida por medición directa.

La metodología de laboratorio seguida para calibrar el volumen correspondiente al intervalo entre cada pareja de puntos fijos consecutivos ha sido la siguiente:

1. El vástago del cilindro M1 se sitúa en el punto superior de la pareja de puntos. El vástago del cilindro M2 se coloca en la parte inferior de su recorrido.
2. Las cámaras de referencia y de presión se aíslan del exterior y se conectan entre sí para igualar las presiones de ambas.
3. Se independizan las dos cámaras
4. Se toman los valores de las temperaturas en ambas cámaras.
5. El vástago del cilindro M1 se pasa al punto fijo inferior (disminuye el volumen del cilindro inferior).
6. El vástago del cilindro M2 se desplaza hacia arriba (aumento de volumen) hasta que la presión de la cámara de medida vuelva a igualar la presión de la cámara de referencia.
7. Se mide el desplazamiento del “dial” del cilindro M2 sobre la escala graduada.
8. Se toman los valores de las temperaturas en ambas cámaras.

Cuando en el punto 6 se vuelven a igualar las presiones, el volumen de la cámara de referencia vuelve a ser igual que el original. La disminución de volumen del cilindro M1 es igual al aumento de volumen del cilindro M2.

$$(183) \quad \Delta V_1 = -\Delta V_2 = -S_2 \times H_2$$

Donde:

- ΔV_1 = Incremento de volumen por desplazamiento del émbolo del cilindro grande entre dos puntos consecutivos.
- ΔV_2 = Incremento de volumen por desplazamiento del émbolo del cilindro pequeño para igualar las presiones.
- S_2 = Sección del cilindro pequeño.
- H_2 = Desplazamiento del vástago del cilindro pequeño, medido sobre la escala graduada

Las mediciones se efectúan 3 veces, 1 empleando aire y 2 veces sustituyendo el aire por helio.

5.5.4.1.2 Calibrado del volumen total de la cámara de medida

5.5.4.1.2.1 Materiales

La cámara de medida está constituida por el recipiente de medida, los dos cilindros y los tubos de conexión entre estos elementos. Sus dimensiones se han detallado en el apartado 5.5.4.1.1.1.

Para el calibrado se emplea patrón de volumen nº 1, utilizado para la determinación de la densidad del agua del baño, en la medida de volumen por desplazamiento de fluidos (5.2.3.3.2.2.2).

5.5.4.1.2.2 Métodos

En el calibrado del volumen de la cámara de medida se emplea el calibrado de los puntos fijos del cilindro de dicha cámara de medida. Se emplean también los puntos fijos de la cámara de referencia, para efectuar las mediciones a distintos valores de K_i .

El empleo de un patrón de volumen conocido “P”, proporciona dos lecturas para cada valor de K_i :

- La primera lectura “b”, corresponde al incremento de volumen de la cámara de medida cuando la relación de volumen en la cámara de referencia varía 1: K_i .
- Para obtener la segunda lectura “c”, el patrón de volumen se introduce en la cámara de medida. “c” corresponde al incremento de volumen de la cámara de medida con el patrón de volumen en su interior, para la misma variación de volumen en la cámara de referencia.

Aplicando la ecuación (152) al calibrado:

- V_p es conocido. Su valor es cero cuando se efectúa la medición con la cámara de medida vacía. Cuando se emplea el patrón de volumen, el valor de V_p es igual al volumen del patrón empleado **P**.
- ΔV_i corresponde al incremento de volumen medido con los cilindros de la cámara de medida previamente calibrados. Denominamos **b** al incremento de volumen obtenido para la medida

sin patrón y **c** al incremento de volumen obtenido cuando la medición se hace con el patrón de volumen.

➤ V_{CM} corresponde, en este caso, al valor incógnita.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (152) y operando se obtiene:

$$(184) \quad V_{CMi} = P \times \frac{1}{1 - \frac{c}{b}}$$

Donde V_{CMi} representa el valor de la cámara de medida obtenido para cada valor K_i .

Para calibrar el volumen de la cámara de medida, es necesario fijar los puntos correspondientes a los distintos valores de K_i de la cámara de referencia, pero no es necesario conocer su valor. Por lo tanto, el calibrado de los puntos K_i de la cámara de referencia puede ser posterior al calibrado del volumen total de la cámara de medida.

Para cada valor de K_i se obtiene una evaluación independiente del volumen total de la cámara. Se trabaja con 5 valores de K_i , 4 correspondientes a cada uno de los 4 puntos fijos marcados para la cámara de referencia más uno adicional, correspondiente a la posición del émbolo en la parte más baja del cilindro.

La metodología seguida es la siguiente:

1. Se efectúan dos mediciones independientes, una con el recipiente de medida vacío y otra con el patrón de volumen en el recipiente de medida.
2. Los vástagos de los cilindros de las cámaras de medida y de referencia se sitúan en su posición inicial: los vástagos de los cilindros M1 y R1 en su posición más alta, con el máximo volumen de cámara correspondiente; el vástago del cilindro M2 en la posición inferior, correspondiente al volumen mínimo.
3. Se igualan las presiones de las dos cámaras, se sellan y se cierra la válvula de comunicación entre ambas.
4. Se toman los valores de las temperaturas en ambas cámaras.
5. El vástago del cilindro R1 se pasa al punto fijo número 1. La relación entre el volumen inicial y final es K_1 .
6. Se ajustan las posiciones de los émbolos de los dos cilindros de la cámara de medida hasta que la presión de la cámara de medida iguale a la presión de la cámara de referencia.
7. Se toman los valores de las temperaturas en ambas cámaras.
8. El incremento de volumen de la cámara de medida se obtiene a partir del desplazamiento del émbolo del cilindro M1 entre los puntos fijos, y del desplazamiento de émbolo del cilindro M2 medido sobre la escala graduada.
9. El incremento de volumen así medido corresponde al valor **b** de (184) cuando la medición se efectúa con el recipiente de medida vacío, y al valor **c** de la misma ecuación cuando el patrón de volumen está dentro del recipiente de medida.
10. El proceso se repite para cada uno de los puntos fijos de la cámara de referencia K_i .

5.5.4.1.3 Calibrado de los valores K_i de la cámara de referencia

5.5.4.1.3.1 Materiales

El volumen total de la cámara de referencia está constituido por la suma del volumen del recipiente de referencia, el volumen del cilindro con la posición del émbolo en su máxima apertura y el volumen de los tubos de conexión correspondientes.

En el recorrido del vástago se han colocado cuatro topes, que fijan su posición y, por tanto, la del émbolo. De esta forma, se fija el volumen de la cámara de referencia (V_{Ti}) para cada uno de los cuatro topes.

A cada uno de estos cuatro topes le corresponde un valor de K_i , que se obtiene dividiendo el valor inicial de la cámara de referencia (V_{T0}) por el valor V_{Ti} correspondiente a cada punto.

5.5.4.1.3.2 Métodos

Para el cálculo de volúmenes se necesita conocer el valor de las relaciones K_i , correspondientes a los topes del émbolo del cilindro de la cámara de referencia. Esto no implica que se deban conocer los valores de los volúmenes inicial y final.

De la ecuación (148) se deduce:

$$(185) \quad K_i = \frac{V_{m0}}{V_{mi}} \times \frac{1}{K_{Ti}}$$

Siendo V_{m0} y V_{mi} el volumen inicial de la cámara de medida sin muestra dentro y el volumen de la misma cámara correspondiente al valor K_i respectivamente. De esta forma, una vez calibrados los puntos fijos y el volumen de la cámara de medida, la obtención de los valores V_{mi} y V_{m0} se pueden realizar experimentalmente. El valor de K_{Ti} se obtiene a partir de los datos de temperatura, medidos con las correspondientes sondas térmicas.

La ecuación (185) proporciona una vía para la obtención de los valores K_i a partir de los volúmenes de la cámara de medida, ya calibrada, sin necesidad de conocer los valores correspondientes a los volúmenes de la cámara de referencia.

La metodología seguida ha sido la siguiente:

1. Los vástagos de los cilindros de las cámaras de medida y de referencia se sitúan en su posición inicial: los cilindros M1 y R1 en su posición más alta, con el máximo volumen de cámara correspondiente; el cilindro M2 de la cámara de medida en la posición inferior: volumen mínimo.
2. Se establece una presión inicial. Se igualan las presiones de las dos cámaras, se sellan y se cierra la válvula de comunicación entre ambas. El volumen de la cámara de medida, V_{m0} , es conocido por los calibrados previos.
3. Se toman los valores de las temperaturas en ambas cámaras.
4. El vástago del cilindro R1 se pasa sucesivamente por los puntos fijos 0, 1, 2, 3 y 4. La relación entre el volumen inicial y final es K_0 , K_1 , K_2 , K_3 y K_4 , respectivamente.
5. Para cada punto fijo, se ajustan las posiciones de los émbolos de los dos cilindros de la cámara de medida hasta que la presión de la cámara de medida iguale a la presión de la cámara de referencia.

5.5 Desarrollo del picnómetro de doble cámara

6. Se toman los valores de las temperaturas en ambas cámaras.
7. El incremento de volumen de la cámara de medida se obtiene a partir del punto fijo en que se posiciona el vástago del cilindro M1, y del desplazamiento del “dial” de M2 sobre la escala graduada.
8. El valor del volumen V_{mi} se obtiene como diferencia entre el valor inicial, V_{m0} , y el incremento de volumen medido.
9. Una vez medidos todos los puntos fijos, se vuelve a la situación inicial y se vuelven a tomar las lecturas para evaluar el error de cierre.
10. El proceso se repite con dos presiones iniciales distintas: presión atmosférica ($\cong 1\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) y $4\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

5.5.4.2 Resultados y discusión

5.5.4.2.1 Calibrado de los puntos fijos de la cámara de medida

En la Tabla 77 se detallan los valores obtenidos para el calibrado del volumen correspondiente al desplazamiento del émbolo entre dos puntos fijos consecutivos del émbolo del cilindro M1 de la cámara de medida. El punto 0 corresponde a la situación del émbolo en el extremo inferior del cilindro, y el punto 11 a la situación en el punto superior.

Intervalo	Desplazamiento cilindro \varnothing 20 mm			Volumen equivalente	
	Media mm	Desv estándar	C.V.	Media cm^3	Desv estándar
0-1	374,33	0,5774	0,1542	117,600	0,181
1-2	375,67	0,5774	0,1537	118,019	0,181
2-3	369,67	1,1547	0,3124	116,134	0,363
3-4	371,33	2,0817	0,5606	116,658	0,654
4-5	371,17	0,7638	0,2058	116,605	0,240
5-6	377,17	0,7638	0,2025	118,490	0,240
6-7	373,83	0,7638	0,2043	117,443	0,240
7-8	347,67	1,1547	0,3321	109,223	0,363
8-9	376,67	0,5774	0,1533	118,333	0,181
9-10	170,00	1,7321	1,0189	53,407	0,544
10-11	242,00	0,0000	0,0000	76,027	0,000
Total	3749,50	3,5707	0,0952	1177,940	1,1218
Valor esperado	3750,00			1178,097	
Error	-0,50			-0,157	

Tabla 77 : Picnometría de gases: Calibrado de los puntos fijos de la cámara de medida del picnómetro de doble cámara.

La precisión de las medidas efectuadas parece, en principio, buena. El coeficiente de variación solo, supera en dos casos el 0,4%. El émbolo del cilindro M1, en el que se han puesto los topes, tiene una carrera total de 600 mm y un diámetro de 50 mm. El cilindro pequeño tiene un diámetro de 20 mm. La carrera equivalente, en este cilindro, a los 600 mm del cilindro anterior es de 3750 mm. La suma de los recorridos parciales es 3749,5 mm, y la diferencia es de 0,5 mm. Los volúmenes correspondientes a estos valores son $1177,940\text{ cm}^3$ y $1178,097\text{ cm}^3$, con una diferencia entre ambos de $0,157\text{ cm}^3$, que podemos considerar muy satisfactoria.

La desviación estándar calculada para la suma de volúmenes es de $1,1218 \text{ cm}^3$. Con este valor de la desviación estándar, hay una probabilidad de 90% de que el error sea $\leq 1,8452 \text{ cm}^3$. Para una probabilidad de 99% el error puede llegar hasta $\pm 2,8895 \text{ cm}^3$, que supone el 1,34% de los 215 cm^3 del volumen de la muestra de sustrato sometida a análisis.

Este error puede ser excesivamente alto para la obtención de mediciones precisas del reparto volumétrico de fases en el sustrato de cultivo. Por lo tanto, consideramos que, a pesar de la elevada precisión con la que se han efectuado las mediciones, ésta no es suficiente para obtener unos valores del reparto volumétrico de fases con una precisión elevada.

5.5.4.2.2 *Calibrado del volumen total de la cámara de medida*

El calibrado del volumen de la cámara de medida se ha tenido que repetir 3 veces para obtener un margen de error adecuado. La metodología seguida ha sido fundamentalmente la señalada en el apartado de material y métodos. La diferencia entre uno y otro calibrado ha estado en el patrón de volumen empleado para hacer el calibrado. Esto ha obligado a introducir pequeñas variaciones en la metodología original.

5.5.4.2.2.1 Primer calibrado

El primer ensayo se realizó empleando como patrón de volumen el patrón nº 1, mencionado en el apartado de material y métodos. Su volumen es de $198,92 \text{ cm}^3$. Los 5 valores obtenidos para el volumen de la cámara de medida presentaban una gran variabilidad, con diferencias entre medidas que superaban los 50 cm^3 . Este error es inadmisibles, por lo que la calibración no puede darse por válida.

El cálculo del volumen total de la cámara de medida se obtiene aplicando la ecuación (184). El denominador de esta ecuación se obtiene de la expresión $(1-c/b)$. Cuando el cociente c/b es próximo a 1, el denominador de la ecuación (184) es próximo a 0, y, por lo tanto, pequeños errores en la medida de b y/o c , pueden suponer diferencias importantes en el valor calculado para el volumen total de la cámara.

El aumento del volumen del patrón empleado tiene como consecuencia el aumento de la diferencia entre b y c y la disminución de la relación c/b . Esto disminuye la sensibilidad a los errores de medida y, por lo tanto, aumenta la precisión de los valores obtenidos para el volumen de la cámara de medida.

5.5.4.2.2.2 Segundo calibrado

La función del patrón de volumen es disminuir, en una cantidad conocida, el volumen total de la cámara de medida. Esta disminución se puede lograr introduciendo un objeto de volumen conocido en el recipiente de medida, o bien disminuyendo el volumen del cilindro de expansión. El calibrado previo de los puntos fijos del émbolo de la cámara de medida permite utilizar estos puntos como patrones de volumen conocido.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se lleva a cabo un segundo calibrado, en el que se emplea como patrón de volumen la diferencia entre los puntos fijos 11 y 3. Esto proporciona un valor de $826,187 \text{ cm}^3$. La metodología de laboratorio descrita en 5.5.4.1.2.2 se modifica ligeramente. Se siguen efectuando dos mediciones, pero ambas con el recipiente de medida vacío. En la primera medición, la posición de los cilindros es como se indica en el punto 2 de la metodología descrita en ese apartado, y el vástago del cilindro M1 de la cámara de medida se

encuentra en su posición superior, punto fijo nº 11. En la segunda medición, ese vástago se coloca en el punto fijo nº 3.

El valor de la relación c/b obtenido para las distintas mediciones oscila alrededor de 0,546, por lo que el cociente de la ecuación (184) es ligeramente inferior a 0,5. La variabilidad de los datos obtenidos para los valores de los volúmenes es menor que la del primer calibrado. La diferencia entre máximo y mínimo es inferior a 10 cm^3 , en lugar de los 50 cm^3 obtenidos en el primer ensayo. Sin embargo, esta variabilidad es todavía elevada, tanto para la diferencia entre máximo y mínimo, como para la desviación estándar.

Posición K de la cámara de referencia	c/b	Volumen de la cámara de medida, cm^3
0	0,5460	1819,946
1	0,5462	1820,877
2	0,5463	1821,217
3	0,5446	1814,353
4	0,5470	1823,805
Media		1820,040
Desviación estándar		3,486
Máximo – Mínimo		9,452

Tabla 78 : Picnometría de gases: Resultado del segundo ensayo de calibrado del volumen de la cámara de medida. Se emplea como patrón de volumen la diferencia entre los puntos fijos 3 y 11 del émbolo del cilindro M1 previamente calibrados.

5.5.4.2.2.3 Tercer calibrado

Con objeto de aumentar la precisión del valor obtenido, hacemos un tercer calibrado en el que se aumenta el valor del patrón de volumen y, en consecuencia, se disminuye el valor de c/b . En esta ocasión, el patrón de volumen es una combinación de las dos opciones empleadas en los ensayos anteriores. Se emplea el patrón de volumen nº 1, utilizado en el primer calibrado. A esto se suma la diferencia de volúmenes entre los puntos fijos 11 y 2 del cilindro grande de la cámara de medida. Esto proporciona un patrón de medida con un volumen total de $1141,241 \text{ cm}^3$.

La metodología de laboratorio es la misma que en el segundo ensayo. En la segunda medición se cambia el punto 3 por el punto 2 y se introduce el patrón de volumen en el recipiente de medida.

En la Tabla 79 se proporcionan los datos correspondientes a este segundo calibrado. El valor de la relación c/b ha bajado hasta alrededor de 0,3737. Únicamente el valor correspondiente a K_4 se aparta de este valor. La homogeneidad de los valores obtenidos para el volumen de la cámara de medida ha aumentado considerablemente con relación a los calibrados anteriores.

El valor obtenido para K_4 es claramente diferente de los demás, por lo que inicialmente no se ha considerado en el cálculo de los valores estadísticos. Excluido este valor, la diferencia entre máximo y mínimo es de $0,44 \text{ cm}^3$, y la desviación estándar de $0,197 \text{ cm}^3$. Si se incluye el

valor correspondiente a K_4 , la diferencia entre máximo y mínimo, y la desviación estándar aumentan respectivamente hasta 3,80 y 1,59 cm³, respectivamente.

Las diferencias observadas para K_4 , tanto para c/b como para el volumen de la cámara, indican la posibilidad de que el valor obtenido sea erróneo, probablemente debido a un error de lectura sobre la escala milimétrica.

Aceptando esta hipótesis como cierta, el valor medio obtenido para el volumen de la cámara de medida es de 1822,454 cm³ y la desviación estándar de 0,197 cm³. Con este valor de la desviación estándar hay una probabilidad del 90% de que el error sea $\leq 0,324$ cm³. Para una probabilidad del 99% el error es $\leq 0,5067$ cm³, lo que supone el 0,24% de los 215 cm³ del volumen de la muestra de sustrato sometida a análisis.

Consideramos que este error es asumible para el cálculo del reparto volumétrico de fases.

Posición K de la cámara de referencia	c/b	Volumen de la cámara de medida cm ³
0	0,3737	1822,337
1	0,3736	1822,283
2	0,3738	1822,724
3	0,3737	1822,471
4	0,3725	1818,927
Media		1822,454
Desviación estándar		0,197
Máximo – Mínimo		0,441
*Media		1821,749
*Desviación estándar		1,587
*Máximo – Mínimo		3,797

Tabla 79 : Picnometría de gases: Resultado del tercer ensayo de calibrado del volumen de la cámara de medida. El volumen obtenido para K_4 se aparta de la media, por lo que inicialmente no se ha considerado. Los estadísticos marcados con * incluyen el valor de K_4 .

5.5.4.2.3 Calibrado de los valores K_i de la cámara de referencia

En la Tabla 80 se presenta el resultado del calibrado de los valores de K_i correspondientes a los puntos fijos de la cámara de referencia. Se presentan los valores obtenidos para cada una de las dos presiones de trabajo, el valor medio de ambas y la desviación estándar.

El valor K_{10} corresponde al regreso a la situación de partida, una vez que se han recorrido todos los puntos. Su valor debería ser 1. La diferencia con éste evalúa la magnitud global del método de calibrado empleado.

El valor correspondiente a K_{10} es 0,99708, la diferencia de 1 es 0,00292. Es decir, que el error global del método de calibrado es menor de 0,003 (3 por mil); La desviación estándar de las estimaciones de los valores de K_i son menores que este valor, en el caso más desfavorable es de

5.5 Desarrollo del picnómetro de doble cámara

$1.59 \cdot 10^{-3}$. Con este valor de la desviación estándar, la probabilidad de que el error sea $\leq 0,003$ es del 95%. Podemos considerar, pues, que el error de estimación de los valores de K_i es $\leq 0,003$.

Presión inicial	1 kg*cm ⁻²	4 kg*cm ⁻²	Media	Desviación estándar
K ₀	2,82833	2,82833	2,82833	0,000E+00
K ₁	2,56055	2,56111	2,56083	3,992E-04
K ₂	2,06146	2,06219	2,06183	5,182E-04
K ₃	1,54693	1,54528	1,54610	1,166E-03
K ₄	1,27634	1,27410	1,27522	1,586E-03
K ₁₀	0,99701	0,99708	0,99704	4,968E-05

Tabla 80: Picnometría de gases: Calibrado de los valores de K_i correspondientes a los puntos fijos de la cámara de referencia.

5.5.5 Incidencia de la temperatura y de la adsorción de gases

En el apartado 3.5.3 se han visto las características de la medición de volúmenes por picnometría de gases. Entre los inconvenientes, se han mencionado la incidencia de los cambios de temperatura (3.5.3.2) y el fenómeno de adsorción de gases (3.5.3.3).

En este apartado se evalúa la incidencia de ambos factores a partir de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio.

5.5.5.1 Materiales y métodos

5.5.5.1.1 Incidencia de los cambios de temperatura

El valor del K_T se ha definido en la ecuación (147). Para evaluar la incidencia de las temperaturas en condiciones normales de laboratorio, se calcula el valor de este factor de corrección con una serie de medidas de temperatura tomadas durante el calibrado del picnómetro.

5.5.5.1.2 Adsorción de gases

5.5.5.1.2.1 Materiales

El sustrato empleado es corteza de pino con un tamaño de partícula ≤ 3 mm. Para su obtención se ha partido de un lote de corteza de pino compostada y se ha pasado por un tamiz de 3 mm de luz de malla. Se han empleado 6 muestras de sustrato para cada tensión de humedad.

5.5.5.1.2.2 Tensiones de saturación

La tensión de humedad de la muestra se considera como factor de variación. Los valores de tensión, referidos a la base de la muestra, son: 0, 10, 50, y 100 cm de columna de agua.

5.5.5.1.2.3 Metodología de laboratorio

1. Las muestras se han preparado en los contenedores portamuestra formados por un doble anillo metálico de 30 + 40 mm, como el descrito en 5.2.3.3.2.2.2. Los cierres son de malla de nilón de 75 μm de luz, sujetas con juntas tóricas de silicona.
2. La saturación de las muestras se ha hecho en campana de vacío, aplicando un nivel de vacío entre -65 y -67 cm Hg.
3. Una vez saturadas, las muestras se someten a succión en lecho de arena durante 24 horas.
4. Una vez tensionadas, se retira el anillo superior de 30 mm, se elimina el sustrato sobrante, se cierra la cara superior con la correspondiente malla de nilón y se pesa.
5. La muestra tensionada se introduce en el recipiente de medida del picnómetro, y se mide el volumen.
6. Se mide el volumen, empleando aire como gas picnométrico, para las cuatro relaciones de volumen K_i de la cámara de referencia.
7. Una vez finalizadas las mediciones con aire, se sustituye el aire por helio y se repiten las medidas, empleando ahora helio como gas picnométrico.
8. Finalizadas las mediciones en el picnómetro, las muestras se vuelven a saturar por vacío y se miden y se toman los pesos dentro del agua, para el cálculo de volúmenes por desplazamiento de fluidos.
9. A continuación las muestras se secan en estufa a 105 °C durante 24 horas.
10. Se enfrían en desecador y se determina el peso seco.
11. Con las muestras secas se repite el proceso de medida de volúmenes con el picnómetro, repitiendo los pasos 5 a 7, y reemplazando la muestra tensionada por la muestra seca.

5.5.5.1.2.4 Cálculo del volumen de aire adsorbido

Aplicando la ecuación (150), se obtienen los volúmenes de aire y de helio en la cámara de medida, para cada muestra y para cada valor de K_i .

El volumen de aire adsorbido por una muestra -a una relación K_i determinada- es igual a la diferencia entre el volumen medido de aire y el volumen medido de helio para esa misma muestra.

Para poder comparar los valores de adsorción obtenidos, el volumen de aire adsorbido se ha referido al peso seco del sustrato, tanto en el caso de las mediciones sobre sustrato seco como de sustrato tensionado. La unidad empleada es de cm^3 de aire adsorbido por 100 g de sustrato seco.

5.5.5.1.2.5 Tratamiento de datos

Se ha realizado un análisis de varianza de los valores obtenidos para el volumen de aire adsorbido, considerando tres factores de variación:

- Tensión: Que se refiere a la tensión de humedad a la que se ha sometido la muestra de sustrato.
- Factor K : Referido al factor K_i de la cámara de referencia empleada en la medición.
- Humedad: Se refiera al estado de humedad de la muestra en el que se realiza la medición: húmedo con la muestra tensionada, y seco cuando la medición se efectúa sobre la misma muestra secada en estufa.

5.5.5.2 Resultados y discusión

5.5.5.2.1 Incidencia del factor K_T por cambios de temperatura

En la Tabla 81 se detallan los valores de temperatura obtenidos durante una medición de volumen. Los valores corresponden a un calibrado en el que se ha empleado un patrón de volumen. Se han tomado los valores de temperatura para todos los valores de K_i , por lo que las variaciones de temperatura observadas pueden considerarse representativas de las condiciones del laboratorio.

Los valores de T_{r0} y T_{m0} , son comunes para los cinco valores de K_{Ti} . Las variaciones máximas de temperatura son de 0,1 o 0,2 °C. En algunos casos, estas variaciones se compensan, y tienen como resultado el valor 1 para K_{Ti} . La mayor incidencia observada se debe a una variación de 0,2 °C. Esto tiene como consecuencia un valor de K_{Ti} de 1,0098, es decir una desviación de casi el 1%.

Por otra parte, la toma de datos de temperatura no presenta grandes problema, y su aplicación al cálculo tampoco, siempre que se cuente con medios informáticos. Por lo tanto, y considerando la incidencia del error y el escaso coste que supone la corrección de temperatura, lo más adecuado es incluir esta corrección en el cálculo de volúmenes.

	Sin patrón					Con patrón				
	K0	K1	K2	K3	K4	K0	K1	K2	K3	K4
T_{r0}	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4
T_{m0}	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
T_{ri}	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.6	20.4	20.4	20.4	20.4
T_{mi}	20.2	20.3	20.2	20.3	20.3	20.6	20.6	20.5	20.5	20.5
K_{Ti}	1.004950	1.000000	1.004950	1.000000	1.000000	1.009804	1.000000	1.004878	1.004878	1.004878

Tabla 81: Picnometría de gases: Cálculo del valor de K_{Ti} para mediciones efectuadas en laboratorio. Influencia de las variaciones de temperatura en la medida por picnometría

5.5.5.2.2 Adsorción de gases

En la Tabla 82 se presenta el resultado del análisis de varianza. La variable independiente es el volumen de aire adsorbido por la muestra, expresado en $\text{cm}^3 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ sustrato seco. El valor de R^2 es ligeramente inferior a 0,5. Esto indica un escaso control de la variabilidad del ensayo. Algo más del 50% de la variabilidad corresponde a las diferencias entre repeticiones de un mismo tratamiento. Es probable que en el ensayo no se haya controlado algún factor que tiene una gran incidencia en el resultado obtenido. Este hecho limita fuertemente la posibilidad de obtener conclusiones.

Considerando los factores controlados en el ensayo, las fuentes de variación que mayor incidencia tienen son el factor tensión y el factor humedad. Entre ambos suponen aproximadamente el 90% de la variabilidad explicada por el modelo. El resto corresponde, en gran medida, a la interacción entre estos dos factores, quedando una pequeña parte residual de la suma de cuadrados a repartir entre el factor K , sus interacciones dobles con los otros dos factores y la interacción triple.

5.5 Desarrollo del picnómetro de doble cámara

Ante la escasa incidencia que tiene como fuente de variación y la no significación del factor K y los efectos interacción en los que interviene, se ha hecho un análisis de varianza en el que se consideran como fuentes de variación los factores tensión, humedad y la interacción entre ambos.

En la Tabla 83 se presenta el resultado de este nuevo análisis de varianza. Los grados de libertad y las sumas de cuadrados de los factores no considerados pasan a engrosar los grados de libertad y la suma de cuadrados del error. Como consecuencia, disminuyen estos parámetros en el modelo, aumentan en el error y permanecen constantes para las fuentes de variación de dicho modelo. Esto tiene como consecuencia la disminución del valor de la R^2 del modelo, y la variación de los cuadrados medios del modelo y del error. Este último disminuye, y en consecuencia, aumentan ligeramente los niveles de significación y disminuyen los valores de las mínimas diferencias significativas. En cualquier caso, la incidencia de este cambio es escasa, y, por su magnitud, se puede considerar intrascendente. La discusión de los resultados de la Tabla 82 es de plena aplicación en este caso.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Modelo	31	5665,93	182,77	4,25	0,0001	
Tensión	3	2284,66	761,55	17,72	0,0001	2,869
Factor K	3	16,99	5,66	0,13	0,9410	2,829
Humedad	1	2839,14	2839,14	66,06	0,0001	2,000
Ten * K	9	137,46	15,27	0,36	0,9539	
Ten * Hum	3	447,63	149,21	3,47	0,0180	
K * Hum	3	6,83	2,28	0,05	0,9839	
Ten*K*Hum	9	51,83	5,76	0,13	0,9987	
Error	136	5844,66	42,98			
Total	167	11510,59				

$R^2= 0,4922$ C.V.=101,59

Tabla 82 : Picnometría de gases: Análisis de varianza -con tres factores- de los valores obtenidos para el volumen de aire adsorbido por la muestra referido a 100 g de peso seco.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Modelo	7	5447,94	778,28	20,54	0,0001	
Tensión	3	2284,66	761,55	20,10	0,0001	2,690
Humedad	1	2839,14	2839,14	74,93	0,0001	1,876
Ten * Hum	3	447,63	149,21	3,94	0,0096	
Error	160	6062,64	37,89			
Total	167	11510,59				

$R^2= 0,4733$ C.V.=95,39

Tabla 83 : Picnometría de gases: Análisis de varianza -con dos factores- de los valores obtenidos para el volumen de aire adsorbido por la muestra referido a 100 g de peso seco.

La significación del factor tensión indica que la adsorción de aire por parte del sustrato es función de la tensión de humedad a la que se ha sometido el mismo. La significación del factor humedad indica que la absorción de aire es distinta para el sustrato seco y para el sustrato húmedo. Por último, la significación del efecto interacción obliga al estudio de los resultados de todas las combinaciones tensión por humedad.

En la Tabla 84 se presentan los resultados correspondientes al volumen de aire adsorbido por la muestra de sustrato cuando está tensionada y seca. El comportamiento de las muestras sometidas a 10 cm de tensión de columna de agua es anómalo. En el caso de la muestra seca, el volumen de aire adsorbido es claramente inferior al del resto de las tensiones. En el caso de la muestra tensionada, se obtiene un valor negativo. De ser esto cierto, indicaría que se ha producido una adsorción de helio. Lo más probable es que se haya cometido algún error en el trabajo del laboratorio. Este comportamiento anómalo puede ser la causa de la significación del efecto interacción detectado en el análisis de la varianza.

Respecto a las diferencias entre los volúmenes adsorbidos por las muestras tensionadas y por las mismas muestras secas, el comportamiento es, en todos los casos, similar. El volumen de aire adsorbido por la muestra seca es superior al volumen adsorbido por la muestra tensionada. La diferencia entre ambos valores es significativa, tanto cuando se consideran todos los datos conjuntamente (ver Tabla 83) como cuando, como consecuencia del efecto interacción, se hace el análisis para cada una de las tensiones estudiadas.

Tensión (cm de c.a.)	0	10	50	100	Media
Seco	14,087	3,017	11,167	13,585	10,473
Tensionado	1,592	-3,21	7,038	3,089	2,432
Seco-Tensionado	12,495	6,227	4,129	10,496	8,041

Tabla 84: Picnometría de gases: Volumen de aire adsorbido por la muestra de sustrato, expresado en cm^3 por 100 g de peso seco de la muestra. Volumen adsorbido por la muestra tensionada y seca. Diferencia de adsorción entre ambos casos.

La adsorción de gases se produce en la superficie de los sólidos. Esto puede explicar la diferencia observada entre el sustrato seco y el sustrato húmedo. El elevado volumen de poros del sustrato proporciona una elevada superficie específica. Cuando el sustrato está seco, la adsorción de aire se produce en toda la superficie de los poros. Cuando el sustrato está húmedo, parte de los poros están ocupados por agua, y la superficie de estos poros no está en contacto directo con el aire, por lo que la adsorción se ve dificultada.

Si aceptamos como válida esta hipótesis, se deduce que el volumen de gas adsorbido es tanto menor cuanto mayor sea el contenido de humedad del sustrato, y, por lo tanto, cuanto más próxima a cero sea la tensión de humedad. Los datos observados para las diferentes tensiones de humedad no permiten confirmar este comportamiento. En este ensayo no se ha conseguido un buen control de los factores que inciden, como se ha puesto de manifiesto en el análisis de varianza (ver Tabla 82). Es posible que esto haya incidido negativamente en la fiabilidad de los datos obtenidos para las distintas tensiones y, por lo tanto, en la posibilidad de confirmar esta hipótesis.

5.5.6 *Recapitulación*

1. Medida independiente del volumen ocupado por aire en muestras de sustrato tensionado
 - 1.1. La picnometría de gases proporciona un método alternativo para obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire en una muestra de sustrato tensionada. Su aplicación permite obtener una evaluación de la exactitud del reparto volumétrico de fases, obtenido para la muestra tensionada.
 - 1.2. Para el objetivo planteado, el picnómetro de gas de doble cámara presenta dos ventajas importantes sobre los otros diseños: la escasa incidencia de la temperatura y la elevada precisión que se consigue en el ajuste de las presiones, y, por lo tanto, en las mediciones obtenidas.
2. Calibrado del picnómetro
 - 2.1. El calibrado previo de la cámara de medida, necesario para efectuar las mediciones, mejora considerablemente con el aumento del volumen de los patrones de referencia empleados.
 - 2.2. El calibrado de los puntos fijos de la cámara de medida, y de la cámara de referencia, se puede obtener con una elevada fiabilidad.
3. Adsorción de gases
 - 3.1. El análisis estadístico del volumen de gas adsorbido por la muestra de sustrato indica la existencia de algún factor no controlado, con una incidencia importante en esta variable.
 - 3.2. De los factores considerados en el modelo, el estado de humedad del sustrato, seco o húmedo, es el factor que más incide en la variabilidad de los resultados obtenidos.
 - 3.3. La relación de compresión K_i no incide en la cantidad de gas adsorbido por la muestra.

El escaso control de la variabilidad ($R^2=0,47$) indica que estas conclusiones se deben tomar con precaución. Es necesario realizar nuevos ensayos para confirmar estas conclusiones.

6 MODELO DE POROSIDAD LOGARÍTMICO NORMAL

6.1 Descripción y desarrollo del modelo

6.1.1 Definición del modelo

La curva de retención de agua de un sustrato de cultivo, describe las relaciones aire-agua en el medio poroso. Esta curva de retención de agua es consecuencia de la distribución de los tamaños de los poros que constituyen el medio.

Para explicar el comportamiento hídrico del sustrato planteamos como hipótesis de partida que el tamaño de poro sigue una distribución logarítmico normal.

La ley de capilaridad de Jurin relaciona el tamaño de poro con el reparto del espacio poroso entre aire y agua.

6.1.2 Hipótesis del modelo

6.1.2.1 Modelo logarítmico normal de distribución del tamaño de poro

La hipótesis básica del modelo planteado es que, en el medio poroso, el logaritmo del diámetro del poro sigue una distribución normal.

En Estadística, el objetivo de la transformación de variables es la obtención de distribuciones normales. La transformación a emplear depende de las características de las variables de origen. Las más usuales son la transformación de raíz cuadrada ($x_1 = \sqrt{x}$), la transformación arcsen ($x_1 = \arcsen \sqrt{x}$) y la transformación logarítmica ($x_1 = \log(x)$).

La transformación logarítmica es de uso habitual con variables que se refieren a tamaños. En Biología se emplea para estudiar el tamaño de colonias de seres vivos. En edafología se considera que el diámetro de las partículas de suelo sigue una distribución logarítmico normal. Consecuencia de esta distribución es el empleo de diagramas semilogarítmicos para representar las proporciones de las distintas fracciones del suelo (Hillel, 1980b; Orozco, 1995). Shirazi y Boersma (1984) aplican la distribución logarítmico normal del tamaño de partícula de suelos en el estudio de las propiedades físicas. Posteriormente, Orozco (1995) aplicó el mismo modelo para el estudio de sus propiedades físicas de la perlita empleada como sustrato de cultivo.

El tamaño de los poros interparticulares está condicionado por el tamaño de las partículas del sustratos (Burés, 1997). Dada esta relación entre el tamaño de partícula y el tamaño de poro, es probable que la distribución del tamaño de poro sea similar a la distribución del tamaño de partícula.

La hipótesis de la distribución logarítmico normal del tamaño de poro es, por lo tanto, consecuencia de la distribución logarítmico normal del tamaño de partícula, ampliamente aceptada en el caso de los suelos agrícolas y asumida para los sustratos.

6.1.2.2 Capilaridad: Ley de Jurin

La relación entre la distribución del tamaño de poro y el reparto del espacio poroso entre aire y agua se puede explicar aplicando el modelo capilar enunciado en la ley de Jurin, que dice: la altura alcanzada por los líquidos en los tubos capilares es directamente proporcional a la tensión superficial del líquido, e inversamente proporcional a su densidad, al valor de la gravedad en el lugar en que se hace la determinación y al radio del tubo.

El valor de la presión diferencial en un menisco aire – líquido en un tubo capilar viene dado por la expresión (Danielson y Sutherland, 1986):

$$(186) \quad P_{at} - P_{liq} = \Delta P = \frac{2\sigma}{r_c} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_p}$$

Donde:

- P_{at} es la presión en la cara de la interfase en contacto con la atmósfera (Pascales)
- P_{liq} es la presión en la cara de la interfase en contacto con el líquido (Pascales)
- ΔP es la diferencia de presión en la interfase (Pascales)
- σ es la tensión superficial del líquido ($= 74 \cdot 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$ para el agua)
- r_c es el radio de curvatura del menisco (m)
- r_p es el radio del capilar (m)
- θ es el ángulo de contacto agua – sólido (grados)

La diferencia de presión entre las dos caras de la interfase se compensa con una variación del nivel del líquido dentro del tubo capilar. La diferencia de presión debida a la variación de altura del líquido dentro del capilar viene dada por la expresión:

$$(187) \quad P_{at} - P_{liq} = \Delta P = \rho g h$$

Siendo:

- ρ la densidad del líquido ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- g la aceleración de la gravedad ($\cong 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
- h la diferencia de altura provocada por el tubo capilar (m)

Cuando se alcanza el equilibrio, los valores de ΔP de las ecuaciones (186) y (187) son iguales. Igualando los términos a la derecha del signo igual de las ecuaciones (186) y (187) se obtiene:

$$(188) \quad \rho g h = \frac{2\sigma \cos\theta}{D/2} \Rightarrow D = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g h}$$

Esta expresión es equivalente a la ecuación (121) obtenida en 3.2.2.4.3. Corresponde a la formulación de la ley de Jurin, y relaciona el diámetro del capilar con la tensión superficial, el ángulo de contacto del líquido con la superficie sólida, la densidad, la gravedad y la altura que alcanza el líquido dentro del capilar.

En la ecuación (188) se observa que el signo de h es el mismo que el de $\cos\theta$. Si el ángulo de contacto es $\theta < 90^\circ$, $\cos\theta > 0$, $h > 0$ y el líquido asciende dentro del capilar por encima de la superficie libre del líquido. Si, por el contrario, el ángulo de contacto es $\theta > 90^\circ$, $\cos\theta < 0$, $h < 0$

y el líquido desciende dentro del capilar por debajo de la superficie libre del líquido. En el primer caso se dice que el líquido moja la superficie sólida y en el segundo, se dice que no moja.

Cuando el líquido es el agua, el ángulo θ de contacto con la superficie sólida es $\theta < 90^\circ$ para los materiales que constituyen el suelo y para los empleados como sustrato de cultivo. Por lo tanto, el valor de h es mayor que cero y se produce el ascenso capilar. La tensión superficial del agua (σ), la densidad (ρ) y la aceleración de la gravedad (g) se pueden considerar constantes. En el caso de que el ángulo de contacto agua – sólido sea $\theta=0$, el valor $\cos \theta=1$. Transformando las unidades para expresar el diámetro (D) y la altura (h) en milímetros, la expresión (188) queda de la forma (Adams y Gibbs, 1994):

$$(189) \quad D(mm) = \frac{30}{h(mm)}$$

Que relaciona el diámetro del tubo capilar con la altura que alcanza el agua en su interior.

6.1.3 *Curva de retención de agua: Relación con la distribución del tamaño de poro*

La curva de retención de agua es consecuencia de la distribución del tamaño de poro. Las hipótesis planteadas para el modelo proporcionan las bases para dar forma matemática a la curva de retención de agua. El modelo capilar relaciona el potencial matricial con el reparto del volumen de poros entre aire y agua. El modelo de distribución de tamaño de poro determina la forma de la curva de retención de agua.

6.1.3.1 Relación entre capilaridad y potencial matricial

El modelo capilar se aplica habitualmente en suelos para relacionar el potencial matricial con el tamaño de poro ocupado por agua (Danielson y Sutherland, 1986; Adams y Gibbs, 1994; Muñoz-Carpena y Ramos, 1997). En este modelo, el espacio poroso del suelo se considera que está constituido por tubos capilares de distinto diámetro; el agua contenida en estos capilares constituye la reserva de agua del suelo.

Si bien es cierto que los poros del suelo distan mucho de ser cilíndricos, la sección del poro se puede asimilar a una sección circular equivalente a efectos hídricos. La variación de la sección equivalente a lo largo del poro se asimilar a un tubo capilar de sección variable y es la causa del fenómeno de histéresis que se da en la curva de retención de agua de suelos y sustratos de cultivo (Muñoz-Carpena y Ramos, 1997).

El modelo capilar aplicado al medio poroso implica que los poros se llenan de agua según su diámetro como consecuencia del efecto capilar. El agua queda retenida en los poros por el mismo efecto capilar, como se ha visto en el apartado 6.1.2.2. Para extraer este agua y poder disponer de ella, es necesario hacer un aporte energético que contrarreste las fuerzas que la mantienen retenida en el poro. El modelo capilar determina la cantidad de energía necesaria para extraer el agua contenida en los poros del suelo. Si esta energía la referimos a la unidad de volumen, se corresponde con el potencial hídrico como se ha visto en 3.2.2.2.

En 3.2.2.3.1 se ha definido el potencial matricial como el debido a la atracción del agua por la superficie sólida y a la atracción mutua de las moléculas de agua; corresponde a las fuerzas no equilibradas en la interfase aire-agua, que dan origen a la tensión superficial (Baber *et al.*, 1991b). Hay un paralelismo completo entre esta definición y los conceptos considerados en el

modelo capilar. El potencial matricial se corresponde con el diferencial de presión calculado por el modelo capilar.

6.1.3.2 Relación entre curva de retención de agua y distribución del tamaño de poro

La evolución del reparto de aire y agua en función del potencial matricial o tensión de humedad está determinado por la distribución del tamaño de poro. Para un determinado valor del potencial matricial, el volumen de poros ocupado por agua es igual al volumen de poros cuyo diámetro es menor que el valor de diámetro correspondiente obtenido de la ecuación (189). El volumen de aire es igual al volumen de poros cuyo diámetro es mayor o igual que el mencionado anteriormente.

La energía necesaria para extraer el agua contenida en un poro es inversamente proporcional a su diámetro, como se desprende de la ecuación (189). Dada la equivalencia entre capilaridad y potencial matricial, la ecuación (189) la podemos transformar para expresarla en otras unidades más útiles desde el punto de vista energético. Si el diámetro lo pasamos de mm a micras (μm) y pasamos de mm de columna de agua a kPa (kilopascales), la ecuación (189) se transforma en:

$$(190) \quad D(\mu\text{m}) = \frac{300}{\varphi(\text{kPa})}$$

Como ya se ha visto en 3.2.2.2 las unidades de potencial corresponden a trabajo (o energía) por unidad de volumen. Esto equivale dimensionalmente a una presión, por lo que se utilizan las unidades de ésta. El pascal (Pa) es la unidad de medida de presión en el sistema internacional (SI) y corresponde a la presión ejercida por una fuerza de 1 newton (N) en una superficie de 1 m^2 . Cuando se trata de potenciales hídricos, 1 pascal se refiere a la aplicación de un trabajo de 1 julio (J) en un volumen de 1 m^3 .

Supongamos que disponemos de un medio poroso formado por poros de distinto diámetro. Hemos saturado completamente el medio, con lo que todos los poros están totalmente llenos de agua. Para extraer el agua de los poros debemos aplicar una determinada cantidad de energía, que normalmente haremos por succión. La ecuación (190) nos proporciona el valor del diámetro de poro del que podemos extraer agua en función de la energía aplicada.

Si aplicamos una energía de 1 kJ por cada m^3 de agua extraída, equivalente a 1 kPa, podremos extraer el agua de los poros de 300 μm . Aplicando la ecuación (190) vemos que esta energía es mayor que la necesaria para extraer el agua contenida en los poros mayores de 300 μm , por lo que también la extraeremos. Aplicando la misma ecuación (190) vemos que para extraer el agua contenida en los poros de diámetro menor de 300 μm , es necesario aplicar una cantidad de energía mayor de 1 kJ por cada m^3 de agua extraída, por lo que estos poros seguirán llenos de agua. Aplicando el mismo razonamiento vemos que si la energía aplicada es de 2 $\text{kJ} \cdot \text{m}^3$ (2 kPa), se vacían los poros cuyo diámetro sea $\geq 150 \mu\text{m}$ y permanecen llenos de agua los poros cuyo diámetro es menor que estas 150 μm .

En definitiva, la ecuación (190) proporciona un valor crítico de diámetro de poro para cada potencial matricial. La energía necesaria para extraer el agua de los poros cuyo diámetro es mayor que este valor crítico, es menor que la correspondiente a este potencial matricial. Por lo tanto, se encuentran sin agua. La energía correspondiente a este potencial matricial es menor que

la necesaria para extraer el agua de los poros cuyo diámetro es menor que este valor crítico, por lo que éstos se encuentran llenos de agua.

De esto se deduce que, para un valor determinado de potencial matricial, el volumen de agua es igual al volumen de poros cuyo diámetro es menor al valor crítico correspondiente. El volumen de aire corresponde al volumen de poros cuyo diámetro es mayor o igual que este valor crítico.

6.1.3.3 Gradiente decreciente del contenido de humedad

El modelo capilar tiene como consecuencia que el gradiente del volumen de agua con respecto al potencial matricial es siempre negativo o cero, cualquiera que sea la distribución del tamaño de poro.

Aplicando la ecuación (189) o su equivalente (190) se deduce que un aumento del diferencial de presión ($\Delta P_1 > \Delta P_0$) tiene como consecuencia una disminución del valor crítico del diámetro de poro ($D_1 < D_0$). El volumen de poros llenos de agua (A_0) en el primer caso viene dado por la expresión:

$$(191) \quad A_0 = V(D < D_0)$$

Que representa el volumen de poros cuyo diámetro D es menor que el valor crítico D_0 dado por la expresión (190).

De la misma forma, el valor de poros llenos de agua (A_1) del segundo caso viene dado por la expresión:

$$(192) \quad A_1 = V(D < D_1)$$

Teniendo en cuenta que $D_1 < D_0$ el volumen de agua A_0 se puede descomponer en dos sumandos: el primero, correspondiente al volumen de poros cuyo diámetro es menor que D_1 y el segundo, correspondiente al volumen de poros cuyo diámetro está comprendido entre D_1 y D_0

$$(193) \quad A_0 = V(D < D_0) = V(D < D_1) + V(D_1 < D < D_0)$$

Restando las ecuaciones (193) - (192) se obtiene:

$$(194) \quad A_0 - A_1 = V(D < D_1) + V(D_1 < D < D_0) - V(D < D_1) = V(D_1 < D < D_0) > 0$$

La diferencia de volúmenes $A_0 - A_1$ corresponde al volumen de poros cuyo diámetro D cumple la condición $D_1 < D < D_0$. Este valor es siempre positivo puesto que $D_1 < D_0$.

El incremento del diferencial de presión (equivalente a potencial hídrico) causante de este incremento de volumen viene dado por la expresión:

$$(195) \quad \Delta P_1 > \Delta P_0 \Rightarrow \Delta P_1 - \Delta P_0 > 0 \Rightarrow \Delta P_0 - \Delta P_1 < 0$$

El signo del incremento de volumen es positivo (194), mientras que el signo del incremento del diferencial de presión es negativo (195). El cociente entre ambos es, por tanto,

negativo. Es decir, el gradiente del contenido de humedad con respecto al diferencial de presión es siempre decreciente.

6.1.4 Desarrollo matemático del modelo

6.1.4.1 Distribución del tamaño de poro. Cambio de variable a tensión de humedad

La primera hipótesis planteada define una distribución normal para el logaritmo del diámetro de poro:

$$(196) \quad f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Siendo:

- x = Logaritmo del diámetro de poro
- μ = Media del logaritmo del diámetro de poro
- σ = Desviación estándar del logaritmo del diámetro de poro

El volumen ocupado por agua corresponde al volumen de poros cuyo diámetro es menor o igual que el valor crítico del diámetro de poro correspondiente al potencial matricial considerado (6.1.3.2). Sea D_1 el valor del diámetro y $x_1 = \log D_1$ el valor correspondiente en la escala logarítmica en la que se define la distribución normal:

$$(197) \quad P(x \leq x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx : \text{Poros ocupados por agua}$$

El volumen ocupado por aire corresponde al volumen de poros cuyo diámetro es mayor o igual al valor crítico del diámetro de poro correspondiente al potencial matricial considerado (6.1.3.2):

$$(198) \quad P(x_1 \leq x) = \int_{x_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx : \text{Poros ocupados por aire}$$

Para pasar a escala de tensiones (equivalente a potencial matricial), hay que hacer el cambio de variable sustituyendo x por su valor expresado en función de la tensión de humedad. Teniendo en cuenta que $x = \log D$ y la ecuación (189), la relación entre la variable x y la tensión de humedad viene dada por la expresión:

$$(199) \quad x = \log \frac{30}{h}$$

La expresión (197), expresada en escala de tensiones, corresponde a la proporción del volumen de poros ocupados por agua a la tensión h ($P(h)$). Sustituyendo en (197) el valor de (199), se obtiene la expresión:

$$(200) \quad P(h) = \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Que calcula la proporción de volumen de poros ocupado por agua a la tensión h , expresada en mm de columna de agua.

En esta ecuación se presentan dos casos particulares, cuando los valores de tensión son cero e infinito. El límite superior de integración se obtiene sustituyendo h por su respectivo valor. Para $h=0$, el límite superior queda $\log \frac{30}{0} = \log \infty = \infty$. La integral entre $-\infty$ y $+\infty$ de la función normal es igual a 1. Para $h=\infty$, el límite superior queda $\log \frac{30}{\infty} = \log 0 = -\infty$. Cuando el límite superior es igual al límite inferior, el valor de la integral es igual a cero. Por lo tanto:

$$(201) \quad P(h=0) = 1$$

$$(202) \quad P(h=\infty) = 0$$

Cuando la tensión es cero, la proporción de poros ocupados por agua es 1, es decir todos los poros están ocupado por agua. Cuando la tensión es ∞ , se ha extraído el agua de todos los poros y el contenido de agua es cero.

6.1.4.2 Parámetros de modulación de la curva de retención de agua: Escalado y desplazamiento

La ecuación (200) se refiere a la proporción de los poros que están ocupados por agua. El valor $P(h)=1$ de la ecuación (201) indica que todos los poros están ocupados por agua. Sin embargo, en el estudio de las relaciones hídricas del medio poroso, el volumen de referencia no es el volumen de poros sino el volumen total del medio poroso. Este volumen total incluye el volumen de poros más el volumen ocupado por la matriz sólida.

El volumen ocupado por los poros representa una determinada proporción del volumen total. Por lo tanto, para calcular el volumen de agua referido al volumen total de sustrato, el valor obtenido por la expresión (200) se debe multiplicar por un factor menor que 1, que corresponde a la proporción del volumen ocupado por los poros respecto al volumen total del sustrato. Este factor tiene el efecto de un cambio de escala, por lo que lo denominamos escalado y lo representamos por la letra E .

Los valores experimentales del contenido hídrico del sustrato, expresados en función de la tensión de humedad, se estabilizan, en general, en un valor superior a cero. Este comportamiento ya se contempla en el modelo de Van Genuchten (1980), que lo recoge en el concepto de humedad residual. El efecto resultante es que el volumen de agua del sustrato tiene dos componentes: una componente fija constituida por esta humedad residual y una componente variable, que es función de la tensión de humedad.

Asumimos como hipótesis que la componente variable del contenido de humedad en función de la tensión es consecuencia de la distribución logarítmico normal del tamaño de poro. El intervalo de variación de esta componente variable corresponde a la fracción del volumen total explicado por el modelo logarítmico normal, y por lo tanto coincide con el escalado (E).

La componente fija del contenido de humedad produce un desplazamiento de la curva de retención de agua en el eje de ordenadas, por lo que la denominamos desplazamiento y la representamos con la letra D.

El valor del desplazamiento es constante en el intervalo de tensiones de humedad en el que se han realizado las mediciones. En el apartado 1.2.3.5.2 se ha visto que los modelos no se deben aplicar en intervalos de variación en los que no han sido testados. El desplazamiento es un valor que permanece constante en el intervalo de tensiones en el que se han efectuado las mediciones. Si se aplica a tensiones mayores, se llega al absurdo de que para una tensión de humedad infinita el sustrato sigue teniendo un cierto volumen ocupado por agua. Aplicado al modelo capilar, esto indica que hay un determinado volumen del sustrato ocupado por poros de diámetro cero. Si el diámetro es cero, lógicamente no ocupa volumen.

Manteniendo la hipótesis del modelo logarítmico normal y la del modelo capilar, el desplazamiento se puede explicar a partir de una distribución bimodal del diámetro de poro. Una parte de esta distribución bimodal corresponde a los tamaños de poros que intercambian agua en el intervalo de tensiones medido. La otra parte de esta distribución bimodal corresponde a poros de diámetro más pequeño y que, aplicando el modelo capilar, permanecen saturados de agua en todo el intervalo de tensiones de trabajo.

6.1.5 *Formulación del modelo*

6.1.5.1 Curva de retención de agua

Asumiendo las hipótesis anteriores, el valor de la proporción del volumen ocupado por agua en un medio poroso es:

$$(203) \quad V_{Ag}(h) = D + E \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Donde:

- $V_{Ag}(h)$ representa la proporción del volumen total del sustrato ocupado por agua a la tensión de humedad h
- D es el valor del desplazamiento
- E es el escalado
- μ es el valor de la media de la distribución logarítmico normal de distribución del diámetro de poro
- σ es la desviación estándar de la misma distribución logarítmico normal

Esta ecuación obtiene el valor de la proporción de agua (V_{Ag}) en función del potencial matricial o tensión de humedad (h). La evolución de la variable dependiente (V_{Ag}) en función de h constituye la curva de retención de agua del sustrato.

6.1.5.2 Generalización de la ecuación para una maceta o muestra de altura finita

La ecuación (203) calcula la proporción del volumen ocupado por agua para un valor h determinado de la tensión de humedad. En el apartado 3.2.2.4.2 se ha visto que la diferencia de

potencial matricial (o de tensión) entre dos puntos, expresado en altura de columna de agua, es igual a la diferencia de cotas entre ellos (ecuación(115)).

La variación en altura del potencial matricial en la maceta obliga a emplear el cálculo integral para calcular el contenido total de agua del sustrato contenido en la maceta (Q_{Ag}). En condiciones de equilibrio estático, la diferencia de potencial matricial es igual a la diferencia de cotas. La sección del recipiente que contiene el sustrato, puede ser variable en altura $S(h)$. La cantidad diferencial de agua contenida en un volumen diferencial, viene dada por la ecuación:

$$(204) \quad dQ_{Ag} = S(h)V_{Ag}(h)dh$$

Siendo:

- dQ_{Ag} = Cantidad diferencial de agua contenida en un cilindro o prisma diferencial de sección $S(h)$ y altura dh
- $V_{Ag}(h)$ = La proporción de agua para la tensión h dada por la ecuación (203)
- $S(h)$ = La superficie de la sección del recipiente del sustrato a la altura correspondiente al potencial matricial h
- Dh = La altura diferencial de un cilindro o prisma de sección $S(h)$

La cantidad de agua contenida en el sustrato, se obtiene integrando la ecuación (204) entre los valores extremos del potencial hídrico, h_1 y h_2 .

$$(205) \quad Q_{Ag} = \int_{h_1}^{h_2} dQ_{Ag} = \int_{h_1}^{h_2} S(h)V_{Ag}(h)dh$$

Sustituyendo en (205) el valor de $V_{Ag}(h)$ dado en la ecuación (203), el valor de la cantidad de agua contenida en el sustrato viene dada por la expresión:

$$(206) \quad Q_{Ag} = \int_{h_1}^{h_2} S(h) \left(D + E \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \right) \times dh$$

Esta ecuación proporciona la cantidad de agua contenida en el sustrato confinado en un recipiente de sección variable ($S(h)$), de altura h_2-h_1 , que está en condiciones de equilibrio hidráulico estático, con una tensión de humedad h_1 en la base y h_2 en la parte superior.

6.1.6 Agrupación de los parámetros que definen el modelo

El modelo logarítmico normal está definido por cuatro parámetros. Dos de ellos corresponden a la curva normal, media y desviación estándar. Los otros dos son parámetros de modulación de esta curva, desplazamiento y escalado.

Esto permite simplificar la representación de los sustratos, pasando del espacio original de 4 dimensiones (4 parámetros) a dos espacios bidimensionales:

- Plano normal, en el que los ejes corresponden a la media y la desviación estándar de la distribución logarítmico normal.
- Plano de porosidad, cuyos ejes corresponden al escalado y la porosidad total.

6.1.6.1 Representación en el plano normal

Una distribución normal se puede representar por un punto en un plano en el que el eje de abscisas corresponde a la media y el eje de ordenadas a la desviación estándar.

La representación de la curva normal por un punto en un plano la utilizaron Shirazi y Boersma (1984), para representar las clases texturales del suelo. Estos autores consideraron que el logaritmo del diámetro de las partículas del suelo sigue una distribución normal. Como tal está definida por un valor medio y una desviación estándar, y se puede representar por un punto en el plano normal previamente definido. El paso posterior fue la representación del triángulo textural USDA en el nuevo sistema de coordenadas.

Posteriormente, Orozco (1995) empleó este mismo sistema de representación para comparar distintos sustratos granulares y su posición relativa con el diagrama textural de suelos.

El modelo de porosidad logarítmico normal está definido por cuatro parámetros, de los cuales dos corresponden a la media y la desviación estándar de la distribución logarítmico normal del diámetro de poro, que se pueden representar en el plano normal descrito.

6.1.6.2 Representación en el plano de porosidad

El escalado y el desplazamiento fraccionan la porosidad total en dos tramos. El primero corresponde al volumen de poros explicado por la distribución logarítmico normal. El segundo corresponde al volumen de poros que, en las condiciones de trabajo, está ocupado por agua. La suma del escalado más el desplazamiento constituye la porosidad total. De estas tres variables, podemos tomar dos cualesquiera de ellas como independientes, obteniendo el valor de la tercera a partir de las anteriores.

Por lo tanto, y al igual que ocurría con la curva normal, desplazamiento y escalado se pueden representar en un plano, en el que cada sustrato estará representado por un punto. Para representar los sustratos en el plano, hemos considerado como variables independientes escalado y porosidad total; el primero interviene como abscisa y el segundo como ordenada. El interés de la porosidad total es evidente: representa el volumen de sustrato ocupado por los poros. Respecto a la segunda variable, hemos considerado más interesante el escalado que el desplazamiento, porque el primero representa el volumen de poros explicado por la curva logarítmico normal, que coincide en líneas generales, con la variación del volumen ocupado por agua en el intervalo de tensiones entre 0 y 100 cm de columna de agua.

El desplazamiento se obtiene por diferencia entre ambos. Teniendo en cuenta la ecuación (209), y la correspondencia $PT=y$, $E=x$ se obtiene:

$$(207) \quad y = D + x$$

Si el desplazamiento (D) se mantiene constante, se obtiene una recta de pendiente 1 y término independiente igual al desplazamiento. Es decir, los sustratos con un mismo valor de desplazamiento se sitúan sobre una recta de pendiente 1 y término independiente igual al valor del desplazamiento.

Las condiciones que se cumplen son:

- Porosidad total $y \leq 1$

- Desplazamiento (D) $0 \leq D \leq 1$
- Escalado (E) $0 \leq x \leq 1$

Por lo tanto, los puntos que representan a los sustratos están contenidos en el triángulo cuyos lados son:

- $x=0$
- $y=1$
- $x=y$

6.2 Aplicación del modelo

La principal aplicación del modelo de porosidad logarítmico normal es la determinación de los criterios de riego, para proporcionar el agua necesaria para la planta y el aire necesario para la respiración de las raíces. La modelización del comportamiento hídrico del volumen de sustrato en el que se desarrollan las raíces, permite prever la evolución de la disponibilidad de aire y agua, y, en consecuencia, adoptar las decisiones necesarias para la aplicación del agua de riego.

El volumen de sustrato en el que se puede desarrollar el sistema radical está limitado por la barrera física que suponen las paredes del contenedor. La forma geométrica de éste define el volumen de sustrato en el que se debe hacer la simulación.

El modelo de porosidad logarítmico normal permite simular el comportamiento hídrico del sustrato en condiciones de equilibrio hidráulico estático. Para poder hacer la modelización dinámica del comportamiento hídrico, es necesario disponer de información sobre la conductividad hidráulica, que no se aborda en este trabajo.

La ecuación (203) proporciona el valor del contenido hídrico para un valor puntual de tensión de humedad. Cuando esta tensión es igual a cero, se obtiene la relación entre la porosidad total y los parámetros D y E.

La ecuación (206) se obtiene a partir de la ecuación (203), dando entrada al volumen de sustrato. Es, por tanto, la que se debe aplicar para simular el comportamiento hídrico del volumen de sustrato contenido en el contenedor.

Para poder aplicar esta ecuación (206), es necesario conocer la función $S(h)$ y los valores D, E, μ y σ del modelo logarítmico normal definidos en la ecuación (203). Estos últimos se estiman a partir de los valores experimentales obtenidos en laboratorio para la proporción de agua en las muestras de sustrato sometidas a un valor de tensión de humedad conocido. Las características de la metodología de laboratorio condicionan la fiabilidad de los valores D, E, μ y σ estimados a partir de los datos experimentales.

6.2.1 Porosidad total

En la ecuación (203) se presenta un caso particular cuando el valor de tensión es cero. En esta situación, todos los poros están llenos de agua, por lo que el volumen ocupado por agua corresponde a la porosidad total. Para $h=0$, los límites de integración en la ecuación (203) son $-\infty$ y $+\infty$, con lo que el valor de la integral es igual a 1. De aquí se deduce que el valor de la porosidad total es igual a la suma del desplazamiento más el escalado.

$$(208) \quad V_{Ag}(h) = D + E \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{0}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \Rightarrow V_{Ag}(h) = D + E \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

$$(209) \quad PT = D + E$$

Donde:

- PT= Porosidad Total
- D= Desplazamiento
- E= Escalado

6.2.2 Relación S(h) entre sección y tensión de humedad

Los envases empleados como contenedores del sustrato son, en general, de sección variable. Las macetas, contenedores y alvéolos son en general de forma troncocónica o troncopiramidal, con la base menor en la parte baja. En el caso de sacos de cultivo se pueden considerar sacos cilíndricos, con su eje en posición horizontal. Las secciones correspondientes a un mismo valor del potencial matricial son paralelas al eje del cilindro y, por lo tanto, de superficie variable. Únicamente en el caso de tablas de lana de roca, la sección del sustrato no varía en altura.

En todos los casos mencionados, la sección horizontal se puede poner en función de la distancia (x) entre la base inferior y la sección considerada. En el caso de la forma troncopiramidal, se trata de una sección cuadrada y en la forma troncocónica, de una sección circular. El lado (l) de la primera y el radio (r) de la segunda se obtienen aplicando la ecuación:

$$(210) \quad (l, r) = a + bx$$

En el caso del saco de cultivo no deformado, de forma cilíndrica de radio r, con el eje en posición horizontal, la sección horizontal es un rectángulo cuya longitud (l₁) coincide con la longitud del saco y la anchura (l₂) se obtiene entonces aplicando la ecuación:

$$(211) \quad l_2 = 2\sqrt{r^2 - (x-r)^2}$$

En condiciones de equilibrio estático, la diferencia de potencial matricial es igual a la diferencia de cota. Si el potencial matricial en la base es h₁, el potencial h a una distancia x de la base es:

$$(212) \quad h = h_1 + x \Rightarrow x = h - h_1$$

Que relaciona la tensión de humedad con la distancia a la base inferior. Sustituyendo este valor de x en las ecuaciones (210) y (211), la función S(h) de la sección en función de la tensión de humedad para el envase troncopiramidal, troncocónico y saco de cultivo cilíndrico no deformado en posición horizontal, son, respectivamente:

$$(213) \quad S(h) = (a + b h - b h_1)^2 \text{ Envase troncopiramidal}$$

$$(214) \quad S(h) = \pi (a + b h - b h_1)^2 \text{ Envase troncocónico}$$

$$(215) \quad S(h) = l_1 \left(2\sqrt{r^2 - (h - h_1 - r)^2} \right) \text{ Saco de cultivo cilíndrico no deformado en posición horizontal}$$

Donde:

- a es el lado o el radio de la base inferior del tronco de pirámide o del tronco de cono, respectivamente.
- b es una constante de proporcionalidad e igual a $2 \tan \alpha$ ó $\tan \alpha$ para el tronco de pirámide y de cono, respectivamente, siendo α el ángulo que forma la cara lateral o la generatriz con el eje del tronco de pirámide o de cono.
- h es la tensión de humedad que interviene como variable independiente
- h_1 es la tensión de humedad en la cara inferior del envase
- r es el radio del cilindro del saco de cultivo
- l_1 es la longitud del saco de cultivo

6.2.3 Caracterización física de sustratos. Cálculo de los parámetros del modelo a partir de los datos experimentales

En el caso de la caracterización física, las muestras de análisis están contenidas en un anillo metálico de sección constante. El valor experimental obtenido ($V_{Ag}(ex)$) corresponde a la proporción de agua en la muestra, es decir la cantidad de agua (Q_{Ag}) dividida por el volumen total. Este, a su vez, se obtiene como producto de la sección (S) de la base por la altura (H). Teniendo en cuenta que se trabaja en condiciones de equilibrio, la altura de la muestra es igual a la diferencia de los potenciales matriciales h_2-h_1 :

$$(216) \quad V_{Ag}(ex) = \frac{Q_{Ag}}{Volumen} = \frac{Q_{Ag}}{S H} = \frac{Q_{Ag}}{S(h_2 - h_1)}$$

Este valor obtenido experimentalmente corresponde a la proporción media de agua en un volumen previamente definido de un sustrato, cuyas características se quieren conocer. Dado que se trata de un volumen de sustrato, el volumen ocupado por agua (Q_{Ag}) viene dado por la ecuación (206), que en notación simplificada se corresponde con la ecuación (205).

Sustituyendo en (216) el valor de Q_{Ag} de la ecuación (205), teniendo en cuenta que la sección $S(h)$ es constante y se puede sacar fuera de la integral, y que el resultado se puede simplificar eliminando la sección del numerador y del denominador, se tiene que la proporción de humedad obtenida experimentalmente corresponde a la expresión:

$$(217) \quad V_{Ag}(ex) = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} V_{Ag}(h) dh$$

El valor obtenido experimentalmente para la proporción de agua, corresponde a la integral en el intervalo de tensiones, de la función V_{Ag} , dividido por la amplitud del intervalo. Es decir el valor experimental obtenido para la proporción de agua corresponde al valor medio integral en el intervalo de tensiones de la función de proporción de agua.

6.2.3.1 Modelo completo para muestras de sección constante

Sustituyendo en (217) el valor de $V_{Ag}(h)$ dado por la ecuación (203) y teniendo en cuenta que D y E son constantes, se obtiene:

$$(218) \quad V_{Ag}(ex) = D + E \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx dh$$

La ecuación (218) relaciona el valor experimental de la proporción de agua en una muestra de laboratorio de sección constante, de altura igual a h_2-h_1 , sometida a una tensión de humedad conocida e igual a h_1 en la parte más baja y h_2 en la parte más alta, en condiciones de equilibrio hidráulico.

En esta ecuación, los parámetros D , E , μ y σ son desconocidos. Uno de los objetivos de la metodología de laboratorio es determinar los valores de estos cuatro parámetros con una fiabilidad adecuada.

6.2.3.2 Sustitución del valor medio integral por el valor de la integral en el punto medio

El modelo detallado en la ecuación (218), presenta una integral doble. Esta se puede reducir a una integral sencilla si se asume la hipótesis de que el valor experimental de la proporción de agua en la muestra corresponde al valor de la proporción de agua en el punto medio del intervalo.

El valor de la proporción de agua obtenido experimentalmente corresponde al valor medio integral dado por la ecuación (217). La hipótesis propuesta sustituye el valor medio integral de la ecuación (217) por el valor de la función $V_{Ag}(h)$ particularizado en el punto medio del intervalo:

$$(219) \quad V_{Ag}(ex) = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} V_{Ag}(h) dh \Rightarrow V_{Ag}(ex) = V_{Ag}\left(\frac{h_2 - h_1}{2}\right)$$

Sustituyendo en la nueva expresión de $V_{Ag}(ex)$, en la ecuación (219), el valor de $V_{Ag}\left(\frac{h_2 - h_1}{2}\right)$ que se deduce de la ecuación (203) se obtiene:

$$(220) \quad V_{Ag}(ex) = D + E \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{(h_2 - h_1)/2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad \text{Modelo simplificado para sustrato}$$

de sección constante.

Esta opción reduce considerablemente la complejidad del modelo, reduciendo la integral doble a una integral sencilla. Es equivalente al modelo dado por la ecuación (218), asumiendo la hipótesis de que el valor de la proporción media de agua en un intervalo de tensiones es igual al valor de la proporción en el punto medio del intervalo.

La hipótesis de que el valor medio integral en un intervalo es igual al valor en el punto medio del intervalo, es correcta cuando la función es una recta. El error cometido al asumir esta hipótesis es tanto mayor cuanto más se separe la función de la recta y cuanto más amplio sea el intervalo.

6.3 Evaluación del modelo

6.3.1 Introducción

Una vez elaborado el modelo, es necesario evaluar su utilidad para los objetivos propuestos y establecer los límites entre los que el modelo simula adecuadamente el comportamiento del sistema que representa. La validación evita el peligro que representa la aplicación indebida de los modelos (Monteith, 1996).

En 1.2.3.3.2.1 se ha adoptado la definición de validación de Whisler *et al.* (1986) En el criterio de este autor, el modelo a validar debe estar previamente calibrado y verificado.

El calibrado de un modelo consiste en ajustar ciertos parámetros o relaciones, para que el modelo funcione adecuadamente en unas determinadas condiciones (Boote *et al.*, 1996; De Wit y Penning de Vries, 1982). Verificar un modelo significa probar su veracidad (Baker y Curry, 1976); para ello, se puede hacer funcionar el modelo con datos históricos y se compara la respuesta del modelo con los datos del sistema real.

Un modelo incluye normalmente un elevado número de parámetros cuyos valores se determinan en el calibrado, se comprueba la veracidad de las ecuaciones empleadas y, finalmente, se inicia el proceso de validación con los datos experimentales obtenidos en distintas condiciones, que permiten establecer los límites de aplicación del modelo. Este es el esquema general seguido, por ejemplo, por Muñoz-Carpena (1993).

El modelo de porosidad presentado en este trabajo presenta unas características que se deben considerar en su evaluación. El nivel de complejidad es muy inferior al que puede presentar un modelo de cultivo o un modelo hidrológico, como el de Muñoz-Carpena, mencionado anteriormente. De hecho, en sentido estricto, no se trata de un modelo de cultivo, sino en todo caso, de un módulo a incluir en un modelo de cultivo. Este bajo nivel de complejidad se refleja en un escaso número de parámetros, tan solo cuatro, necesarios para definir el modelo.

El modelo de porosidad se refiere a un medio de producción determinado, como es el medio poroso en el que se desarrolla el sistema radicular, y, en concreto, a las características hídricas de este medio poroso. El cambio de medio poroso se refleja en la variación de los valores de los parámetros del modelo. Los materiales utilizados como sustratos de cultivo presentan una gran variabilidad en sus características hídricas y, en consecuencia, en los valores de los parámetros del modelo. La magnitud de estas diferencias no permite el empleo de valores genéricos, ni siquiera para grupos de sustratos. Los errores derivados de estos calibrados genéricos no son asumibles.

La necesidad de calibrar el modelo para cada sustrato empleado determina la importancia de esta fase y condiciona el método de evaluación del modelo.

6.3.2 Objetivos

El desarrollo del modelo logarítmico normal se basa en dos hipótesis: la distribución logarítmico normal del diámetro de poro y la aplicación de la ley de capilaridad de Jurin para relacionar el tamaño de poro con el potencial matricial. Lo idóneo sería comprobar cada una de

las dos hipótesis por separado. El método empleado no permite la separación de ambas, por lo que necesariamente se han de testar conjuntamente en el modelo resultante.

Para facilitar los cálculos, se ha planteado una simplificación. El valor medio integral de la proporción del volumen ocupado por agua en un intervalo de tensiones, se sustituye por la proporción del volumen ocupado por agua en el punto medio del intervalo.

La aplicación del modelo requiere su calibrado previo para el material poroso empleado en cada caso. Por lo tanto, el objetivo general perseguido en este caso es evaluar la fiabilidad de calibrado del modelo a partir de los datos experimentales de laboratorio.

Por lo tanto, en este apartado se plantean tres objetivos particulares:

- Comprobar la validez del modelo resultante de la hipótesis logarítmico normal de distribución del tamaño de poro y de la ley de capilaridad de Jurin.
- Evaluar la incidencia, en el valor predictivo del modelo, de la simplificación resultante de sustituir el valor medio integral de la proporción de agua en un intervalo de tensiones por el valor de la proporción en el punto medio del intervalo.
- Evaluar la fiabilidad del calibrado del modelo a partir de los datos experimentales de laboratorio.

6.3.3 *Materiales y métodos*

El error del modelo viene dado por la diferencia entre el valor simulado por el modelo calibrado y el valor obtenido en el sistema real. La utilidad del modelo es tanto mayor cuanto menor sea este error. El modelo planteado se compara con otros modelos obtenidos de la bibliografía, evaluando los errores obtenidos con los diferentes modelos calibrados.

La validación establece los límites del modelo previamente calibrado. La aplicación de este criterio a nuestro caso no tiene mucho sentido, puesto que es necesario hacer un calibrado para cada sustrato concreto. Sin embargo, es necesario conocer la aplicabilidad del modelo en distintas condiciones y establecer los límites de su aplicación. Para ello, se estudia la fiabilidad del calibrado en una gama de sustrato en los que las características hídricas varían en intervalos muy amplios.

6.3.3.1 Obtención de datos para la comparación de modelos

6.3.3.1.1 *Caracterización física de los sustratos*

Los datos experimentales de laboratorio se han obtenido aplicando la metodología de laboratorio desarrollada en esta misma Tesis a muestras de 9 sustratos de características muy diversas, de manera que nos permitan comprobar la aplicabilidad del modelo en un amplio abanico de posibilidades

6.3.3.1.1.1 Metodología de laboratorio

La metodología de laboratorio empleada es la desarrollada en este mismo trabajo:

- Doble saturación en vacío a 0,1 atm.
- Preparación de la muestra en doble anillo portamuestras.
- Tensionado en lecho de arena con control de la tensión de humedad mediante tensiómetro.

- Evaluación del volumen ocupado por el material sólido por aplicación del principio de Arquímedes.
- Secado en estufa a 105°C.

6.3.3.1.1.2 Valores considerados para la tensión de humedad

Los datos experimentales se han obtenido sobre muestra cilíndricas de 4 cm de altura, para 11 valores de tensión previamente fijados. Los valores referenciados a la base inferior de la muestra (h_1) son 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 50 y 100 cm de columna de agua.

6.3.3.1.1.3 Sustratos empleados

1. C100 .- 100% Corteza compostada de *Pinus radiata* (D. Don (C)
2. C25:T75 .- Mezcla de corteza de pino compostada (C) y turba *Sphagnum* comercial (T) en proporción 25% +75% en volumen.
3. C50:T50 .- Mezcla similar a la anterior en proporción 50%+50%.
4. Cyclamenerde .- Sustrato comercial para cultivo de Cyclamen.
5. E25:C75 .- Mezcla de escoria de horno alto cristalizada (E) y corteza de pino compostada (C) en proporción 25%+75% en volumen.
6. E25:T75 .- Mezcla de escoria de horno alto cristalizada (E) y turba rubia comercial (T) en proporción 25%+75% en volumen.
7. EG25:C75 .- Mezcla de escoria de horno alto granulada (EG) y corteza de pino compostada (C) en proporción 25%+75% en volumen.
8. EG25:T75 .- Mezcla de escoria de horno alto granulada (EG) y turba rubia comercial (T) en proporción 25%+75% en volumen.
9. Lana de escoria .- Fibra mineral obtenida industrialmente a partir de escoria de horno alto fundida.

6.3.3.1.2 Modelos empleados

Los datos experimentales obtenidos se ajustan al modelo logarítmico normal desarrollado y a otros tomados de la bibliografía, que nos sirven para contrastar la validez del modelo.

El modelo desarrollado por Van Genuchten (1980) es de amplia utilización en suelos agrícolas. Esto lo hace muy adecuado como elemento de comparación.

Con relativa frecuencia se recurre a modelos de tipo polinómico. La ventaja de éstos es su facilidad de adaptación a los datos experimentales. Se han tomado dos modelos de la bibliografía, que han sido utilizados previamente por otros autores en sustratos de cultivo (Karlovič y Fonteno, 1986; Martínez *et al.*, 1993).

Los datos experimentales se han ajustado a cuatro variantes del modelo logarítmico normal y a dos del modelo de Van Genuchten.

Por una parte, se pretende evaluar la incidencia, en el ajuste y en los valores obtenidos para los parámetros del modelo, de la simplificación propuesta en el apartado 6.2.3.2. Esto da lugar a dos variantes del modelo: el modelo completo como se expresa en la ecuación (218) y el modelo simplificado como se expresa en la ecuación (220).

Por otra parte, el valor de la porosidad interviene, de una u otra forma, en el modelo logarítmico normal y en el de Van Genuchten. La metodología de laboratorio proporciona un valor experimental de la porosidad total. Interesa también evaluar la incidencia, en el ajuste de los modelos, del empleo como dato del valor obtenido experimentalmente para la porosidad total. Para ello, se han considerado dos variantes para el modelo logarítmico normal completo, para la versión simplificada y para el modelo de Van Genuchten: en una variante, el valor experimental de la porosidad se toma como dato y en la otra no se considera.

6.3.3.1.2.1 Modelo logarítmico normal, integral sencilla con los cuatro parámetros libres. Programa V12

Corresponde al modelo logarítmico normal simplificado, con las siguientes condiciones:

- Criterio de simplificación: El valor de la proporción del volumen ocupado por agua para toda la muestra se considera equivalente al valor correspondiente a la sección media. Los valores considerados para la tensión son 2, 4, 6, 8, 10, 12, 17, 22, 32, 52, 102 cm de columna de agua.
- El valor de la porosidad total no se considera como dato. El modelo estima libremente los valores del escalado y desplazamiento.
- El modelo aplicado corresponde a la ecuación (220)

$$(221) \quad V_{Ag}(ex) = D + E \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{(h_2-h_1)/2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

En el que el valor $(h_2-h_1)/2$ del límite superior de integración corresponde a los valores detallados en la primera condición.

6.3.3.1.2.2 Modelo logarítmico normal, integral sencilla con tres parámetros libres. Programa V17

Corresponde al modelo logarítmico normal simplificado, con las siguientes condiciones:

- Criterio de simplificación: El valor de la proporción del volumen ocupado por agua para toda la muestra se considera equivalente al valor correspondiente a la sección media.
- El valor de la porosidad total obtenido experimentalmente se considera como dato. El modelo calcula el valor del desplazamiento como diferencia entre el valor experimental de porosidad y el valor estimado del escalado.
- Al igual que en el caso anterior, el modelo aplicado corresponde a la ecuación (220)

$$(222) \quad V_{Ag}(ex) = D + E \times \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{(h_2-h_1)/2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

En el que el valor $(h_2-h_1)/2$ del límite superior de integración corresponde a cada uno de los 11 valores de tensión experimentales: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 17, 22, 32, 52, 102 cm de columna de agua.

6.3.3.1.2.3 Modelo logarítmico normal, integral doble con los cuatro parámetros libres. Programa V14

Corresponde al modelo logarítmico normal completo, con las siguientes condiciones:

- El valor de la porosidad total no se considera como dato. El modelo estima libremente los valores del escalado y desplazamiento.
- El modelo aplicado corresponde a la ecuación (218)

$$(223) \quad V_{Ag}(ex) = D + E \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx dh$$

Los valores de h_1 y h_2 considerados para los 11 valores de tensión experimentales son 0-4, 2-6, 4-8, 6-10, 8-12, 10-14, 15-19, 20-24, 30-34, 50-54 y 100-104 cm de columna de agua.

6.3.3.1.2.4 Modelo logarítmico normal, integral doble con tres parámetros libres. Programa V18

Corresponde al modelo logarítmico normal completo, con las siguientes condiciones:

- El valor de la porosidad total obtenido experimentalmente se considera como dato. El modelo calcula el valor del desplazamiento como diferencia entre el valor experimental de la porosidad y el valor estimado del escalado.
- El modelo aplicado corresponde a la ecuación (218)

$$(224) \quad V_{Ag}(ex) = D + E \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx dh$$

Los valores de h_1 y h_2 considerados para los 11 valores de tensión experimentales son 0-4, 2-6, 4-8, 6-10, 8-12, 10-14, 15-19, 20-24, 30-34, 50-54 y 100-104 cm de columna de agua.

6.3.3.1.2.5 Modelo de Van Genuchten con los cuatro parámetros libres. Programa M1

En 1980, Van Genuchten publicó un modelo que relaciona el contenido de agua en el suelo con el potencial matricial. Este modelo se basa en el modelo de Mualen (1976), de comportamiento hídrico del suelo.

El modelo de Van Genuchten ha sido ampliamente aceptado para describir las características hídricas del suelo agrícola. También se ha empleado para describir las características hídricas de los sustratos de cultivo (Orozco, 1995; Otten, 1994).

La ecuación que relaciona la proporción del volumen ocupado por agua con el potencial matricial es:

$$(225) \quad \theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}$$

Donde:

- θ es la proporción del volumen ocupado por agua
- θ_s es el contenido de agua a saturación
- θ_r es el contenido residual de agua
- α y n son parámetros a determinar para cada material
- m está relacionado con n por la expresión $m=1-1/n$

Para calcular la curva correspondiente a cada medio poroso, se deben determinar los valores de cuatro parámetros independientes θ_s , θ_r , α y n .

En la bibliografía se citan distintas posibilidades en relación con estos parámetros. Van Genuchten y Nielsen (1985) eliminaron la restricción entre n y m para mejorar la flexibilidad del modelo. Milks *et al.* (1989a) consideran como datos del modelo los valores obtenidos experimentalmente de θ_r y θ_s , y determinan los valores de α , n y m por métodos de ajuste.

El programa M1 aplica el modelo de Van Genuchten, con las siguientes condiciones:

- El valor de la porosidad total no se considera como dato. El modelo estima libremente los valores de los cuatro parámetros θ_r , θ_s , α y n .
- Criterio de simplificación: El valor de la proporción del volumen ocupado por agua para toda la muestra se considera equivalente al valor correspondiente a la sección media.
- Los valores de tensión h correspondientes a cada uno de los 11 valores de tensión experimentales son 2, 4, 6, 8, 10, 12, 17, 22, 32, 52 y 102 cm de columna de agua.

6.3.3.1.2.6 Modelo de Van Genuchten con tres parámetros libres. Programa M4

En este caso se aplica el mismo modelo que en el caso anterior. El valor de θ_s del modelo se considera como dato.

La ecuación aplicada es:

$$(226) \quad \theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}$$

Y las condiciones consideradas para el ajuste son:

- El valor de la porosidad total se considera como dato. El modelo fija el valor de θ_s igual al valor obtenido experimentalmente para la porosidad total. Los otros tres parámetros del modelo los estima libremente.
- Criterio de simplificación: El valor de la proporción del volumen ocupado por agua para toda la muestra se considera equivalente al valor correspondiente a la sección media.
- Los valores de tensión h correspondientes a cada uno de los 11 valores de tensión experimentales son 2, 4, 6, 8, 10, 12, 17, 22, 32, 52 y 102 cm de columna de agua.

6.3.3.1.2.7 Modelo polinómico de tercer grado en raíz cúbica de h . Programa C1

Se emplea el modelo polinómico de tercer grado en raíz cúbica de la tensión, propuesto por Martínez *et al.* (1993). El modelo viene dado por la ecuación:

$$(227) \quad y = a + b x + c x^2 + d x^3$$

Siendo la variable independiente $x = \sqrt[3]{t}$ la raíz cúbica de la tensión de humedad.

Las condiciones consideradas para este modelo son:

- Criterio de simplificación: El valor de la proporción del volumen ocupado por agua para toda la muestra se considera equivalente al valor correspondientes a la sección media.
- Los valores de tensión h correspondiente a cada uno de los 11 valores de tensión experimentales son 2, 4, 6, 8, 10, 12, 17, 22, 32, 52 y 102 cm de columna de agua.

6.3.3.1.2.8 Modelo polinómico de Karlovich y Fonteno (1986). Programa C3

Se emplea el modelo polinómico de tercer grado propuesto por Karlovich y Fonteno (1986):

$$(228) \quad y = a + b x + c x^2 + d x^3$$

En este caso, el valor de la variable independiente x se obtiene aplicando la expresión:

$$(229) \quad x = \text{Log}(Tensión(kPa) \times 9.8 + 1)$$

Las condiciones consideradas para este modelo son:

- Criterio de simplificación: El valor de la proporción del volumen ocupado por agua para toda la muestra se considera equivalente al valor correspondiente a la sección media.
- Los valores de tensión h correspondientes a cada uno de los 11 valores de tensión experimentales son 2, 4, 6, 8, 10, 12, 17, 22, 32, 52 y 102 cm de columna de agua.

6.3.3.1.3 Cálculo de los parámetros de los modelos

6.3.3.1.3.1 Métodos de cálculo

Los valores de los parámetros que determinan los diferentes modelos se han calculado por ajuste por mínimos cuadrados no lineales. Para ello se ha empleado la rutina ZXSSQ de International Mathematics and Statistics Library (IMSL). Esta rutina se basa en el algoritmo de Levenberg-Marquardt (IMSL, 1979). Los cálculos se han realizado en doble precisión (REALx16). El cálculo se hace por iteraciones sucesivas, partiendo de unos valores iniciales hasta obtener 6 cifras exactas.

6.3.3.1.3.2 Valores iniciales de los parámetros

Para el cálculo de los valores de los parámetros por mínimos cuadrados, se parte de unos valores iniciales de los parámetros y por iteraciones sucesivas, se obtienen unos valores de los parámetros que hacen mínima la suma de cuadrados de los residuos, definidos como la diferencia entre los valores calculados y observados.

En el proceso de cálculo se pueden presentar diversas incidencias como son la falta de convergencia y la presencia de mínimos locales. La falta de convergencia se produce cuando el programa de cálculo no es capaz de encontrar los valores de los parámetros correspondientes a un mínimo de la suma de cuadrados de los residuos. La presencia de mínimos locales, proporciona una solución en la que la suma de cuadrados de los residuos corresponde a un mínimo matemático, pero puede ocurrir que haya otro mínimo en el que el valor de la suma de cuadrados sea menor.

Los valores empleados como iniciales en el proceso de cálculo, pueden provocar que el proceso de cálculo lleve a un mínimo local e incluso que no se produzca la convergencia.

En las cuatro variantes consideradas para el modelo logarítmico normal, se ha partido de distintos valores iniciales con la finalidad de estudiar la sensibilidad del modelo a estos valores y detectar el riesgo de caer en un mínimo local.

6.3.3.1.3.2.1 Modelo logarítmico normal con integral sencilla

En las dos variantes (V12 y V17) se han empleado 5 bloques de datos iniciales. De estos cinco bloques, cuatro son comunes a ambos y el quinto, procede de un ajuste previo de los datos a estas dos variantes del modelo. En la Tabla 85 se detallan los valores empleados como iniciales.

Los valores de la media y de la desviación estándar de la distribución logarítmico normal no presentan limitaciones especiales, aunque normalmente la media oscila entre -0.2 y -2 y la desviación estándar entre 0.3 y 1.8. La suma de los valores de escalado y desplazamiento debe ser ≤ 1 y ninguno de los dos puede ser < 0 , por lo que el intervalo de variación es entre 0 y 1.

Los cuatro bloques comunes se han establecido de más a menos verosímil, buscando la posible presencia de mínimos locales e incluso la no convergencia del modelo. En el quinto bloque se intercambian los datos, es decir, los valores obtenidos con el programa V12 en el ajuste previo, se emplean como datos de partida para el programa V17, y los obtenidos con el programa V17 se emplean como datos de partida para el V12.

Bloque	Media	Desviación estándar	Escalado	Desplazamiento
1	-1	1	0.5	0.5
2	-2	0.5	1	0
3	-3	0.1	2	1
4	0	5	3	2
5	Valores de ajuste previo			

Tabla 85 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores iniciales empleado para el ajuste de los parámetros en las variantes V12 y V17 de integral simple del modelo logarítmico normal

6.3.3.1.3.2.2 Modelo logarítmico normal con integral doble

En las dos variantes (V14 y V18) se han empleado 3 bloques de datos iniciales, todos ellos procedentes de ajustes previos.

En los ajustes previos, se ha visto que el tiempo necesario para la ejecución del programa aumenta considerablemente con respecto al caso de la integral sencilla. En ocasiones, el programa ni siquiera es capaz de converger, dependiendo en gran medida de los datos empleados como iniciales, en especial en el caso de la variante V18, en el que se fija el valor de la porosidad total.

Los tres bloques de datos iniciales 1, 2 y 3, corresponden a los valores obtenidos para los parámetros para las variantes V12, V17 y V14, respectivamente. No se han considerado como valores iniciales los obtenidos previamente con la variante V18, por los problemas de convergencia que presenta.

6.3.3.2 Análisis de datos

6.3.3.2.1 Sensibilidad de los valores obtenidos a los valores iniciales del ajuste en el modelo logarítmico normal

El empleo de distintos bloques de valores iniciales para el ajuste de los parámetros, tiene dos objetivos principales. Por una parte, delimitar los intervalos de los valores de iniciales en el cálculo de los parámetros para evitar la divergencia en el cálculo y poder obtener los valores de los parámetros. En segundo lugar, detectar la posible presencia de mínimos locales, que se manifiesta por la obtención de valores diferentes en función de los valores de iniciales.

6.3.3.2.1.1 Falta de convergencia

La falta de convergencia en el programa de cálculo para la obtención de los parámetros que definen el modelo, se detecta considerando los distintos bloques de datos iniciales considerados en el apartado 6.3.3.1.3.2.

En la Tabla 86 se detalla el reparto de los 144 casos considerados en el estudio de la falta de convergencia. De ellos, 45 corresponden a cada uno de los dos modelos V12 y V17 (9 sustratos * 5 bloques iniciales) y 27 a cada uno de los dos modelos V14 y V18 (9 sustratos * 3 bloques iniciales).

°	V12	V14	V17	V18	Total
Sustrato 1	5	3	5	3	16
Sustrato 2	5	3	5	3	16
Sustrato 3	5	3	5	3	16
Sustrato 4	5	3	5	3	16
Sustrato 5	5	3	5	3	16
Sustrato 6	5	3	5	3	16
Sustrato 7	5	3	5	3	16
Sustrato 8	5	3	5	3	16
Sustrato 9	5	3	5	3	16
Total	45	27	45	27	144

Tabla 86: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Número de casos considerados por sustrato y modelo en el estudio de convergencia

6.3.3.2.1.2 Presencia de mínimos locales

Los problemas de mínimos locales se presentan cuando un mismo grupo de datos experimentales (un mismo sustrato), con un mismo programa de ajuste, proporciona resultados diferentes en función de los datos iniciales.

En la Tabla 87 se detalla el reparto de los 114 casos considerados en el estudio de la presencia de mínimos cuadrados. De las 36 combinaciones posibles (9 sustratos*4 programas), en tres no se produce convergencia, por lo que quedan disponibles 33 grupos. De estos 33 grupos, 18 corresponden a los modelos V12 y V17 con 4 bloques de datos iniciales cada uno. Los otros 15 grupos corresponden a los programas V14 y V18, con 2 (3 grupos) ó 3 (12 grupos) bloques de datos iniciales cada uno.

	V12	V14	V17	V18	Total
Sustrato 1	4	2	4	--	10
Sustrato 2	4	3	4	3	14
Sustrato 3	4	3	4	3	14
Sustrato 4	4	3	4	2	13
Sustrato 5	4	2	4	--	10
Sustrato 6	4	3	4	3	14
Sustrato 7	4	3	4	3	14
Sustrato 8	4	3	4	3	14
Sustrato 9	4	3	4	--	11
Total	36	25	36	17	114

Tabla 87: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Número de casos considerados por sustrato y modelo en el estudio de presencia de mínimos locales

6.3.3.2.2 Comparación de modelos

Para comparar los modelos se han considerado 66 de los 72 ajustes posibles, correspondientes al empleo del primer bloque de datos iniciales en cada una de las combinaciones de los 9 sustratos por los 8 modelos. Los otros 6 casos no se han considerado, por falta de convergencia.

Se han considerado 3 criterios. En primer lugar, se comparan los valores observados con los calculados por el modelo.

Para aplicar el segundo criterio, se ha calculado el residuo como diferencia entre ambos (observado – calculado). Mediante un análisis de varianza, se ha estudiado la incidencia de los

tres factores de variación, modelos matemático, sustrato, y valor de tensión a la que se efectúa la medición.

El tercer criterio considerado compara los valores obtenidos para los parámetros que definen el modelo. Los parámetros de los modelos log – normales son comparables entre sí. El modelo de Van Genuchten tiene dos parámetros comparables a otros dos de los modelos log – normales.

6.3.3.2.2.1 Comparación de datos observados y calculados por el modelo

Los criterios para comparar los datos observados experimentalmente con los calculados por el modelo han sido tomados de Whitmore (1991) y de Quemada y Cabrera (1995).

La fiabilidad de un modelo es tanto mayor cuanto mayor sea la concordancia entre los valores observados y calculados. Para estudiar esta concordancia se consideran dos criterios. El primero es el ajuste a una recta de las parejas de valores (observado, calculado). La fiabilidad del modelo es tanto mayor cuanto mayor sea el ajuste de este modelo a la recta $y=x$.

El segundo criterio considerado es la falta de ajuste entre los valores observados y calculados. Se compara la variabilidad debida a la falta de ajuste con la variabilidad experimental o error.

6.3.3.2.2.1.1 Regresión lineal entre datos observados y calculados

Las parejas de datos (observado, calculado) se ajustan a una recta $y=a+bx$, en la que el valor observado interviene como variable independiente. Si, como en nuestro caso, se dispone de repeticiones, se puede obtener el error estándar asociado a los dos parámetros, a y b de la recta. La regresión proporciona, además, el valor del coeficiente de correlación R entre los valores observados y calculados.

Si el modelo predice exactamente el valor observado, se cumple $y=x$. En este caso, $a=0$ y $b=1$ y la recta de regresión coincide con la bisectriz del primer cuadrante. Por lo tanto, una forma de evaluar la fiabilidad del modelo es ver si a es significativamente distinto de 0 y b significativamente distinto de 1 . El nivel de significación se obtiene a partir del valor estimado para cada parámetro y de su correspondiente error estándar.

El valor del coeficiente de correlación indica el grado de asociación de los valores a la recta calculada, es decir a la recta $y=a+bx$, no a la recta $y=x$. Por lo tanto, el valor de este parámetro se ha de considerar junto con los valores de a y b , y nunca por separado.

El valor R^2 (cuadrado del coeficiente de correlación) se obtiene dividiendo la suma de cuadrados de la regresión entre la suma de cuadrados total. Indica el reparto de la variabilidad total entre la variabilidad debida a la regresión y el error. Se estudia la evolución de cada uno de estos dos componentes.

Los valores considerados son:

- Suma de cuadrados de la regresión (SC_{Reg})
- Suma de cuadrados del error (SC_{Error})
- Valor de R^2
- Test de significación de la regresión
- Testado de la hipótesis $a=0$, paso de la recta de regresión por el origen de coordenadas.

➤ Testado de la hipótesis $b=1$, pendiente de la recta de regresión igual a 1

La suma de cuadrados total se obtiene como suma de los cuadrados de las diferencias entre cada valor y_i y el valor medio \bar{y} .

$$(230) \quad SC_{Total} = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

A cada valor y_i observado le corresponde un valor \hat{y}_i estimado por la recta. La suma de cuadrados de las diferencias entre los valores observados y estimados constituye la suma de cuadrados residual. Esta suma de cuadrados evalúa la variabilidad debida a los errores.

$$(231) \quad SC_{Resid} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

La suma de cuadrados de la regresión se obtiene como suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores estimados \hat{y}_i y el valor medio \bar{y} . Corresponde a la parte de la variabilidad total debida a la variación propia de la recta.

$$(232) \quad SC_{Reg} = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

La suma de cuadrados es aditiva y se cumple:

$$(233) \quad SC_{Total} = SC_{Resid} + SC_{Reg}$$

El valor R^2 se obtiene como cociente entre SC_{Reg} y SC_{Total} . Corresponde a la proporción de la variabilidad total explicada por la regresión:

$$(234) \quad R^2 = \frac{SC_{Reg}}{SC_{Total}}$$

Dividiendo SC_{Resid} y SC_{Reg} por los grados de libertad, se obtienen los cuadrados medios correspondientes. El valor de F para el test de significación de la regresión se obtiene del cociente:

$$(235) \quad F = \frac{CM_{Reg}}{CM_{Resid}}$$

Desde el punto de vista estadístico se evalúa la variabilidad de los datos respecto al valor medio total (SC_{Total}). Esta variabilidad tiene dos componentes: la residual, debida a las diferencias entre valor observado y calculado por la recta (SC_{Resid}), y la variabilidad debida a la variación propia de la recta (SC_{Reg}). Cuanto más se ajusten los datos a la recta, menor es el valor de SC_{Resid} . El valor de R^2 corresponde a la proporción de la variabilidad total debida a la variación propia de la recta. El valor de F compara la variabilidad debida a la regresión con la debida al error.

Si los puntos están perfectamente alineados, la diferencia entre valores observados y calculados es cero, y por lo tanto $SC_{Resid}=0$. En este caso $R^2=1$ y $F=\infty$. Cuando los puntos se separan de la recta, la diferencia entre los valores observado y calculado aumentan y con ella el valor de SC_{Resid} . La consecuencia es la disminución del valor de R^2 y de F. Cuanto más

próximos a la recta están los valores observados más se aproxima R^2 a 1, más elevado es F y más bajo es el valor de α .

6.3.3.2.2.1.2 Prueba de la bondad del ajuste (Lofit)

Para estudiar la falta de ajuste se sigue la metodología descrita por Whitmore (1991). La suma de cuadrados de las diferencias entre los valores medidos y simulados se reparte en dos componentes: uno calculado a partir de las diferencias entre la simulación y la media de las medidas repetidas (falta de ajuste – lack of fit), y otro calculado a partir de la varianza en cada conjunto de medidas repetidas (error puro). Si el primero no es significativamente mayor que el segundo, no hay razón para rechazar el modelo.

De los 72 casos posibles (9 sustratos * 8 modelos), se han considerado 69. No se consideran los tres casos desechados inicialmente por falta de convergencia. De estos 69 casos, se han obtenido los valores correspondientes a la SC_{Lofit} y grados de libertad. A partir de estos valores, se han obtenido los correspondientes cuadrados medios (CM_{Lofit}) y su raíz cuadrada (RCM_{Lofit}).

Teniendo en cuenta la propiedad aditiva de la suma de cuadrados y de los grados de libertad, se han obtenido los valores de la SC_{Lofit} y grados de libertad correspondientes a todo el ensayo por adición de los valores obtenidos para los casos considerados.

Los factores que inciden en la falta de ajuste son sustrato, modelo y valor de tensión a la que se ha hecho la medida. Los valores correspondientes a la SC_{Lofit} y grados de libertad para cada sustrato, se han obtenido como suma de los 8 valores correspondientes a los 8 modelos de cada sustrato. De forma análoga se han obtenido los valores de SC_{Lofit} y grados de libertad correspondientes a cada uno de los 9 sustratos.

Retomando los datos originales y siguiendo los mismos criterios, se han calculado los valores de SC_{Lofit} y grados de libertad correspondientes a cada uno de los 11 valores de tensión de humedad.

Los valores considerados son:

- La suma de cuadrados debida a la falta de ajuste (Lofit)
- La suma de cuadrados del error
- El test F de los cuadrados medios correspondientes a las sumas de cuadrados anteriores

$$(236) \quad SC_{Total} = \sum \sum (Medido_{ji} - Simulado_{ij})^2$$

$$(237) \quad SC_{Lofit} = \sum \sum (\overline{Medido}_i - Simulado_{ij})^2$$

$$(238) \quad SC_{Error} = \sum \sum (Medido_{ij} - \overline{Medido}_i)^2$$

Estas sumas de cuadrados son aditivas: la suma de cuadrados total es igual a la suma de las otras dos sumas de cuadrados. Los cuadrados medios se obtienen dividiendo cada suma de cuadrados por sus correspondientes grados de libertad. El valor de F se obtiene aplicando la expresión:

$$(239) \quad F = \frac{CM_{Lofit}}{CM_{Error}}$$

Conceptualmente el CM_{Lofit} es una medida de la variabilidad de los datos y tiene dos componentes: El primero corresponde a la variabilidad entre los datos experimentales y la media respectiva (CM_{Error}). El segundo sumando corresponde a la variabilidad entre las medias de los valores experimentales y el valor simulado por el modelo.

Un valor $F=1$, significa que el numerador es igual al denominador, es decir, la componente de CM_{Lofit} debida a las diferencias entre el valor medio experimental y el valor simulado por el modelo es cero. Hay un ajuste perfecto entre los valores medios experimentales y los valores simulados por el modelo.

Un valor $F>1$, significa que el numerador es mayor que el denominador. La componente de CM_{Lofit} debida a las diferencias entre el valor medio experimental y el valor simulado es mayor que cero.

Cuanto más próximo a 1 sea el valor obtenido para F , mejor es el ajuste entre los datos experimentales y los valores simulados por el modelo. Un valor de F significativamente superior a 1 indica, por lo tanto, que el modelo se puede mejorar.

6.3.3.2.2 Residuos

6.3.3.2.2.1 Distribución de los residuos y de sus valores absolutos

El estudio de los residuos proporciona información sobre su evolución, y por tanto sobre el origen de la significación de la falta de ajuste.

El primer criterio aplicado para el estudio de residuos es que su valor medio es cero para el ajuste de los datos experimentales de cada sustrato a cada modelo. Esta es la primera hipótesis nula planteada. Para su aceptación o rechazo se calcula la probabilidad α de que el valor obtenido sea menor o igual a cero. El valor de α viene dado por la expresión:

$$(240) \quad \alpha = P(z \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f(r, \sigma_r) dx$$

Siendo f una distribución normal de media r y desviación estándar σ_r , que corresponden respectivamente al valor medio y la desviación estándar de la distribución normal de los residuos del ajuste de los datos experimentales al modelo. Los valores r y σ_r se obtienen a partir de los valores de los residuos.

El segundo criterio aplicado es el valor absoluto de los residuos. La media de estos valores absolutos proporciona una evaluación del error del modelo independiente de su signo.

A partir de los residuos obtenidos para cada ajuste, se obtienen los valores medios y de desviación estándar de los residuos y de sus valores absolutos. Los factores que intervienen en el ajuste, y por lo tanto en el valor de los residuos, son el sustrato, el modelo y el valor de tensión al que se ha efectuado la toma de datos experimentales.

Interesa conocer la incidencia de cada uno de estos factores en los residuos obtenidos, y en consecuencia en la falta de ajuste. Para ello, se ha hecho un análisis de varianza de todos los residuos, considerando como factores de variación el sustrato, el modelo y el valor de tensión al que se efectúa la medición de los datos experimentales.

6.3.3.2.2.2.2 *Análisis de varianza de los residuos y de sus valores absolutos*

Se ha hecho un análisis de varianza de los residuos obtenidos y de los valores absolutos de los residuos.

Se han considerado como un factorial con 3 factores de variación y sus respectivas interacciones:

- Factor Modelo
- Factor Sustrato
- Factor Valor de Tensión de Humedad
- Interacción Modelo * Sustrato
- Interacción Modelo * Tensión
- Interacción Sustrato* Tensión
- Interacción Modelo * Sustrato *Tensión

6.3.3.2.2.3 Valores de los parámetros obtenidos

En total se han ensayado 8 modelos matemáticos diferentes. De ellos, 4 corresponden a distintas variantes del modelo logarítmico normal V12, V14, V17 y V18. Otros dos corresponden a dos variantes del modelo de Van Genuchten, M1 y M4. Finalmente, otros dos son de tipo polinómico C1 y C3.

Todos los modelos tienen 4 parámetros a determinar. En el caso de los modelos logarítmico normales, los cuatro parámetros son equivalentes y corresponden a la media y desviación estándar de la distribución logarítmico normal, al escalado y al desplazamiento. Los modelos de Van Genuchten tienen dos parámetros considerados de ajuste (α y n), y otros dos que se pueden asimilar a algunos de los parámetros del modelo logarítmico normal. El contenido de agua residual del modelo de Van Genuchten se puede asimilar al desplazamiento del modelo logarítmico normal. El contenido de agua en saturación es equivalente a la porosidad total, que en el modelo logarítmico normal viene dado por la suma de desplazamiento más escalado.

En consecuencia, se han comparado los valores de la media y de la desviación estándar de la distribución logarítmico normal, del desplazamiento y del escalado obtenidos para cada sustrato con los 4 modelos logarítmico normales. Además, se ha comparado el desplazamiento con los valores de contenido de humedad residual de los modelos de Van Genuchten y con el contenido de humedad obtenido experimentalmente para una tensión de 100 cm de columna de agua. El valor del contenido de humedad a saturación del modelo de Van Genuchten se ha comparado con la suma de escalado y desplazamiento, y con el valor de la porosidad total obtenido experimentalmente.

6.3.4 *Resultados*

6.3.4.1 Sensibilidad de los valores obtenidos a los valores iniciales del ajuste en el modelo logarítmico normal.

En los primeros ajustes realizados, las variantes del modelo con integral sencilla (V12 y V17) no presentan, en general, problemas de convergencia de los datos. No ocurre lo mismo con las variantes en las que se incluye la integral doble (V14 y V18). En estos casos, se presentan

problemas de convergencia, sobre todo con el programa V18, en el que se fija el valor de la porosidad.

6.3.4.1.1 Falta de convergencia

6.3.4.1.1.1 Detección de la falta de convergencia

El problema de divergencia se presenta cuando el programa de cálculo no es capaz de ajustar los parámetros del modelo.

Cuando se emplea un ordenador personal (MS-DOS), la falta de convergencia no provoca la interrupción del programa, sino que continúa hasta encontrar unos valores para los parámetros del modelo. Sin embargo, los datos de salida del programa presentan varias anomalías, que indican la falta de convergencia y la invalidez de los datos obtenidos. Las anomalías observadas son:

- Suma de cuadrados de falta de ajuste (LOFIT): Los valores habituales de esta suma de cuadrados son del orden de 10^2 . La falta de convergencia puede manifestarse por el aumento considerable de esta suma de cuadrados, que puede alcanzar desde valores próximos a 1 hasta valores del orden de 10^3 e incluso 10^5 .
- Valores de los parámetros del modelo, media, desviación estándar, escalado y desplazamiento. En esta caso, la falta de convergencia puede manifestarse en los valores de los parámetros y/o en los valores de sus errores estándar:
 - Valores de los parámetros
 - Media de la distribución logarítmico normal. Los valores habituales oscilan entre -0.2 y -2 . La obtención de valores muy distanciados de este intervalo puede indicar una falta de convergencia. En ocasiones, se han obtenido valores del orden de 10^4 e incluso 10^7 en valor absoluto.
 - Desviación estándar de la distribución normal (sigma): El intervalo de valores para este parámetro es de 0.3 a 1.8 . La falta de convergencia produce valores muy altos, (de hasta 10^9) o muy bajos (del orden de 10^{-4}). También se pueden presentar valores negativos; en este caso, el valor absoluto suele ser coincidente con el valor obtenido para sigma cuando el programa converge adecuadamente.
 - Escalado y desplazamiento: Estos valores oscilan entre 0 y 1 , y la suma de ambos ha de ser inferior a 1 . La falta de convergencia se manifiesta con la obtención de valores fuera de estos intervalos.
 - Error estándar de los parámetros: En este caso la falta de convergencia se manifiesta de dos formas: la primera proporcionando el valor cero para el error estándar, y la segunda, con valores muy altos, normalmente del orden de 10^3 , que pueden llegar a 10^8 .
- Regresión lineal entre valores observados y calculados
 - La suma de cuadrados total toma valores muy bajos (del orden de 10^{-30}) o muy altos (del orden de 10^3).
 - El valor de R^2 está comprendido entre 0 y 1 . La falta de convergencia proporciona valores negativos, cero ó 1 .
 - La pendiente de la recta (m) debe ser 1 . La falta de convergencia proporciona valores de cero, próximos a cero (del orden de 10^{-15}), o muy elevados (entre 50 y 100).
 - El término independiente de la recta (b) debe ser 0 . La falta de convergencia proporciona valores claramente diferentes de cero. Estos valores pueden ser negativos (normalmente entre -15 y -30), o positivos (normalmente entre 0.4 y 0.6).
- Contenido de humedad calculado para $t=0$. El contenido de humedad se expresa como proporción, por lo que varía entre 0 y 1 . A veces, la falta de convergencia se manifiesta

asignando el valor 40 para el contenido de humedad para tensión cero. Esto solo se produce en las variantes V14 y V18 con integral doble, y coincide con el valor del intervalo de la primera integral.

Estas anomalías nunca se presentan solas, siendo varias las anomalías que ocurren, por lo que la falta de convergencia no deja lugar a dudas. La única excepción se presenta con el sustrato nueve (lana de escoria) y programa V17, en el que el valor del escalado es de 1.8 y el del desplazamiento -0.89 . El resto de los valores no indican falta de convergencia.

6.3.4.1.1.2 Casos en los que se ha detectado falta de convergencia

Los problemas que se presentan de convergencia varían para los distintos programas o variantes del modelo empleados y aumentan considerablemente cuando el modelo empleado incluye la integral doble.

En el caso de la variante V12, integral simple con los cuatro parámetros a determinar, la convergencia se produce en todos los casos estudiados, excepto cuando los valores iniciales corresponden al grupo 4. En este caso, solo se produce la convergencia para el sustrato cinco.

En el caso de la variante V17, integral simple fijando el valor de la porosidad total (escalado + desplazamiento), la convergencia se produce en todos los casos, excepto para los sustratos uno, cinco y siete cuando los valores iniciales corresponden al grupo 3. A diferencia del caso anterior, los valores iniciales del grupo 4 proporcionan valores válidos para todos los sustratos.

La entrada de la integral doble en el modelo aumenta considerablemente las dificultades de cálculo. Por una parte aumenta considerablemente el tiempo de ejecución. Por otra, aumentan los problemas de convergencia. Cuando los valores iniciales son del tipo $-1, 1, 0.5, 0.5$, como para los casos de la integral simple, el programa converge solo ocasionalmente. Esto mejora notablemente cuando se emplean como datos iniciales los valores obtenidos con las variantes V12 y V17. Es por esta razón por la que los grupos de datos iniciales considerados corresponden a los valores obtenidos con las variantes V12 (grupo 1), V17 (grupo 2) y un cálculo previo realizado con la variante V14 (grupo 3).

En la variante V14, integral doble con los cuatro parámetros por determinar, la convergencia se produce en todos los casos, excepto en los sustratos uno y cinco, cuando se emplean los datos iniciales correspondientes al grupo 2, es decir cuando se emplean como datos iniciales los valores obtenidos con la variante V17.

La variante V18, integral doble fijando el valor de la porosidad total, es la que más problemas de convergencia presenta. En los casos de los sustratos uno, cinco y nueve, no se ha obtenido resultado positivo con ninguno de los grupos de datos iniciales empleados. Se ha presentado el mismo problema con el sustrato cuatro cuando se emplean como datos iniciales los valores obtenidos con la variante V14 (grupo 3).

6.3.4.1.2 Presencia de mínimos locales

Una vez detectados los casos con problemas de convergencia, se ha estudiado la posible presencia de mínimos locales. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, en este caso se han considerado los siguientes datos:

- En el caso de la variante V12, se han considerado los ajustes obtenidos con los datos iniciales correspondientes a los grupos 1, 2, 3 y 5. Los datos obtenidos con el grupo 4 se han desechado por los problemas de convergencia.
- En el caso de la variante V17, se han considerado los ajustes obtenidos con los datos iniciales correspondientes a los grupos 1, 2, 4 y 5. Los datos obtenidos con el grupo 3, se han desechado por los problemas de convergencia detectados con tres sustratos.
- En la variante V14 se han desechado los ajustes correspondientes a los sustratos uno y cinco, cuando se emplean como datos iniciales los correspondientes al grupo 2. A diferencia del caso anterior, en éste no es conveniente desechar todos los ajustes del grupo 2, porque la cantidad de datos disponibles es menor.
- Por último, en el caso de la variante V18, no se han considerado los datos correspondientes a los sustratos uno, cinco y nueve, ni los del sustrato 4 cuando se emplean como datos iniciales los del grupo 3.

En la Tabla 88 se detalla el número de ajustes efectuados con cada uno de las variantes del modelo logarítmico normal, los considerados en el estudio de mínimos locales y los no considerados por los problemas de convergencia.

Programa	V12	V17	V14	V18	Total
Nº de Ajustes efectuados	45	45	27	27	144
Nº de ajustes considerados	36	36	25	17	114
Nº de ajustes no considerados	9	9	2	10	30

Tabla 88: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Nº de ajustes de curvas realizados con las diferentes variantes del modelo logarítmico normal y considerados en el estudio de mínimos locales

Para estudiar la presencia de mínimos locales se han estudiado los cuatro parámetros que definen el modelo: media y desviación estándar de la distribución logarítmico normal, escalado y desplazamiento. Para cada uno de los 33 grupos considerados en 6.3.3.2.1.2, se ha calculado el valor medio y el intervalo de variación (valor máximo-valor mínimo del grupo) de cada uno de estos cuatro parámetros.

		Media	Sigma	Escalado	Desplazamiento
Valores medios	Máximo	-2.155E-01	1.803E+00	6.603E-01	4.029E-01
	Mínimo	-2.254E+00	3.536E-01	2.446E-01	8.252E-02
Intervalos	Máximo	2.911E-05	3.736E-04	4.239E-05	1.715E-05
	Mínimo	3.935E-08	9.084E-08	1.334E-08	1.334E-08

Tabla 89: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores máximo y mínimo de los valores medios e intervalos de los 33 grupos considerados en el estudio de mínimos locales

En la Tabla 89 se detallan los valores máximo y mínimo de los 33 valores medios y de los 33 intervalos correspondientes a los cuatro parámetros.

El intervalo de variación es de un orden de magnitud al menos 3 veces inferior al de los valores medios, con unos valores del orden de 10^{-4} e inferiores. Los errores estándar de

estimación de los parámetros son normalmente del orden de 10^{-2} y excepcionalmente pueden ser del orden de 10^{-1} o 10^{-3} . En cualquier caso, las diferencias son de un orden de magnitud inferior a los errores estándar, por lo que los valores obtenidos con las distintas estimaciones pueden considerarse iguales.

6.3.4.2 Comparación de modelos

6.3.4.2.1 *Comparación de los datos observados y calculados por el modelo*

6.3.4.2.1.1 Regresión lineal entre valores observados y calculados

Se han calculado los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los valores simulados (variable dependiente) para los ajustes de los 8 modelos a los datos experimentales de los 9 sustratos.

En primer lugar, se prueba el ajuste de los datos a la recta $y=a+bx$. El estudio se completa con el testado de las hipótesis $a=0$ y $b=1$.

6.3.4.2.1.1.1 *Variabilidad de la regresión, ajuste a la recta*

a) *Suma de cuadrados de la regresión*

En la Tabla 90 se detallan los valores de la SC_{Reg} de las regresiones lineales entre los valores observados de cada sustrato y los calculados con cada uno de los 8 modelos empleados.

El valor de la SC_{Reg} presenta unas variaciones mínimas cuando se comparan los datos experimentales de un sustrato concreto con los valores simulados por los distintos modelos matemáticos. Esta variación es <0.02 para el sustrato 6, entre 0.02 y 0.03 para los sustratos 2, 5, 7 y 8, entre 0.03 y 0.06 para los sustratos 1 y 3, y >0.06 para los sustratos 4 y 9.

Las variaciones de la SC_{Reg} son en cambio muy importantes cuando se comparan los valores obtenidos para los distintos sustratos. La media SC_{Reg} de los modelos a los que se ajustan los datos experimentales tiene un valor entre 0.3 y 0.5 para los sustratos 1 y 5, entre 0.5 y 1.0 para los sustratos 3 y 7, para el sustrato 2 el valor obtenido para los diferentes modelos oscila alrededor de 1, y es ligeramente superior a 1 para los sustratos 4, 6 y 8. Los valores más elevados corresponden a los ajustes realizados con los datos del sustrato 9, que tienen un valor medio de 2.41.

Estos resultados ponen de manifiesto la escasa incidencia del factor modelo en relación con la incidencia que tiene el factor sustrato. Permiten discriminar el comportamiento de los diferentes sustratos pero no el de los modelos.

b) *Suma de cuadrados del error*

En la Tabla 91 se proporcionan los valores de la SC_{Error} de las regresiones lineales entre los valores observados de cada sustrato y los calculados con cada uno de los 8 modelos empleados. En los 9 sustratos empleados se observan dos comportamientos claramente diferenciados.

Por una parte, en los sustratos 2, 5, 6, 7 y 8, las variaciones de la SC_{Error} son mínimas cuando se comparan los datos experimentales de un sustrato con los calculados por los diferentes modelos empleados. Las diferencias entre el valor máximo y mínimo son inferiores a 0.006.

En los sustratos 1, 3, 4 y 9, las diferencias entre los modelos son más importante, entre 0.013 para el sustrato 3 y 0.039 para el sustrato 9. Estas diferencias permiten establecer tres grupos de comportamiento. El primer grupo corresponde a los modelos V12, V14 y M1, el segundo a los modelos V17, V18 y M4, y el tercero a los modelos C1 y C2.

En los casos de los grupos primero y segundo, las diferencias entre los modelos de un mismo grupo son muy pequeñas, en ocasiones inapreciables. En cambio hay una clara diferencia entre los dos grupos, con valores de la SC_{Error} sensiblemente superiores para los modelos del grupo segundo. Los modelos cúbicos que forman el grupo tercero, tienen un comportamiento más dispar. Presentan diferencias entre ellos: unas veces están próximos al grupo primero y otras, al grupo segundo.

c) Valor de R^2 y test F de significación

En la Tabla 92 y Tabla 93 se proporcionan, respectivamente, los valores obtenidos para R^2 y α . La similitud entre los valores de la SC_{Reg} y las diferencias en los de SC_{Error} , hace que la evolución de los valores de R^2 estén estrechamente relacionados con los valores de SC_{Error} . Al igual que en el caso de la SC_{Error} , las diferencias entre los valores de R^2 son mínimas para los sustratos 2, 6 y 8, con unos valores en torno a 0.973, 0.988 y 0.989, respectivamente. En el caso de los sustratos 5 y 7, las diferencias son algo mayores, debido fundamentalmente al descenso del valor de R^2 para los modelos C1 y C2. Las diferencias aumentan para los sustratos 3 y 4, y se hacen muy elevadas para los sustratos 1 y 9

Las diferencias del valor de R^2 confirman los tres grupos de comportamiento de los modelos establecidos en el caso de la SC_{Reg} . Las diferencias en el valor de R^2 para modelos de un mismo sustrato se deben, fundamentalmente, a la diferencia entre los valores de los modelos V12, V14 y M1 por un lado y V17, V18 y M4, por otro, correspondiendo a los primeros los valores de R^2 más elevados. Al igual que en el caso de la SC_{Reg} , el comportamiento de los modelos cúbicos es dispar.

Respecto al nivel de significación, el valor de α obtenido es, en todos los casos, muy inferior a 0.01 (Tabla 93). El valor máximo es $1.05 \cdot 10^{-17}$ para el modelo M4 con el sustrato 1. Se puede considerar, por tanto, que en todos los casos estudiados los datos observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada uno de los modelos, se ajustan a una recta.

6.3.4.2.1.1.2 Pendiente de la recta del ajuste lineal

En Tabla 94 se proporcionan los valores obtenidos para la pendiente de la recta de ajuste entre los datos experimentales y los simulados por cada modelo. En la Tabla 95 se proporcionan los valores de los errores estándar de la estima de estas pendientes.

El valor obtenido para la pendiente es, en todos los casos, inferior a 1. En el caso de los sustratos 2, 4, 5, 6, 7 y 8, oscila en intervalos variables para cada sustrato, pero siempre con valores ente 0.96 y 1. La pendiente de las rectas correspondientes al sustrato 3 varían entre 0.949 (modelo C1) y 0.981 (modelo M4). En el caso del sustrato 9, los valores oscilan entre 0.968 para el modelo C1 y valores en torno a 0.984 para los modelos V12, C14 y M1. Los valores más

bajos corresponden al sustrato 1, con un margen de variación entre 0.897 (modelo M1) y 0.843 (modelo M4).

A partir de estos valores y de los errores estándar de la Tabla 95, se ha calculado la probabilidad α de que sea $m \geq 1$. La hipótesis nula es: el valor obtenido para las pendientes es $m=1$. En todos los casos el valor obtenido es $m < 1$. Para testar la hipótesis nula se aplica un test de una cola, en el que el valor α corresponde a la probabilidad de que el valor obtenido sea mayor o igual a 1. Es decir:

$$(241) \quad \alpha = P(z \geq 1) = \int_1^{\infty} f(m, \sigma_m) dx$$

Siendo f una distribución normal cuya media m es el valor obtenido para la pendiente de la recta, y su desviación estándar σ_m es el error estándar correspondiente.

El valor obtenido para α es en general elevado ($\alpha > 0.1$), por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula. Esto ocurre con todos los modelos para los sustratos 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9. En el caso de los sustratos 1 y 3, el nivel de significación depende del modelo de que se trate. Para los modelos V12, V14 y M1, el nivel de significación es $0.01 \leq \alpha < 0.05$ para el sustrato 1 y $0.05 \leq \alpha < 0.1$ para el sustrato 3. Para los modelos V17, V18 y M4, $\alpha < 0.01$ para el sustrato 1 y $0.1 < \alpha$ para el sustrato 3. En el caso de los modelos polinómicos, C1 y C3, $\alpha < 0.01$ para el sustrato 1 y $0.05 \leq \alpha < 0.10$ para el sustrato 3.

La clasificación de los modelos por tipos de comportamiento se repite una vez más, en este caso. Los modelos V12, V14 y M1 tienen, en general, valores de pendiente y error estándar más bajos que los modelos V17, V18 y M4. Las diferencias entre estos dos grupos se acentúan cuando se consideran los valores de probabilidad de $\alpha \geq 0.1$. Los modelos C1 y C3 siguen, como en otras ocasiones, un comportamiento dispar, oscilando entre uno y otro grupo, e incluso saliendo fuera del intervalo de valores marcado por los dos grupos anteriores.

6.3.4.2.1.1.3 Término independiente de la recta del ajuste lineal

En Tabla 96 se proporcionan los valores obtenidos para el término independiente de la recta de ajuste entre los datos experimentales y los simulados por cada modelo. En la Tabla 97 se proporcionan los valores de los errores estándar de la estima de estos términos independientes.

El valor obtenido es, en todos los casos, superior a 0. El comportamiento de los sustratos es similar al observado para la pendiente de la recta. En el caso de los sustratos 2, 4, 5, 6, 7 y 8, oscila en intervalos variables para cada sustrato, pero siempre en valores entre 0.02 y 0. El término independiente de las rectas correspondientes al sustrato 3 varían entre 0.0216 (modelo M1) y 0.0256 (modelo M4). En el caso del sustrato 9, el valor para el modelo C1 es 0.0273 y desciende hasta valores entre 0.0193 y 0.0197 para los modelos V12, V14 y M1. Los valores más elevados corresponden al sustrato 1, con un margen de variación entre 0.0468 (modelo M1) y 0.0591 (modelo M4).

A partir de estos valores y de los errores estándar de la Tabla 97, se ha calculado la probabilidad α de que sea $b \leq 0$. La hipótesis nula es: el valor obtenido para el término independiente es $b=0$. En todos los casos el valor obtenido es $b > 0$. Para testar la hipótesis nula se aplica un test de una cola, en el que el valor α corresponde a la probabilidad de que el valor obtenido sea menor o igual a 0. Es decir:

$$(242) \quad \alpha = P(z \leq 0) = \int_{-\infty}^0 N(b, \sigma_b) dx$$

Siendo f una distribución normal cuya media b es el valor obtenido para el término independiente de la recta, y su desviación estándar σ_b , el error estándar correspondiente.

La evolución del valor de α es prácticamente la misma que la de la pendiente de la recta. Tomando los mismos intervalos de α , se reproducen exactamente los mismos resultados que en el caso de la pendiente.

Se repite también la clasificación de los modelos, por tipos de comportamiento. El valor del término independiente y los correspondientes errores estándar para los modelos V12, V14 y M1 son, en general, más bajos que para los modelos V17, V18 y M4. Las diferencias entre estos dos grupos se acentúan cuando se consideran los valores de probabilidad de $\alpha \geq 0.1$. Los modelos C1 y C3 siguen, como en otras ocasiones, un comportamiento dispar oscilando entre uno y otro grupo, e incluso saliendo fuera del intervalo de valores marcado por los dos grupos anteriores.

6.3.4.2.1.2 Prueba de bondad del ajuste

6.3.4.2.1.2.1 Falta de ajuste

En la Tabla 98 se detallan los valores obtenidos para la suma de cuadrados de cada uno de los 69 ajustes realizados. La columna de totales de la derecha corresponde a la suma de cuadrados de la falta de ajuste para cada sustrato, obtenida como suma de las SC_{Lofit} de todos los modelos ajustados a los datos disponibles del sustrato. La fila de totales inferior es la equivalente a la anterior para los modelos. La casilla inferior derecha, correspondiente al cruce de la columna y fila de totales, corresponde a la suma para todo el ensayo de la SC_{Lofit} .

El valor de la suma de cuadrados de la falta de ajuste para todo el ensayo es 1,7130. Los grados de libertad son 2.190. El cuadrado medio resultante y su raíz cuadrada son, respectivamente, $7,8220 \cdot 10^{-4}$ y $2,7968 \cdot 10^{-2}$.

En la Tabla 99 (Caso A) se detalla la contribución de cada uno de los modelos a la SC_{Lofit} de todo el ensayo, los cuadrados medios correspondientes y su raíz cuadrada. La Tabla 100 (Caso A) es equivalente a la anterior, pero para los sustratos, y la Tabla 101 (Caso A), para las tensiones. Dadas las diferencias que se presentan en los grados de libertad, el estudio se hace para la raíz de los cuadrados medios del error (RCM_{Lofit}).

Respecto a modelos (Tabla 99), los valores más elevados de la RCM_{Lofit} corresponden a los modelos V17 y M4 ($3.6-3.7 \cdot 10^{-2}$). Los valores más bajos corresponden a los modelos V12, V14 y M1 con un valor alrededor de $2.1 \cdot 10^{-2}$. El modelo V18 presenta un valor ligeramente más elevado, mientras que los modelos C1 y C3 presentan unos valores intermedios.

En lo referente a la incidencia de cada sustrato a la falta de ajuste (Tabla 100), el sustrato 9 presenta una fuerte incidencia, con un valor de la RCM_{Lofit} de $5.5 \cdot 10^{-2}$. Le sigue en importancia el sustrato 1 ($3.4 \cdot 10^{-2}$). Los sustratos 2, 3 y 4 están en una situación intermedia (entre 2.4 y $3 \cdot 10^{-2}$). Los valores más bajos, entre 1.3 y $1.6 \cdot 10^{-2}$, corresponden a los sustratos 5, 6, 7 y 8.

Por último, en el estudio de las tensiones (Tabla 101) se presenta una situación de dientes de sierra. Los valores oscilan entre el $3.7 \cdot 10^{-2}$, para 10 cm de tensión de humedad, y $1.7 \cdot 10^{-2}$

para 8 y 100 cm de tensión de humedad. Se presentan máximos parciales para las tensiones 0, 6, 20 y 50 cm, con valores de RCM_{Lofit} entre 2.9 y $3.34 \cdot 10^{-2}$, y mínimos parciales para 4, 16 y 30 cm de tensión, con valores de RCM_{Lofit} entre 2.1 y $2.6 \cdot 10^{-2}$.

La Tabla 98 proporciona información sobre el posible origen de estas diferencias. Se observa que hay tres valores de la SC_{Lofit} más elevados que el resto. Estos tres valores corresponden al ajuste del sustrato 9 con los modelos V17 ($2.19 \cdot 10^{-1}$), M4 ($2.15 \cdot 10^{-1}$) y C3 ($1.21 \cdot 10^{-1}$). Superan en 3 veces (modelos V17 y M4) y 2 veces (modelo C3) el valor máximo de la SC_{Lofit} de los otros 66 casos, que oscila entre un máximo de $6.01 \cdot 10^{-2}$ (modelo C1 con sustrato 9) y un mínimo de $4.32 \cdot 10^{-3}$ (modelo C1 con sustrato 8).

La SC_{Lofit} de los tres casos mencionados suma $5.56 \cdot 10^{-1}$. Esto supone el 32.44% de la SC_{Lofit} de los 69 casos que constituyen el ensayo, y el 82.12% de los 8 ajustes realizados con el sustrato 9. Estos valores son suficientemente elevados como para considerar que su comportamiento es diferente de los otros 66 casos considerados. Por ello, se han repetido los cálculos anteriores sin considerar los ajustes del sustrato 9 a los modelos V17, M4 y C3. El resultado se muestra en Tabla 99, Tabla 100 y Tabla 101 bajo el epígrafe Caso B. En las mismas tablas, bajo el epígrafe %SCB/SCA, se detalla la reducción de la SC_{Lofit} que se produce en cada caso como consecuencia de la eliminación de los tres ajustes.

Los modelos afectados por esta eliminación son, lógicamente, V17, M4 y C3. La reducción en todos ellos es del orden del 50% de la SC_{Lofit} del modelo (Tabla 99). En consecuencia, el perfil de la raíz cuadrada de los cuadrados medios cambia sustancialmente con respecto a la situación inicial. Los dos valores correspondientes a los modelos V17 y M4 se reducen considerablemente. El modelo C1 que no ha alterado su valor, pasa a ser el máximo ($RCM_{Lofit} = 2.69 \cdot 10^{-2}$). Los valores de RCM_{Lofit} para los modelos V17, M4 y C3 se sitúan entre 2.3 y $2.6 \cdot 10^{-2}$, al igual que el modelo V18, que no se ha visto afectado. Los modelos V12, V14 y M1 tampoco se han visto afectados y continúan proporcionando los valores mínimos de la RCM_{Lofit} , alrededor de $2.1 \cdot 10^{-2}$.

El único sustrato que se ve afectado es el 9, cuya SC_{Lofit} se ve reducida en la ya mencionada cifra del 82.12% (Tabla 100). La consecuencia es una reducción considerable del valor de la RCM_{Lofit} , que pasa de $5.49 \cdot 10^{-2}$ a $3.07 \cdot 10^{-2}$. Este valor es inferior al del sustrato 1, pero sigue siendo superior al del resto de los sustratos que no se han visto alterados.

Por último, y respecto a las tensiones de humedad, todas se ven afectadas en mayor o menor medida. Para las tensiones más elevadas (≥ 30 cm de columna de agua), la reducción de la SC_{Lofit} , es superior al 50%. En las bajas tensiones, la incidencia es variable, entre 30-50% para las tensiones 0, 2 y 8 cm, y prácticamente despreciable ($\leq 5\%$) para 4, 6 y 10 cm de tensión. La incidencia en la RCM_{Lofit} es comparable a la de SC_{Lofit} . En los casos de menor variación de la SC_{Lofit} (tensiones 6 y 10) se produce un ligero aumento de la RCM_{Lofit} , que se puede considerar inapreciable. Como consecuencia de esto, el perfil de dientes de sierra que se daba en la situación inicial se ha visto claramente alterado. Para las tensiones entre 0 y 20 cm de columna de agua, el valor de RCM_{Lofit} oscila normalmente en el intervalo $2.2-3 \cdot 10^{-2}$. La excepción se presenta en las tensiones 8 y 10 cm, con valores claramente por debajo y por encima del resto de valores. Las tensiones entre 30 y 100 cm presentan unos valores para RCM_{Lofit} en el intervalo $1.4-1.6 \cdot 10^{-2}$, claramente inferior al intervalo $2.2-3 \cdot 10^{-2}$ de las tensiones más bajas.

El perfil de diente de sierra que se presenta con los datos originales se ha visto alterado. Se presenta una reducción importante de RCM_{Lofit} para tensiones ≥ 30 cm, con valores por debajo de $1.61 \cdot 10^{-2}$. Los valores de las tensiones 0 y 2 también han tenido una mejora importante,

pasando de valores del orden de $3 \cdot 10^{-2}$ a $2.5 \cdot 10^{-2}$. Se sigue manteniendo un máximo a tensión 10 y un mínimo a tensión 8, con valores muy similares a los que se daban con los datos originales. Se presentan dos máximos parciales a tensiones 16 y 20, pero con una reducción importante del valor de RCM_{Lofit} del máximo correspondiente a 20 cm de tensión (Tabla 101).

6.3.4.2.1.2.2 Test de significación de la falta de ajuste

En la Tabla 102 se presentan los valores del nivel de significación α correspondientes a la probabilidad de error Tipo I de rechazar como falsa una hipótesis nula cierta. Corresponde a un test F del cociente entre CM_{Lofit} y CM_{Error} , para los ajustes realizados con cada modelo para cada sustrato.

Los sustratos 1, 2, 3, 5, 6 y 9 presentan, para todos los modelos, un nivel de significación $\alpha < 0.01$, siendo el más elevado $\alpha = 4.72 \cdot 10^{-3}$ para el ajuste de los datos del sustrato 5 al modelo M1. En el resto de sustratos, los niveles de significación varían en función del modelo al que se ajustan los datos.

En el sustrato 4, el nivel de significación es $\alpha < 0.01$ para los modelos V17, V18, M4 y C1. El nivel de significación es $0.01 \leq \alpha \leq 0.05$ cuando los datos experimentales se ajustan a los modelos V12, V14, M1 y C3.

En el caso del sustrato 7, los niveles de significación son $\alpha < 0.01$ para los modelos M4, C1 y C3, y $0.01 \leq \alpha < 0.05$ para los modelos V12, V17, V14, V18 y M1.

Para el sustrato 8, el nivel de significación es $\alpha < 0.01$ cuando los datos se ajustan al modelo C3. Cuando se emplean los modelos V12, V17, V14, V18, M1 y M4 el nivel de significación es $0.01 \leq \alpha < 0.05$, y $0.05 \leq \alpha$ cuando los datos se ajustan al modelo C1.

Un valor significativo de α para este test indica que CM_{Lofit} es significativamente superior a CM_{Error} , es decir, que las diferencias entre los valores calculados y la media de los valores observados correspondientes son mayores que las que se podrían esperar por la incidencia los factores aleatorios recogidos en CM_{Error} . La consecuencia inmediata es que se puede encontrar un modelo matemático que se ajuste mejor a los datos experimentales.

Con este criterio, y si consideramos un nivel de significación $\alpha < 0.01$, de los 66 ajustes considerados, 50 son mejorables. Si elevamos el nivel de significación hasta $\alpha < 0.05$, el número de ajustes mejorables sube hasta 65, y solamente se puede considerar como no mejorable el ajuste de los datos del sustrato 8 al modelo C1. En todos los casos, el valor de α es inferior a 0.1.

6.3.4.2.2 Residuos

El test de significación de la falta de ajuste (6.3.4.2.1.2.2) ha proporcionado valores de $\alpha < 0.01$ para 50 de los 66 ajustes realizados. Solo en un caso el valor de α es superior a 0.05, y en todos los casos α es inferior a 0.1. El análisis de los residuos puede informar sobre las causas de esta falta de ajuste.

6 Modelo de porosidad logarítmico normal

Modelo	Suma de cuadrados de la regresión (SC_{Reg})								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	0.34990	0.98332	0.71603	1.13432	0.43006	1.07855	0.56854	1.11630	2.43292
V17	0.32223	1.00449	0.73950	1.16114	0.43500	1.08527	0.57790	1.12895	
V14	0.34747	0.98326	0.71614	1.13443	0.43087	1.07868	0.56889	1.11627	2.43378
V18		1.00071	0.74651	1.17629		1.08208	0.57783	1.12614	
M1	0.35479	0.98215	0.71760	1.13550	0.41722	1.07716	0.56915	1.11518	2.43589
M4	0.31328	0.99900	0.75125	1.17720	0.44476	1.07736	0.58806	1.12345	
C1	0.31639	0.98270	0.70606	1.11618	0.42380	1.08062	0.55828	1.11813	2.35655
C3	0.32290	0.98404	0.71521	1.13306	0.42377	1.07351	0.55891	1.10599	

Tabla 90 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la suma de cuadrados de la regresión (SC_{Reg}) para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente)

Modelo	Suma de cuadrados del error (SC_{Error})								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	0.04273	0.02659	0.03301	0.03303	0.01229	0.01307	0.01205	0.01172	0.03990
V17	0.06076	0.02798	0.04510	0.04994	0.01321	0.01320	0.01319	0.01200	
V14	0.04386	0.02656	0.03294	0.03293	0.01198	0.01310	0.01201	0.01170	0.03950
V18		0.02757	0.04444	0.04927		0.01315	0.01265	0.01190	
M1	0.04058	0.02717	0.03228	0.03244	0.01027	0.01377	0.01185	0.01227	0.03839
M4	0.06464	0.02809	0.04535	0.05404	0.01384	0.01379	0.01473	0.01244	
C1	0.05696	0.02686	0.03773	0.04179	0.01536	0.01212	0.01712	0.01084	0.07711
C3	0.05427	0.02621	0.03338	0.03364	0.01538	0.01563	0.01682	0.01683	

Tabla 91 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la suma de cuadrados del error (SC_{Error}) para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente)

Modelo	Coeficiente de correlación (R^2) entre valores observados y calculados								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	0.89116	0.97367	0.95593	0.97171	0.97222	0.98802	0.97925	0.98961	0.98387
V17	0.84135	0.97290	0.94252	0.95877	0.97053	0.98798	0.97769	0.98948	
V14	0.88792	0.97370	0.95602	0.97179	0.97296	0.98800	0.97933	0.98963	0.98403
V18		0.97319	0.94381	0.95980		0.98799	0.97857	0.98954	
M1	0.89735	0.97308	0.95695	0.97223	0.97598	0.98738	0.97961	0.98911	0.98448
M4	0.82895	0.97265	0.94308	0.95611	0.96982	0.98736	0.97557	0.98905	
C1	0.84743	0.97339	0.94928	0.96391	0.96502	0.98891	0.97024	0.99040	0.96832
C3	0.85610	0.97405	0.95541	0.97117	0.96499	0.98565	0.97078	0.98501	

Tabla 92 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de R^2 para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente).

Modelo	Nivel de significación α para Test F de la relación lineal observado/calculado								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	7.66E-22	1.27E-31	4.71E-28	2.28E-33	1.57E-33	5.42E-42	5.60E-37	2.73E-42	2.27E-38
V17	2.15E-18	2.19E-31	8.44E-26	5.18E-30	5.26E-33	5.84E-42	2.59E-36	3.52E-42	
V14	1.42E-21	1.24E-31	4.53E-28	2.15E-33	9.04E-34	5.66E-42	5.17E-37	2.64E-42	1.84E-38
V18		1.79E-31	5.42E-26	3.07E-30		5.77E-42	1.10E-36	3.11E-42	
M1	2.23E-22	1.94E-31	2.99E-28	1.56E-33	5.18E-34	1.64E-41	3.90E-37	7.08E-42	1.02E-38
M4	1.05E-17	2.60E-31	6.98E-26	1.87E-29	8.57E-33	1.68E-41	1.74E-35	7.98E-42	
C1	9.43E-19	1.55E-31	7.34E-27	3.37E-31	1.77E-31	1.08E-42	1.10E-33	5.37E-43	2.33E-32
C3	2.75E-19	9.59E-32	5.93E-28	3.37E-33	1.81E-31	2.42E-40	7.45E-34	5.00E-39	

Tabla 93 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Nivel de significación α del valor F para los ajustes lineales entre valores observados (variable independiente) y los simulados por el modelo (variable dependiente).

6 Modelo de porosidad logarítmico normal

Modelo	Valor de m=pendiente de la recta								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	0.8912**	0.9737 ns	0.9560*	0.9717 ns	0.9721 ns	0.9880 ns	0.9792 ns	0.9896 ns	0.9839 ns
V17	0.8552***	0.9841 ns	0.9715 ns	0.9831 ns	0.9777 ns	0.9910 ns	0.9871 ns	0.9952 ns	
V14	0.8881**	0.9737 ns	0.9561*	0.9718 ns	0.9730 ns	0.9880 ns	0.9795 ns	0.9896 ns	0.9840 ns
V18		0.9823 ns	0.9761 ns	0.9895 ns		0.9896 ns	0.9871 ns	0.9939 ns	
M1	0.8974**	0.9731 ns	0.9570*	0.9722 ns	0.9759 ns	0.9873 ns	0.9797 ns	0.9891 ns	0.9845 ns
M4	0.8433***	0.9814 ns	0.9792 ns	0.9899 ns	0.9886 ns	0.9874 ns	0.9958 ns	0.9928 ns	
C1	0.8474***	0.9734 ns	0.9493*	0.9639 ns	0.9650 ns	0.9889 ns	0.9702 ns	0.9904 ns	0.9683 ns
C3	0.8561***	0.9741 ns	0.9554*	0.9712 ns	0.9650 ns	0.9857 ns	0.9708 ns	0.9850 ns	

Tabla 94: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la pendiente (m) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo. Nivel de significación $\alpha=P(z\geq 1)$. $\alpha>0.1\rightarrow ns$, $0.10\geq\alpha>0.05\rightarrow *$, $0.05\geq\alpha>0.01\rightarrow **$, $0.01\geq\alpha\rightarrow *$**

Modelo	Error estándar de m=pendiente de la recta								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	4.806E-02	2.597E-02	3.287E-02	2.589E-02	2.566E-02	1.678E-02	2.199E-02	1.584E-02	1.968E-02
V17	5.730E-02	2.664E-02	3.842E-02	3.184E-02	2.661E-02	1.687E-02	2.301E-02	1.603E-02	
V14	4.869E-02	2.596E-02	3.284E-02	2.586E-02	2.534E-02	1.680E-02	2.196E-02	1.582E-02	1.958E-02
V18		2.645E-02	3.814E-02	3.163E-02		1.684E-02	2.254E-02	1.596E-02	
M1	4.683E-02	2.626E-02	3.251E-02	2.566E-02	2.421E-02	1.722E-02	2.181E-02	1.620E-02	1.930E-02
M4	5.911E-02	2.669E-02	3.852E-02	3.312E-02	2.724E-02	1.724E-02	2.432E-02	1.631E-02	
C1	5.548E-02	2.611E-02	3.514E-02	2.913E-02	2.869E-02	1.616E-02	2.622E-02	1.523E-02	2.735E-02
C3	5.416E-02	2.579E-02	3.305E-02	2.613E-02	2.871E-02	1.835E-02	2.599E-02	1.898E-02	

Tabla 95: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Error estándar de la pendiente (m) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo

Modelo	Valor de b=término independiente de la recta								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	0.0481	0.0180	0.0287	0.0161	0.0129	0.0079	0.0097	0.0069	0.0089
V17	0.0644	0.0122	0.0210	0.0116	0.0106	0.0063	0.0064	0.0041	
V14	0.0495	0.0180	0.0286	0.0161	0.0125	0.0078	0.0096	0.0069	0.0088
V18		0.0132	0.0183	0.0084		0.0071	0.0064	0.0047	
M1	0.0454	0.0184	0.0280	0.0158	0.0111	0.0083	0.0095	0.0072	0.0086
M4	0.0697	0.0138	0.0167	0.0086	0.0060	0.0082	0.0029	0.0054	
C1	0.0675	0.0182	0.0330	0.0206	0.0161	0.0073	0.0139	0.0064	0.0175
C3	0.0637	0.0177	0.0290	0.0164	0.0162	0.0094	0.0136	0.0099	

Tabla 96: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor del término independiente (b) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo

Modelo	Error estándar de b=término independiente de la recta								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	2.180E-02	1.824E-02	2.188E-02	1.537E-02	1.214E-02	1.130E-02	1.058E-02	1.081E-02	1.186E-02
V17	2.599E-02	1.871E-02	2.557E-02	1.890E-02	1.258E-02	1.136E-02	1.107E-02	1.094E-02	
V14	2.208E-02	1.822E-02	2.186E-02	1.535E-02	1.198E-02	1.131E-02	1.056E-02	1.080E-02	1.180E-02
V18		1.857E-02	2.539E-02	1.878E-02		1.134E-02	1.084E-02	1.090E-02	
M1	2.124E-02	1.843E-02	2.164E-02	1.524E-02	1.137E-02	1.160E-02	1.049E-02	1.106E-02	1.163E-02
M4	2.681E-02	1.874E-02	2.564E-02	1.966E-02	1.288E-02	1.161E-02	1.170E-02	1.114E-02	
C1	2.516E-02	1.833E-02	2.339E-02	1.729E-02	1.357E-02	1.088E-02	1.261E-02	1.040E-02	1.649E-02
C3	2.456E-02	1.810E-02	2.200E-02	1.552E-02	1.358E-02	1.236E-02	1.250E-02	1.296E-02	

Tabla 97: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Error estándar del término independiente (b) de la recta de ajuste entre los valores observados experimentalmente para cada sustrato y los simulados por cada modelo

6 Modelo de porosidad logarítmico normal

	Suma de cuadrados de falta de ajuste (Lofit)								
	Modelo V12	Modelo V17	Modelo V14	Modelo V18	Modelo M1	Modelo M4	Modelo C1	Modelo C3	Total
Sustrato 1	2.6810E-02	4.8846E-02	2.8205E-02		2.4066E-02	5.4315E-02	4.6057E-02	4.2239E-02	2.7054E-01
Sustrato 2	1.6523E-02	1.7540E-02	1.6503E-02	1.7172E-02	1.7148E-02	1.7715E-02	1.6825E-02	1.6135E-02	1.3556E-01
Sustrato 3	2.1187E-02	3.2649E-02	2.1125E-02	3.1870E-02	2.0381E-02	3.2747E-02	2.6406E-02	2.1600E-02	2.0796E-01
Sustrato 4	1.6441E-02	3.2901E-02	1.6331E-02	3.2110E-02	1.5798E-02	3.6956E-02	2.5808E-02	1.7089E-02	1.9343E-01
Sustrato 5	6.8878E-03	7.6798E-03	6.5456E-03		5.6409E-03	8.1625E-03	1.0160E-02	1.0176E-02	5.5253E-02
Sustrato 6	8.2403E-03	8.3039E-03	8.2641E-03	8.2820E-03	8.9681E-03	8.9682E-03	7.2590E-03	1.0861E-02	6.9146E-02
Sustrato 7	5.3384E-03	6.3316E-03	5.2856E-03	5.7929E-03	5.1130E-03	7.8122E-03	1.0685E-02	1.0362E-02	5.6721E-02
Sustrato 8	5.2235E-03	5.4464E-03	5.2079E-03	5.3454E-03	5.7964E-03	5.8942E-03	4.3248E-03	1.0469E-02	4.7708E-02
Sustrato 9	2.0953E-02	2.1934E-01	2.0526E-02		1.9427E-02	2.1498E-01	6.0063E-02	1.2143E-01	6.7672E-01
Total	1.2760E-01	3.7904E-01	1.2799E-01	1.0057E-01	1.2234E-01	3.8755E-01	2.0759E-01	2.6036E-01	1.7130E+00

Tabla 98 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores de la suma de cuadrados de falta de ajuste (Lofit), para los ajustes de cada modelo a cada sustrato. Totales para cada modelo y para cada sustrato y total del ensayo

Modelo	Análisis de la falta de ajuste de los modelos							
	Caso A: Considerando los 69 ajustes			Caso B: Sin ajustes de modelos V17, M4 y C3 a sustrato 9				% reduc SC
	SC Lofit	CM Lofit	RCM Lofit	Modelo	SC Lofit	CM Lofit	RCM Lofit	
V12	1.2760E-01	4.4617E-04	2.1123E-02	V12	1.2760E-01	4.4617E-04	2.1123E-02	0.00
V17	3.7904E-01	1.3253E-03	3.6405E-02	V17	1.5970E-01	6.2873E-04	2.5075E-02	57.87
V14	1.2799E-01	4.4753E-04	2.1155E-02	V14	1.2799E-01	4.4753E-04	2.1155E-02	0.00
V18	1.0057E-01	5.3213E-04	2.3068E-02	V18	1.0057E-01	5.3213E-04	2.3068E-02	0.00
M1	1.2234E-01	4.2925E-04	2.0718E-02	M1	1.2234E-01	4.2925E-04	2.0718E-02	0.00
M4	3.8755E-01	1.3551E-03	3.6811E-02	M4	1.7257E-01	6.7941E-04	2.6065E-02	55.47
C1	2.0759E-01	7.2583E-04	2.6941E-02	C1	2.0759E-01	7.2583E-04	2.6941E-02	0.00
C3	2.6036E-01	9.1035E-04	3.0172E-02	C3	1.3893E-01	5.4697E-04	2.3387E-02	46.64
Total	1.7130E+00	7.8220E-04	2.7968E-02	Total	1.1573E+00	5.5266E-04	2.3509E-02	32.44

Tabla 99 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Falta de ajuste de los modelos. Valores para cada modelo de la SC_{Lofit} , CM_{Lofit} y RCM_{Lofit} .

	Análisis de la falta de ajuste de los sustratos							
	Caso A: Considerando los 69 ajustes			Caso B: Sin ajustes de modelos V17, M4 y C3 a sustrato 9			% reduc SC	
	SC Lofit	CM Lofit	RCM Lofit	SC Lofit	CM Lofit	RCM Lofit		
Sustrato 1	2.7054E-01	1.1711E-03	3.4222E-02	Sustrato 1	2.7054E-01	1.1711E-03	3.4222E-02	0.00
Sustrato 2	1.3555E-01	5.8425E-04	2.4171E-02	Sustrato 2	1.3555E-01	5.8425E-04	2.4171E-02	0.00
Sustrato 3	2.0797E-01	8.6653E-04	2.9437E-02	Sustrato 3	2.0797E-01	8.6653E-04	2.9437E-02	0.00
Sustrato 4	1.9339E-01	7.5543E-04	2.7485E-02	Sustrato 4	1.9339E-01	7.5543E-04	2.7485E-02	0.00
Sustrato 5	5.5252E-02	2.4777E-04	1.5741E-02	Sustrato 5	5.5252E-02	2.4777E-04	1.5741E-02	0.00
Sustrato 6	6.9108E-02	2.6177E-04	1.6179E-02	Sustrato 6	6.9108E-02	2.6177E-04	1.6179E-02	0.00
Sustrato 7	5.6741E-02	2.1493E-04	1.4660E-02	Sustrato 7	5.6741E-02	2.1493E-04	1.4660E-02	0.00
Sustrato 8	4.7709E-02	1.8636E-04	1.3651E-02	Sustrato 8	4.7709E-02	1.8636E-04	1.3651E-02	0.00
Sustrato 9	6.7677E-01	3.0213E-03	5.4966E-02	Sustrato 9	1.2102E-01	9.4549E-04	3.0749E-02	82.12
Total	1.7130E+00	7.8220E-04	2.7968E-02	Total	1.1573E+00	5.5266E-04	2.3509E-02	32.44

Tabla 100 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Falta de ajuste de los modelos. Valores para cada sustrato de la SC_{Lofit} , CM_{Lofit} y RCM_{Lofit} .

Tensión	Análisis de la falta de ajuste para los distintos valores de tensiones							
	Caso A: Considerando los 69 ajustes			Caso B: Sin ajustes de modelos V17, M4 y C3 a sustrato 9			% reduc SC	
	SC Lofit	CM Lofit	RCM Lofit	Tensión	SC Lofit	CM Lofit		RCM Lofit
0	2.0597E-01	1.0350E-03	3.2172E-02	0	1.2163E-01	6.4018E-04	2.5302E-02	40.95
2	1.8898E-01	9.1738E-04	3.0288E-02	2	1.1838E-01	6.0092E-04	2.4514E-02	37.36
4	9.8724E-02	5.5777E-04	2.3617E-02	4	9.4751E-02	5.5410E-04	2.3539E-02	4.02
6	1.6211E-01	8.4872E-04	2.9133E-02	6	1.5896E-01	8.7339E-04	2.9553E-02	1.94
8	5.9260E-02	2.9779E-04	1.7257E-02	8	2.9315E-02	1.5429E-04	1.2421E-02	50.53
10	2.7616E-01	1.3877E-03	3.7252E-02	10	2.7264E-01	1.4349E-03	3.7880E-02	1.27
16	1.4228E-01	6.8734E-04	2.6217E-02	16	9.5425E-02	4.8195E-04	2.1953E-02	32.93
20	2.3040E-01	1.1130E-03	3.3362E-02	20	1.4975E-01	7.5633E-04	2.7502E-02	35.00
30	9.3753E-02	4.5291E-04	2.1282E-02	30	4.2540E-02	2.1485E-04	1.4658E-02	54.63
50	1.9367E-01	1.0140E-03	3.1843E-02	50	4.7129E-02	2.5895E-04	1.6092E-02	75.67
100	6.1718E-02	2.9815E-04	1.7267E-02	100	2.6749E-02	1.3510E-04	1.1623E-02	56.66
Total	1.7130E+00	7.8220E-04	2.7968E-02	Total	1.1573E+00	5.5266E-04	2.3509E-02	32.44

Tabla 101 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Falta de ajuste de los modelos. Valores para cada tensión de la SC_{Lofit} , CM_{Lofit} y RCM_{Lofit} . Valor de tensión expresado en cm de columna de agua

6 Modelo de porosidad logarítmico normal

Modelo	Nivel de significación α para Test F del ajuste								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	1.40E-03	1.24E-03	6.72E-04	1.33E-02	2.83E-03	1.65E-04	3.19E-02	3.30E-02	5.91E-03
V17	6.75E-06	7.97E-04	1.64E-05	7.87E-05	1.30E-03	1.55E-04	1.27E-02	2.67E-02	
V14	9.54E-04	1.25E-03	6.87E-04	1.38E-02	4.00E-03	1.61E-04	3.35E-02	3.35E-02	6.73E-03
V18		9.33E-04	2.06E-05	9.79E-05		1.58E-04	2.09E-02	2.94E-02	
M1	3.05E-03	9.43E-04	9.01E-04	1.66E-02	4.72E-03	7.76E-05	3.94E-02	1.93E-02	9.43E-03
M4	2.21E-06	7.41E-04	1.60E-05	2.68E-05	8.17E-04	7.76E-05	3.35E-03	1.76E-02	
C1	1.22E-05	1.08E-03	1.12E-04	6.14E-04	1.35E-04	4.82E-04	3.08E-04	7.71E-02	5.49E-07
C3	2.86E-05	1.46E-03	5.79E-04	1.06E-02	1.33E-04	1.24E-05	3.97E-04	3.40E-04	

Tabla 102 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Nivel de significación α para el test F de la falta de ajuste entre los datos experimentales y los modelos considerados.

Modelo	Valor absoluto de los residuos								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	2.87E-02	2.06E-02	2.42E-02	2.33E-02	1.38E-02	1.25E-02	1.33E-02	1.31E-02	2.42E-02
V17	2.91E-02	2.20E-02	2.88E-02	2.89E-02	1.36E-02	1.25E-02	1.36E-02	1.35E-02	
V14	2.92E-02	2.06E-02	2.41E-02	2.33E-02	1.37E-02	1.25E-02	1.33E-02	1.30E-02	2.41E-02
V18		2.16E-02	2.85E-02	2.85E-02		1.25E-02	1.34E-02	1.34E-02	
M1	2.74E-02	2.09E-02	2.37E-02	2.32E-02	1.29E-02	1.30E-02	1.30E-02	1.33E-02	2.40E-02
M4	3.04E-02	2.20E-02	2.90E-02	2.99E-02	1.36E-02	1.30E-02	1.43E-02	1.35E-02	
C1	2.80E-02	2.06E-02	2.69E-02	2.56E-02	1.46E-02	1.20E-02	1.56E-02	1.28E-02	3.56E-02
C3	2.84E-02	2.10E-02	2.43E-02	2.36E-02	1.49E-02	1.47E-02	1.59E-02	1.67E-02	

Tabla 103: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor absoluto de los residuos para cada sustrato y modelo

6.3.4.2.2.1.1 Valor medio de los residuos

Se han obtenido los valores de la media y de la desviación estándar de los residuos obtenidos para cada ajuste de los valores experimentales de cada sustrato a cada modelo. Se consideran los 66 ajustes válidos, es decir, la combinación de los 9 sustratos por los 8 modelos, excepto los ajustes del modelo V18 a los datos experimentales de los sustratos 1, 5 y 9, y los ajustes de los datos experimentales del sustrato 9 a los modelos V17, M4 y C3.

En cada uno de los 66 ajustes mencionados, el valor de la media de los residuos es del orden de 10^{-5} o inferior. El valor de la desviación estándar es del orden de 10^{-2} . Con estos valores de la media y la desviación estándar, el valor de $\alpha=P(z\leq 0)$ es próximo a 0.5, en cualquier caso comprendido en un intervalo $0.01 < \alpha < 0.9$.

6.3.4.2.2.1.2 Valor medio de los valores absolutos de los residuos

En la Tabla 103 se detallan las medias de los valores absolutos de los residuos obtenidos en los ocho ajustes realizados con cada uno de los nueve sustratos. En los sustratos 5, 6, 7 y 8, este valor es ligeramente superior a 0.01, es decir, el error cometido es entre 1% y 2%. En los sustratos 1, 2, 3 y 4, el error aumenta hasta el 2-3%. En el caso del sustrato 9, el error depende en gran medida del modelo empleado: oscila alrededor de 2.4% para los modelos V12, V14 y M1, y es ligeramente superior a 3.5% para el modelo C1. No se consideran los modelos V17, V18, M4 y C3 para el sustrato 9, ni los sustratos 1 y 5 para el modelo V18 por falta de convergencia.

6.3.4.2.2.1.3 Análisis de varianza de los residuos considerando los tres factores de variación

Para estudiar la incidencia de los tres factores considerados, modelo, sustrato y tensión de humedad, se ha hecho el análisis de varianza considerando como fuentes de variación estos tres factores y las correspondientes interacciones. El resultado se muestra en la Tabla 104.

El valor de R^2 es 0.6074 y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error es $1.89 \cdot 10^{-2}$. El valor de la media es muy próximo a cero, por lo que el coeficiente de variación no resulta representativo de la fiabilidad del ensayo. El valor de R^2 indica que de la variabilidad total del ensayo, medida como suma de cuadrados, el 60.74% se debe a los factores considerados en el ensayo. El 39.26% restante es debido a factores aleatorios no controlados en el ensayo. Consecuencia de esta fuerte incidencia de los factores aleatorios, es el valor de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error. Su valor corresponde a un 1.89% del volumen total de la muestra, que lo podemos considerar elevado.

De los tres factores de variación considerados, en dos de ellos, sustrato y modelo, el valor de α es próximo a 1, mientras que en el tercero, tensión, $\alpha \ll 0.01$.

Es lógico que no se presenten diferencias significativas entre sustratos ni entre modelos. Como ya se ha visto anteriormente, el valor medio de los residuos para todas las combinaciones sustrato* modelo está muy próximo a cero. El valor medio para cada uno de los sustratos y para cada uno de los modelos corresponde al valor medio de varios valores próximos a cero, que necesariamente han de ser también próximo a cero.

El tercer factor de variación considerado es la tensión, que presenta diferencias significativas. En el ajuste de los datos experimentales al modelo matemático, la tensión de humedad interviene como variable independiente. El ajuste por mínimos cuadrados hace mínima la suma de los cuadrados de las diferencias entre valores observados y calculados (residuos), para todo el intervalo de variación de la variable independiente. Esto da lugar a una suma de residuos próxima a cero para todo el intervalo. Cuando se considera cada uno de los valores de la variable independiente, la suma de residuos proporciona valores positivos o negativos distanciados de cero, que son la causa de la significación del factor tensión.

Como resultado de la interacción de los tres factores se tiene un efecto interacción triple y tres efectos interacción doble. El valor de α para la interacción triple es próximo a 1, al igual que para la interacción doble modelo* sustrato. Los valores de α para las interacciones dobles modelo* tensión y tensión* sustrato son inferiores a 0.01.

La no significación de la interacción modelo* sustrato implica que la evolución de los residuos de los diferentes modelos sigue un patrón común para todos los sustratos, y viceversa, la evolución de los residuos de los diferentes sustratos sigue un patrón común de comportamiento para los diferentes modelos.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Ensayo	725	1.15683	0.00159	4.47	0.0001	
Modelo	7	0.00076	0.00010	0.30	0.9529	$2.815 \cdot 10^{-3}$
Tensión	10	0.33839	0.03384	94.81	0.0001	$3.274 \cdot 10^{-3}$
Mod*Ten	70	0.04198	0.00060	1.68	0.0004	
Sustrato	8	0.00080	0.00010	0.28	0.9722	$3.028 \cdot 10^{-3}$
Mod*Sus	50	0.00050	0.00001	0.03	1.0000	
Ten*Sus	80	0.61050	0.00763	21.38	0.0001	
Mo*Te*Su	500	0.14188	0.00028	0.79	0.9992	
Error	2095	0.74776	0.0003569			
Total	2820	1.90460				
$R^2 = 0.6074$		$RCME = 1.89 \cdot 10^{-2}$		$Media = -0.04 \cdot 10^{-2}$		

Tabla 104 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza de los residuos considerando los tres factores de variación: modelo, sustrato y tensión

La significación del efecto interacción modelo* tensión implica que la evolución de los residuos de los diferentes modelos no sigue un patrón común para todos los valores de tensión, sino que se puede diferenciar más de uno. De la misma forma, la significación del efecto interacción tensión* sustrato implica que la evolución de los residuos de los diferentes sustratos tampoco sigue un patrón de comportamiento común para todos los valores de tensión, sino que se puede diferenciar más de uno. En ambos casos, el recíproco es también cierto.

Los distintos valores de tensión implican, por tanto, distintos patrones de comportamiento para los distintos sustratos y para los distintos modelos. Esto obliga a hacer el análisis para cada uno de los valores de tensión por separado. Dado que el efecto interacción triple y el efecto interacción doble modelo* sustrato no son significativos, es previsible que

tampoco lo sea la interacción modelo* sustrato para cada uno de los valores de tensión. Si para el conjunto de datos la evolución de los residuos de los diferentes modelos sigue un patrón común de comportamiento para todos los sustratos, es lógico pensar que también habrá un patrón común de comportamiento para cada uno de los valores de tensión.

6.3.4.2.2.1.4 Análisis de varianza del valor absoluto de los residuos considerando los tres factores de variación

El valor absoluto de los residuos proporciona una evaluación del error independiente de su signo. Para estudiar su comportamiento, se ha realizado un análisis de varianza similar al de los residuos. El resultado se presenta en la Tabla 105.

Comparando los resultados de la Tabla 104 y los de la Tabla 105, se observa una disminución de las sumas de cuadrados, tanto la debida a los factores considerados en el ensayo, como la debida a factores aleatorios recogidos en el error. El descenso de la suma de cuadrados debida a los factores considerados en el ensayo se debe al descenso de todas las sumas de cuadrados relacionadas con el factor tensión: tensión, modelo* tensión, sustrato* tensión y modelo* sustrato* tensión. En el resto de las fuentes de variación, se producen ligeros aumentos de la suma de cuadrados.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	α	M.D.S.
Ensayo	725	0.40292	0.00056	2.99	0.0001	
Modelo	7	0.00283	0.00040	2.18	0.0331	2.030*10 ⁻³
Tensión	10	0.07131	0.00713	38.42	0.0001	2.361*10 ⁻³
Mod*Ten	70	0.01428	0.00020	1.10	0.2712	
Sustrato	8	0.11449	0.01431	77.11	0.0001	2.184*10 ⁻³
Mod*Sus	50	0.00698	0.00014	0.75	0.8996	
Ten*Sus	80	0.14068	0.00176	9.47	0.0001	
Mo*Te*Su	500	0.05403	0.00011	0.58	1.0000	
Error	2095	0.38847	0.00019			
Total	2820	0.79177				
		R ² =0.50889	RCME=1.36*10 ⁻²	Media=1.99*10 ⁻²		

Tabla 105 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza del valor absoluto de los residuos considerando los tres factores de variación: modelo, sustrato y tensión

El aumento de las sumas de cuadrados del factor sustrato del factor modelo y de su interacción, indica un aumento de las distancias entre los valores medios de cada uno de los niveles de estos factores y la media global del ensayo.

Cuando se consideran los valores absolutos el valor medio para cada operación de ajuste, se distancia de cero. Los valores medios para cada modelo y para cada sustrato pasan de ser próximos a cero a tener un valor positivo claramente distinto de cero. Esto aumenta la distancia entre los valores medios para cada sustrato y para cada modelo, y entre estos valores medios y la media del ensayo. De esta forma, se explica el aumento de las sumas de cuadrados correspondientes al sustrato, al modelo y a la interacción entre ambos.

El descenso de la suma de cuadrados de la tensión y sus interacciones indica, en términos generales, una disminución de las distancias entre el valor medio de cada uno de los niveles del factor tensión y la media global del ensayo. Dado que el descenso de estas sumas de cuadrados es notable, es de suponer que la disminución de distancias también lo sea.

En el caso de las tensiones, ocurre lo contrario que en los casos de sustrato y modelo. Cuando se emplean los residuos con su signo, los valores medios para cada valor de tensión varían en un amplio intervalo, con valores positivos y negativos distanciados de cero. Cuando se consideran los valores absolutos, los valores negativos pasan a ser positivos y los positivos mantienen su valor. Como consecuencia de ello, la distancia entre los valores medios para cada valor de tensión, y entre éstos y la media del ensayo, disminuyen considerablemente, y con ella las sumas de cuadrados relacionadas con la tensión.

El descenso de la suma de cuadrados del error indica una disminución de la distancia entre residuos de los valores repetidos de cada tratamiento y su correspondiente valor medio.

En algunos tratamientos, se presentan residuos positivos y negativos para los valores repetidos. Cuando se consideran los valores absolutos, todos se consideran positivos, el intervalo de variación disminuye y también la distancia entre cada uno de ellos y el nuevo valor medio. Esto explica la disminución de la suma de cuadrados del error.

El método de cálculo empleado proporciona un valor medio próximo a cero para el ajuste de los datos experimentales de cada sustrato al modelo en cuestión. El valor medio de los residuos correspondientes a cada uno de los valores de la variable independiente del modelo puede ser próximo a cero o estar muy distanciado de este valor. Cuando estos valores son diferentes de cero, en unos casos son positivos y en otros negativos, proporcionando un valor próximo a cero para el valor medio correspondiente a todo el intervalo de la variable independiente. La significación de la falta de ajuste vista anteriormente hace suponer que nos encontramos en este caso.

Como consecuencia de estos cambios, el análisis de varianza presenta algunas diferencias con respecto al anterior. El descenso de la suma de cuadrados del error es menor que la debida a los factores considerados en el ensayo. En consecuencia, el valor de R^2 es inferior, pasando de 0.6074 a 0.5089. Los grados de libertad son los mismos para los residuos que para sus valores absolutos. En consecuencia, el descenso de la SC_{Error} implica el descenso de la RCM_{Error} , que pasa de $1.89 \cdot 10^{-2}$ a $1.36 \cdot 10^{-2}$. Por último, el valor de la media también varía considerablemente, pasando de un valor de 0.0004, que se puede considerar como cero, a $1.99 \cdot 10^{-2}$. Este valor indica que, entre los valores observados y los equivalentes calculados por los diferentes modelos, hay una diferencia media de uno u otro sentido equivalente al 1.99% del volumen total.

Los valores del nivel de significación α presentan dos variaciones con respecto al análisis de varianza de los residuos con su signo (Tabla 104). El valor de α para el factor modelo pasa de un valor de 0.9529 a 0.0331. El primero no es significativo y el segundo está en el intervalo $0.01 < \alpha \leq 0.05$. En el caso del factor sustrato, el valor de α pasa de 0.9722 a 0.0001. El primero no es significativo, mientras que en el segundo, el valor de α es inferior a 0.01. En el caso de la interacción modelo* tensión el valor de α pasa de 0.0004 (< 0.01) a 0.2712 (no significativo). El nivel de significación de las otras fuentes de variación queda como en el caso de los residuos, es decir, la interacción modelo* sustrato y la interacción triple no son significativos. Para el factor tensión y la interacción tensión* sustrato, el valor de α es inferior a 0.01.

El análisis presenta diferencias significativas para cada uno de los tres factores de variación. Respecto a las interacciones, la única que presenta diferencias significativas es la interacción tensión* sustrato. Las interacciones del factor modelo con los otros factores no son significativas, por lo que el análisis de este factor se puede realizar con los valores medios. El test de Duncan, de separación de medias para $\alpha=0.05$, no detecta diferencias entre los valores medios correspondientes a cada modelo. Los valores medios correspondientes a cada modelo se detallan en la última columna de la Tabla 109, variando entre 1.90% y 2.13% del volumen total de la muestra, con una mínima diferencia significativa de 0.21% del volumen total (Tabla 105).

La significación del efecto interacción tensión* sustrato implica que la evolución de los diferentes sustratos no sigue un patrón de comportamiento común para todos los valores de tensión, sino que se puede diferenciar más de uno. Esto obliga a hacer un estudio para cada nivel del factor tensión.

6.3.4.2.2.1.5 Análisis de varianza de los residuos con su signo para cada valor de tensión

La necesidad de hacer estos análisis viene dada por la significación de los efectos interacción modelo* tensión y tensión* sustrato, detallado en el apartado 6.3.4.2.2.1.3. Los resultados de estos análisis se muestran en la Tabla 106.

En los análisis de varianza realizados para cada uno de los valores de tensión, parece que se distinguen dos tipos de comportamiento. Por una parte, los valores bajos de tensión (hasta $h=16$) y por otra, los valores elevados (desde $h=20$ hasta $h=100$).

En el caso de los valores bajos de tensión, el valor de R^2 es bajo en general (inferior a 0.55), el valor de la RCME es elevado ($>1.95 \cdot 10^{-2}$) y, en consecuencia, también son elevados los valores de la MDS (entre $1 \cdot 10^{-2}$ y $1.21 \cdot 10^{-2}$ para los modelos y entre $1.11 \cdot 10^{-2}$ y $1.30 \cdot 10^{-2}$ para los sustratos). Se trata, por tanto, de un grupo en el que el porcentaje de variabilidad explicada por los factores considerados es bajo y la sensibilidad es escasa. Para que el análisis considere diferentes dos valores, la diferencia entre ambos ha de ser elevada. Se presentan dos casos que no responden a este comportamiento. Para las tensiones $h=0$ y $h=6$, el valor de R^2 es más elevado y el valor de RCME más bajo. Es decir, aumenta el porcentaje de variabilidad explicada por el modelo y la sensibilidad del análisis. Estos dos casos son los únicos de las bajas tensiones en los que las diferencias entre modelos son significativas.

Para los valores de tensión más elevados, el valor de R^2 varía en un intervalo amplio, entre 0.41 y 0.71. Los valores de la RCME oscilan entre $1.18 \cdot 10^{-2}$ y $1.73 \cdot 10^{-2}$. En relación con el grupo anterior, aumenta la sensibilidad del análisis. Los valores de la MDS varían entre $0.60 \cdot 10^{-2}$ y $0.86 \cdot 10^{-2}$, para la comparación de modelos, y entre $0.64 \cdot 10^{-2}$ y $0.93 \cdot 10^{-2}$, para la comparación de sustratos. De los valores de tensión considerados en este grupo, las diferencias entre modelos son significativas en dos casos ($h=50$ y $h=100$), y no lo son en los otros dos.

El valor de la media de los residuos oscila en un intervalo muy amplio para las bajas tensiones. Desde $-2.76 \cdot 10^{-2}$ para $h=10$ hasta $+1.59 \cdot 10^{-2}$ para $h=4$, con valores muy próximos a cero para $h=2$ y $h=8$. Para las tensiones altas, el intervalo de variación de los residuos es mucho más pequeño. El valor más alejado de cero corresponde a $h=50,0$ con un valor medio de los residuos de $-0.41 \cdot 10^{-2}$. Para el resto de tensiones de este grupo, el valor medio de los residuos oscila entre $0.07 \cdot 10^{-2}$ y $0.17 \cdot 10^{-2}$.

El nivel de significación es $0.1 < \alpha$ (no significativo) para el valor de tensión 8. Para las tensiones 4 y 16, el nivel de significación es $0.01 < \alpha < 0.05$. En el resto de los casos es $\alpha < 0.01$.

El nivel de significación del factor modelo es $\alpha < 0.01$ para los valores de tensión 0, 50 y 100, $0.05 < \alpha < 0.1$ para $h=6$, y $0.1 < \alpha$ (no significativo), para el resto de los valores de tensión.

El factor sustrato presenta un nivel de significación $\alpha < 0.01$ para todos los valores de tensión.

El nivel de significación para el efecto interacción es $0.1 < \alpha$ para todos los valores de tensión, excepto para $h=50$ ($\alpha < 0.01$) y $h=100$ ($0.05 < \alpha < 0.01$). Por lo tanto, podemos suponer que, para cada valor de tensión, todos los sustratos siguen un mismo patrón de comportamiento para los diferentes modelos, excepto para los valores de tensión $h=50$ y $h=100$. Con la excepción de estos dos últimos casos, esto permite analizar el comportamiento de los modelos para cada uno de los valores de tensión a partir de los valores medios obtenidos para todos los sustratos.

Tensión	α				R^2	\sqrt{MSE}	Media	MDS	
	Total	Modelo	Sustrato	Mo*Su				Modelo	Sustrato
0	0.0001	0.0001	0.0001	0.3710	0.6102	0.0181	-0.0095	0.0090	0.0097
2	0.0001	0.9826	0.0001	0.7080	0.5514	0.0221	0.0005	0.0108	0.0117
4	0.0395	0.5496	0.0001	0.8882	0.3499	0.0195	0.0159	0.0101	0.0111
6	0.0001	0.08168	0.0001	1.0000	0.7239	0.0176	0.0065	0.0089	0.0096
8	0.8934	0.9977	0.0001	1.000	0.2077	0.0242	-0.0004	0.0121	0.0130
10	0.0001	0.9921	0.0001	0.8860	0.4779	0.0211	-0.0276	0.0105	0.0113
16	0.0333	0.9425	0.0001	0.7802	0.3188	0.0218	0.0139	0.0107	0.0115
20	0.0001	0.6360	0.0001	0.9540	0.7081	0.0176	0.0017	0.0086	0.0093
30	0.0001	0.3477	0.0001	1.000	0.4152	0.0173	-0.0010	0.0085	0.0091
50	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.6301	0.0118	-0.0041	0.0060	0.0064
100	0.0001	0.0001	0.0001	0.0890	0.4661	0.0124	0.0007	0.0061	0.0065

Tabla 106: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza de los residuos para cada uno de los niveles del factor tensión

En la Tabla 108 se detallan los valores medios de los residuos correspondientes a los análisis de varianza para cada valor de tensión. En las tensiones 0, 50 y 100, las diferencias entre modelos son significativas, pero, además, para las tensiones 50 y 100, el efecto interacción modelo* sustrato también es significativa, por lo que se debe hacer el análisis para cada uno de los sustratos.

En el caso de la tensión 0, el test de Duncan de separación de medias para $\alpha=0.05$ separa dos grupos de modelos. Por una parte, los modelos V12, V14, M1, C3 y C1 con unos valores de residuos entre $-0.06 \cdot 10^{-2}$ y $-0.71 \cdot 10^{-2}$. Por otra parte, los modelos V18, V17 y M4 con unos residuos entre $-1.98 \cdot 10^{-2}$ y $-2.58 \cdot 10^{-2}$. Las diferencias entre los modelos del mismo grupo no son significativas. Los valores de los residuos de los modelos del primer grupo son significativamente superiores a los del segundo.

6.3.4.2.2.1.6 Análisis de los valores absolutos de los residuos para cada valor de tensión

En la Tabla 107 se detalla el resultado de los análisis de varianza de los valores absolutos de los residuos para cada uno de los valores de tensión.

En el apartado 6.3.4.2.2.1.4, se ha visto que el análisis de varianza de los valores absolutos de los residuos supone, con respecto a los residuos con su signo, un descenso del valor de R^2 y de la RCME. Comparando la Tabla 106 y Tabla 107, se observa el mismo efecto. En ambos casos, se hace un análisis de varianza para cada uno de los valores de tensión. En el primer caso, la variable independiente es el residuo y en el segundo, su valor absoluto. Comparando las dos tablas se observa que este cambio de variable implica un descenso del valor de R^2 y de la RCME. Es decir, se tiene un menor control de la variabilidad del ensayo, pero aumenta su sensibilidad.

Tensión	α				R^2	\sqrt{MSE}	Media	MDS	
	Total	Modelo	Sustrato	Mo*Su				Modelo	Sustrato
0	0.0001	0.0001	0.0001	0.5098	0.5431	0.0144	0.0195	0.0071	0.0077
2	0.0001	0.1185	0.0001	0.9912	0.4907	0.0155	0.0215	0.0076	0.0082
4	0.0001	0.1259	0.0001	1.0000	0.5142	0.0123	0.0212	0.0064	0.0070
6	0.0001	0.8876	0.0001	1.0000	0.5710	0.0140	0.0231	0.0071	0.0076
8	0.9966	1.0000	0.0003	1.000	0.1597	0.0154	0.0185	0.0077	0.0082
10	0.0001	0.9717	0.0001	0.8840	0.4516	0.0187	0.0303	0.0093	0.0100
16	0.0001	0.6052	0.0001	0.8902	0.4839	0.0142	0.0207	0.0069	0.0075
20	0.0001	0.6248	0.0001	0.4341	0.5554	0.0119	0.0237	0.0058	0.0063
30	0.6671	0.9966	0.0001	1.000	0.2299	0.0131	0.0148	0.0064	0.0069
50	0.0012	0.8860	0.0001	0.1561	0.3914	0.0088	0.0141	0.0044	0.0048
100	0.0001	0.2277	0.0001	0.2930	0.4389	0.0081	0.0113	0.0040	0.0043

Tabla 107: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza del valor absoluto de los residuos para cada uno de los niveles del factor tensión

Al igual que en el caso de los residuos con su signo, los análisis de varianza del valor absoluto distingue entre las bajas tensiones (entre $h=0$ y $h=16$) y las tensiones de humedad elevadas (desde $h=20$ hasta $h=100$), sobre todo en lo relativo a la sensibilidad.

Para las bajas tensiones la RCME, oscila entre $1.40 \cdot 10^{-2}$ y $1.87 \cdot 10^{-2}$. Las MDS varían entre $0.69 \cdot 10^{-2}$ y $0.93 \cdot 10^{-2}$ para la comparación de modelos, y entre $0.75 \cdot 10^{-2}$ y $1.00 \cdot 10^{-2}$ para la comparación de sustratos. Para las altas tensiones, estos valores varían entre $0.81 \cdot 10^{-2}$ y $1.19 \cdot 10^{-2}$ para RCME, entre $0.40 \cdot 10^{-2}$ y $0.58 \cdot 10^{-2}$ para la MDS entre modelos, y entre $0.43 \cdot 10^{-2}$ y $0.63 \cdot 10^{-2}$ para la MDS entre sustratos. Se presentan únicamente dos excepciones a este comportamiento. En el grupo de bajas tensiones, para $h=4$, el valor de la RCME es menor que la del resto del grupo, y en consecuencia la sensibilidad es mayor. En el grupo de altas tensiones, para $h=30$, el valor de la RCME es mayor que el resto del grupo, y por lo tanto la sensibilidad menor.

La media de los valores absolutos de los residuos oscila alrededor de $2 \cdot 10^{-2}$ para el intervalo de bajas tensiones. Únicamente para la tensión 10 este valor es sensiblemente superior, sobrepasando ligeramente $3 \cdot 10^{-2}$. Para el resto de valores de tensión, la media varía entre $1.85 \cdot 10^{-2}$ y $2.31 \cdot 10^{-2}$. En el caso de las altas tensiones, esta media es sensiblemente inferior. Solo en el caso de $h=20$ el valor de la media es superior a $2 \cdot 10^{-2}$. En el resto de los casos, varía entre $1.13 \cdot 10^{-2}$ y $1.48 \cdot 10^{-2}$.

El nivel de significación es $0.1 < \alpha$ (no significativo) para los valores de tensión 8 y 30. En el resto de los casos es $\alpha < 0.01$.

El nivel de significación del factor modelo es $\alpha < 0.01$ para $h=0$, y $0.1 < \alpha$ (no significativo), para el resto de los valores de tensión.

El factor sustrato presenta un nivel de significación $\alpha < 0.01$ para todos los valores de tensión.

El nivel de significación para el efecto interacción es $0.1 < \alpha$ para todos los valores de tensión. Por lo tanto, podemos suponer que para cada valor de tensión todos los sustratos siguen un mismo patrón de comportamiento para los diferentes modelos. Esto permite analizar el comportamiento de los modelos para cada uno de los valores de tensión a partir de los valores medios obtenidos para todos los sustratos.

En la Tabla 109 se detallan los valores medios de los valores absolutos de los residuos correspondientes a los análisis de varianza para cada valor de tensión. El valor $h=0$ es el único caso en el que las diferencias entre modelos son significativas.

Se ha aplicado el test de Duncan de separación de medias para $\alpha=0.05$. Aunque la separación en este caso no es tan nítida, como en el análisis de residuos, se presenta una clara diferencia entre los modelos M4, V17 y V18, por un lado, y los modelos V14, V12 y M1 por otro. Los modelos C1 y C3, presentan una situación intermedia.

Los valores para los modelos V17, V18 y M4 varían entre $2.34 \cdot 10^{-2}$ y $2.80 \cdot 10^{-2}$, y son significativamente superiores a los valores de los modelos V12, V14 y M1, que varían entre $1.48 \cdot 10^{-2}$ y $1.52 \cdot 10^{-2}$. Los modelos C1 ($2.04 \cdot 10^{-2}$) y C3 ($1.60 \cdot 10^{-2}$) se presentan en una situación intermedia. Las diferencias de C1 con el resto de los modelos no son significativas. El valor para el modelo C3 es significativamente inferior al de los modelos M4 y V17, pero las diferencias con el resto de modelos no son significativas.

6 Modelo de porosidad logarítmico normal

	0	2	4	6	8	10	16	20	30	50	100	Media
α	0.0001	0.9826	0.5496	0.8168	0.9951	0.9921	0.9425	0.6360	0.3477	0.0001	0.0001	
V12	-6.33E-04 a	-5.20E-04	1.21E-02	3.60E-03	1.19E-04	-2.74E-02	1.54E-02	6.83E-03	1.28E-03	-5.71E-03 b	-4.63E-03 b	4.05E-05
V14	-8.79E-04 a	-4.05E-04	1.21E-02	3.51E-03	3.61E-04	-2.70E-02	1.54E-02	6.66E-03	1.06E-03	-5.81E-03 b	-4.58E-03 b	4.12E-05
M1	-1.02E-03 a	-8.86E-04	1.22E-02	3.78E-03	1.00E-04	-2.75E-02	1.51E-02	6.57E-03	1.28E-03	-7.89E-03 b	-1.31E-03 b	3.06E-05
V17	-2.41E-02 b	3.57E-03	2.06E-02	8.83E-03	-4.29E-04	-2.70E-02	1.34E-02	-2.85E-03	-2.56E-03	-5.38E-03 b	5.53E-03 a	-9.41E-04
V18	-1.98E-02 b	-9.81E-03	1.53E-02	1.73E-02	2.06E-03	-2.50E-02	1.45E-02	-3.02E-03	-2.64E-03	-7.29E-03 b	5.35E-03 a	-1.19E-03
M4	-2.58E-02 b	3.80E-03	2.18E-02	9.71E-03	-1.26E-04	-2.73E-02	1.22E-02	-4.43E-03	-4.76E-03	-7.52E-03 b	1.03E-02 a	-1.11E-03
C1	-7.09E-03 a	3.70E-03	1.88E-02	5.32E-03	-1.10E-03	-3.02E-02	1.11E-02	1.46E-03	-1.46E-03	5.01E-03 a	-1.20E-03 b	3.90E-04
C3	-3.65E-03 a	1.82E-03	1.51E-02	4.25E-03	-3.88E-03	-2.88E-02	1.44E-02	-5.46E-04	2.06E-03	1.04E-03 a	-1.26E-03 b	5.56E-05

Tabla 108: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro: Valor medio de los residuos de cada modelo para cada valor de tensión. Obtenidos como media de los valores obtenidos para cada sustrato.

	0	2	4	6	8	10	16	20	30	50	100	Media
α	0.0001	0.1185	0.1259	0.8876	1.0000	0.9717	0.6052	0.6248	0.9966	0.8860	0.1492	
V12	1.51E-02 c	1.80E-02	1.88E-02	2.16E-02	1.93E-02	2.95E-02	2.30E-02	2.38E-02	1.55E-02	1.35E-02	1.34E-02	1.92E-02
V14	1.52E-02 c	1.82E-02	1.88E-02	2.17E-02	1.93E-02	2.93E-02	2.30E-02	2.38E-02	1.55E-02	1.36E-02	1.34E-02	1.93E-02
M1	1.48E-02 c	1.82E-02	1.86E-02	2.12E-02	1.88E-02	2.99E-02	2.31E-02	2.33E-02	1.45E-02	1.40E-02	1.21E-02	1.90E-02
V17	2.63E-02 a	2.33E-02	2.35E-02	2.51E-02	1.78E-02	2.98E-02	1.90E-02	2.10E-02	1.31E-02	1.31E-02	1.06E-02	2.02E-02
V18	2.34E-02 ab	1.74E-02	1.78E-02	2.62E-02	1.82E-02	2.88E-02	2.27E-02	2.38E-02	1.43E-02	1.41E-02	1.03E-02	1.97E-02
M4	2.80E-02 a	2.41E-02	2.38E-02	2.41E-02	1.77E-02	3.00E-02	1.80E-02	2.16E-02	1.39E-02	1.42E-02	1.21E-02	2.07E-02
C1	2.04E-02abc	2.60E-02	2.63E-02	2.39E-02	1.82E-02	3.28E-02	1.87E-02	2.86E-02	1.64E-02	1.43E-02	8.80E-03	2.13E-02
C3	1.60E-02 bc	2.61E-02	2.13E-02	2.26E-02	1.84E-02	3.21E-02	1.92E-02	2.32E-02	1.47E-02	1.62E-02	9.51E-03	1.99E-02

Tabla 109: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro: Evaluación del modelo: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor medio del valor absoluto de los residuos de cada modelo para cada valor de tensión. Obtenidos como media de los valores obtenidos para cada sustrato.

6 Modelo de porosidad logarítmico normal

	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9	Media
α	0.0011	0.0032	0.0029	0.1896	0.9228	0.1257	0.0498	0.0787	0.0942	
V12	-2.86E-02 c	-1.48E-02 b	-3.51E-04 b	-7.90E-03	4.92E-03	-7.52E-03	1.41E-02 b	-6.70E-03 ab	-5.45E-03 a	-5.82E-03
V14	-2.94E-02 c	-1.51E-02 b	-5.69E-04 b	-8.17E-03	4.85E-03	-7.53E-03	1.42E-02 b	-6.53E-03 ab	-4.97E-03 a	-5.92E-03
M1	-2.11E-02 bc	-1.96E-02 b	-4.90E-03 bc	-1.34E-02	2.89E-03	-1.04E-02	1.34E-02 b	-9.46E-03 b	-1.06E-02 ab	-8.13E-03
V17	-4.60E-03 ab	-1.82E-02 b	-1.36E-02 bc	-1.72E-02	6.14E-03	-8.30E-03	1.57E-02 b	-8.28E-03 ab		-6.04E-03
V18		-1.78E-02 b	-1.25E-02 bc	-1.66E-02		-7.97E-03	1.51E-02 b	-7.84E-03 ab		-7.94E-03
M4	-5.84E-03 ab	-2.19E-02 b	-1.57E-02 c	-2.13E-02	4.91E-03	-1.04E-02	1.50E-02 b	-1.06E-02 b		-8.22E-03
C1	6.87E-03 a	4.16E-03 a	1.58E-02 a	1.72E-02	6.18E-03	4.04E-03	2.06E-02 ab	5.09E-03 a		9.99E-03
C3	1.03E-02 a	-1.56E-02 b	1.37E-03 b	5.08E-03	1.19E-02	-1.71E-02	2.66E-02 a	-1.84E-02 b	-3.24E-02 b	-3.12E-03
Media	-1.03E-02	-1.49E-02	-3.81E-03	-7.79E-03	5.97E-03	-8.14E-03	1.68E-02	-7.84E-03	-1.33E-02	

Tabla 110: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Tensión 50 cm de columna de agua. Valor medio de los residuos de cada modelo para cada sustrato.

	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9	Media
α	0.0001	0.9986	0.2487	0.1917	0.0729	0.3878	0.0298	0.9822	0.9852	
V12	-3.14E-02 c	3.21E-03	-5.16E-03	-6.90E-04	-1.30E-02	4.06E-03	-9.58E-03 b	5.20E-03	5.67E-03	-4.63E-03
V14	-3.22E-02 c	3.38E-03	-4.97E-03	-2.60E-04	-1.26E-02	4.06E-03	-9.01E-03 b	5.08E-03	5.30E-03	-4.58E-03
M1	-2.31E-02 c	5.17E-03	-4.22E-03	2.88E-03	-1.08E-02	5.93E-03	-4.18E-03 b	7.36E-03	9.14E-03	-1.31E-03
V17	1.32E-02 a	5.43E-03	8.59E-03	1.79E-02	-6.83E-03	4.50E-03	-4.65E-03 b	6.14E-03		5.53E-03
V18		5.08E-03	7.09E-03	1.58E-02		4.31E-03	-5.99E-03 b	5.84E-03		5.35E-03
M4	2.18E-02 a	6.96E-03	1.11E-02	2.46E-02	6.10E-04	5.94E-03	3.49E-03 a	8.11E-03		1.03E-02
C1	-3.03E-03 b	-1.34E-03	-3.90E-03	-5.08E-03	-2.20E-03		-4.79E-03 b	-1.60E-04	1.01E-02	-1.30E-03
C3	-8.08E-03 b	3.31E-03	-1.93E-03	-3.81E-03	-6.31E-03	7.33E-03	-9.61E-03 b	9.06E-03		-1.25E-03
Media	-8.98E-03	3.90E-03	8.21E-04	6.42E-03	-7.29E-03	5.16E-03	-5.54E-03	5.83E-03	7.56E-03	

Tabla 111: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Tensión 100 cm de columna de agua. Valor medio de los residuos de cada modelo para cada sustrato.

6.3.4.2.2.1.7 Análisis de los valores de los residuos para las tensiones $h=50$ y $h=100$

En el apartado 6.3.4.2.2.1.5, se presentan dos casos en los que la interacción modelo* sustrato es significativa, el correspondiente a $h=50$, con $\alpha=0.0002$, y $h=100$ con $\alpha=0.0890$ (Tabla 106). Esto indica que el patrón de comportamiento de los modelos no es único, sino que varía para los distintos sustratos considerados. Esto hace necesario el estudio del comportamiento de los modelos para cada sustrato.

En la Tabla 112 se muestran los resultados de los análisis de varianza realizados con los valores correspondientes a cada sustrato para las tensiones $h=50$ y $h=100$.

En el caso de la tensión $h=50$, el nivel de significación es $\alpha < 0.01$ para los sustratos 1, 2 y 3, $0.01 < \alpha < 0.05$ para el sustrato 7, y $0.05 < \alpha < 0.1$ para los sustratos 8 y 9. En los casos de los sustratos 4, 5 y 6, el valor de α es superior a 0.1 y por lo tanto las diferencias entre los modelos no son significativas.

Para la tensión $h=100$, únicamente en el caso del sustrato 1, las diferencias entre modelos son significativas ($\alpha < 0.01$). En el resto de los sustratos, el valor de α es superior a 0.1.

Sustrato	Tensión = 50 cm de columna de agua					Tensión = 100 cm de columna de agua				
	α	R^2	\sqrt{MSE}	Media	MDS	α	R^2	\sqrt{MSE}	Media	MDS
1	0.0011	0.6217	0.0136	-0.0103	0.0199	0.0001	0.9214	0.0067	-0.0090	0.0098
2	0.0032	0.6924	0.0061	-0.0148	0.0106	0.9986	0.0246	0.0169	0.0039	0.0247
3	0.0029	0.6963	0.0078	-0.0038	0.0135	0.2487	0.2907	0.0116	0.0008	0.0169
4	0.1896	0.3153	0.0206	-0.0078	0.0344	0.1917	0.3145	0.0180	0.0064	0.0263
5	0.9228	0.0822	0.0102	0.0060	0.0150	0.0729	0.3952	0.0068	-0.0073	0.0101
6	0.1257	0.3491	0.0086	-0.0081	0.0126	0.3878	0.2449	0.0044	0.0045	0.0064
7	0.0498	0.4143	0.0058	0.0168	0.0085	0.0298	0.4458	0.0052	-0.0055	0.0076
8	0.0787	0.3836	0.0088	0.0787	0.0129	0.9822	0.0553	0.0125	0.0058	0.0182
9	0.0942	0.4010	0.0158	-0.0133	0.0244	0.9852	0.0119	0.0221	0.0076	0.0341

Tabla 112: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Análisis de varianza de los residuos para cada uno de los niveles del factor sustrato para los valores de tensión 50 y 100 cm de columna de agua.

En la Tabla 110 se detallan los valores medios de los residuos para cada sustrato correspondientes a la tensión $h=50$. Así mismo, se indica el resultado del test de Duncan de separación de medias para $\alpha=0.05$, correspondiente a cada sustrato. Los valores unidos con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

El test de separación de medias del sustrato 1 parece presentar tres grupos de modelos. Por un lado, C1 y C3 con unos residuos entre $1.02 \cdot 10^{-2}$ y $0.69 \cdot 10^{-2}$. Por otro, V17 y M4 con residuos entre $-0.46 \cdot 10^{-2}$ y $-0.58 \cdot 10^{-2}$. Finalmente los modelos M1, V12 y V14 con residuos entre $-2.11 \cdot 10^{-2}$ y $-2.94 \cdot 10^{-2}$. Las diferencias entre los modelos del primer grupo y los del segundo no son significativas, mientras que las diferencias entre los modelos de los grupos primero y tercero si lo son. Las diferencias entre los modelos del segundo grupo y los del tercero son significativas, excepto para el modelo M1, que no presenta diferencias significativas con ninguno de los modelos del grupo segundo ni del grupo tercero.

Los test de separación de medias de los sustratos 2, 3, 7, 8 y 9 detectan diferencias significativas entre alguno de los modelos cúbicos (C1 y C3) con respecto al resto de los modelos. En el caso del sustrato 2, el residuo del modelo C1 es $0.42 \cdot 10^{-2}$, significativamente superior al residuo del resto de los modelos que varían entre $-0.48 \cdot 10^{-2}$ y $-0.219 \cdot 10^{-2}$. En el sustrato 3, se diferencia el modelo C1 ($1.57 \cdot 10^{-2}$) del resto, cuyos residuos oscilan entre $0.14 \cdot 10^{-2}$ y $-1.57 \cdot 10^{-2}$. La diferencia entre el residuo del modelo M4 con respecto a los modelos C3, V12 y V14 también es significativa. Con los datos del sustrato 7, el residuo del sustrato C3 ($2.66 \cdot 10^{-2}$) es significativamente superior a los residuos de los modelos no cúbicos, que varían entre $1.57 \cdot 10^{-2}$ y $1.34 \cdot 10^{-2}$. En el caso del sustrato 8, las diferencias son menores, solo es significativa la diferencia entre el modelo C1 ($0.51 \cdot 10^{-2}$) y los modelos M1, M4 y C3. Finalmente, en el caso del sustrato 9 intervienen solo cuatro modelos. Los residuos de los modelos V12 ($-0.55 \cdot 10^{-2}$) y V14 ($-0.50 \cdot 10^{-2}$) son significativamente superiores a los del modelo C1 ($-3.24 \cdot 10^{-2}$).

En la Tabla 111 se detallan los valores medios de los residuos para cada sustrato correspondientes a la tensión $h=100$. Al igual que en la Tabla 110, se indica el resultado del test de Duncan de separación de medias para $\alpha=0.05$ correspondiente a cada sustrato.

En este caso, los datos del sustrato 1 son los únicos que presentan diferencias significativas entre modelos. Se establecen tres grupos claramente diferenciados entre sí, con diferencias significativas entre los modelos de diferentes grupos, mientras que las diferencias entre modelos del mismo grupo no son significativas. El primer grupo está formado por los modelos M4 y V17, con residuos entre $2.18 \cdot 10^{-2}$ y $1.32 \cdot 10^{-2}$. En el segundo grupo los residuos son $-0.30 \cdot 10^{-2}$ y $-0.81 \cdot 10^{-2}$ para los modelos C1 y C3, respectivamente. Por último, el tercer grupo está formado por los modelos M1, V12 y V14, y los residuos varían entre $-0.31 \cdot 10^{-2}$ y $-3.22 \cdot 10^{-2}$.

6.3.4.2.3 *Relación entre parámetros equivalentes obtenidos por distintos modelos*

6.3.4.2.3.1 Media de la distribución logarítmico normal

Los valores de la media así como los errores estándar correspondientes se detallan en la Tabla 113. En los sustratos 2, 6 y 8, los valores de la media obtenidos para cada sustrato con los distintos modelos son prácticamente iguales. Lo mismo ocurre con sus correspondientes errores estándar.

Los sustratos 4, 5 y 7 tienen un comportamiento similar. Los valores de las medias y sus correspondientes errores estándar presentan pequeñas variaciones para un mismo sustrato, en función del modelo empleado. Con los valores obtenidos, se observan dos tipos de comportamiento: por una parte, los modelos V12 y V14, y por otra, los modelos

V17 y V18. Las diferencias observadas para cada sustrato corresponden a la diferencia entre estos dos grupos, mientras que las diferencias entre los dos modelos de cada grupo son mínimas.

En el caso del sustrato 3, los valores de la media son muy similares para todos los modelos: en cambio, los errores estándar obtenidos para los modelos V17 y V18 son muy superiores a los obtenidos para los modelos V12 y V14.

El sustrato 1 presenta una clara diferenciación del comportamiento de los dos grupos de modelos mencionados. Los modelos V12 y V14 proporcionan datos muy similares entre sí. Los valores del error estándar son razonables, incluso más bajos que los obtenidos para otros sustratos. El modelo V18 no ha podido converger. El valor de la media obtenido con el modelo V17 es muy diferente del obtenido con los modelos V12 y V14. El valor del error estándar es muy superior al correspondiente a los modelos V12 y V14.

En el caso del sustrato 9, no se produce convergencia con los modelos V17 y V18, por lo que no se dispone de elemento de comparación entre los dos grupos.

Con los valores de la media y sus correspondientes errores estándar se han calculado los intervalos de confianza para los valores de α 0.005-0.995 y 0.025-0.975, correspondientes a un intervalo de 99% y 95% respectivamente.

Sustrato	V12		V14		V17		V18	
	Media	Error estándar	Media	Error estándar	Media	Error estándar	Media	Error estándar
Sustrato1	-0.9761	0.0597	-0.9676	0.0646	-0.2155	0.1419		
Sustrato2	-1.9784	0.0729	-1.9721	0.0740	-1.9660	0.0821	-1.9606	0.0811
Sustrato3	-1.8491	0.0804	-1.8415	0.0816	-1.8690	0.1855	-1.8312	0.1725
Sustrato4	-1.5548	0.0610	-1.5388	0.0632	-1.4076	0.1086	-1.3816	0.1030
Sustrato5	-0.8740	0.0956	-0.8225	0.0945	-0.6942	0.0468		
Sustrato6	-2.1601	0.0476	-2.1564	0.0479	-2.1588	0.0484	-2.1557	0.0480
Sustrato7	-0.8912	0.0641	-0.8375	0.0690	-0.7632	0.0353	-0.7500	0.0344
Sustrato8	-2.1249	0.0401	-2.1206	0.0400	-2.1213	0.0417	-2.1176	0.0411
Sustrato9	-2.2539	0.0275	-2.2525	0.0272				

Tabla 113 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Media de la distribución logarítmico normal y error estándar de estimación de esta media

Para los sustratos 2 a 8, los cuatro intervalos de confianza de cada sustrato se solapan. En los casos de los sustratos 2, 3, 6 y 8, con diferencias muy pequeñas entre los valores de las medias, los cuatro intervalos están centrados. En los casos de los sustratos 4, 5 y 7, en los que se diferencian los dos grupos de modelos, normalmente los valores medios de un grupos están dentro del intervalo de confianza del otro. En todos los casos comentados, sustratos 2 a 8, y para los dos intervalos comentados, 99% y 95%, se produce el solape de los intervalos de confianza.

6.3.4.2.3.2 Desviación estándar de la distribución logarítmico normal

En la Tabla 114 se detallan los valores de la desviación estándar de la distribución logarítmico normal y sus correspondientes errores estándar para los distintos sustratos y modelos considerados.

El comportamiento de este parámetro tiene muchas similitudes con el comentado anteriormente para la media. En los sustratos 2, 6 y 8, los valores obtenidos para la desviación estándar y su error, son muy similares para los cuatro modelos. Las diferencias entre valores disminuyen de forma importante cuando se consideran las parejas de valores V12-V14, por un lado y V17-V18, por otro. Las pequeñas diferencias que se observan en estos sustratos corresponden a las diferencias entre estas dos parejas de modelos.

En los casos de los sustratos 3, 4, 5 y 7, se observan las mismas pautas de comportamiento, es decir, las diferencias de valores observados dentro de cada sustrato corresponden a la diferencia entre la pareja V12-V14 por un lado, y la pareja V17-V18 por otro. Los valores correspondientes a los modelos de una misma pareja son en todos los casos muy similares. Las diferencias, tanto dentro de cada pareja como entre parejas, son mayores para estos sustratos que para los 2, 6 y 8.

En el caso del sustrato 1, se observa una gran diferencia entre los valores obtenidos con los modelos V12-V14 por un lado y con el modelo V17, por otro. Al igual que ocurría en el caso de la media, los errores estándar en el caso de los modelos V12-V14 los podemos considerar normales. El error de estima en el caso del modelo V17 es muy superior a los obtenidos en el resto de los casos.

La no disponibilidad de datos para los modelos V17 y V18 con el sustrato 9, no permite hacer la comparación entre los dos grupos de modelos.

Al igual que en el caso de la media de la distribución logarítmico normal, se han calculado los intervalos de confianza del 99% y 95%.

Sustrato	V12		V14		V17		V18	
	Sigma	Error estándar	Sigma	Error estándar	Sigma	Error estándar	Sigma	Error estándar
Sustrato1	0.3832	0.0809	0.3535	0.0936	1.8030	0.2845		
Sustrato2	0.9509	0.1061	0.9614	0.1108	1.0444	0.0824	1.0387	0.0826
Sustrato3	0.8724	0.1137	0.8824	0.1195	1.4150	0.1692	1.3746	0.1652
Sustrato4	0.8855	0.0899	0.9023	0.0957	1.4138	0.1237	1.3803	0.1244
Sustrato5	0.9905	0.1187	1.0273	0.1185	1.2203	0.0733		
Sustrato6	0.8647	0.0608	0.8678	0.0627	0.8823	0.0465	0.8775	0.0467
Sustrato7	0.8791	0.0822	0.9161	0.0872	1.0365	0.0545	1.0192	0.0577
Sustrato8	0.8175	0.0524	0.8173	0.0536	0.8492	0.0421	0.8431	0.0421
Sustrato9	0.4415	0.0349	0.4388	0.0350				

Tabla 114 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Desviación estándar de la distribución logarítmico normal (sigma) y error estándar de estimación

En el caso del sustrato 1, la situación para los dos casos considerados (99% y 95%) es la misma: los intervalos de los modelos V12 y V14 son coincidentes y están claramente separados del intervalo correspondiente al modelo V17.

En el caso del sustrato 4, los intervalos del 95% forman dos grupos: por una parte los modelos V12-V14 y por otra, los modelos V17-V18. Los dos intervalos de la misma pareja son coincidentes, pero los intervalos de una pareja no se solapan con los de la otra. Cuando los intervalos se amplían al 99%, los intervalos de los modelos V14 y V12 se solapan con los intervalos correspondientes a los modelos V17 y V18. En el resto de los sustratos, 2, 3, 5, 6, 7 y 8, todos los intervalos de confianza se solapan.

6.3.4.2.3.3 Escalado

El siguiente parámetro considerado es el escalado. Los valores obtenidos para el escalado y el error estándar de la estimación se proporcionan en la Tabla 115.

El comportamiento observado en los casos de la media y la desviación estándar de la distribución logarítmico normal también se repite para el caso del escalado. Los comentarios hechos en el caso de la desviación estándar de la distribución normal son válidos para los valores del escalado y sus errores estándar. Se repiten exactamente los mismos comportamientos con los mismos sustratos.

Respecto al solapamiento de los intervalos de confianza, también en este caso es de aplicación la argumentación de la desviación estándar. La única diferencia se presenta en el caso del sustrato 4. En el caso del escalado, con intervalos para el 95%, se forman dos grupos con las parejas de sustratos V12-V14 y V17-V18. Los intervalos de confianza son coincidentes para los dos sustratos de cada pareja, no solapándose los intervalos de los modelos de distinta pareja. Cuando el intervalo se amplía al 99%, únicamente se produce el solape entre los intervalos de confianza de los modelos V14 y V18.

Sustrato	V12		V14		V17		V18	
	Escalado	Error estándar	Escalado	Error estándar	Escalado	Error estándar	Escalado	Error estándar
Sustrato1	0.2446	0.0173	0.2460	0.0192	0.5335	0.0284		0.0000
Sustrato2	0.5185	0.0325	0.5224	0.0337	0.5480	0.0253	0.5466	0.0250
Sustrato3	0.4148	0.0280	0.4181	0.0291	0.5500	0.0468	0.5410	0.0436
Sustrato4	0.4993	0.0260	0.5062	0.0275	0.6603	0.0320	0.6532	0.0306
Sustrato5	0.3549	0.0274	0.3663	0.0259	0.4137	0.0083		0.0000
Sustrato6	0.5049	0.0200	0.5065	0.0205	0.5105	0.0156	0.5095	0.0155
Sustrato7	0.3817	0.0210	0.3963	0.0217	0.4280	0.0070	0.4264	0.0068
Sustrato8	0.5016	0.0170	0.5023	0.0173	0.5116	0.0138	0.5105	0.0136
Sustrato9	0.6490	0.0179	0.6489	0.0178				0.0000

Tabla 115 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Escalado, valor medio y error estándar de estimación

6.3.4.2.3.4 Desplazamiento

Los modelos V12 y V14 estiman el valor de este parámetro a partir de los datos experimentales. Los modelos V17 y V18 lo obtienen como diferencia entre el valor de la porosidad, obtenido experimentalmente, y el valor del escalado, estimado a partir de los

datos experimentales. Como consecuencia de los procesos de cálculos seguidos, los modelos V12 y V14 proporcionan, además del valor del desplazamiento, el correspondiente error de estima. Los modelos V17 y V18 proporcionan el valor del desplazamiento, pero no informan sobre la fiabilidad del dato obtenido.

En la Tabla 116 se proporcionan los valores de desplazamiento obtenidos, junto con los errores estándar en los casos de los modelos V12 y V14.

Al igual que en casos anteriores, se observa un comportamiento diferente para las parejas de modelos V12-V14 y V17-V18. La diferencia entre estos dos grupos es mínima en los sustratos 6, 7 y 8; aumenta ligeramente para los sustratos 2 y 5, y aumenta de forma importante en el caso de los sustratos 1, 3 y 4. En el sustrato 9, no se dispone de datos correspondientes a los modelos V17 y V18.

Sustrato	V12		V14		V17		V18	
	Desplazamiento	Error estándar	Desplazamiento	Error estándar	Desplazamiento	Error estándar	Desplazamiento	Error estándar
Sustrato1	0.3608	0.0082	0.3616	0.0093	0.2985	--	--	--
Sustrato2	0.3634	0.0242	0.3624	0.0247	0.3510	--	0.3524	--
Sustrato3	0.4029	0.0204	0.4023	0.0208	0.3341	--	0.3431	--
Sustrato4	0.3142	0.0160	0.3133	0.0164	0.2579	--	0.2650	--
Sustrato5	0.3433	0.0078	0.3426	0.0078	0.3343	--	--	--
Sustrato6	0.3125	0.0165	0.3124	0.0167	0.3100	--	0.3110	--
Sustrato7	0.3384	0.0066	0.3377	0.0068	0.3324	--	0.3340	--
Sustrato8	0.3291	0.0139	0.3294	0.0139	0.3248	--	0.3259	--
Sustrato9	0.0825	0.0155	0.0830	0.0154	--	--	--	--

Tabla 116 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Desplazamiento, valor medio y error estándar de estimación

Con los valores de los errores estándar obtenidos para los modelos V12 y V14, se han calculado los intervalos de confianza para 95% y 99%. Los valores de desplazamiento obtenidos con los modelos V17 y V18, se han comparado con estos intervalos, comprobando si quedan dentro o fuera de los mismos. En los casos de los sustratos 2, 5, 6, 7 y 8, los valores obtenidos con estos dos últimos modelos quedan fuera del intervalo de confianza de los primeros. En el caso de los sustratos 1, 3 y 4, los valores obtenidos con los modelos V17 y V18 quedan fuera del intervalo de confianza de los valores obtenidos con los modelos V12 y V14. Esta situación se repite con los dos intervalos de confianza considerados, 99% y 95%.

6.3.4.2.3.5 Humedad residual

En la Tabla 117 se detallan los valores medios para el desplazamiento obtenidos con el modelo logarítmico normal. Su comportamiento ya se ha comentado en el apartado 6.3.4.2.3.4. Junto a ellos se presentan los valores medios y error estándar obtenidos para la humedad residual con las dos variantes del modelo de Van Genuchten. Finalmente se añade el valor medio obtenido experimentalmente para el contenido de agua a tensión 100 cm de columna de agua.

Los valores de humedad residual de los modelos de Van Genuchten son, en general, inferiores a los valores obtenidos para el desplazamiento por el modelo logarítmico normal. Los valores de los errores estándar para la humedad residual son más elevados que los correspondientes al desplazamiento del modelo logarítmico normal. Estas diferencias se acentúan considerablemente en el caso del modelo M4.

En el caso del modelo M1, los valores obtenidos son comparables a los obtenidos con los modelos logarítmico normales. En los casos de los sustratos 5 y 7, los valores obtenidos son prácticamente iguales para los cuatro modelos logarítmico normales y para el modelo M1. En los casos de los sustratos 1 y 9, la coincidencia es buena para los modelos V12, V14 y M1. En los sustratos 3 y 4, los valores del modelo M1 son intermedios entre los obtenidos para los modelos V12-V14, por un lado y para los modelos V17-V18, por otro. En los sustratos 2 y 6, el valor correspondiente a M1 es inferior a los obtenidos para los modelos logarítmico normales.

Los errores estándar de la humedad residual para el modelo M1 son, en general, más elevados que los obtenidos para el desplazamiento. En los casos de los sustratos 1, 5, 6 y 9, los errores son similares, pero en el resto son del orden del doble. El error estándar para el desplazamiento oscila entre 0.0066 para el sustrato 7 modelo V12, y 0.0247 para el sustrato 2 modelo V14. En el caso del modelo M1, el error oscila entre 0.0089 para el sustrato 7 y 0.0469 para el sustrato 2, aproximadamente el doble que para el mismo sustrato con el modelo V14.

	V12	V17	V14	V18	M1		M4		Agua 100
	Desplaza- miento	Desplaza- miento	Desplaza- miento	Desplaza- miento	Θ_r	Error estándar	Θ_r	Error estándar	
Sustrato1	0.3608	0.2985	0.3616		0.3524	0.0096	0.2053	0.0853	0.3294
Sustrato2	0.3634	0.3510	0.3624	0.3524	0.3025	0.0469	0.2793	0.0456	0.3935
Sustrato3	0.4029	0.3341	0.4023	0.3431	0.3731	0.0325	0.1922	0.1204	0.4091
Sustrato4	0.3142	0.2579	0.3133	0.2650	0.2855	0.0246	0.1197	0.0848	0.3200
Sustrato5	0.3433	0.3343	0.3426		0.3341	0.0095	0.3008	0.0150	0.3316
Sustrato6	0.3125	0.3100	0.3124	0.3110	0.2599	0.0293	0.2597	0.0247	0.3454
Sustrato7	0.3384	0.3324	0.3377	0.3340	0.3265	0.0089	0.3086	0.0113	0.3294
Sustrato8	0.3291	0.3248	0.3294	0.3259	0.2867	0.0229	0.2800	0.0211	0.3560
Sustrato9	0.0825		0.0830		0.0709	0.0172			0.0895

Tabla 117 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Comparación de los valores de desplazamiento obtenidos con el modelo logarítmico normal y de la humedad residual (Θ_r) obtenida con el modelo de Van Genuchten. Valor medio del desplazamiento (modelo logarítmico normal), valor medio y error estándar para la humedad residual (modelo de Van Genuchten), contenido de humedad del sustrato a tensión 100 cm de columna de agua (experimental).

Los valores de humedad residual obtenidos con el modelo M4 son, en todos los casos, inferiores a los obtenidos con los modelos logarítmico normales, y en general también inferiores a los obtenidos con el modelo M1. Las diferencias entre el valor obtenido con el modelo M4 y los modelos logarítmico normal llega hasta el 0.2 (20% del volumen total del sustratos) para los sustratos 3 y 4; en el caso del sustrato 1, la diferencia es de 0.15. En el resto de los sustratos las diferencias varían entre 0.03 y 0.09. Los errores

estándar son similares a los correspondientes al modelo M1 para los sustratos 2, 5, 6, 7 y 8. Los errores para los sustratos 1, 3 y 4 son muy superiores al resto (mayores de $8 \cdot 10^{-2}$).

Finalmente, se ha considerado como valor de referencia el contenido de humedad a tensión 100 cm de columna de agua. En la metodología de De Boedt, este agua se considera como difícilmente disponible. Para los sustratos 3, 4, 5, 7 y 9, este valor coincide en una buena aproximación, con el calculado por los modelos V12-V14. En los casos de los sustratos 2, 6 y 8, el valor experimental es superior a los calculados por todos los modelos. Solamente en el caso del sustrato 1 el valor experimental es inferior a los obtenidos por algunos modelos, en concreto V12, V14 y M1.

A partir de los valores medios y los errores estándar se han calculado los intervalos de confianza para el 95% y 99%, para la humedad residual de los modelos M1 y M4.

Los valores de desplazamiento calculados con los modelos logarítmico normales están siempre dentro de los límites de confianza de los valores del modelo M1, tanto si se considera el intervalo de 99% como si se reduce al 95%.

Con los valores correspondientes al modelo M4, se presenta la misma situación en el caso de los sustratos 1, 2 y 3. En los casos de los sustratos 5 y 7, los valores obtenidos por los modelos logarítmico normales quedan fuera del intervalo del 95%. Cuando se amplía hasta el 99%, los modelos V17 y V18 quedan dentro del intervalo, mientras que los modelos V12 y V14 continúan fuera. En los sustratos 4, 6 y 8, los valores de los modelos logarítmico normales están dentro del intervalos del 99% del modelo M4. Cuando se reduce al 95%, quedan fuera del intervalo todos los valores de los modelos logarítmico normales excepto los correspondientes a los modelos V17 y V18 en el sustrato 4.

	V12	V17	V14	V18	M1	M4	Experimental
Sustrato1	0.6054	0.8320	0.6076		0.6111	0.8320	0.8320
Sustrato2	0.8819	0.8990	0.8848	0.8990	0.8864	0.8990	0.8990
Sustrato3	0.8177	0.8841	0.8204	0.8841	0.8205	0.8841	0.8841
Sustrato4	0.8135	0.9182	0.8195	0.9182	0.8147	0.9182	0.9182
Sustrato5	0.6982	0.7480	0.7090		0.6831	0.7485	0.7485
Sustrato6	0.8174	0.8205	0.8188	0.8205	0.8204	0.8205	0.8205
Sustrato7	0.7201	0.7604	0.7340	0.7604	0.7108	0.7604	0.7604
Sustrato8	0.8306	0.8364	0.8318	0.8364	0.8325	0.8364	0.8364
Sustrato9	0.7315		0.7319		0.7327		0.9086

Tabla 118 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valores de la porosidad total obtenida con los diferentes modelos. Comparación con los valores obtenidos experimentalmente en laboratorio.

Las grandes diferencias que se dan entre los valores obtenidos con el modelo M4 y los modelos logarítmico normales, hacían pensar que estas serían significativas. La elevada magnitud de los errores estándar hace que los intervalos de confianza sean muy amplios, hasta el punto de absorber estas diferencias.

6.3.4.2.3.6 Porosidad total

Los modelos V17, V18 y M4 incluyen como dato de entrada el valor de la porosidad total obtenido experimentalmente; por ello, los valores de la suma de escalado + desplazamiento, en los modelos V17 y V18, y de la Θ_s en el modelo M4, coinciden con el valor obtenido experimentalmente. Los otros tres modelos considerados, V12, V14 y M1, dan valores equivalentes; las diferencias entre ellos son mínimas, inferiores a 0.01 (1% del volumen total) para todos los casos, excepto para los sustratos 5 y 7, que es próxima a 0,025 (2.5% del volumen total).

Los valores de porosidad obtenidos con los modelos V12, V14 y M1, son siempre inferiores al valor obtenido experimentalmente. La diferencia es mínima para los sustratos 6 y 8 (<0.01) y para el sustrato 2 (0.017). La diferencia entre valores observados y calculados aumenta para los sustratos 3, 5 y 7 hasta 0.05-0.07, y es superior a 0.1 (10% del volumen total) para los sustratos 3 (0.105), 9 (0.189) y 1 (0.226).

6.3.5 *Discusión*

6.3.5.1 Sensibilidad de los valores obtenidos a los valores iniciales del ajuste en el modelo logarítmico normal.

6.3.5.1.1 *Falta de convergencia*

6.3.5.1.1.1 Programas con integral sencilla

En los casos de las variantes V12 y V17 con integral sencilla, se han empleado dos grupos de datos iniciales (1 y 2), que están dentro de los intervalos normales de variación de las variables, otros dos grupos (3 y 4) en los que al menos uno de los valores iniciales está fuera del intervalo de variación normal de la variable, y otro grupo (5) en el que los datos iniciales se toman de un cálculo previo.

Los problemas de convergencia, cuando se presentan, lo hacen con los grupos 3 y 4. Cuando los datos iniciales están dentro de los intervalos normales de variación de las variables, no se presentan problemas de convergencia. El empleo como datos iniciales del resultado de ajustes previos no presenta ninguna ventaja adicional.

Por lo tanto, la elección de los valores iniciales para el proceso de ajuste no presenta grandes problemas. La precisión requerida es baja, basta con que tenga una cifra significativa. Estos valores iniciales deben estar comprendidos dentro del intervalo de variación normal de las variables. Los problemas de convergencia se pueden presentar cuando uno o varios valores iniciales están fuera de los intervalos de variación normales.

6.3.5.1.1.2 Programas con integral doble

En el caso de los programas que incluyen integral doble, la sensibilidad a los valores iniciales aumenta considerablemente. Cuando, como en el caso anterior, se emplean valores iniciales con una sola cifra significativa, normalmente no se produce la convergencia, por lo que es necesario emplear valores más precisos. Los valores obtenidos con los programas de ajuste de integral sencilla proporcionan una buena aproximación para

utilizarlos como valores iniciales de los cálculos de los modelos de integral doble. De esta forma, se reduce a niveles mínimos los casos de falta de convergencia.

Los mejores resultados para los programas de integral doble se obtienen cuando se emplean como datos iniciales del ajuste los valores obtenidos con el programa correspondiente de integral sencilla. Para el programa V14, se deben emplear como datos iniciales los valores de ajuste obtenidos con el programa V12, y para el programa V18 los obtenidos con el programa V17.

6.3.5.1.2 *Presencia de mínimos locales*

Una vez desechados los casos de falta de convergencia, los valores obtenidos para los cuatro parámetros con cada modelo son muy similares, independientemente de los valores iniciales utilizados, con unas diferencias inferiores al error estándar correspondiente.

Como consecuencia, podemos deducir que no se presentan mínimos locales que interfieran en el cálculo del valor de los parámetros del modelo por mínimos cuadrados.

Los problemas de cálculo, cuando se presentan, se deben a la falta de convergencia. En el caso de los modelos de integral simple, no se presenta ningún problema de convergencia cuando se utilizan unos valores iniciales dentro del intervalo de variación normal de los parámetros. En el caso de los modelos de integral doble, estos problemas son más importantes, pero se reducen al mínimo cuando se utilizan como valores iniciales los valores calculados con el modelo equivalente de integral simple.

6.3.5.2 Comparación de modelos

6.3.5.2.1 *Relación datos experimentales – modelos*

6.3.5.2.1.1.1 *Casos considerados y casos desechados por falta de convergencia.*

Para la comparación de los modelos, se consideran inicialmente los 72 casos resultante de ajustar los datos experimentales de los 9 sustratos a los 8 modelos considerados (6.3.3.2.2).

En el apartado 6.3.4.1.1.2 se han desechado 3 casos por falta de convergencia. Estos casos corresponden a los sustratos 1, 5 y 9 con el modelo V18, en los que no se produce convergencia con ninguno de los grupos de datos iniciales empleados. La falta de convergencia se ha detectado a partir de los valores obtenidos para los distintos valores calculados, suma de cuadrados de la falta de ajuste, valores de los parámetros del modelo, regresión lineal entre los valores calculados y observados, y contenido de humedad para tensión 0 cm de columna de agua.

En el apartado 6.3.4.2.1.2.1 se presentan los datos de suma de cuadrados, cuadrados medios y raíz cuadrada del cuadrado medio, referidos a la falta de ajuste de cada modelo y sustrato a los datos experimentales obtenidos. Se estudian los 69 casos de ajuste en los que, según el apartado 6.3.4.1.1.2, se produce convergencia.

El estudio de estos últimos datos pone de manifiesto que, además de los tres casos anteriores, hay otros tres, correspondientes al sustrato 9 con los modelos V17, M4 y C3, en los que tampoco se produce la convergencia. La primera manifestación de esta falta de convergencia es que el valor de la SC_{Lofit} , es sensiblemente más elevada que en el resto de los casos. Las diferencias no son tan grandes como en los tres casos desechados anteriormente, pero llegan a ser del orden de 2 a 3 veces superiores al valor máximo obtenido para el resto de los modelos.

6.3.5.2.1.1.2 Falta de ajuste entre datos observados y calculados

En el apartado 6.3.4.2.1.2.2, se presentan los resultados de los test de significación de la falta de ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos planteados. En 50 de los 66 casos considerados, el nivel de significación es $\alpha < 0.01$ y en los 66, el valor de α es menor de 0.1.

Desde el punto de vista matemático, esto indica que el ajuste entre datos y modelos se puede mejorar. La falta de ajuste entre modelos y datos experimentales puede ser debida a problemas derivados de los modelos empleados y/o de los datos experimentales disponibles.

Si asumimos que los datos experimentales son correctos, el problema de la falta de ajuste derivará del empleo de modelos inadecuados. La solución a la falta de ajuste vendrá del empleo de nuevos modelos, que se ajusten mejor a los datos experimentales disponibles tomados como correctos.

Si por el contrario, asumimos que el modelo o modelos empleados son correctos, la falta de ajuste derivará de los errores de medida que afectan a los datos experimentales. La mejora del ajuste necesita, en este caso, la disminución de los errores de medida.

Los datos disponibles indican que la incidencia de los errores de medida es mayor que las diferencias entre los métodos. La mayor incidencia de los primeros se pone claramente de manifiesto en los valores de tensión bajos, que debido a los gradientes de humedad que se presentan, son más sensibles, tanto a los errores experimentales como a las diferencias entre modelos. Como se verá más adelante (apartado 7.5.2.1.2.2), para la tensión 10 cm de columna de agua, las desviaciones entre los datos experimentales y los modelos varían entre $-2.13 \cdot 10^{-2}$ y $-3.02 \cdot 10^{-2}$. La diferencia máxima entre modelos es de $0.89 \cdot 10^{-2}$, frente a un valor de $-2.54 \cdot 10^{-2}$, de magnitud claramente superior, correspondiente a la desviación media de los modelos respecto a los datos experimentales. Para la tensión 16 cm de columna de agua, la situación es similar. La diferencia máxima entre modelos es de $0.82 \cdot 10^{-2}$, frente a un valor de $+1.56 \cdot 10^{-2}$ para la desviación media de los modelos respecto a los datos experimentales.

De esto se deduce que la falta de ajuste entre datos experimentales y modelos se debe más a los errores de medida, que afectan a los datos experimentales, que al empleo de modelos inadecuados. Una reducción de estos errores experimentales permitirá discriminar las diferencias entre modelos que ahora están enmascaradas por ellos.

6.3.5.2.2 Agrupación de los modelos en función de la relación entre valores observados y calculados

En el apartado 6.3.4.2.1.1 se presentan los resultados de la comparación de los datos observados experimentalmente con los calculados por los diferentes modelos matemáticos empleados. La comparación se basa en un ajuste lineal, en el que los valores observados intervienen como variable independiente y los calculados como variable dependiente.

Los valores considerados para cada ajuste son:

- Los parámetros estadísticos relativos a la regresión : SC_{Reg} , SC_{Error} , R^2 y nivel de significación α para el test F de Snedecor
- La pendiente m de la recta y su ajuste al valor $m=1$
- El término independiente b de la recta y su ajuste al valor $b=0$

Se pretende comparar el comportamiento de los modelos con los sustratos empleados para evaluar su fiabilidad y utilidad, en particular, para el modelo logarítmico normal en las distintas variantes consideradas.

En los resultados obtenidos se observa una incidencia importante del factor sustrato. En unos sustratos todos los modelos se comportan de la misma forma, mientras que en otros los modelos se presentan claramente agrupados.

6.3.5.2.2.1 Incidencia del factor sustrato

De los nueve sustratos ensayados, en cuatro de ellos la comparación entre valores observados y calculados presenta diferencias entre los modelos, que permiten agruparlos en diferentes tipos de comportamiento. En los otros cinco sustratos, estas diferencias, cuando se presentan, son muy inferiores y no permiten agrupar a los sustratos en diferentes tipos de comportamiento.

Los cuatro sustratos obtenidos como mezcla de los dos tipos de escoria con turba y corteza, presentaban los valores más bajos de la SC_{Error} (Tabla 91). Los parámetros estadísticos relativos al ajuste lineal entre valores observados y calculados por el modelo, son muy similares para todos los modelos cuando los datos observados corresponden a un mismo sustrato.

Las mezclas de turba y corteza de pino (sustratos 5 a 8), presentaban un segundo grupo con un valor de la SC_{Error} ligeramente más alto que para el grupo de las mezclas de escoria con turba o corteza. El valor más bajo de esta SC_{Error} correspondía a la mezcla C25:T75 (sustrato 2) y el más alto a la mezcla C50:T50 (sustrato 3, ver Tabla 91). Respecto al ajuste entre valores observados y calculados, el comportamiento de la mezcla C25:T75, con el valor más bajo de la SC_{Error} , es el mismo que el de las mezclas de escoria con turba o corteza anteriormente mencionados. En el caso de la mezcla C50:T50, el comportamiento es distinto. La comparación de los valores experimentales obtenidos para estos modelos con los valores calculados por cada modelo para cada sustrato, establecen diferencias entre los modelos.

Los valores más elevados de la SC_{Error} correspondían a los sustratos corteza de pino (sustrato 1), Cyclamenerde (sustrato 4) y lana de escoria (sustrato 9). Cuando se comparan los valores experimentales de estos sustratos con los valores calculados para

cada modelo se observa un comportamiento similar al de la mezcla C50:T50, con la separación de los modelos en grupos claramente definidos.

6.3.5.2.2.2 Agrupación de los modelos

Los sustratos con valores más elevados de la SC_{Error} , permiten agrupar los modelos empleados en tres tipos, en base a su comportamiento:

- Grupo A: Formado por los modelos V12, V14 y M1
- Grupo B: Formado por los modelos V17, V18 y M4
- Grupo C: Formado por los dos modelos polinómicos C1 y C3

6.3.5.2.2.2.1 Características de los grupos

En el estudio del comportamiento de estos modelos con respecto a los sustratos, hay que tener en cuenta que se han desechado 6 casos por falta de convergencia; 5 corresponden al grupo B y 1 al grupo C. Como consecuencia, el grupo A está completo, se dispone de datos de los tres modelos para cada sustrato. En el grupo B falta el modelo V18 para los sustratos 1 y 5, y no se dispone de datos de este grupo para el sustrato 9. Con los datos experimentales de este sustrato no se ha logrado la convergencia de ningún modelo de este grupo. Por último, en el grupo C, tampoco se ha logrado la convergencia del modelo C3 con los datos experimentales del sustrato 9.

Los tres modelos que forman este grupo A tienen en común que el valor de la porosidad total no se considera como dato. El ajuste del modelo a los datos experimentales proporciona un valor para la porosidad total, que no siempre coincide con el obtenido experimentalmente. Respecto al origen de los modelos, V12 y V14 corresponden al modelo logarítmico normal en las variantes de integral sencilla y doble, respectivamente, y el modelo M1 corresponde al modelo de Van Genuchten.

Los tres modelos del grupo B son equivalentes a los del grupo A, pero en este caso el programa de ajuste considera como dato el valor de la porosidad total obtenido experimentalmente. Las equivalencias entre modelos, respecto al origen, son V12–V14, V17–V18 y M1 – M4.

Los modelos del grupo C son polinómicos de tercer grado. En los dos modelos empleados, se dejan los cuatro parámetros libres, para que el programa de ajuste encuentre los valores que mejor ajustan a los datos experimentales.

6.3.5.2.2.2.2 Comparación entre grupos

De forma general se puede decir que los modelos que forman los grupos A y B tienen un comportamiento muy similar entre ellos. Algunos sustratos diferencian claramente el comportamiento de estos dos grupos.

Los dos modelos polinómicos que forman el grupo C no tienen un comportamiento definido, y presentan diferencias entre ellos, a veces importantes, oscilando entre los dos grupos anteriores.

6.3.5.2.2.2.3 *Ajuste a la recta*

Se presentan diferencias claras entre los grupos A y B en los sustratos 1, 3 y 4. Las diferencias son menores o inexistentes para los sustratos 2, 5, 6, 7 y 8. En el caso del sustrato 9, no se dispone de datos del grupo B

En los casos de sustratos 1, 3 y 4, los valores de la SC_{Error} y de SC_{Reg} son mayores para el grupo B que para el grupo A. El valor de R^2 es mayor para el grupo A. El modelo C3 presenta un comportamiento muy similar al grupo A, mientras que el modelo C1 presenta valores intermedios entre los dos grupos.

Para los sustratos 2, 5, 6, 7 y 8, los valores de estos parámetros son muy similares para todos los modelos. Las únicas excepciones se presentan para los modelos cúbicos, con un comportamiento un tanto caótico; en unos casos, los valores son muy similares al resto de los modelos y en otros, se separan claramente de ellos, aunque las diferencias son siempre inferiores a las que se observan en los sustratos 1, 3 y 4.

En el sustrato 9, los valores del modelo C1 se diferencian claramente de los modelos del grupo A.

Respecto al test de significación, en todos los casos el valor de α es de un orden de magnitud muy inferior a 0.01. Los valores de α obtenidos en cada caso son consecuencia de los anteriores y, por tanto, reflejan el mismo comportamiento.

6.3.5.2.2.2.4 *Pendiente y término independiente de la recta de ajuste*

Las pautas generales de comportamiento son similares a las comentadas en 6.3.5.2.2.2.3, es decir, las diferencias entre los modelos A y B son claras para los sustratos 1, 3 y 4, son menores para los sustratos 2, 5, 6, 7, y, 8 y lógicamente, tampoco en este caso se dispone de datos del grupo B para el sustrato 9.

En el caso de los sustratos 3 y 4, los modelos del grupo B presentan unos valores de la pendiente y el término independiente más próximos a 1 y 0, respectivamente, que los modelos del grupo A. En el caso del sustrato 1, la situación es la inversa. Para estos tres sustratos, los errores estándar de los modelos del grupo A son menores que los del grupo B.

Respecto a los sustratos 2, 5, 6, 7 y 8, los valores de todos los parámetros considerados están muy próximos entre sí. Las diferencias entre los valores correspondientes a los distintos modelos no permiten su agrupación. Cuando estas diferencias aumentan ligeramente, los modelos tienden a agruparse con una tendencia clara al comportamiento observado para los sustratos 3 y 4.

Los modelos del grupo C presentan, en general, los valores de m y b más alejados de 1 y 0, respectivamente. Unas veces estos valores coinciden con los del grupo más desfavorable y otras, están claramente diferenciados de él.

La clasificación de los modelos en dos grupos se mantiene en las mismas condiciones cuando se estudian los errores estándar de los parámetros de la recta. Con los datos de los sustratos 1, 3 y 4, los errores estándar de m y de b para el grupo A son inferiores a los errores estándar de estos parámetros para el grupo de modelos que forman

el grupo B. Los errores estándar del resto de los sustratos, no permiten clasificar los modelos en grupos.

Respecto al nivel de significación α , su valor es consecuencia de los valores de los parámetros y de sus errores estándar, por lo que no aporta información adicional sobre el comportamiento de los modelos.

6.3.5.2.2.5 Incidencia de los errores de medida en el ajuste lineal de los datos observados y calculados

Los errores de medida inciden directamente en la comparación de modelos. El aumento de los errores de medida está actuando como un amplificador de las diferencias entre modelos. Estas diferencias son más claras cuanto mayor es la variabilidad de los datos experimentales (SC_{Error} elevada). Cuando esta variabilidad es baja, las diferencias entre modelos disminuyen, aunque en general se mantiene la misma tendencia. A la vista de estos resultados, es previsible que el aumento de la fiabilidad en la toma de datos experimentales siga confirmando las tendencias observadas.

Los modelos del grupo A presentan, con respecto a los modelos del grupo B, unos valores más bajos de la SC_{Error} y SC_{Reg} y unos valores más altos de R^2 . Es decir, el ajuste de los valores observados y calculados a la recta es mejor para los modelos del grupo A.

Respecto a la pendiente y término independiente de la recta de ajuste, los valores de los modelos del grupo B son más próximos a 1 y 0, respectivamente, que los del grupo A. Sin embargo, los errores estándar de los primeros son superiores a los de los segundos.

Los errores de medida están incidiendo directamente en la magnitud de los valores de SC_{Error} , SC_{Reg} , y en los errores estándar de la pendiente y del término independiente de la recta de ajuste. La mejora de las rutinas de laboratorio, que permitan disminuir los errores de medida, tienen como consecuencia la disminución de estos valores, y permitirán confirmar o rechazar las diferencias entre modelos observadas en este trabajo.

Los errores de medida constituyen el factor limitante más importante para la mejora del ajuste; por lo tanto, el aspecto prioritario a desarrollar es la reducción de los errores experimentales mediante las modificaciones oportunas de las rutinas de laboratorio. Una vez que se hayan reducido estos errores, se podrá acometer con más garantías la comparación de modelos.

6.3.5.2.3 Agrupación de los modelos en función de la relación entre parámetros equivalentes

En el apartado 6.3.4.2.3 se han presentado los resultados correspondientes a la relación entre parámetros equivalentes, obtenidos por los distintos modelos empleados. Las cuatro variantes empleadas del modelo logarítmico normal, permiten comparar los cuatro parámetros que lo definen.

Al igual que ocurría con la relación entre valores observados y calculados (6.3.5.2.2), para unos sustratos todos los modelos se comportan de la misma forma, mientras que con los datos de otros sustratos, se observan claras diferencias de comportamiento entre los modelos empleados.

Para el estudio de estas diferencias se ha considerado, por una parte, el plano normal y por otra, el plano de porosidad. Los valores correspondientes al plano normal se obtienen solamente cuando se aplica el modelo logarítmico normal. Se comparan los valores obtenidos con las cuatro variantes de este modelo. Los valores correspondientes al plano de porosidad se obtienen también con el modelo logarítmico normal. Con el modelo de Van Genuchten, se obtienen dos parámetros equivalentes, que permiten su comparación con los valores obtenidos con el modelo logarítmico normal.

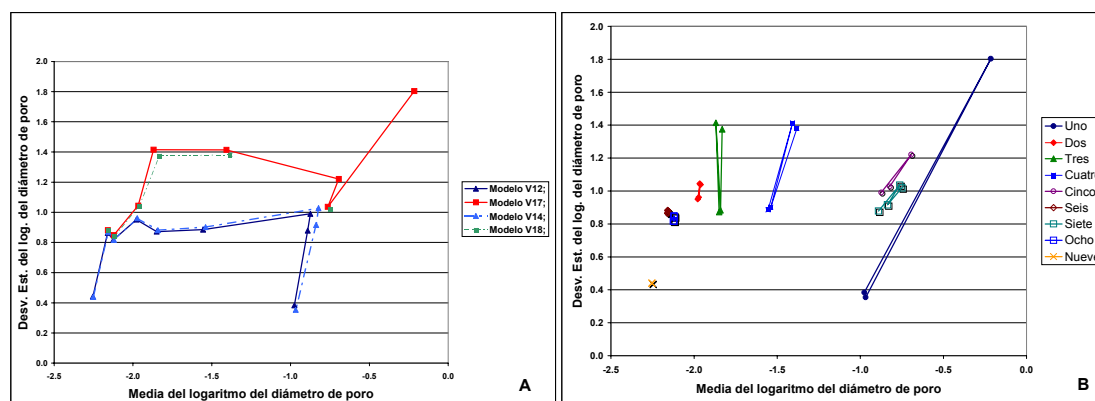


Figura 14: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Representación de los sustratos en el plano normal. (A) unión de los datos por modelos. (B) unión de los datos por sustratos. En la figura (A), tomando la línea de los modelos V12 y V14 de izquierda a derecha, los puntos corresponden a los sustratos 9, 6, 8, 2, 3, 4, 5, 7 y 1. Para los modelos V17 y V18, el orden es el mismo, falta el sustrato 9 por falta de convergencia, con lo que la serie comienza en el sustrato 6.

6.3.5.2.3.1 Parámetros del plano normal

La Figura 14 se ha elaborado con los datos detallados en la Tabla 113 y la Tabla 114. En ella se representan en el plano normal los puntos representativos de los valores obtenidos para cada sustrato con los datos experimentales de cada modelo. En la Figura 14A se han unidos los puntos que representan a los diferentes sustratos correspondientes a cada modelo, mientras que en la figura B, se han unido los puntos que representan los valores obtenidos por los distintos modelos para cada sustrato.

6.3.5.2.3.1.1 Agrupación de los modelos

En el apartado 6.3.5.2.2 los modelos se han clasificado en tres grupos, atendiendo a su comportamiento respecto a la relación entre valores observados y calculados. Las cuatro variantes del modelo logarítmico normal estaban incluidas en los grupos A (V12 y V14) y B (V17 y V18). Los resultados obtenidos confirman la agrupación de los modelos en estos dos grupos.

En la Figura 14A se pone claramente de manifiesto que los valores obtenidos con los modelos V12 y V14, son prácticamente idénticos entre sí. Lo mismo ocurre con los valores obtenidos por los modelos V17 y V18. En este último caso, los datos son incompletos. Debido a la falta de convergencia, no se dispone de los datos de ajuste del sustrato 9 a los modelos V17 y V18, ni de los sustratos 1 y 5 al modelo V18, pero con los datos disponibles, se presenta una gran coincidencia entre los valores obtenidos con estos dos modelos.

6.3.5.2.3.1.2 Factor sustrato

En la Figura 14A se observa que para unos sustratos todos modelos están muy próximos entre sí, mientras que en otros se separan claramente los resultados de los modelos V12 – V14, por un lado, y V17 – V18, por otro.

La Figura 14 B muestra la incidencia del factor sustrato. En el caso de los sustratos 2, 6, 8 y 9, los valores de media y desviación estándar son prácticamente iguales para los distintos modelos empleados. En el caso de los sustratos 2, 6 y 8, los datos experimentales se han ajustado a las cuatro variantes del modelo, y todas ellas proporcionan resultados similares. Los datos experimentales del sustrato número 9 se han ajustado a los modelos V12 y V14. Cuando se emplean las variantes V17 y V18, no se produce la convergencia de los datos.

En los casos de los sustratos 5 y 7, se presentan ligeras diferencias entre los valores obtenidos por las distintas variantes del modelo. Se observa una clara diferenciación entre los valores obtenidos por los modelos V12 y V14 por un lado, y los modelos V17 y V18 por otro. Los valores de la media y de la desviación estándar obtenidos por las variantes V17 y V18 son superiores a los obtenidos con las variantes V12 y V14.

Por último, los sustratos 1, 3 y 4 presentan diferencias importantes entre los valores obtenidos por las variantes V12 y V14 por un lado, y las variantes V17 y V18 por otro. En los tres sustratos considerados, el valor de la desviación estándar de la distribución normal obtenido con los ajustes V17 y V18 es superior al valor obtenido con las variantes V12 y V14. El valor de la media no presenta diferencias entre modelos en el caso del sustrato 3. En el sustrato 4, el valor de la media obtenido para las variantes V17 y V18 es ligeramente superior al obtenido con las variantes V12 y V14. Esta diferencia entre las dos parejas de modelos se incrementa notablemente en el caso del sustrato 1.

Esta clasificación es consecuencia de la consideración conjunta de los resultados de la media y desviación estándar expuestos en los apartados 6.3.4.2.3.1 y 0. Si se analiza detalladamente, se puede ver que esta clasificación no se diferencia mucho de la detallada para los sustratos en el apartado 6.3.5.2.2.1.

Para los cuatro sustratos obtenidos como mezcla de escoria con corteza y turba, la comparación entre valores observados y calculados no presentaban diferencias entre modelos. Para las mezclas de escoria y turba, todos los modelos obtienen valores muy similares para la media y la desviación estándar de la distribución normal. En cambio, las mezclas de escoria con corteza de pino presentan ligeras diferencias entre los modelos V12 y V14, con respecto a los modelos V17 y V18.

El segundo grupo de sustratos estaba formado por las mezclas de turba y corteza de pino. La comparación entre valores observados y calculados no presentaban diferencias entre modelos para el sustrato 2 (C25:T75), mientras que para el sustrato 3 (C50:T50), se presentaban diferencias entre modelos. La situación se repite cuando se comparan los valores obtenidos para la media y la desviación estándar de la distribución normal. En el sustrato 2, no se presentan diferencias entre modelos. En cambio, en el caso del sustrato 3 (C50:T50), las diferencias entre los valores de la media son mínimas, pero se presentan diferencias importantes entre las desviaciones estándar de la distribución normal obtenidas por los dos tipos de modelos logarítmico normales.

El tercer grupo estaba formado por la corteza de pino, Cyclamenerde y lana de escoria. El valor de SC_{Error} era muy elevado para los tres sustratos y, cuando se comparaban los valores observados y los calculados, se presentaban diferencias notables entre modelos. Los dos primeros sustratos considerados presentan diferencias entre los valores de la media y desviación estándar obtenidos por los modelos V12 y V14 por un lado, y V17 y V18 por otro. En el caso de la lana de escoria no se ha podido hacer converger los datos experimentales con los modelos V17 y V18, por lo que no se ha podido detectar esta diferencia.

6.3.5.2.3.1.3 Incidencia de los errores de medida y del tamaño de poro

Al igual que en los casos anteriores, parece que existe una relación directa entre la magnitud de los errores experimentales y las diferencias detectadas entre modelos. Sin embargo, se observa además una relación entre el tamaño de poro y las diferencias entre modelos.

Respecto a los errores de medida, se observa, en general, que los sustratos con un bajo valor de la SC_{Error} apenas diferencian los modelos. Las mayores diferencias se presentan en los sustratos 1, 3 y 4, con valores elevados de la SC_{Error} . La falta de convergencia de los modelos V17 y V18, no ha permitido confirmar este mismo comportamiento para el sustrato 9.

El valor de la SC_{Error} incide, sobre todo, en las diferencias relativas a la desviación estándar. Respecto a las diferencias en el valor de la media, en la Figura 14 B se observa claramente que las diferencias son mayores cuanto más a la derecha se sitúa el sustrato. Las mayores diferencias se presentan en la corteza de pino (sustrato 1). En los dos sustratos en los que ésta interviene como componente de la mezcla (5 y 7), los errores de medida son inferiores a los de la corteza, y, a pesar de ello, se presentan diferencias sensibles en el valor de la media, aunque muy inferiores a las observadas para la corteza.

Este comportamiento se puede explicar si se tiene en cuenta la relación entre estos valores y la curva de retención de agua. La variable independiente de la curva normal es el logaritmo del diámetro de poro. A cada valor de esta variable le corresponde un valor de tensión de la curva de retención de agua. Al valor medio de la distribución normal le corresponde un valor de tensión en la curva de retención de agua que denominaremos tensión media equivalente. La curva de retención de agua se corresponde con la curva de probabilidad acumulada obtenida a partir de la curva normal.

El valor medio de una distribución normal divide a ésta en dos partes iguales. Cuando se trabaja con la curva de frecuencia acumulada, la media corta a esta curva en el valor de frecuencia=0.5. El equivalente en la curva de retención de agua es que la tensión media corta a ésta en el punto equivalente al 50% del volumen del escalado, es decir, el incremento de volumen, en la curva de retención de agua entre cero y el valor de tensión media equivalente, es igual a la mitad del volumen representado por el escalado.

De este razonamiento se deduce que un valor bajo de la tensión media equivalente da lugar a gradientes elevados en las tensiones bajas. Los gradientes en esta zona se suavizan a medida que aumenta el valor de la tensión media equivalente.

En la Tabla 119 se detallan los valores de la tensión media para cada uno de los modelos y sustratos. Los valores correspondientes a los sustratos 1, 5 y 7, no sobrepasan

en ningún caso los 8 cm de columna de agua. En el sustrato 4, el valor varía para los distintos modelos entre 12 y 14. En el resto de los sustratos, este valor es próximo o superior a 20 cm de columna de agua.

Los bajos valores de la tensión media para los sustratos 1, 5 y 7, y en menor medida para el sustrato 4, implican gradientes elevados de humedad en la zona de tensiones bajas, con dos consecuencias importantes. Por una parte, una elevada sensibilidad a los errores de medida. Por otra, el estrecho intervalo de tensión de humedad limita el número de puntos de la curva en las que se han efectuado las mediciones. Para tensiones inferiores a 8 cm de columna de agua, el número de puntos de la curva en los que se ha tomado datos es de 3, ya que el cuarto corresponde a este valor. Para los sustratos 1, 5 y 7, en el intervalo de tensiones más bajas en el que se ha consumido el 50% del agua del escalado, únicamente se han efectuado tres mediciones. En el intervalo de tensiones correspondiente al otro 50% restante, las mediciones se han efectuado en 8 puntos. Es posible que los tres puntos correspondientes a las bajas tensiones sean insuficientes para determinar con la debida fiabilidad los parámetros que definen la curva de frecuencias.

Modelo	Valor de la Tensión media								
	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3	Sustrato 4	Sustrato 5	Sustrato 6	Sustrato 7	Sustrato 8	Sustrato 9
V12	7.96	21.69	19.06	14.20	7.19	26.02	7.31	25.12	28.57
V17	3.72	21.43	19.45	12.26	6.01	25.98	6.44	25.03	
V14	7.90	21.56	18.92	13.98	6.83	25.92	6.93	25.01	28.54
V18		21.31	18.72	11.94		25.90	6.35	24.93	

Tabla 119: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Valor de la tensión de humedad (cm de columna de agua) equivalente al valor medio de la distribución logarítmico normal

Otro factor a tener en cuenta es que en los modelos V17 y V18 se fija el valor de la porosidad total en un valor obtenido experimentalmente, mientras que en los modelos V12 y V14, este valor se obtiene por ajuste del modelo. Esto supone que en el primer caso se cuenta con un dato más en una zona de indefinición por falta de datos. El elevado gradiente hace que los modelos sean muy sensibles a la presencia de un dato adicional, explicando así las diferencias, en ocasiones muy grandes, entre los dos grupos de modelos.

La insuficiencia de los datos experimentales se ve agravada cuando los errores experimentales son elevados. De ahí que las diferencias sean pequeñas para los sustratos 5 y 7, si se comparan con los otros tres de elevada RCME, especialmente con la corteza de pino, con un valor medio de la distribución normal similar.

6.3.5.2.3.2 Parámetros del plano de porosidad

Los parámetros considerados en el plano de porosidad, permiten comparar los valores obtenidos con las cuatro variantes del modelo logarítmico normal con los datos obtenidos con las dos variantes del modelo de Van Genuchten. En los primeros, se obtiene el valor del desplazamiento y del escalado, y la porosidad total corresponde a la suma de ambos. En los segundos, se obtiene el valor de la porosidad total y de la humedad residual, equivalente al desplazamiento. Por diferencia entre ambos, se obtiene un valor comparable al escalado.

La Figura 15 se ha elaborado con los valores de la Tabla 115 y la Tabla 116. En ella se representan en el plano de porosidad los valores obtenidos para cada sustrato y modelo. La representación gráfica no resulta en este caso tan evidente como lo era en el plano normal. La incidencia del factor sustrato y las diferencias entre modelos se manifiestan más claramente cuando se representan por separado ambas variables.

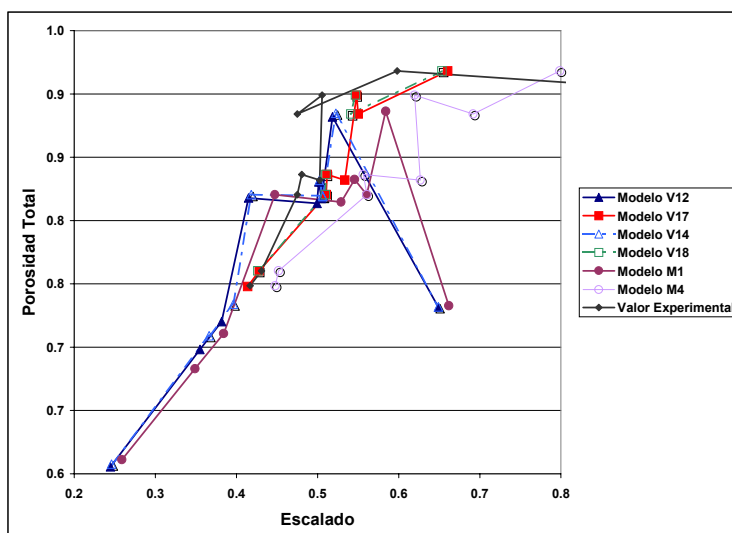


Figura 15: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Representación de los sustratos en el plano de porosidad

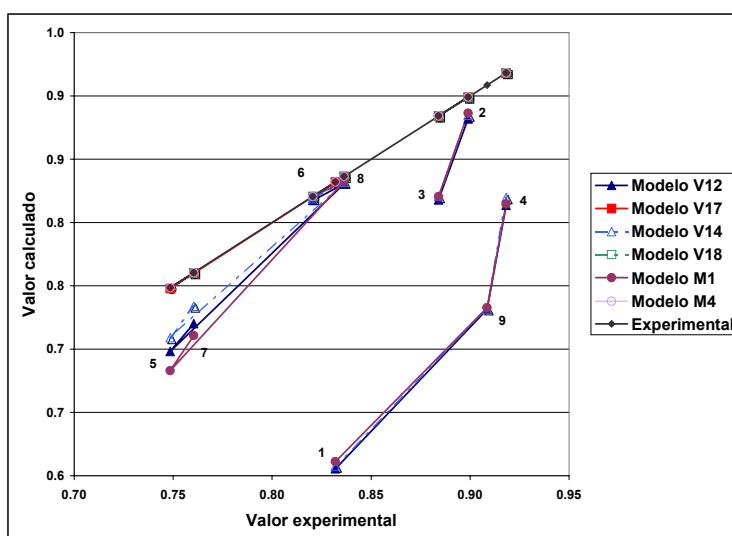


Figura 16: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Relación entre el valor de la porosidad total obtenido experimentalmente y el obtenido por ajuste de los modelos. Los números incluidos en el gráfico indican la posición de cada sustrato

6.3.5.2.3.2.1 Porosidad total

En los modelos V17, V18 y M4, el valor de la porosidad total obtenido experimentalmente interviene como dato, por lo que el valor obtenido coincide, lógicamente, con el valor experimental.

Los modelos V12, V14 y M1 calculan el valor de la porosidad total sin tener en cuenta el valor experimental obtenido. Para estudiar las diferencias entre ambos valores se

ha elaborado la Figura 16, a partir de los datos de la Tabla 118, teniendo en cuenta la clasificación de sustratos establecida en el apartado 6.3.5.2.2.1.

El comportamiento de los grupos de sustratos repite fielmente el comportamiento de los mismos en el caso de los parámetros del plano normal.

En el primer grupo, los sustratos obtenidos como mezcla de escoria y turba (sustratos 6 y 8) proporcionan un valor de la porosidad total prácticamente igual al valor obtenido experimentalmente. Las mezclas de escoria con corteza de pino (sustratos 5 y 7) proporcionan un valor ligeramente inferior.

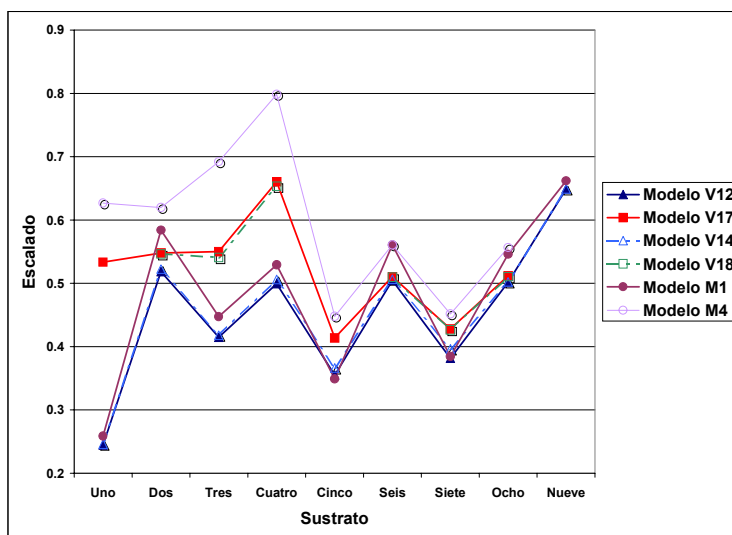


Figura 17: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Evolución de los valores del escalado.

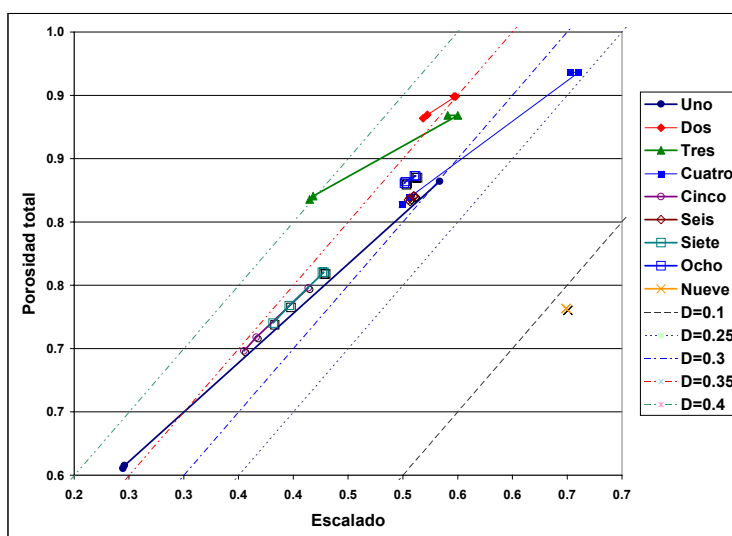


Figura 18: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Evaluación del modelo: Plano de porosidad. Variación de los valores obtenidos para cada sustrato con los diferentes modelos

En el segundo grupo de sustratos, la mezcla T75:C25 (sustrato 2) vuelve a dar unos valores muy próximos a los obtenidos por los modelos V17, V18 y M1, y por lo tanto, a los experimentales, aunque inferiores a éstos. La diferencia aumenta considerablemente en el caso de la mezcla T50:C50 (sustrato 3).

En el tercer grupo, las diferencias entre los valores experimentales y los obtenidos con los modelos V12, V14 y M4 son muy elevadas, variando entre el 10 y el 20% del volumen total del sustrato, aproximadamente. En todos los casos, el valor calculado por el modelo es inferior al obtenido experimentalmente.

Estas diferencias son consecuencia de las mismas causas que provocaron las diferencias entre los valores de la media de la distribución normal. Por lo tanto, aquí es de aplicación el razonamiento argumentado en el apartado 6.3.5.2.3.1.3.

6.3.5.2.3.2.2 Escalado

A diferencia de los casos anteriores, el escalado separa el modelo de Van Genuchten del modelo logarítmico normal. Se mantiene la similitud entre los valores obtenidos por los modelos V12 y V14, por un lado, y entre los modelos V17 y V18, por otro. Para abordar este estudio, se ha elaborado la Figura 17 a partir de los datos obtenidos como diferencia entre la porosidad total (Tabla 118) y el desplazamiento (Tabla 117).

Los valores obtenidos con los modelos V17 y V18, son en general, superiores a los obtenidos con los modelos V12 y V14. Sólo en el caso de los sustratos 6 y 8, los valores de los cuatro modelos son similares.

La diferencia entre la porosidad total y la humedad residual obtenida con el modelo de Van Genuchten presenta valores claramente diferenciados de los equivalentes del modelo logarítmico normal. Los valores obtenidos con el modelo M1 son similares a los obtenidos con los modelos V12 y V14; para unos sustratos son prácticamente iguales (1, 5, 7 y 9), mientras que para otros, los valores obtenidos con el modelo M1 son ligeramente superiores a los obtenidos con los modelos V12 y V14.

Los valores obtenidos con el modelo M4 son, en todos los casos, superiores a los valores obtenidos con las cuatro variantes del modelo logarítmico normal, en algunos casos con diferencias muy importantes. Los valores obtenidos con el modelo M4 son, también, superiores a los obtenidos con el modelo M1. Únicamente en el caso de los sustratos 6 y 8 los valores de ambos son similares y superiores a los valores obtenidos con las cuatro variantes del modelo logarítmico normal.

Conceptualmente, el valor de la humedad residual del modelo de Van Genuchten es equivalente al desplazamiento del modelo logarítmico normal. Sin embargo, las diferencias observadas con los resultados experimentales limitan la utilización de unos como evaluadores fiables de los otros.

6.3.5.2.3.2.3 Modelos logarítmico normal en el plano de porosidad

Una vez estudiadas por separado la evolución de la porosidad y del escalado, la consideración de ambos valores conjuntamente permite obtener información adicional sobre la incidencia de los modelos en los valores obtenidos. Para ello, se han estudiado las variaciones de los valores obtenidos para cada sustrato en función del modelo empleado.

En la Figura 18 se han representado en el plano de porosidad los valores obtenidos para cada sustrato, con los distintos modelos. Esta figura es equivalente a la Figura 15, pero en este caso se han unido los puntos correspondientes a cada sustrato. Las líneas de puntos corresponden a valores constantes de desplazamiento. Las líneas continuas unen

los puntos correspondientes a los valores obtenidos con los diferentes modelos para un mismo sustrato. Las diferencias son tanto mayores cuanto mayor es la distancia entre los puntos.

En general, estas líneas tienen una pendiente ligeramente inferior a la de las líneas de desplazamiento constante. Esto indica que las variaciones de los valores de la porosidad son similares a las variaciones de los correspondientes del escalado. Las variaciones del desplazamiento son pequeñas, y siempre de signo contrario al de la porosidad.

El extremo inferior de la línea que representa a cada sustrato corresponde a los modelos V12 y V14, y el extremo superior a los modelos V17 y V18. Si tomamos como valores de referencia los experimentales, los modelos V12 y V14 proporcionan valores inferiores de la porosidad total y del escalado, y ligeramente superiores del desplazamiento.

Las diferencias para cada sustrato dependen, como en los casos anteriores, de los sustratos. En los sustratos obtenidos como mezcla de escoria y turba, las diferencias son mínimas. En el caso de las mezclas de escoria con corteza, las diferencias de la porosidad total son del orden del 5% del volumen total. En los sustratos del segundo grupo, la diferencia es pequeña para la mezcla T75:C25, y superior al 5% para la porosidad total de la mezcla T50:C50. Por último, en los sustratos del grupo tercero, la diferencia de la porosidad total es del orden del 10% para el sustrato 4, y superior al 20% para el sustrato 1. La variación del desplazamiento es, en ambos casos, del orden del 5%, con lo que la variación resultante del escalado es del orden del 15% y 25%, respectivamente. En el caso del sustrato 9, no se dispone de datos para los modelos V17 y V18.

6.3.5.2.4 Clasificación de los modelos en función de los residuos y de la falta de ajuste

El análisis de los residuos está motivado por la significación de la falta de ajuste de los datos experimentales al modelo. En el apartado 6.3.5.2.1.1.2, se ha visto como esta falta de ajuste se debe más a los errores de medida de los datos experimentales que al empleo de modelos inadecuados.

6.3.5.2.4.1.1 Valor medio de los residuos

El primer criterio aplicado para el estudio de residuos ha sido el valor medio (6.3.4.2.2). En todos los casos, el valor medio de los residuos considerados con su signo es muy próximo a cero. El error estándar es superior a las diferencias entre el valor medio de las diferencias y cero, por lo que distan mucho de ser significativas.

6.3.5.2.4.1.2 Media de los valores absolutos de los residuos

La media de los valores absolutos de los residuos es un indicador de la magnitud media de las diferencias entre los datos experimentales y los calculados por los modelos. Los valores obtenidos se presentan en el apartado 6.3.4.2.2.1.2. El comportamiento de los modelos con respecto a este parámetro es el mismo que con respecto a la SC_{Lofit} , cuyos resultados se presentan en el apartado 6.3.4.2.1.2.1. Esta coincidencia es lógica, puesto que el primero corresponde a la media de unos valores absolutos y el segundo a la suma de

los cuadrados de los residuos, que es la misma que la suma de los cuadrados de los valores absolutos.

El comportamiento de los modelos con respecto a la media de los valores absolutos de los residuos y a la SC_{Lofit} , es el mismo que para la SC_{Error} del ajuste lineal entre modelos observados y calculados, ya visto en el apartado 6.3.5.2.2.2.3. La agrupación de modelos que se detalla en ese apartado es válida, en los mismos términos, para el caso del valor absoluto de los residuos y de la SC_{Lofit} .

Respecto a la magnitud de estos valores medios, que evalúan la magnitud media del error cometido (Tabla 103), en el caso de los sustratos 5, 6, 7 y 8, oscila entre $1.25 - 1.35 \cdot 10^{-2}$ para los modelos de los grupos A y B. En los modelos polinómicos y en el modelo M4 con el sustrato 7, sobrepasan estos valores, llegando a un máximo de $1.67 \cdot 10^{-2}$. Los errores en el resto de los sustratos son más elevados. En el sustrato 2, los errores son muy similares para todos los modelos (entre 2.06 y $2.20 \cdot 10^{-2}$). Los sustratos 3 y 4 los valores medios vuelven a clasificar a los modelos en dos grupos de comportamiento, que coinciden con los grupos A y B del apartado 6.3.5.2.2.2. Estos valores medios varían en torno a $2.30-2.40 \cdot 10^{-2}$ para el grupo A y en torno a $2.80-3.00 \cdot 10^{-2}$.

La magnitud de estos valores la podemos considerar elevada. El valor mínimo de la media de los valores absolutos es de $1.20 \cdot 10^{-2}$ y el máximo, de $3.04 \cdot 10^{-2}$ (ver Tabla 103). Esto corresponde al 1.20% y 3.04% del volumen total del sustrato, y pone una vez más de manifiesto la necesidad de modificar la metodología de trabajo para controlar y reducir la magnitud de estos errores.

6.4 Análisis de sensibilidad

6.4.1 Introducción

El modelo logarítmico normal está definido por cuatro parámetros, media y desviación estándar de la distribución logarítmico normal, escalado y desplazamiento. Los valores de estos cuatro parámetros son característicos de cada sustrato. Su valor se estima a partir de los valores experimentales de la proporción de agua correspondiente a cada valor de tensión.

En los apartados anteriores se ha presentado y discutido el método de obtención de estos parámetros. Para cada uno de ellos se obtiene un valor estimado y un error estándar de la estimación. La fiabilidad de las predicciones del modelo está relacionada con la magnitud de los errores estándar de estimación de los parámetros que definen dicho modelo. El análisis de sensibilidad de un modelo estudia la incidencia de las variaciones de la(s) variable(s) de entrada en la(s) variable(s) de salida del modelo.

El análisis de sensibilidad permite determinar el error de estima máximo admitido para los parámetros del modelo, en función de los errores máximos admitidos para las variables calculadas por dicho modelo.

6.4.2 Fundamentos

El error del valor obtenido por el modelo para el volumen ocupado por agua, es consecuencia de los errores de los cuatro parámetros que lo definen. La complejidad de la relación entre el primero y los segundos varía en función de los parámetros considerados. Esta relación es muy simple en los casos de escalado y desplazamiento, y muy compleja en el caso de la media y la desviación estándar de la distribución logarítmico normal.

Si denominamos:

- L el valor correspondiente a $L = \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} f(\mu, \sigma) dx$ donde $f(\mu, \sigma)$ corresponde a la distribución normal de media μ y desviación estándar σ
- ΔL la variación de la función anterior inducida por las variaciones de la media y de la desviación estándar $L + \Delta L = \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} f(\mu + \Delta\mu, \sigma + \Delta\sigma) dx$ donde $f(\mu + \Delta\mu, \sigma + \Delta\sigma)$ corresponde a la distribución normal de media $\mu + \Delta\mu$ y desviación estándar $\sigma + \Delta\sigma$
- D e ΔD los valores del desplazamiento y de su correspondiente error
- E e ΔE los valores del escalado y de su correspondiente error

El valor de la proporción de agua se obtiene de la expresión:

$$(243) \quad V_{Ag} = D + E L$$

El valor de ΔL corresponde a la diferencia

$$(244) \quad \Delta L = \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} f(\mu + \Delta\mu, \sigma + \Delta\sigma) dx - \int_{-\infty}^{\log \frac{30}{h}} f(\mu, \sigma) dx$$

El valor obtenido para la proporción de agua a partir de los valores de los parámetros incrementados es:

$$(245) \quad V_{Ag} + \Delta V_{Ag} = D + \Delta D + (E + \Delta E)(L + \Delta L)$$

Operando se obtiene

$$(246) \quad V_{Ag} + \Delta V_{Ag} = D + E L + \Delta D + E \Delta L + L \Delta E + \Delta E \Delta L$$

Restando la expresión (243) de la expresión (246) se obtiene el valor del incremento o error inducido en la proporción de agua por los errores o incrementos de los parámetros que definen el modelo.

$$(247) \quad \boxed{\Delta V_{Ag} = \Delta D + E \Delta L + L \Delta E + \Delta E \Delta L}$$

Es decir, el error inducido en la proporción de volumen ocupado por agua por los errores de los parámetros del modelo, es igual al error del desplazamiento, más el escalado por el error de la integral, más el valor de la integral por el error del escalado, más el error del escalado por el error de la integral.

Los valores de ΔD , E e ΔE se obtienen directamente del programa de ajuste del modelo a los datos experimentales. El valor de L se obtiene por integración de la

distribución logarítmico normal entre $-\infty$ y $\log(30/h)$. Para evaluar el factor ΔL , es necesario simular el comportamiento del modelo con distintos valores de la media y de la desviación estándar de la distribución logarítmico normal.

6.4.3 *Objetivo*

El objetivo principal del análisis de sensibilidad es:

- Determinar la magnitud del error admitido en la estimación de los parámetros que determinan el modelo logarítmico normal.

Teniendo en cuenta los fundamentos detallados en el apartado 6.4.2, para llegar a este objetivo, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Evaluar la magnitud del factor ΔL dado por la expresión (244)
- Establecer la relación entre ΔL y μ , $\Delta\mu$, σ e $\Delta\sigma$, evaluando la incidencia de estos cuatro factores en el valor de ΔL
- Delimitar el error admitido en la estimación de los parámetros ($\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$) en función del error admitido en la evaluación del volumen de agua y de los valores de μ y de σ .

6.4.4 *Material y métodos*

6.4.4.1 Intervalos de valores de los parámetros del modelo

Los intervalos de valores considerados para cada parámetro que interviene en el análisis de sensibilidad se han determinado en función de los valores obtenidos para los sustratos analizados.

6.4.4.1.1 *Media de la distribución normal*

Los valores de la media de la distribución normal y sus correspondientes errores estándar se han detallado en la Tabla 113. Exceptuando el valor obtenido para el sustrato 1 con el modelo V17, el resto de valores de las medias están incluidos en el intervalo $-2.5 \leq \mu \leq -0.5$.

En la misma tabla se observa que el valor del error estándar de la media oscila entre 0.0272, para el sustrato 9 con el modelo V14, y 0.1855, para el sustrato 3 con el modelo V17. El intervalo considerado en este caso es $\varepsilon_{\mu} \leq 0.25$.

Se observa una clara diferenciación entre los modelos V12 y V14, por un lado, y los modelos V17 y V18, por otro. En los primeros, el error estándar de la media es, en todos los casos, inferior a 0.1.

6.4.4.1.2 *Desviación estándar*

Los valores de la desviación estándar de la distribución normal y sus correspondientes errores estándar se han detallado en la Tabla 114. A excepción del valor obtenido para el sustrato 1 con el modelo V17, el resto de valores de las medias están incluidos en el intervalo $0.3 \leq \sigma \leq 1.5$.

En la misma tabla se observa que el valor del error estándar de la desviación estándar es, normalmente, inferior a 0.12. Para los ajustes de los modelos V17 y V18, se

supera este valor, alcanzando un máximo de 0.28 para el sustrato 1 con el modelo V17. El intervalo considerado para el error de la desviación estándar es $\varepsilon_e \leq 0.25$.

Al igual que en el caso del error de la media, se observa una clara diferenciación entre los modelos V12 y V14, por un lado, y los modelos V17 y V18, por otro. En los primeros, el error estándar de la media es, en todos los casos, inferior a 0.1.

6.4.4.1.3 Escalado y desplazamiento

El escalado y el desplazamiento no intervienen en el cálculo del factor ΔL de la expresión (244). El cálculo de este factor corresponde al caso particular en que $E=1$ y $D=0$.

Para obtener los errores correspondientes a los sustratos analizados se aplica la expresión (247), entrando con el valor obtenido en la simulación para ΔL y con los valores de E , ΔE y ΔD obtenidos en la Tabla 115 y la Tabla 116.

6.4.4.2 Cálculo del error inducido en la proporción de agua por los errores de la media y de la desviación estándar

Los valores de la media de la distribución normal considerados en la simulación son los comprendidos entre -2.5 y -0.5 a intervalos de 0.5 , es decir, -2.5 , -2.0 , -1.5 , -1.0 y -0.5 .

Los valores del error estándar de la media considerados en la simulación son los comprendidos entre 0.05 y 0.25 a intervalos de 0.05 , es decir, 0.05 , 0.10 , 0.15 , 0.20 y 0.25 .

Los valores de la desviación estándar de la distribución normal considerados en la simulación son los comprendidos entre 0.3 y 1.5 a intervalos de 0.3 , es decir, 0.3 , 0.6 , 0.9 , 1.2 y 1.5 .

Factor	Mínimo	Máximo	Intervalo	Casos	Casos totales
Media	-2.5	-0.5	0.5	5	25
Desviaci Estándar	0.3	1.5	0.3	5	
Error Media	0	0.25	0.05	6	36
Error Desv Est	0	0.25	0.05	6	
Tensión (cm de columna de agua)	0	100	0.02	5000	900

Tabla 120: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Valores considerados en la simulación para el análisis de sensibilidad

Los valores del error estándar de la desviación estándar considerados en la simulación son los comprendidos entre 0.05 y 0.25 a intervalos de 0.05 , es decir, 0.05 , 0.10 , 0.15 , 0.20 y 0.25 .

La incidencia en la proporción de agua de una determinada combinación de errores de media y desviación estándar se obtiene aplicando la expresión (244). Para ello, es necesario obtener el valor de la integral con los valores de la media y la desviación estándar supuestos sin error, y el valor de la integral con los valores de la media y la desviación estándar incrementados con el correspondiente error.

Para obtener la incidencia es necesario, por lo tanto, obtener el valor de la integral para los valores de la media y la desviación estándar para error=0. El número de casos considerados para el error es 6 y corresponden a los valores 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25.

El número total de simulaciones realizadas es: 5 valores de la media * 5 valores de la desviación estándar * 6 valores del error estándar de la media * 6 valores del error estándar de la desviación estándar = 900 casos.

En total se consideran 25 puntos del plano normal, obtenidos como combinación de los 5 valores de la media por los 5 valores de la desviación estándar. En cada uno de estos 25 puntos se consideran 36 casos de error, resultantes de la combinación de los 6 casos de error de la media por los 6 casos de error de la desviación estándar (incluyendo en ambos casos el error cero).

Para cada uno de los 900 casos se obtiene el valor de la proporción de agua para los valores de tensión de humedad comprendidos entre 0 y 100 cm de columna de agua a intervalos de 0.02 cm, con un total de 5000 puntos por cada caso.

6.4.4.3 Medida de la incidencia del error

El error inducido en la proporción de agua se obtiene de la expresión (244). Esta diferencia puede ser positiva o negativa. A efectos de evaluar el error, se ha considerado el valor absoluto de la diferencia obtenida por la mencionada expresión (244).

6.4.5 *Resultados y discusión*

6.4.5.1 Forma de la curva de retención de agua

El modelo planteado proporciona una gran versatilidad para la curva de retención de agua.

En la Figura 19 se ilustra una muestra del polimorfismo que presenta la curva en función de los valores de la media y la desviación estándar de la distribución logarítmico normal. Se han representado 5 curvas de las 25 consideradas en el análisis de sensibilidad. Los 25 casos representados en el plano normal, están dentro de un rectángulo definido por las abscisas $-2.5 \leq \mu \leq -0.5$ y las ordenadas $0.3 \leq \sigma \leq 1.5$. Se han representado las curvas correspondientes a los cuatro vértices de este rectángulo y una, próxima al centro del mismo. Los valores considerados son:

- Simu0000 $\mu=-2.5$ $\sigma=0.3$
- Simu0400 $\mu=-2.5$ $\sigma=1.5$
- Simu2200 $\mu=-1.5$ $\sigma=0.9$
- Simu4000 $\mu=-0.5$ $\sigma=0.3$
- Simu4400 $\mu=-0.5$ $\sigma=1.5$

En todos los casos se ha considerado el caso hipotético mencionado más arriba, de escalado $E=1$ y desplazamiento $D=0$.

6.4.5.1.1 Incidencia de la media en la forma de la curva de retención de agua

En el apartado 6.3.5.2.3.1.3, se ha visto que el valor de la tensión media corresponde al punto de la curva de retención de agua en el que se ha consumido el 50% del agua correspondiente al escalado. Por lo tanto, en la Figura 19 el valor de la tensión media de cada curva corresponde al valor 0.5 de proporción de agua. El valor de la media de la distribución normal determina, por tanto, el valor de tensión (x) en el que la curva corta a la ordenada $y=0.5$. El valor de la media y el de la tensión media están relacionados por la expresión $h = 3/e^\mu$, siendo h el valor de la tensión en cm de columna de agua y μ el valor de la media de la distribución normal. Dos curvas con el mismo valor de la media se cortarán en el punto correspondiente a $y = 0.5$.

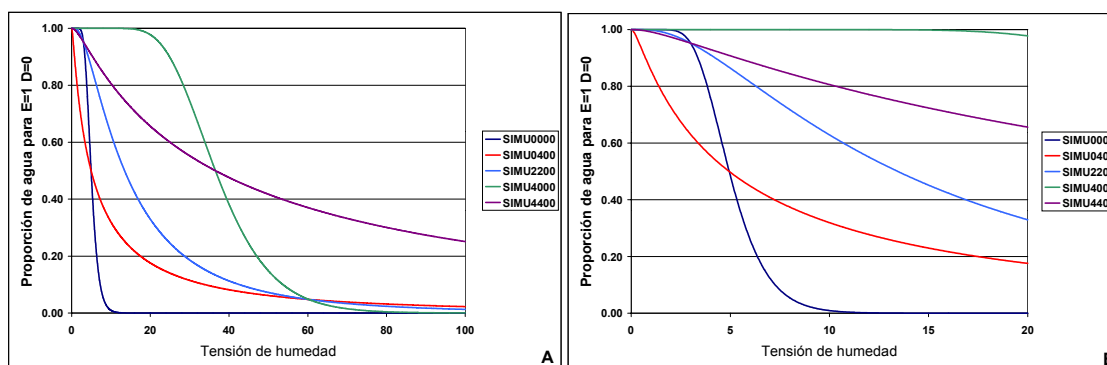


Figura 19: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro: Polimorfismo de la curva de retención de agua obtenida con el modelo logarítmico normal. A: Escala de 0 a 100 cm de columna de agua. B: Detalle para bajas tensiones (0-10 cm de columna de agua)

Un valor elevado de la media de la distribución normal tiene como consecuencia un valor bajo de la tensión media. El valor de x para $y = 0.5$ es próximo a cero. Dado que la curva pasa por el punto $(0, 1)$, un valor de tensión elevado de la media implica la presencia de fuertes gradientes de humedad en la zona de bajas tensiones.

La disminución del valor de la media de la distribución normal tiene como consecuencia el aumento de la tensión media, el aumento del valor de x para $y = 0.5$, y la consiguiente disminución del gradiente medio entre el punto $(0, 1)$ y el punto de la curva correspondiente a la tensión media.

En la Figura 19, se puede comprobar que las curvas con el mismo valor de tensión se cortan en el punto correspondiente a $y = 0.5$. Así ocurre con las curvas SIMU0000 y SIMU0400, por una parte, y con las curvas SIMU4000 y SIMU4400, por otra.

En la misma figura se observa la tensión media aumenta cuando disminuye el valor de la media de la distribución normal. En las dos curvas con una media $\mu=-0.5$, el corte de ambas se produce a una tensión de 4.95 cm de columna de agua. En las dos con el valor de la media de -2.5 el cruce se produce a la tensión de 36.55 cm de columna de agua.

La curva SIMU2200 corresponde a la curva intermedia, con una media $\mu=-1.5$ y una tensión media $h=13.46$.

6.4.5.1.2 *Incidencia de la desviación estándar en la curva de retención de agua*

La curva de retención de agua es consecuencia de la distribución normal acumulada. Un valor bajo de la desviación estándar da lugar a una distribución normal acumulada con un fuerte gradiente en las zonas próximas a la media. Este gradiente disminuye conforme aumenta el valor de la desviación estándar.

El paso de la variable logarítmica a la variable no logarítmica provoca un cambio de escala, que varía en función del valor de la variable. Este cambio de variable provoca un cambio de gradiente, pero, para un mismo valor de la media de la distribución, el aumento de la desviación estándar provoca una disminución del gradiente de humedad en la zona próxima al valor de la tensión media equivalente.

Las curvas SIMU0400 y SIMU4400 tienen un valor de la desviación estándar $\sigma=1.5$. Los gradientes de humedad de estas curvas en la zona próxima a la media son menores que los de las correspondientes curvas de retención de agua, SIMU0000 y SIMU4000 con los mismos valores de la media y desviación estándar $\sigma=0.3$, inferior a las anteriores. El aumento del valor de la desviación estándar suaviza la curva de retención de agua, produciendo la descarga de agua en un intervalo más amplio de tensiones. Su disminución provoca una caída brusca, en la que el agua contenida en el sustrato se libera en un corto intervalo de tensiones.

La combinación de determinados valores de media y desviación estándar provoca la formación de una zona en las tensiones bajas en la que el valor de la proporción de agua es igual a 1, es decir todos los poros están saturados. La amplitud de esta zona saturada se ve favorecida por los valores elevados de la tensión media y por los valores bajos de la desviación estándar.

6.4.5.2 *Incidencia en la proporción de agua de los errores de la media y desviación estándar de la distribución normal. Evolución en función de la tensión de humedad*

La expresión (244) proporciona la incidencia en la proporción de agua de los incrementos en la media y la desviación estándar del modelo. Cuando $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$ se refieren a los errores de estimación de los parámetros μ y σ , ΔL es el error en la estimación de la proporción de agua. El sustraendo de la expresión (244) corresponde a la curva de referencia, supuesta sin error, definida por los valores de μ y σ . El minuendo corresponde a la curva obtenida con los valores de μ y σ incrementados, es decir, afectados por el error.

Los incrementos de la media y la desviación estándar considerados en el análisis de sensibilidad son, en todos los casos, positivos. La situación con incrementos negativos es similar. Su relación con la situación estudiada de incrementos positivos, se detalla en el apartado 6.4.5.2.3.

En la Figura 20, se muestra la relación entre el incremento de μ y σ y la tensión de humedad. En el ejemplo mostrado se parte de una curva SIMU1000, con unos valores $\mu =$

-1 y $\sigma = 0.3$. La Figura 20A corresponde al efecto de los incrementos de la desviación estándar sin incremento de la media (SIMU100_). La Figura 20B corresponde a una situación similar en la que el valor de la media ha pasado de -1 a -0.75 (SIMU105_). Las líneas que se presentan en ambas figuras corresponden a los distintos incrementos de la desviación estándar, con valores que van desde 0.3 (SIMU10_0) hasta 0.55 (SIMU10_5).

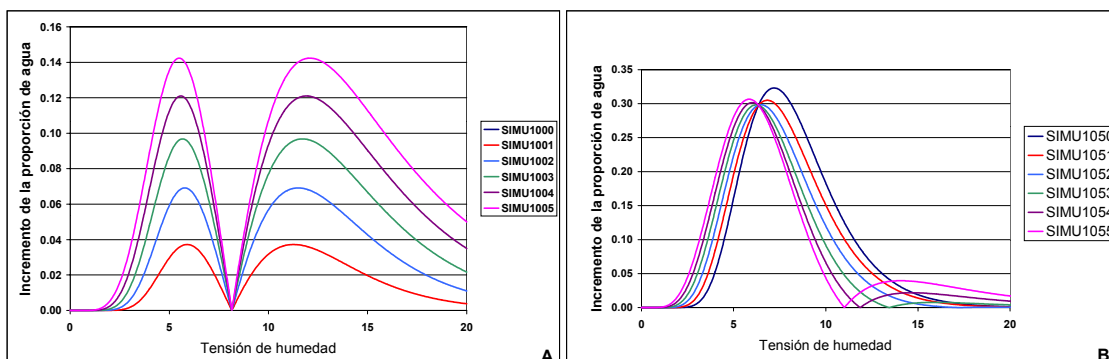


Figura 20: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Diferencia entre los valores calculados por el modelos con los unos valores iniciales de μ y σ y con valores incrementados de estas variables.

6.4.5.2.1 Error de la media igual a cero ($\Delta\mu=0$). Media de las curvas estudiadas igual a media de la curva de referencia

En el primer caso (SIMU100_), el valor de la media de la distribución normal, común a todas las curvas, coincide con el valor de la media de la curva de referencia, SIMU1000. Teniendo en cuenta lo dicho en 6.4.5.1.1, todas las curvas se cortan en el valor de tensión media. Al valor $\mu=-1$ le corresponde un valor de la tensión media $t=8.15$ cm de columna de agua. Por lo tanto, la diferencia entre los valores de proporción de agua para este valor de tensión es igual a cero.

La diferencia entre las curvas representadas en la Figura 20A está en el valor de la desviación estándar, que varía entre 0.3, para SIMU1000, y 0.55 para SIMU1005. El aumento de la desviación estándar provoca, como se ha visto en 6.4.5.1.2, una disminución del gradiente de humedad en la zona próxima a la tensión media equivalente. El efecto es el mismo que se ha observado en la Figura 19 entre las curvas SIMU00 y SIMU40, o entre las curvas SIMU40 y SIMU44. La curva bascula sobre la media, disminuyendo el valor de la proporción de agua en la zona anterior a la media y aumentando en la zona posterior.

Como consecuencia de esto, los valores absolutos de las diferencias presentan dos máximos, uno a cada lado de la tensión media. Para cada valor de σ , estos dos máximos tienen el mismo valor. Su magnitud es tanto mayor cuanto mayor es la diferencia entre la desviación estándar de la curva considerada y la de la curva de referencia (Figura 20B).

6.4.5.2.2 Error de la media mayor que cero ($\Delta\mu>0$). Media de las curvas estudiadas mayor que la media de la curva de referencia

El aumento del valor de la media tiene como consecuencia la disminución de la tensión media y el desplazamiento de la curva hacia la izquierda. Con ello, aumentan las diferencias a la izquierda de la tensión media y disminuyen a la derecha. Cuanto más aumenta el valor de la media con respecto a la curva de referencia, mayor es el máximo de

la izquierda y menor es el de la derecha, llegando incluso a aparecer un solo máximo (Figura 20B).

Cuando la variación de la media con respecto a la curva de referencia es pequeña, el valor del máximo a la izquierda de la tensión media presenta variaciones muy importantes, en función de la variación de la desviación estándar respecto a la curva de referencia. En la Figura 20A se aprecia claramente este efecto: el máximo varía desde cero, para $\Delta\sigma=0$ (SIMU1000) hasta 0.14, para $\Delta\sigma=0.25$ (SIMU1005).

El aumento del $\Delta\mu$ produce, además del aumento del máximo, el acercamiento de los máximos correspondientes a los diferentes $\Delta\sigma$. En la Figura 20B con un $\Delta\sigma=0.25$ con respecto a la curva de referencia, se observa que todos los máximos oscilan alrededor de 0.30. La variación en función de $\Delta\sigma$ es muy pequeña.

6.4.5.2.3 Generalización a valores negativos de los incrementos

Si los incrementos de la media y de la desviación estándar son negativos, la situación es similar a la descrita. La disminución de la desviación estándar aumenta el valor del gradiente en las proximidades de la tensión media. La disminución de la media aumenta el valor de la tensión media y desplaza la curva hacia la derecha, aumenta la magnitud del máximo a la izquierda de la tensión media, y disminuye la del máximo de la derecha, siendo la situación igual a la descrita en el apartado anterior.

	$\Delta\mu>0$ Desplazamiento de la curva a la izquierda	$\Delta\mu<0$ Desplazamiento de la curva a la derecha
$\Delta\sigma>0$: Aumento del gradiente en las proximidades de la tensión media	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumenta máximo de la izquierda ➤ Disminuye máximo de la derecha 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Disminuye máximo de la izquierda ➤ Aumenta máximo de la derecha
$\Delta\sigma<0$: Disminución del gradiente en las proximidades de la tensión media	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Disminuye máximo de la izquierda ➤ Aumenta máximo de la derecha 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumenta máximo de la izquierda ➤ Disminuye máximo de la derecha

Tabla 121 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Incidencia del signo de los errores de μ y σ en la evolución del ΔL , en función de la tensión.

Si el incremento de la media es positivo y el de la desviación estándar es negativo, la situación es simétrica a la descrita. La disminución de la desviación estándar aumenta el gradiente. El aumento de la media desplaza la curva hacia la izquierda, con lo que disminuye el máximo a la izquierda de la tensión media y aumenta el de la derecha.

Por último, si el incremento de la media es negativo y el de la desviación estándar es positivo, la situación también es simétrica a la descrita. El aumento de la desviación estándar reduce el gradiente. La disminución de la media desplaza la curva hacia la derecha, disminuyen las diferencias a la izquierda de la tensión y aumentan a la derecha.

6.4.5.3 Evolución de la diferencia máxima (ΔL) en función del valor de la media, desviación estándar, error de la media y error de la desviación estándar.

Las variables que intervienen en el cálculo de ΔL definido en la ecuación (244), son el valor de la media (μ), de la desviación estándar (σ), y los incrementos de la media ($\Delta\mu$) y de la desviación estándar ($\Delta\sigma$).

La complejidad de la ecuación (244) dificulta la obtención de una solución analítica para estudiar la incidencia de los cuatro factores considerados en ΔL . Por ello, se ha recurrido a la obtención de resultados mediante simulación, aplicando el modelo con los criterios detallados en el apartado 6.4.4.

El valor obtenido para ΔL en las simulaciones realizadas, es independiente del valor de la media de la distribución normal. Si se mantienen constantes los valores de σ , $\Delta\sigma$ e $\Delta\mu$, y se varía el valor de la media (μ), el valor máximo de ΔL permanece constante. La variación de la media incide en el valor de tensión en que se produce el máximo, pero no en la magnitud de éste.

Para unos determinados valores de $\Delta\sigma$ e $\Delta\mu$, el valor de ΔL es tanto mayor cuanto menor es el valor de σ . Es decir, la sensibilidad de ΔL a los errores de la media y de la desviación estándar aumenta con la disminución de la desviación estándar. La relación entre el valor de ΔL y la desviación estándar (σ) de la distribución normal se ajusta a una función potencial de la forma:

$$(248) \quad \Delta L = a \sigma^b$$

Para estimar los valores de a y b en esta ecuación, se ha transformado en una ecuación lineal aplicando logaritmos:

$$(249) \quad \text{Ln}(\Delta L) = \text{Ln}(a) + b \text{Ln}(\sigma)$$

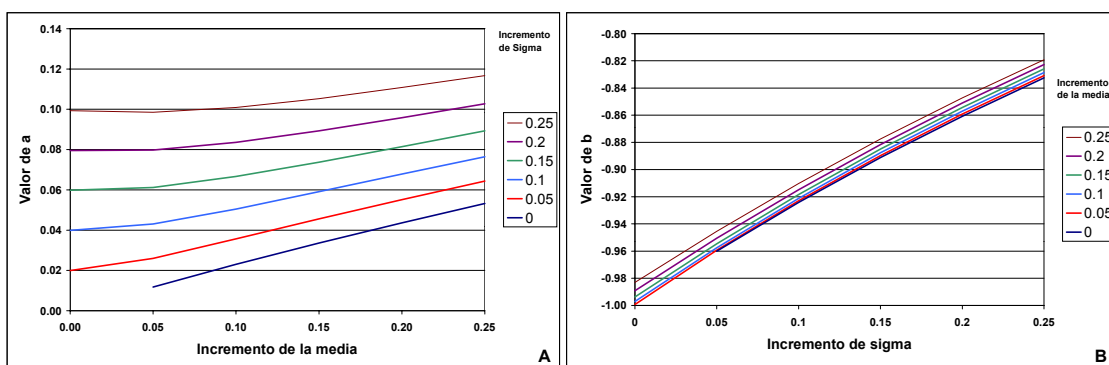


Figura 21: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Evolución de los valores de los parámetros a y b de la ecuación (248) en función de los incrementos de la media y de la desviación estándar (sigma) de la distribución normal.

Para cada combinación de errores $\Delta\mu \cdot \Delta\sigma$, se han ajustado a la ecuación (249) los datos de $\text{Ln}(\Delta L)$ y $\text{Ln}(\sigma)$. En todos los casos, el valor de R^2 de ajuste a la recta (249) es superior a 0.998, el valor de F es mayor que 1600 y el valor α de probabilidad de error de

tipo I es en todos los casos $\alpha < 10^{-4}$. Podemos asumir, por tanto, la hipótesis de que $\ln(\Delta L)$ es función lineal de $\ln(\sigma)$, o lo que es lo mismo, que el ΔL es función potencial de σ , siguiendo la función expresada en la ecuación (248).

El valor del parámetro a de la ecuación (249) se obtiene a partir del $\ln(a)$, estimado por ajuste lineal de los datos a la ecuación (249). El valor del parámetro b se obtiene directamente por estimación lineal de los datos a la ecuación (249).

En la Figura 21 se representa la evolución de los dos parámetros (a y b) de la ecuación (248) en función de los incrementos de la media y de la desviación estándar de la distribución normal.

El valor de a presenta una relación próxima a la lineal con respecto al incremento de la media. Las líneas presentan una ligera concavidad hacia abajo. El ajuste a una recta de los valores de a en función de $\Delta\mu$ para cada valor de $\Delta\sigma$, proporciona, en todos los casos, unos valores de R^2 superiores a 0.99 y un nivel de significación $\alpha < 10^{-5}$.

Si se consideran conjuntamente las dos variables, $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$, los valores del parámetro a se encuentran situados en una superficie con una ligera concavidad hacia abajo. La regresión lineal de estos datos, considerando las dos variables independientes, indica el grado de aproximación de los puntos a un plano. En esta hipótesis, el valor del parámetro a se ajusta al plano:

$$(250) \quad a = 0.00997 + 0.1353 \Delta\mu + 0.3077 \Delta\sigma$$

	Parámetro a		Parámetro b	
	Estimado	Error estándar	Estimado	Error estándar
Término independiente	0.00998	0.00188	-0.99556	0.00155
Pendiente para $\Delta\mu$	0.13531	0.00914	0.66536	0.00755
Pendiente para $\Delta\sigma$	0.30767	0.00914	0.05509	0.00755
R^2	0.9758		0.9959	
α	$1.36 \cdot 10^{-26}$		$6.34 \cdot 10^{-39}$	

Tabla 122 : Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Ajuste de los parámetros a y b de la ecuación (248) a un plano considerando como variables independientes $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$.

El valor del parámetro b presenta una situación muy similar. En este caso, el ajuste lineal es mejor cuando el parámetro b se relaciona con $\Delta\sigma$. La superficie en la que se encuentran los valores b , presenta una ligera concavidad hacia arriba. Esta superficie se aproxima al plano definido por la ecuación:

$$(251) \quad b = -0.9956 + 0.6657 \Delta\mu + 0.0551 \Delta\sigma$$

En la Tabla 122 se detallan los valores estimados y los correspondientes errores estándar para el ajuste de a y b al plano. Los valores detallados en la misma tabla, próximo a 1 para R^2 y muy inferior a 0.01 para el nivel de significación α , ponen de manifiesto la gran proximidad al plano de las superficies definidas por los parámetros a y b .

El valor de a está fuertemente condicionado por $\Delta\sigma$. El término independiente se puede considerar prácticamente cero, y la pendiente para la variable $\Delta\mu$ es menos de la mitad de la pendiente que afecta a la variable $\Delta\sigma$. En el intervalo de trabajo considerado, el valor de a está comprendido entre los valores $0 \leq a \leq 0.12$.

En el caso de b , el término independiente se puede considerar prácticamente igual a -1 . A diferencia de lo visto para el parámetro a , el valor de b está fuertemente condicionado por $\Delta\mu$. El factor por el que hay que multiplicar $\Delta\mu$ (0.66) es más de 10 veces superior al factor que afecta a $\Delta\sigma$ (0.055). En el intervalo de trabajo considerado, el valor de b está comprendido entre los valores $-1 \leq b \leq -0.85$.

La expresión para estimar el error máximo (ΔL) en función de σ , $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$, se obtiene sustituyendo en (248) los valores de a y b obtenidos en (250) y (251), respectivamente:

$$(252) \quad \Delta L = (0.00997 + 0.1353 \Delta\mu + 0.3077 \Delta\sigma) \times \sigma^{(-0.9956 + 0.6657 \Delta\mu + 0.0551 \Delta\sigma)}$$

La expresión (252) se ha obtenido de una forma totalmente empírica. Por lo tanto, su aplicación se limita a los intervalos de variación considerados en la simulación para las distintas variables detalladas en el apartado 6.4.4.1:

- $-2.5 \leq \mu \leq -0.5$
- $\varepsilon_x \leq 0.25$
- $0.3 \leq \sigma \leq 1.5$
- $\varepsilon_\sigma \leq 0.25$

La independencia del valor ΔL con respecto a μ se presenta en todos los casos considerados. El valor de ΔL es exactamente el mismo en todos los casos considerados, por lo que parece que se puede aplicar para cualquier valor de μ .

Los elevados valores de R^2 , y los bajos valores de α obtenidos, proporcionan una elevada fiabilidad a la relación potencial entre los valores de ΔL y σ . Es por tanto previsible que esta relación se puede extender más allá de los límites marcados para el valor de σ .

Los valores de a y b están en una superficie curva definida por una ecuación matemática desconocida. A efectos de cálculo, las porciones de superficie definidas por los intervalos $0 \leq \Delta\mu \leq 0.25$ y $0 \leq \Delta\sigma \leq 0.25$ se han asimilado a sendos planos, y esta asimilación proporciona una buena aproximación. Fuera de estos intervalos, las diferencias entre la superficie curva y el plano considerado aumentan y, en consecuencia, disminuye la fiabilidad de las predicciones.

6.4.5.4 Incidencia del error estándar de los parámetros del modelo en el cálculo del reparto volumétrico de fases

La magnitud de los errores estándar de los parámetros inciden en la variabilidad del valor obtenido para el reparto del volumen total entre aire, agua y material sólido.

La expresión (252), relaciona la media y desviación estándar de la distribución normal (plano normal), y sus errores estándar con el valor de ΔL . La expresión (247) relaciona desplazamiento y escaldado (plano de porosidad), sus errores estándar, L e ΔL , con el valor de ΔV_{Ag} , correspondiente al incremento de volumen ocupado por agua.

En la Tabla 123, se detallan los valores obtenidos para ΔV_{Ag} , para cada uno de los nueve sustratos considerados en el ensayo y para cada una de las cuatro variantes del modelo logarítmico normal. El valor obtenido está condicionado por el valor de L (ver expresión (247)), que corresponde al porcentaje de volumen ocupado por agua. Con objeto de simplificar el cálculo se ha considerado $L=75\%$, es decir, se considera que para el valor de tensión correspondiente al máximo, el 75% del volumen del sustrato está ocupado por agua.

Los valores obtenidos marcan una clara diferenciación entre el comportamiento de los modelos V12 y V14, por un lado, y los modelos V17 y V18, por otro, como ocurría en ocasiones anteriores.

Los valores obtenidos (Tabla 123) son muy elevados para asumirlos como error de medida, pero este error no es la única componente de ΔV_{Ag} . En el apartado 1.3.5.3.2, se ha visto que el error tiene dos componentes: error de medida (1.3.5.3.2.1) y error de muestreo (1.3.5.3.2.2). Allí mismo se ha visto que, en nuestro caso, el error de muestreo corresponde a la variabilidad propia del sustrato. Es importante conocer esta variabilidad para conocer la variabilidad entre macetas o contenedores. Sin embargo, las rutinas de laboratorio empleadas no permiten discriminar estos dos errores (1.3.5.3.2.3). El valor obtenido en la Tabla 123 para ΔV_{Ag} es el resultado de la combinación del error de medida y de la variabilidad del sustrato. Considerando esta interpretación del error, es lógico que los valores más bajos de ΔV_{Ag} se correspondan con los sustratos más homogéneos (mezclas en las que interviene la escoria).

	V12	V14	V17	V18
Sustrato 1	4.92%	5.74%	6.02%	
Sustrato 2	7.89%	8.12%	4.45%	4.56%
Sustrato 3	6.95%	7.17%	7.36%	7.22%
Sustrato 4	6.26%	6.52%	5.56%	5.61%
Sustrato 5	5.13%	4.99%	1.98%	
Sustrato 6	5.27%	5.37%	3.00%	3.08%
Sustrato 7	4.23%	4.40%	1.85%	1.92%
Sustrato 8	4.65%	4.70%	2.79%	2.85%
Sustrato 9	6.51%	6.51%		

Tabla 123: Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro. Análisis de sensibilidad: Incidencia máxima de los errores estándar de los parámetros del modelo logarítmico normal en el cálculo del porcentaje de volumen ocupado por agua (ΔV_{Ag})

En cualquier caso es importante puntualizar la incidencia de estos valores: en primer lugar, hay que decir que el máximo corresponde a un valor puntual de tensión de humedad, como se puede ver en la Figura 20. El valor medio para un intervalo de

tensiones es menor. En segundo lugar, el valor máximo de ΔV_{Ag} se presenta siempre para un valor bajo de la tensión de humedad, normalmente por debajo de 10 cm de columna de agua. En un elevado porcentaje de los casos, este valor es inferior a la altura del contenedor. Como consecuencia, incide directamente en el cálculo de la capacidad de contenedor. Dado que ésta interviene como minuendo en el cálculo de la dosis de riego, ΔV_{Ag} está incidiendo en el cálculo de la dosis de riego; como error de cálculo, en su componente de error, y como variabilidad entre macetas en la componente debida a la heterogeneidad del sustrato.

La imposibilidad de conocer la incidencia en las dos componentes de ΔV_{Ag} , hace necesario hacer hipótesis de trabajo para interpretar los resultados. En el caso de que la más importante sea la componente debida al error de medida, la fiabilidad de las predicciones es escasa. La solución pasa por replantear la metodología de laboratorio. Se debe modificar para conseguir mayor control de los errores de medida, puesto que, desde este punto de vista, los valores obtenidos no son asumibles.

En el caso de que la componente más importante sea debida a la heterogeneidad propia del sustrato, estos datos están informando sobre la heterogeneidad que podemos encontrar entre las macetas, contenedores, sacos, etc, llenados con un determinado lote. El valor de ΔV_{Ag} , está informando sobre la heterogeneidad de las macetas, sobre la variabilidad de la capacidad de contenedor, y en definitiva sobre la variabilidad entre macetas de la dosis de riego a aplicar. Cuando se aplica un riego excedentario para provocar drenaje, la consecuencia es la variabilidad entre macetas del porcentaje de drenaje y del potencial matricial en el momento de aplicar el riego. La solución es homogeneizar el sustrato adecuadamente antes del enmacetado. La homogeneización de la muestra de laboratorio, únicamente enmascararía esta heterogeneidad, que se mantendría entre los distintos envases del sustrato.

6.5 Recapitulación

6.5.1 *Modelo logarítmico normal*

6.5.1.1 Definición del modelo

La curva de retención de agua es consecuencia de la distribución del tamaño de poro. Se plantea, como hipótesis de partida, que esta distribución es logarítmico normal, es decir, el logaritmo del diámetro de poro sigue una distribución normal. La relación entre tamaño de poro y potencial matricial se obtiene aplicando la ley de capilaridad de Jurin.

El modelo planteado para la curva de retención de agua queda definido por cuatro parámetros: dos que definen la curva normal, media y desviación estándar, y otros dos de modulación, desplazamiento y escalado.

6.5.1.2 Aplicación y simplificaciones

La utilización del modelo para el control del riego requiere la determinación previa de los parámetros, que se obtiene a partir de los datos experimentales del reparto de aire y de agua, medidos en laboratorio para distintos valores del potencial matricial.

Para agilizar los cálculos se propone una simplificación del modelo, en la que el valor medio del contenido de agua en un volumen de sustrato se sustituye por el contenido de humedad en la sección media. De esta forma, se sustituye la integral doble, necesaria para el cálculo del reparto aire-agua en un volumen de sustrato, por una integral sencilla, con la que se calcula el reparto de aire y agua en una sección diferencial, situada en la mitad de la altura de la muestra.

El modelo proporciona un valor para la porosidad total del sustrato, obtenido como suma del desplazamiento más el escalado. La porosidad total también se obtiene experimentalmente, en laboratorio.

6.5.2 *Evaluación del modelo*

Para evaluar el modelo se compara su comportamiento con el modelo de Van Genuchten, empleado en suelos y sustratos, y con otros dos modelos polinómicos, empleados también en sustratos de cultivo. Además de la comparación con otros modelos, se evalúa también la influencia de factores que inciden en el modelo, como son:

- Incidencia de los valores iniciales del proceso de ajuste
- Comparación entre modelos
- Validez del calibrado para sustratos con características diversas
- Simplificación del modelo de integral doble por integral sencilla
- Empleo como dato del valor de porosidad obtenido experimentalmente

Para cubrir estos objetivos, se parte de datos experimentales para nueve sustratos, de características muy diversas, que se ajustan a los modelos considerados.

6.5.3 *Resultados*

6.5.3.1 Incidencia de los valores iniciales del proceso de ajuste

Los problemas de ajuste detectados se deben a la falta de convergencia del programa de ajuste. No se han detectado mínimos locales, que puedan interferir en el cálculo.

El modelo logarítmico normal simplificado a una integral sencilla presenta unas bajas exigencias en cuanto a los valores iniciales. La precisión requerida es baja, bastando con una cifra significativa. El modelo converge cuando los valores iniciales están dentro de un amplio intervalo de variación, considerado como normal para cada variable.

El modelo logarítmico normal completo, con integral doble, presenta unas exigencias muy rigurosas para los valores iniciales. Se debe partir de valores iniciales ajustados, con varias cifras significativas correctas, ya que en otro caso no se produce convergencia. La entrada del valor de la porosidad total como dato, aumenta las posibilidades de no convergencia. Los mejores resultados se obtienen cuando se emplean como datos iniciales los valores de los parámetros obtenidos con el programa de ajuste

correspondiente de integral sencilla. En otro caso, lo normal es que no se produzca convergencia.

6.5.3.2 Comparación entre modelos: Ajuste entre datos experimentales y modelo

El test de falta de ajuste es significativo para la mayoría de los casos considerados. Esta falta de ajuste se debe más a la magnitud de los errores de medida de los datos experimentales, que al empleo de los diferentes modelos; las diferencias entre éstos son inferiores a las diferencias entre valores repetidos.

La modificación de las rutinas de laboratorio tendente a disminuir los errores de medida permitirá, presumiblemente, un aumento de la sensibilidad y la discriminación entre modelos, que ahora se presentan como iguales.

6.5.3.3 Incidencia del factor sustrato

Los sustratos considerados en el análisis presentan una capacidad variable para discriminar el comportamiento de los ocho modelos estudiados. Para unos sustratos, los modelos se clasifican en tres grupos claramente diferenciados. Para otros, las diferencias son menores y no llegan a ser significativas, pero se mantienen las mismas agrupaciones. Finalmente, para otros, los modelos no presentan diferencias apreciables entre ellos.

La capacidad de un sustrato para discriminar el comportamiento de los modelos está relacionada con la magnitud de los errores experimentales de medida. La agrupación de los modelos es más nítida en los sustratos en los que los errores de medida son mayores.

Estos errores de medida están relacionados con el gradiente de humedad del sustrato respecto al potencial matricial. Este gradiente está a su vez relacionado con el valor de la media y la desviación estándar de la distribución logarítmico normal. Los sustratos con tamaño de poro grande presentan fuertes gradientes a tensiones bajas y una gran sensibilidad a pequeñas variaciones en los parámetros de medida. La consecuencia es el aumento de los errores experimentales de medida.

Para disminuir los errores de medida en esta zona de fuertes gradientes, es necesario modificar la metodología de laboratorio, teniendo en cuenta esta circunstancia. Previsiblemente, esto aumentará la sensibilidad a las diferencias entre modelos.

6.5.3.4 Incidencia de la simplificación del modelo en el ajuste de los datos experimentales

Los datos analíticos clasifican los modelos considerados en grupos de comportamiento. La clasificación es la misma en todos los casos, tanto si se trata de diferenciación clara entre grupos como si se trata de una simple tendencia.

Las cuatro variantes consideradas para el modelo logarítmico normal aparecen siempre clasificadas de la misma forma: por una parte, los modelos V12 – V14 y por otra, los modelos V17 – V18. Cada una de estas dos parejas está formada por el modelo de integral doble y el equivalente de integral sencilla; los modelos de la misma pareja se pueden considerar equivalentes entre sí, ya que las diferencias entre ellos son mínimas.

La simplificación del modelo de integral doble por integral sencilla no incide de forma negativa en la fiabilidad de los cálculos realizados. Esta simplificación presenta una ventaja importante en cuanto a la facilidad de cálculo. En definitiva, esta simplificación resulta claramente ventajosa.

6.5.3.5 Incidencia del empleo del valor de la porosidad total experimental como dato en el programa de ajuste

La clasificación anteriormente mencionada agrupa los modelos V12 – V14 por un lado, y V17 – V18, por otro. En los dos primeros, el valor de la porosidad obtenido experimentalmente no interviene en el programa de ajuste; ambos programas calculan el valor de la porosidad del sustrato sin tener en cuenta este valor experimental. En los dos segundos, el valor experimental de la porosidad interviene como dato en el programa de ajuste.

En los modelos V17 y V18, la suma de los valores de desplazamiento y escalado coincide, lógicamente, con el valor de porosidad que interviene como dato. En los modelos V12 y V14, la suma de desplazamiento + escalado no coincide con el valor experimental de la porosidad. La diferencia entre ambos es tanto mayor cuanto mayores son los errores de medida. Una y otros son tanto mayores cuanto mayor es el gradiente de la curva de retención de agua a bajas tensiones.

Para reducir la diferencia entre los dos valores mencionados, es necesario reducir los errores de medida y aumentar el número de puntos de medida en la zona de bajas tensiones, con fuerte gradiente de humedad.

6.5.3.6 Comparación con el modelo de Van Genuchten

La clasificación de los modelos empleados en grupos de comportamiento, agrupa el modelo M1 de Van Genuchten con los modelos V12 y V4 del modelo logarítmico normal, y el modelo M4 de Van Genuchten con los modelos V17 y V18 del logarítmico normal. En los primeros, el valor experimental de la porosidad total no interviene en el ajuste, mientras que en los segundos sí lo hace.

Dentro de un mismo grupo, las diferencias entre el modelo de Van Genuchten y los modelos logarítmico normales son similares a las diferencias entre los modelos logarítmico normales. Únicamente en el caso del escalado se presentan diferencias entre el modelo de Van Genuchten y el logarítmico normal.

Si se comparan los modelos desde el punto de vista conceptual, el logarítmico normal es más favorable. Los cuatro parámetros que lo definen corresponden a características físicas previamente definidas. En el modelo de Van Genuchten, dos parámetros corresponden a características físicas y otros dos son de ajuste. El carácter totalmente conceptual del modelo logarítmico normal le proporciona una mayor potencia de simulación del comportamiento hídrico del sustrato.

6.5.3.7 Comparación con los modelos polinómicos

El comportamiento de los modelos polinómicos es diferente al de los modelos logarítmico normales y de Van Genuchten. Los indicadores estadísticos muestran un comportamiento inconsistente si se comparan con los otros modelos.

Desde el punto de vista conceptual, ninguno de los parámetros que los definen se corresponde con variable física alguna, ya que todos son parámetros de ajuste estadístico. Esto hace que la capacidad de simulación del modelo sea inferior a la de los otros modelos considerados.

6.5.4 *Análisis de sensibilidad*

6.5.4.1 Fundamentos

El análisis de sensibilidad estudia la incidencia de los errores de medida de las variables independientes en la variable dependiente.

La forma matemática del modelo no permite relacionar directamente el error inducido en la variable dependiente con los errores de las variables independientes. Para estudiar esta incidencia se procede a la simulación del modelo, incrementando los valores de entrada y calculando los incrementos de salida. La relación entre ellos se establece de forma empírica.

Teniendo en cuenta las variables que intervienen y sus correspondientes incrementos, se ha procedido a la simulación de un total de 900 casos, con 5.000 puntos en cada caso.

6.5.4.2 Resultados

6.5.4.2.1 *Forma de la curva de retención de agua*

El modelo logarítmico normal proporciona un gran polimorfismo a la curva de retención de agua. En términos generales, la curva presenta una meseta en las tensiones próximas a cero, un descenso del contenido de humedad, y una estabilización posterior.

Los valores de la media y la desviación estándar de la curva logarítmico normal determinan el tamaño de la meseta en las tensiones próximas a cero, y la posición y el gradiente del descenso de agua.

6.5.4.2.2 *Incidencia de los distintos factores en la variable de salida*

Dadas las características del modelo, el análisis de sensibilidad se reduce a la incidencia de la media y la desviación estándar de la curva logarítmico normal y la de sus correspondientes errores. En el estudio se considera un ΔL , correspondiente al valor del incremento de la función integral.

El valor de la media no incide en el valor de ΔL . Únicamente afecta al valor de tensión en el que se produce el máximo valor de ΔL , pero no a su magnitud.

El valor de ΔL es tanto menor cuanto mayor es el valor de σ . La relación entre ambos valores se ajusta a una función potencial de la forma $\Delta L = a \sigma^b$, donde a y b dependen de $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$.

Los valores de a y b están relacionados con $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$. La relación de a con $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$ por una parte, y de b con $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$ por otra, se ajustan bien a un plano. El valor de a está fuertemente condicionado por $\Delta\sigma$, mientras que $\Delta\mu$ tiene una incidencia muy superior a $\Delta\sigma$ en el valor de b .

6.5.4.2.3 Incidencia de los errores estándar de los parámetros en el caso de los sustratos estudiados

Los valores obtenidos para ΔV_{Ag} tienen dos componentes: una debida al error de medida, otra debida a la heterogeneidad del sustrato. La primera incide en la fiabilidad de la predicción, la segunda en la variabilidad de las macetas o sacos de sustrato. La solución a los errores de medida pasa por la modificación de las rutinas de laboratorio. La segunda se ha de tener en cuenta en el cálculo de la dosis y momento de riego. Si la variabilidad entre macetas es excesiva, se hace necesario homogeneizar el sustrato antes de su enmacetado.

7 ERRORES DE MEDIDA

7.1 Introducción

La disponibilidad de datos condiciona la construcción y uso de un modelo. Son varios los autores que tratan la relación entre las características de los datos experimentales y las limitaciones del modelo (Baker y Curry, 1976; Whisler *et al.*, 1986; Boote *et al.*, 1996; Sinclair y Seligman, 1996; Quintana *et al.*, 1997). La fiabilidad del modelo obtenido está relacionada con la exactitud y precisión de los datos experimentales empleados en su desarrollo.

Los errores de medida dependen exclusivamente de la fase experimental. Desde este punto de vista, hubiera sido lógico situar este apartado a continuación del desarrollo metodológico.

Sin embargo, el trabajo realizado para el desarrollo del modelo, complementa la información procedente del trabajo experimental respecto a los errores de medida. Los apartados de desarrollo del modelo útiles para el estudio de errores son fundamentalmente dos:

- El propio modelo, que proporciona un valor de la variable dependiente que, a falta de un valor cierto, podemos considerar como el más probable en el estudio de la exactitud de las mediciones efectuadas.
- Asumiendo como valores de referencia los calculados por el modelo, los residuos corresponden a los errores. En este caso, la comparación entre los análisis de los residuos y sus valores absolutos proporciona información sobre la incidencia relativa de factores fijos que afectan a la exactitud, y de los factores aleatorios que afectan a la precisión.

Las medidas repetidas sobre un mismo sustrato proporcionan información suficiente para evaluar la precisión. La información sobre la exactitud está muy limitada por la falta de un valor de referencia absoluto, y porque el único valor de referencia relativo viene dado por una inecuación. La consideración, como valor de referencia, del valor calculado por el modelo, aumenta de forma considerable la información disponible sobre la exactitud de las mediciones, aunque ha de tenerse en cuenta que, en realidad, no se trata de un valor cierto, sino del valor más probable.

La exactitud y la precisión de las medidas efectuadas son los dos componentes del error total que afectan a todo proceso experimental. Los factores que afectan a la exactitud y a la precisión son distintos, y la forma de corregirlos también. Las pautas a seguir, o las correcciones a introducir en las rutinas de análisis, son diferentes para corregir una y otra. Por ello es importantes conocer la incidencia de la exactitud y de la precisión en el error total.

El estudio comparado de los residuos y de sus valores absolutos permite evaluar la incidencia relativa de estos dos componentes del error. La reducción de los errores de medida se obtendrá interviniendo sobre los factores fijos y/o controlando los factores aleatorios que inciden en el proceso de medida, según se trate de problemas de exactitud o precisión, respectivamente.

7.2 Objetivos

El objetivo que se plantea en esta apartado es: evaluar la incidencia relativa de la falta de exactitud y de la falta de precisión en el error total de medida.

7.3 Material y Métodos

7.3.1 Precisión

En 1.3.5.3.1.2 se ha tomado la definición de precisión de Willard *et al.* (1965) que la definen como el grado de aproximación de un número de resultados similares o repetidos a un valor común, en una serie de medida.

La precisión de las mediciones se evalúa mediante los parámetros de dispersión:

- Suma de cuadrados: Se obtienen como suma de los cuadrados de las diferencias entre cada valor experimental y el valor medio de la serie. $SC = \sum (x_i - \bar{x})^2$
- Cuadrado medio: Se obtiene como cociente entre la suma de cuadrados y los grados de libertad. $CM = \sum (x_i - \bar{x})^2 / g.l.$
- Raíz cuadrada del cuadrado medio del error. Se obtiene como raíz cuadrada del cociente entre la suma de cuadrados del error y sus grados de libertad. $RCME = \sqrt{CME}$

La suma de cuadrados es aditiva. Este carácter aditivo, permite descomponer la suma de cuadrados total de un ensayo en las componentes debida a cada una de las fuentes de variación que interviene. También se puede aplicar en sentido inverso, la suma de cuadrados total es igual a la suma de las sumas de cuadrados correspondientes a cada una de las fuentes de variación. La descomposición de la suma de cuadrados total en sus componentes permite calcular la incidencia relativa de cada fuente de variación en la variabilidad total del ensayo.

El cuadrado medio pierde el carácter aditivo de la suma de cuadrados. La división por los grados de libertad elimina la incidencia de desequilibrios, que se dan en la suma de cuadrados derivados de desequilibrios en el número de datos de los distintos tratamientos. El cuadrado medio del error corresponde a la varianza.

Cuando el valor de la media (\bar{x}) considerado en el cálculo de la suma de cuadrados se obtiene para cada nivel de tratamiento o de las combinaciones de tratamientos que intervienen en el ensayo, las diferencias entre cada valor y su media correspondiente depende de los errores de medida. La suma de las sumas de cuadrados parciales corresponde a la suma de cuadrados del error (SCE), y a partir de ella se obtiene el cuadrado medio del error (CME) y la raíz cuadrada de este (RCME).

7.3.2 Exactitud

En 1.3.5.3.1.1 se ha tomado la definición de exactitud de Willard *et al.* (1965) que la definen como la diferencia entre el valor verdadero y el valor medido. Pero dado que no

existe un método absoluto para medir magnitudes físicas, el valor verdadero se sustituye por el más probable entre los datos disponibles.

Baker y Curry (1976) hacen una adaptación de esta definición al caso de modelos y definen la exactitud como la magnitud de la diferencia entre el valor simulado por el modelo y el valor verdadero de una larga serie de pruebas en condiciones diversas.

De estas definiciones se deducen los métodos empleados para evaluar la exactitud de las mediciones efectuadas, a saber:

- Patrón de medida: En nuestro caso no se dispone de ningún valor de referencia cierto de carácter absoluto (patrón de medida).
- Valor de referencia cierto de carácter relativo: En el apartado 6.1.3.3 se ha visto que el gradiente de humedad con respecto a la tensión es siempre negativo. La obtención de valores experimentales contrarios a este gradiente pone de manifiesto la falta de exactitud de las mediciones efectuadas.
- Valor de referencia más probable: Cuando no se dispone de un valor de referencia cierto, éste se puede sustituir por el valor más probable entre los datos disponibles (Willard *et al.*, 1965). Siguiendo este criterio, para evaluar la exactitud de los datos experimentales se pueden emplear como valores de referencia los calculados por el modelo. De alguna forma, este criterio es el de Baker y Curry (1976), pero considerado a la inversa. El valor calculado por el modelo sirve de referencia para evaluar la exactitud de los valores obtenidos experimentalmente.

Las posibilidades de la metodología empleada para evaluar la exactitud de las mediciones efectuadas, es muy limitada y en ningún caso suficiente. No obstante, se ha considerado oportuno elaborar la escasa información al respecto, que se puede extraer de los datos experimentales disponibles.

En la metodología utilizada no se emplean patrones de referencia que proporcionen una estimación fiable de la exactitud de las medidas realizadas. Respecto a valores relativos que puedan servir de referencia, hay que tener en cuenta que la curva de retención de agua es continuamente decreciente, es decir, el gradiente de humedad con respecto a la tensión es siempre negativo o cero ($d\theta/dh \leq 0$).

Aplicando este criterio a los datos obtenidos experimentalmente, se deduce que la diferencia entre los valores de humedad obtenidos para dos tensiones, es de signo contrario al incremento de tensiones correspondiente. La obtención experimental de incrementos de humedad positivos, cuando se aumenta la tensión, solo puede ser debida a errores experimentales en uno o en los dos valores de tensión considerados. Cuando este incremento positivo se produce entre los valores medios de varias repeticiones, es debido a la incidencia de errores sistemáticos, que inciden en la exactitud de las mediciones efectuadas. El valor de este error sistemático es, al menos, la mitad del incremento de humedad entre los dos valores de tensión considerados.

Respecto al empleo como valores de referencia de los valores calculados por los modelos, en nuestro caso, los datos experimentales se han ajustado a un total de ocho modelos. Las diferencias entre los valores calculados por los modelos son, en general, menores que las diferencias entre los valores obtenidos para las distintas repeticiones. Por ello, se han considerado de forma conjunta los valores obtenidos por todos ellos.

7.3.3 *Análisis de los residuos y sus valores absolutos: incidencia de exactitud y precisión*

En los apartados 6.3.4.2.2.1.3 a 6.3.4.2.2.1.7 se presentan los resultados del análisis de varianza de los residuos y de sus valores absolutos. El objetivo allí planteado para este análisis fue encontrar la causa de los desajustes entre modelo y datos experimentales.

Los datos originales de los dos análisis de varianza están relacionados entre sí, unos corresponden a los valores absolutos de los otros. Es lógico pensar que los resultados también estarán relacionados entre sí. El análisis, desde el punto de vista matemático, de estas relaciones y diferencias, permite evaluar numéricamente y de forma objetiva la incidencia de la exactitud y de la precisión en las mediciones realizadas.

Se parte de la hipótesis de que los residuos siguen una distribución normal. La falta de precisión es debida a la incidencia de factores aleatorios. Los errores resultantes se distribuyen siguiendo una distribución normal de media cero y desviación estándar variable. La falta de exactitud es debida a la incidencia de factores fijos, que actúan siempre en un mismo sentido. Los errores sistemáticos resultantes provocan la desviación en un determinado sentido de todas las mediciones efectuadas. Como consecuencia, la media de los residuos tiene un valor distinto de cero.

Por ello, se plantean las siguientes hipótesis de trabajo:

- Los residuos siguen una distribución normal.
- Los factores aleatorios (precisión de las medidas) inciden en la desviación estándar de esta distribución normal. La no incidencia de factores aleatorios da lugar a una desviación estándar igual a cero.
- Los factores fijos (exactitud de las medidas) inciden en el valor medio de la mencionada distribución. La no incidencia de factores fijos da lugar a un valor medio igual a cero.

7.3.3.1 Relación entre valores de los residuos y sus valores absolutos

Teniendo en cuenta estas hipótesis, la relación entre los residuos y sus valores absolutos proporciona información sobre la incidencia de ambos tipos de errores.

En el caso de que los errores sean debidos únicamente a factores aleatorios, los residuos se distribuyen según una normal de media cero, siendo el valor de la desviación estándar función de la incidencia de los factores aleatorios. La distribución de los valores absolutos de los residuos, consecuencia de la anterior, es de frecuencia cero para los valores $x < 0$. Para los valores $x \geq 0$, la frecuencia es igual al doble de la frecuencia de la distribución normal originaria de los residuos.

Si en las mediciones inciden factores fijos, los residuos se distribuyen según una normal de media distinta de cero, cuyo valor, positivo o negativo, depende de la magnitud y sentido de la incidencia debida a estos factores. La desviación estándar es función de la incidencia de factores aleatorios. La distribución de los valores absolutos de los residuos, consecuencia de la anterior, es de frecuencia cero para los valores $x < 0$. Para los valores $x \geq 0$, la frecuencia es igual a la suma de frecuencias de x y de su simétrico ($-x$) de la distribución normal originaria de los residuos.

Así pues, el estudio comparativo de las distribuciones de los residuos y de sus valores absolutos proporciona información sobre la incidencia relativa de los factores fijos y aleatorios en el error de medida.

Para el estudio y evaluación de esta incidencia se consideran dos casos, la distribución discreta de datos, y la más general, de distribución normal. El estudio de la distribución discreta, facilita la comprensión del razonamiento; que es igualmente válido para la distribución continua que se aplicará normalmente.

7.3.3.2 Distribución discreta de datos

La relación entre el residuo y su valor absoluto viene dado por las expresiones:

$$(253) \quad Si : x \geq 0 \rightarrow x = |x|$$

$$(254) \quad Si : x < 0 \rightarrow x = -|x|$$

Supongamos que tenemos un único grupo de n datos, de los que se va a obtener el valor medio (\bar{x}) y la suma de cuadrados del error (SC_{Error}). Las expresiones para calcular uno y otro son:

$$(255) \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$(256) \quad SC_{Error} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Se demuestra que:}$$

$$(257) \quad SC_{Error} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2$$

Supongamos que de los n datos, los datos desde $i=1$ hasta $i=m$ son positivos ($x_i \geq 0$). Los datos desde $i=m+1$ hasta $i=n$ son negativos ($x_i < 0$).

La relación entre los valores de la media de los residuos (\bar{x}) y de sus valores absolutos (\bar{x}_A) es:

$$(258) \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i + \sum_{i=m+1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^m |x_i| - \sum_{i=m+1}^n |x_i|}{n}$$

$$(259) \quad \bar{x}_A = \frac{\sum_{i=1}^m |x_i| + \sum_{i=m+1}^n |x_i|}{n}$$

La diferencia entre las dos medias se obtiene restando (258)-(259):

$$(260) \quad \boxed{\bar{x} - \bar{x}_A = -\frac{2}{n} \sum_{i=m+1}^n |x_i|}$$

Para expresar las sumas de cuadrados, se tiene en cuenta la expresión (257) y la componente correspondiente a los residuos positivos y los negativos. Teniendo en cuenta estos condicionantes, las sumas de cuadrados correspondientes a los residuos (SC_{Error}), y a sus valores absolutos (SC_{EA}) son :

$$(261) \quad SC_{Error} = \sum_{i=1}^m x_i^2 + \sum_{i=m+1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 = \sum_{i=1}^m |x_i|^2 + \sum_{i=m+1}^n (-|x_i|)^2 - n \bar{x}^2 = \sum_{i=1}^n |x_i|^2 - n \bar{x}^2$$

$$(262) \quad SC_{EA} = \sum_{i=1}^m |x_i|^2 + \sum_{i=m+1}^n |x_i|^2 - n \bar{x}_A^2 = \sum_{i=1}^n |x_i|^2 - n \bar{x}_A^2$$

La diferencia entre las dos sumas de cuadrados se obtiene restando (261)-(262):

$$(263) \quad SC_{Error} - SC_{EA} = -n (\bar{x}^2 - \bar{x}_A^2)$$

Teniendo en cuenta que suma *diferencia = diferencia de cuadrados, de (258), (259) y (260) se obtiene:

$$(264) \quad \bar{x}^2 - \bar{x}_A^2 = -\frac{4}{n^2} \sum_{i=1}^m |x_i| \sum_{i=m+1}^n |x_i|$$

Sustituyendo (264) en (263):

$$(265) \quad \boxed{SC_{Error} - SC_{EA} = \frac{4}{n} \sum_{i=1}^m |x_i| \sum_{i=m+1}^n |x_i|}$$

Las ecuaciones (260) y (265) relacionan, respectivamente, los valores medios y las sumas de cuadrados de los residuos y de sus valores absolutos. Las diferencias dependen del factor $\sum_{i=1}^m |x_i|$ y del factor $\sum_{i=m+1}^n |x_i|$, es decir, de los sumatorios de los valores absolutos de los residuos positivos y de los residuos negativos, respectivamente.

Cuando todos los residuos considerados son positivos $m=n$, $\sum_{i=m+1}^n |x_i| = 0$. Cuando todos los residuos son negativos $m=0$ $\sum_{i=1}^m |x_i| = 0$. En el primer caso, todos los residuos positivos, la diferencia de las medias es cero, la media de los residuos es igual a la media de sus valores absolutos. Cuando todos los residuos son negativos, la media de residuos es igual a la media de los valores absolutos con signo negativo. Tanto en uno como en otro caso, la diferencia de sumas de cuadrados es cero, es decir, la suma de cuadrados de los residuos es igual a la suma de cuadrados de sus valores absolutos.

Si los residuos considerados son positivos unos y negativos otros, el término $\sum_{i=1}^m |x_i| \times \sum_{i=m+1}^n |x_i| \neq 0$ por lo que las sumas de cuadrados de los residuos y de sus valores absolutos no serán iguales. Este factor, y por lo tanto la diferencia de las sumas de cuadrados, será tanto mayor cuanto más repartidos estén los residuos a uno y otro lado del

cero. Los dos multiplicandos son sumas de valores absolutos, por lo que su producto será positivo. Por lo tanto, se cumple $SS_{Error} \geq SS_{EA}$.

7.3.3.3 Distribución continua de datos

En este caso se parte de la hipótesis de que la distribución de los residuos responde a la función normal de media m y desviación estándar s . La función de densidad de los residuos es:

$$(266) \quad f(m, s) = \frac{e^{-\frac{(m-x)^2}{2s^2}}}{\sqrt{2\pi} s}$$

La función de densidad de los valores absolutos de esta misma distribución viene dada por la función:

$$(267) \quad f_A(m, s) = \frac{e^{-\frac{(m-x)^2}{2s^2}}}{\sqrt{2\pi} s} + \frac{e^{-\frac{(m+x)^2}{2s^2}}}{\sqrt{2\pi} s}$$

El valor de la media de los valores absolutos se obtiene aplicando la expresión:

$$(268) \quad m_A = e^{-\frac{m^2}{2s^2}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} s$$

La varianza del valor absoluto viene dada por la expresión:

$$(269) \quad s_A^2 = -\frac{2 e^{-\frac{m^2}{s^2}} s^2}{\pi} + (m^2 + s^2) \left(1 + \frac{e^{-\frac{m^2}{2s^2}} m \sqrt{\frac{2}{\pi}}}{s} - \text{Erf}\left(\frac{m}{\sqrt{2} s}\right) \right)$$

La función Erf que se presenta en (269) corresponde a la ecuación:

$$(270) \quad \text{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Con objeto de facilitar el cálculo, los valores de esta función se han tabulado y se presentan en la Tabla 124.

El valor correspondiente a la Suma de Cuadrados de los valores absolutos se obtiene de la expresión:

$$(271) \quad SC_A = s_A^2 gl$$

Siendo s_A^2 el valor de la varianza obtenido en la ecuación (269) y gl el número de grados de libertad

La ecuación (268) relaciona el valor de la media de la distribución de los valores absolutos con la media y la desviación estándar de la distribución normal de los residuos. Las ecuaciones (269) y (271) relacionan la varianza y la suma de cuadrados de los valores absolutos con la media y la desviación estándar de la distribución normal originaria.

x	Erf(x)	x	Erf(x)
0.0	0.0	1.0	0.842701
0.1	0.112463	1.1	0.880205
0.2	0.222703	1.2	0.910314
0.3	0.328627	1.3	0.934008
0.4	0.428392	1.4	0.952285
0.5	0.5205	1.5	0.966105
0.6	0.603856	1.6	0.976348
0.7	0.677801	1.7	0.98379
0.8	0.742101	1.8	0.989091
0.9	0.796908	1.9	0.99279
1.0	0.842701	2.0	0.995322

Tabla 124 : Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Valores de la función Erf(x)

7.3.3.4 Componentes de la Suma de Cuadrados del error (SC_E)

La simplicidad de los datos discretos facilita el estudio de la relación entre los valores obtenidos con los residuos y con sus valores absolutos. Los razonamientos son igualmente válidos para el caso de la distribución continua de residuos.

Las ecuaciones (260) y (265) relacionan, respectivamente, los valores medios y las sumas de cuadrados de los residuos y de sus valores absolutos. De la primera se deduce que si todos los residuos son positivos, los dos valores medios son iguales. Si todos los residuos son negativos, los valores medios son iguales y de signo contrario.

La segunda ecuación mencionada (265), relaciona la suma de cuadrados de los residuos con la de sus valores absolutos. Esta variable es la que presenta un mayor interés. Su aditividad permite estudiar la incidencia relativa de los factores fijos y aleatorios en los errores de medida.

La ecuación (265), se puede reescribir de la forma:

$$(272) \quad SC_{EA} = SC_{Error} - \frac{4}{n} \sum_{i=1}^m |x_i| \sum_{i=m+1}^n |x_i|$$

El sustraendo de la ecuación (272) es el producto de dos sumatorios de valores absolutos y por lo tanto siempre ≥ 0 . En el caso de que todos los residuos fueran positivos o todos fueran negativos, este sustraendo sería =0 y el valor de la SC del error de los residuos (SC_{Error}) es igual a la de sus valores absolutos (SC_{EA}). Esta situación corresponde a una fuerte incidencia de factores fijos. Cuanto menor sea la incidencia de los factores fijos, mayor será la diferencia entre SC_{Error} y SC_{EA} .

El valor de una suma de cuadrados es por definición ≥ 0 . Por lo tanto, el máximo valor que puede alcanzar el sustraendo de la ecuación (272) es igual a SC_{Error} . En este caso, el valor de la SC_{EA} es cero. Esto se corresponde con una situación en la que la variabilidad de los valores absolutos fuera nula, y por lo tanto inalcanzable. El máximo valor del sustraendo se alcanza con una distribución homogénea de los datos entre positivos y negativos. En esta situación, no hay incidencia de factores fijos, y el valor de SC_{EA} se debe únicamente a la incidencia de factores aleatorios.

En consecuencia, el valor de SC_{EA} tiene dos componentes, uno debido a la incidencia de factores aleatorios y otro debido a la incidencia de factores fijos. El valor máximo que puede alcanzar la SC_{EA} se obtiene cuando su valor iguala al de la SC_{Error} . Esto corresponde, como ya se ha visto, a una situación de fuerte incidencia de factores fijos.

El valor de la SC_{EA} , en función de sus dos componentes, se puede expresar de la forma:

$$(273) \quad SC_{EA} = SC_{Fal} + SC_{Ffi}$$

Donde

- SC_{EA} corresponde a la suma de cuadrados del error de los valores absolutos de los residuos
- SC_{Fal} corresponde a la componente de la SC_{EA} debida a la incidencia en el error de factores aleatorios (precisión de las mediciones)
- SC_{Ffi} corresponde a la componente de la SC_{EA} debida a la incidencia en el error de factores fijos (exactitud de las mediciones)

Esta situación se representa gráficamente:

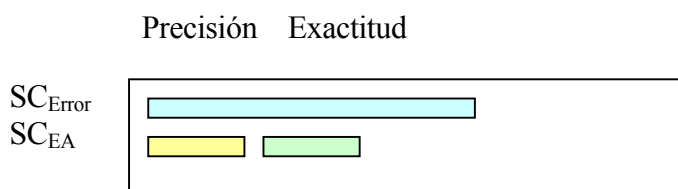


Figura 22 : Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Componentes de la Suma de Cuadrados del error de los valores absolutos (SCEA) y su relación con la Suma de Cuadrados del Error (SCEror).

La evaluación de las dos componentes de la SC_{EA} permitirá evaluar la incidencia relativa de los factores fijos y los variables en los errores de medida.

7.3.3.5 Evaluación de los componentes de la SC_{EA}

Los valores de la media y la desviación estándar de la distribución de los residuos están relacionados con los valores de la media y la desviación estándar de la distribución de sus valores absolutos. En el caso de distribuciones discretas, estas relaciones están dadas por la ecuaciones (260) y (265). En el caso de una distribución normal de los residuos, estas relaciones se obtiene de las ecuaciones (268), (269) y (271).

Este planteamiento corresponde a una situación con un sólo tratamiento, en el que el valor de la media es único. Cuando se consideran varios tratamientos, el valor de la media considerado para el cálculo de la SC_{Error} no es único, sino que varía para cada tratamiento. El valor de la media global del ensayo es único y no se corresponde con los valores de la media considerados para el cálculo de la SC_{Error} .

Para conocer de forma fiable la incidencia relativa de factores fijos y aleatorios, el planteamiento descrito en el apartado anterior, se debe aplicar a cada uno de los tratamientos considerados en el ensayo, es decir a cada una de las 792 combinaciones resultantes de los 9 sustratos * 8 modelos * 11 valores de tensión. Operando de esta forma, se obtienen las dos componentes (SC_{Fal} y SC_{Ffi}) de la SC_{EA} para las 792 combinaciones. Sumando los valores de los 792 valores obtenidos para SC_{Fal} , y los 792 valores obtenidos para SC_{Ffi} , se obtienen los valores correspondientes a la SC_{Fal} y SC_{Ffi} totales para todo el ensayo.

El empleo de los valores de la media y SC_{Error} globales, correspondientes a todo el ensayo, en lugar de los 792 casos particulares, supone una gran simplificación del método, aunque a cambio se pierde fiabilidad en la estimación de la incidencia relativa de los dos tipos de factores considerados.

En este caso, se producen compensaciones parciales, que dan lugar a un valor cero o próximo a cero para la media de residuos. En esta situación, se plantean dos posibilidades:

- Si no hay incidencia de factores fijos, el valor medio cero es el resultado de los valores medios cero de cada uno de los tratamientos. Los valores de la media, desviación estándar y SC_{Error} de los residuos y de sus valores absolutos, están relacionados por las ecuaciones (260) y (265), en el caso de las distribuciones discretas, y (268), (269) y (271) en el caso de la distribución normal de los residuos.
- Si hay incidencia de factores fijos, el valor medio cero es el resultado de valores medios de cada tratamiento diferentes de cero, unos positivos y otros negativos. En este caso, se produce un desfase entre los valores de la media, desviación estándar y SC_{EA} obtenidos a partir de los valores absolutos de los residuos, y los obtenidos a partir de los valores de la media, desviación estándar y SC_{Error} aplicando las ecuaciones (260) y (265) para las distribuciones discretas y (268), (269) y (271) para la distribución normal de los residuos.

En la forma simplificada de cálculo que se plantea en este trabajo, se considera el planteamiento descrito con estas dos hipótesis. Como consecuencia, se precede de la siguiente forma:

- Con los valores de la media, desviación estándar y SC_{Error} obtenidos para los residuos, se entra en las ecuaciones (268), (269) y (271), obteniendo así los valores que corresponden a la media, desviación estándar y suma de cuadrados del error de los valores absolutos, en el caso hipotético de que no hubiera incidencia de factores fijos.
- Asumimos que el valor de la suma de cuadrados así obtenido corresponde a la componente de la SC_{EA} debida a los factores aleatorios, es decir a la SC_{Fal}
- Una vez calculado el valor de SC_{Fal} , por diferencia con el valor SC_{EA} conocido experimentalmente, se obtiene el valor de la componente debida a la incidencia de factores fijos SC_{Ffi}
- La incidencia relativa de los factores fijos y aleatorios se obtiene aplicando las expresiones (276) y (277):

Aplicando estos criterios, el valor de SC_{Fal} se obtiene de la expresión (269) particularizando para $m=0$. Operando se obtiene:

$$(274) \quad s_{A0}^2 = -\frac{2s^2}{\pi} + s^2 \Rightarrow s_{A0}^2 = s^2 \left(\frac{\pi - 2}{\pi} \right)$$

Teniendo en cuenta (271) se obtiene

$$(275) \quad SC_{Fal} = s^2 \left(\frac{\pi - 2}{\pi} \right) gl$$

Siendo

- SC_{Fal} La componente de la SC_{EA} debida a los factores aleatorios (precisión), calculada por el método simplificado propuesto.
- S^2 el valor de la varianza obtenido para los valores de los residuos con su signo
- gl el número de los grados de libertad

$$(276) \quad \%Ffi = 100 \frac{SC_{FFi}}{SC_{EA}}$$

$$(277) \quad \%Fal = 100 \frac{SC_{FAl}}{SC_{EA}}$$

7.4 Resultados

7.4.1 Precisión

En la Tabla 125 se presentan los valores de la SC_{Error} , CM_{Error} y $RCME$ correspondientes a cada uno de los sustratos. La SC_{Error} del ensayo se obtiene como suma de las SC_{Error} de cada sustrato. Lo mismo ocurre con los grados de libertad. Del cociente entre ambos se obtiene el cuadrado medio correspondiente a cada sustrato y a partir de éste, su raíz cuadrada. Este mismo planteamiento se repite en el caso de las tensiones. La forma de operar y la estructura de la tabla es la misma que en el caso de la aportación de los sustratos.

El valor total obtenido para la suma de cuadrados del error es $SC_{Error}=1.0672*10^{-1}$. Los grados de libertad de esta suma de cuadrados son 286. Los valores resultantes para el cuadrado medio y su raíz cuadrada son $CM_{Error}=3.7316*10^{-4}$, y $RCM_{Error}=1.931*10^{-2}$. Esto corresponde al conjunto de todos los datos del ensayo.

El número de grados de libertad es muy similar para todos los sustratos (entre 33 y 29) y para todas las tensiones (entre 27 y 23). Los valores deberían ser 33 para todos los sustratos y 27 para todas las tensiones. La pérdida de datos por diversos motivos hace que, en algunos casos, no se alcance este máximo. Esta similitud en el número de grados de libertad hace que los comportamientos de los tres parámetros considerados sean prácticamente los mismos.

En lo referente a sustratos, se presentan tres grupos claramente diferenciados. Los valores más bajos de estos indicadores, y por lo tanto los datos más precisos, corresponden a los sustratos 5, 6, 7 y 8, con unos valores de la SC entre 5 y $7 \cdot 10^{-3}$. Los valores más elevados, y por lo tanto la menor precisión, corresponden a los sustratos 1, 4 y 9, con una suma de cuadrados superior a $1.75 \cdot 10^{-2}$. Los sustratos 2 y 3 presentan una situación intermedia, con unos valores para la suma de cuadrados de 1.08 y $1.33 \cdot 10^{-2}$, respectivamente.

En el caso de las tensiones, se presentan dos grupos claramente definidos. Por una parte, las tensiones altas, 50 y 100 cm de columna de agua, con SC de 3.6 y $4.6 \cdot 10^{-3}$. Por otra parte, las tensiones bajas, entre 0 y 30 cm de columna de agua, con unos valores para la suma de cuadrados que oscilan entre $8.42 \cdot 10^{-3}$ para tensión 6 cm, y $1.54 \cdot 10^{-2}$, para tensión 8 cm.

Reparto de la variabilidad							
Sustrato				Tensión			
Sustrato	SC Sustrato	CM Sustrato	RCM Sustrato	Tensión	SC Tensión	CM Tensión	RCM Tensión
Uno	2.1158E-02	6.4116E-04	2.5321E-02	0	9.1025E-03	3.5010E-04	1.8711E-02
Dos	1.0775E-02	3.7154E-04	1.9275E-02	2	1.3130E-02	4.8630E-04	2.2052E-02
Tres	1.3337E-02	4.4456E-04	2.1085E-02	4	9.8383E-03	4.2775E-04	2.0682E-02
Cuatro	1.7551E-02	5.4848E-04	2.3420E-02	6	8.4180E-03	3.3672E-04	1.8350E-02
Cinco	5.7581E-03	1.7994E-04	1.3414E-02	8	1.5434E-02	5.9360E-04	2.4364E-02
Seis	4.9954E-03	1.5137E-04	1.2303E-02	10	1.1627E-02	4.4720E-04	2.1147E-02
Siete	6.9647E-03	2.1105E-04	1.4528E-02	16	1.2145E-02	4.4980E-04	2.1209E-02
Ocho	6.6162E-03	2.0676E-04	1.4379E-02	20	9.7178E-03	3.5992E-04	1.8972E-02
Nueve	1.9568E-02	6.1150E-04	2.4728E-02	30	9.0887E-03	3.3662E-04	1.8347E-02
				50	3.6413E-03	1.4565E-04	1.2069E-02
				100	4.5818E-03	1.6970E-04	1.3027E-02
Total	1.0672E-01	3.7316E-04	1.9317E-02		1.0672E-01	3.7316E-04	1.9317E-02

Tabla 125: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Análisis de la precisión de las medidas. Aportación a la SC_{Error} de cada uno de los sustrato y de cada uno de los valores de tensión considerados. Estimación de la varianza (CM) y la desviación estándar (RCM) de cada sustrato y tensión.

Una vez analizados los datos globales y desglosados por sustratos y por tensiones de humedad, el siguiente nivel corresponde a la variabilidad para cada una de las combinaciones sustrato*tensión. En este análisis se considera un solo parámetro, la desviación estándar obtenida a partir de los datos experimentales disponibles de cada una de estas combinaciones.

En cada sustrato se han efectuado mediciones a 11 valores de tensión diferentes. Por lo tanto, para cada sustrato se dispone de 11 valores de varianza, uno correspondiente a cada valor de tensión. En la Tabla 126 se detalla el reparto de las 11 varianzas de cada sustrato por intervalos, indicando además los valores de tensión correspondientes.

Los sustratos 5, 6, 7 y 8 se han agrupado. La variabilidad que presentan es muy baja. Casi en la mitad de los casos (20 de 44) el valor de la desviación estándar es inferior

a 0.01. Solo en 7 casos este valor es superior a 0.02, en ningún caso pasa de 0.025. Estos 7 casos corresponden a valores ≤ 20 cm de tensión de humedad.

Los sustratos 1, 4 y 9, que presentan los valores más elevados de la SC y de la CM, tienen cada uno de ellos más de la mitad de los valores de la desviación estándar por encima de 0.02, y todos ellos tienen entre 1 y 3 valores por encima de 0.03. Los sustratos 2 y 3 presentan una situación intermedia, con más de la mitad de los valores por debajo de 0.02, pero con 1 o 2 valores por encima de 0.03.

Respecto a las tensiones, la tensión 8, que presenta el máximo valor de la desviación estándar, alcanza valores entre 0.02 y 0.04 para todos los sustrato, excepto para los 4 del grupo primero. En general, se observa que los valores más altos de la desviación estándar corresponden a valores de tensión baja. Las tensiones altas aparecen siempre en las casillas correspondientes a los intervalos más bajos de la desviación estándar.

	Sustrato					
	5, 6, 7, 8	2	3	4	9	1
Intervalo σ entre valores de un mismo sustrato y repetición						
<0.01	20	4 (0, 2, 4, 50)	4 (4, 10, 20, 50)	-	1 (2)	3 (20, 30, 100)
0.01-0.02	17	3 (6, 30, 100)	4 (2, 6, 30, 100)	3 (4, 6, 100)	2 (16, 50)	3 (10, 16, 50)
0.02-0.03	7 ($t \leq 20$)	2 (16, 20)	2 (0, 8)	7 (0, 2, 8, 16, 20, 30, 50)	5 (0, 6, 8, 10, 100)	2 (0, 8)
0.03-0.04	-	2 (8, 10)	-	1 (10)	3 (4, 20, 30)	1 (6)
>0.04	-	-	1 (16)	-	-	2 (2, 4)

Tabla 126: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Precisión de los datos experimentales. Varianza (σ) entre repeticiones para cada combinación sustrato*tensión. Distribución por intervalos, de las varianzas de las 11 tensiones de cada sustrato, n° de casos y valores de las tensiones (entre paréntesis).

La suma de cuadrados del error (SC_{Error}) se obtiene como suma de los cuadrados de las diferencias entre cada valor y la media de todas las repeticiones de su tratamiento. Esta suma de cuadrados es tanto mayor cuanto mayor sea la variabilidad de los datos y cuanto mayor sea el número de datos considerados. La suma de cuadrados del error puede servir para comparar la precisión de dos tratamientos, siempre que el número de datos considerados también sean comparables.

7.4.2 Exactitud

En la Tabla 126 se detallan los intervalos de tensión en los que los valores experimentales presentan un gradiente de humedad positivo respecto a la tensión ($d\Theta/dh \geq 0$). En cada sustrato, se ha medido el contenido de humedad para 11 valores de tensión. Esto da lugar a 10 intervalos, que, en el total de los 9 sustratos, hace un total de 90

intervalos. De ellos, se han detectado 7 en los que el gradiente mencionado es positivo. Los errores detectados más elevados corresponden a los dos casos del sustrato 1, con unos incrementos en torno a $3 \cdot 10^{-2}$ (3% del volumen total) para los intervalos de tensiones 0-2 y 10-16. Le sigue en importancia el sustrato 9, con un incremento próximo a $2.5 \cdot 10^{-2}$ (2.5% del volumen total), y el sustrato 2, con un incremento de $1.72 \cdot 10^{-2}$ (1.72% del volumen total); en ambos casos, para el intervalo de tensiones 2-4. En los otros tres casos observados, el valor del incremento es inferior al 1% del volumen total.

Como puede observarse, en todos los casos se trata de bajas tensiones. De los siete casos, 4 corresponden a los intervalos 0-2 o 2-4. Solo uno se da a una tensión superior a 16 cm de tensión, se trata de intervalos 30-50 para el sustrato 7, con un incremento inferior al 1% del volumen total.

	Sustrato					
	5, 6, 7, 8	2	3	4	9	1
$d\Theta/dh \geq 0$	S=7 30-50	2-4	2-4	-	2-4, 6-8	0-2, 10-16
	$0.76 \cdot 10^{-2}$	$1.72 \cdot 10^{-2}$	$0.58 \cdot 10^{-2}$		$2.46 \cdot 10^{-2}$, $0.46 \cdot 10^{-2}$	$3.06 \cdot 10^{-2}$, $2.95 \cdot 10^{-2}$

Tabla 127: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Exactitud de los datos experimentales. Intervalos de tensión en los que se han obtenido valores experimentales de $d\Theta/dh \geq 0$, valores de los intervalos y valores de los incrementos obtenidos.

7.4.3 *Análisis de los residuos y sus valores absolutos: incidencia de exactitud y precisión*

En la Tabla 104 y Tabla 105, se han detallado los valores correspondientes a los análisis de varianza de los residuos y de sus valores absolutos respectivamente. Estos valores se resumen en la Tabla 128. A partir de estos valores se han aplicado las ecuaciones (268), (269) y (271), para obtener la componente de la SC_{EA} debida a la incidencia de factores aleatorios. El número de grados de libertad considerados es 2095 (Tabla 104 y Tabla 105).

	Media	Des Est (RCME)	Suma de cuadrados del error
Valores obtenidos para los residuos (Tabla 104)	$-0.04 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$	0.74776
Valores obtenidos para los valores absolutos de los residuos (Tabla 105)	$1.99 \cdot 10^{-2}$	$1.36 \cdot 10^{-2}$	0.38847
Valores calculas con las expresiones (268), (269) y (271)	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	0.27194

Tabla 128 : Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Cálculo de la incidencia de los factores aleatorios en la SC_{EA} , a partir de los datos obtenidos para los valores de los residuos y de sus valores absolutos. El número de grados de libertad es 2095.

A partir de los datos de la Tabla 128, se ha calculado la incidencia de la precisión y la exactitud en el valor de la SC_{EA} . Estos resultados se detallan en la Tabla 129.

Por lo tanto, con los criterios aplicados, se deduce que el 70% de la variabilidad de los valores absolutos de los residuos es debida a la incidencia de factores aleatorios, y el 30% a la incidencia de factores fijos.

La diferencia entre el valor de la media obtenido para los valores absolutos y el calculado a partir de los valores de los residuos, permite también evaluar la incidencia de los errores sistemáticos. El valor calculado es de $1.5 \cdot 10^{-2}$ (Tabla 128). En el supuesto de que no hubiera errores sistemáticos, este sería el valor que obtendríamos para la media de los valores absolutos. El valor real obtenido es de $1.99 \cdot 10^{-2}$, superior en un 24.22% al valor esperado. Este incremento es debido a la incidencia de los errores sistemáticos. Su valor corresponde al término a la derecha del signo igual de la ecuación (260).

	Valor	%
SC_{EA} Total	0.38847	100 %
SC_{Fal} Factores Aleatorios	0.27194	70.0 %
SC_{Ffi} Factores Fijos	0.11653	30.0 %

Tabla 129: Errores de medida. Relación entre los valores de los residuos y sus valores absolutos: Incidencia relativa de los factores fijos (exactitud) y aleatorios (precisión) en el valor de SC_{EA} .

7.5 Discusión

Los resultados obtenidos proporcionan una evaluación fiable de la precisión de las mediciones, debida a la incidencia de factores aleatorios. La evaluación de la exactitud es más problemática. Contando con la limitación en la estimación de la exactitud, se ha presentado un método que permite una aproximación a la evaluación de la incidencia relativa de uno y otro tipo de errores.

El análisis detallado de los factores que afectan a la variabilidad de las mediciones efectuadas, ayuda a interpretar adecuadamente la información proporcionada en relación con los errores de medida.

El primer aspecto importante a considerar es la incidencia de la heterogeneidad del sustrato en la variabilidad de los valores obtenidos. La información sobre esta heterogeneidad es importante para el manejo del sustrato, pero los métodos empleados para el estudio de las propiedades físicas no permiten discriminar la parte de variabilidad debida a esta heterogeneidad de la debida a los errores de medida.

El segundo aspecto a tener en cuenta es el análisis de los factores que inciden en el proceso de medida, y la determinación, para cada uno de ellos, de si incide como factor fijo o como aleatorio.

7.5.1 Factores que inciden en la variabilidad

7.5.1.1 Componentes de la Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error (RCME)

El valor obtenido para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error tiene dos componentes. El primero es debido a la incidencia de factores aleatorios en el proceso de medida, y corresponde a la precisión de las medidas. El segundo es debido a la heterogeneidad del sustrato.

La componente de la RCME debida a la incidencia de los factores aleatorios en el proceso de medida corresponde al error estándar y permite calcular los intervalos de confianza de las mediciones realizadas. El aumento del número de repeticiones y/o el aumento del tamaño muestral permite reducir el valor de esta componente de la RCME, y, en consecuencia, el de los intervalos de confianza de la medida.

La componente de la RCME debida a la heterogeneidad del sustrato corresponde a la desviación estándar de la distribución de las muestras, y permite calcular la variabilidad entre muestras y, por extensión, entre macetas o contenedores. La homogeneización del sustrato reduce el valor de esta componente de la RCME, aumentando la homogeneidad entre las muestras y entre las macetas que se han llenado con el mencionado sustrato.

El cuadrado medio del error se obtiene como cociente entre la suma de cuadrados del error y sus grados de libertad. Su raíz cuadrada corresponde a una estimación de la media de las desviaciones estándar de todos los tratamientos considerados en el ensayo y proporciona una estimación de la variabilidad debida a factores aleatorios, no considerados en el ensayo.

La suma de cuadrados del error corresponde a $\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$ siendo x_{ij} cada una de las mediciones obtenidas y \bar{x}_i el valor medio de las repeticiones correspondientes al tratamiento i . En el ensayo considerado, las componentes del valor medido (x_{ij}) son, además del valor medio total (\bar{x}) , las componentes debidas a los tratamientos, la componente debida a la heterogeneidad del sustrato, y la componente debida a los factores aleatorios que inciden en el proceso de medida.

El valor medio \bar{x}_i considerado para el cálculo corresponde al valor medio de las medidas efectuadas para cada tratamiento, en decir para cada combinación sustrato *tensión. La diferencia $x_{ij} - \bar{x}_i$ corresponde a la suma de los factores aleatorios que inciden en el proceso de medida (precisión) y de la heterogeneidad del sustrato. Como consecuencia, la suma de cuadrados, el cuadrado medio y su raíz cuadrada corresponden a la suma de estos dos efectos.

La metodología de laboratorio empleada no permite separar estos dos efectos. A partir de la muestra de laboratorio se obtienen las muestras de análisis. En cada una de éstas se efectúa una sola medida de cada variable física estudiada. El valor obtenido para la RCME es necesariamente la resultante de ambos efectos. Si previamente se han evaluado los errores de medida y se han corregido, el valor de la RCME puede considerarse como

índice de la homogeneidad del sustrato. En el caso de que se disponga de un sustrato que se pueda considerar uniforme, el valor de la RCME correspondería al error estándar de medida.

7.5.1.2 Factores que inciden en el proceso de medida

Los errores de medida son consecuencia de variaciones incontroladas de los factores que intervienen en el proceso de medida. Cuando estas variaciones afectan de forma aleatoria a los diferentes valores medidos, inciden en la precisión de las medidas. Cuando la incidencia es sistemática en varios valores medidos, afecta a la exactitud. El análisis de la rutina de laboratorio permite obtener información sobre su incidencia en la exactitud y en la precisión de las medidas obtenidas. Los aspectos de la metodología considerados son: muestreo y homogeneización, saturación, tensionado, secado y control de peso.

7.5.1.2.1 *Heterogeneidad del sustrato*

La heterogeneidad del sustrato es consecuencia de una distribución no uniforme de los componentes de la mezcla en la masa de sustrato, y da lugar a que las características de las muestras obtenidas sigan una distribución normal.

La componente de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error debida a las diferencias entre muestras corresponde a la desviación estándar de la distribución normal y, por lo tanto, permite calcular, para un tamaño de muestra determinado, la probabilidad de que el valor de la variable se encuentre en un intervalo previamente fijado. La homogeneización del sustrato tiene como consecuencia la reducción de la componente de la RCME debida a las diferencias entre muestras, es decir, del valor de la desviación estándar de la distribución normal.

Un sustrato se puede considerar como una mezcla de materiales, con propiedades físicas diferentes. Cuando todos los materiales tienen un origen común, el tamaño de partícula determina sus propiedades físicas, y se puede considerar que los componentes de la mezcla están constituidos por los diferentes intervalos de tamaño de partícula. Cuando se mezclan materiales de distintos orígenes, los componentes de la mezcla son cada uno de los diferentes tamaños de partícula de cada uno de los orígenes.

La homogeneización del sustrato tiene como objetivo conseguir una distribución uniforme, en la masa de sustrato, de los materiales que constituyen la mezcla. El proceso para conseguir este objetivo depende de las características de los componentes de la mezcla. Los materiales granulares tienen tendencia a segregarse por granulometrías (corteza y escorias), mientras que los productos fibrosos tienden a formar aglomerados o copos (turba y lana de escoria); la homogeneización de materiales de diferentes orígenes presenta problemas derivados de las diferencias de densidad de unos y otros (mezclas de escoria con turba y corteza).

Una distribución no uniforme de los materiales que constituyen el sustrato, da lugar a que la composición de las muestras tomadas sea diferente para los distintos puntos de muestreo. Esta variación de la composición tiene como consecuencia la variación de las propiedades físicas de las muestras. En general, se puede considerar que la distribución de los materiales en la masa de sustrato es aleatoria, y en este caso, las propiedades físicas de las muestras siguen una distribución normal. La suma de cuadrados de las diferencias

entre muestras de un mismo sustrato, corresponde a la heterogeneidad del sustrato. La raíz cuadrada del cuadrado medio corresponde a la desviación estándar de la distribución normal y constituye la componente de la RCME debida a la heterogeneidad del sustrato.

7.5.1.2.2 *Muestreo y homogeneización de la muestra*

El sistema de muestreo debe proporcionar una muestra representativa del lote o partida de sustrato. Un error de muestreo puede suponer la obtención de una muestra no representativa del lote, que afectará a todas las submuestras. Incide sistemáticamente en todos los análisis realizados, afectando a la exactitud.

La homogeneización de la muestra incide en la repetitibilidad de los valores medidos, afectando, por lo tanto, a la precisión. Sin embargo, han de tenerse en cuenta los objetivos del análisis y los razonamientos desarrollados en el apartado 7.5.1.2.1. Cuando se busca información sobre la homogeneidad del sustrato, se debe tener en cuenta que la homogeneización de la muestra enmascara la heterogeneidad de la partida inicial. En cualquier caso, se debe valorar si es suficiente la información que pueda aportar la muestra de laboratorio o bien, es necesario diseñar un ensayo específico para este fin.

7.5.1.2.3 *Saturación de las muestras de laboratorio*

Todas las metodologías en uso obtienen la curva de retención de agua por desorción de la muestra de sustrato previamente saturada. Si la saturación de la muestra es deficiente, la deficiencia inicial de agua se arrastra durante todo el proceso de desorción. Esto produce una infravaloración del contenido hídrico para todas las mediciones realizadas sobre la misma muestra.

Dependiendo de la metodología seguida, la saturación deficiente incide de forma aleatoria o sistemática. En el primer caso, afecta a la precisión y en el segundo, a la exactitud. Esta incidencia aleatoria o sistemática depende principalmente de dos factores. El primero es la eficacia y la repetitibilidad del método de saturación. El segundo es la estrategia de medida seguida; una muestra se puede someter sucesivamente a los distintos valores de tensión necesarios para obtener la curva de retención de agua, o bien se puede utilizar una muestra para cada valor de tensión.

La eficacia del método de saturación incide claramente en la exactitud. El empleo de métodos que no saturan completamente el sustrato, afecta a todas las muestras, infravalorando el contenido hídrico, y, en consecuencia, a todas las mediciones efectuadas sobre ellas. La repetitibilidad del método de saturación afecta normalmente a la precisión de las mediciones realizadas, pero se debe tener en cuenta la estrategia de medida empleada.

Una vez saturadas las muestras, se someten a desorción y pudiéndose seguir dos estrategias distintas. Si cada muestra se somete a un solo valor de tensión, la deficiencia de saturación afecta solo a una medida y las diferencias entre muestras inciden en la precisión. Si una misma muestra se somete sucesivamente a los valores de tensión necesarios para obtener la curva de retención de agua, la deficiencia de saturación afecta sistemáticamente a todas las mediciones efectuadas; si se emplean varias muestras, las diferencias de saturación entre muestras afectan a la precisión de los valores obtenidos para cada tensión (incidencia aleatoria entre muestras) y a la exactitud de la curva de retención de agua de cada muestra (incidencia sistemática dentro de cada muestra).

La elevada eficacia del método de saturación empleado hace poco probable que, en nuestro caso, se presenten errores importantes derivados de las deficiencias de saturación.

7.5.1.2.4 *Tensionado*

El sistema de tensionado de las muestras tiene por objeto llevar a la muestra a un valor de tensión o potencial matricial previamente fijado. Una vez alcanzado este valor de tensión, se efectúan las mediciones correspondientes. Los errores que se pueden presentar en este caso son un tensionado deficiente y un error en el valor de tensión aplicado, de forma que el valor de tensión de la muestra sea distinto del consignado.

El tensionado deficiente se produce cuando no se ha dejado el tiempo suficiente para que la muestra llegue al equilibrio. Puesto que se parte de muestras saturadas, el tensionado deficiente tiene como consecuencia un contenido hídrico más elevado que el que corresponde a la tensión consignada, por lo que se produce una sobrevaloración del contenido hídrico.

El error de medida de la tensión real aplicada depende del sistema de medida empleado y puede ser de uno u otro sentido. Dependiendo del signo del error de medida, se produce la sobrevaloración o infravaloración del contenido hídrico.

Estos dos errores inciden de la misma forma en todas las muestras sometidas a tensionado simultáneamente, pero pueden tener distinta incidencia en los distintos tensionados. Por lo tanto, estos errores intervienen como sistemáticos para todas las muestra que forman el mismo lote de tensionado y como aleatorios entre los distintos lotes. Esto puede explicar que para unos valores de tensión, todos los residuos sean positivos (tensión 16 cm de columna de agua) y para otros, todos los residuos sean negativos (tensión 10 cm de columna de agua en 7.5.2.1.2.2). La presencia de residuos positivos y negativos para un mismo valor de tensión puede explicarse por la diferente sensibilidad de los sustratos a esas tensiones, y por la incidencia de otros errores.

7.5.1.2.5 *Secado de las muestras*

Una vez que se ha controlado el peso de la muestra tensionada, se somete a secado, para obtener el peso seco. Un secado deficiente de la muestra sobrevalora el peso de material sólido e infravalora el peso de agua obtenido como diferencia entre peso tensionado y peso seco.

Un secado deficiente afecta a todas las muestras del mismo lote de secado, aunque la incidencia en los distintos sustratos puede presentar diferencias importantes. Este error incide en la exactitud de todas las muestras del mismo sustrato que forman parte de un mismo lote de secado, y en la precisión, cuando las muestras forman parte de distintos lotes de secado.

7.5.1.2.6 *Errores de medida*

Los errores de medida por gravimetría se deben a las características de las balanzas empleadas y a las incidencia de factores incontrolados. En general, se puede considerar que afectan únicamente a la precisión pero no a la exactitud.

7.5.1.2.7 *Incidencia en la exactitud y precisión de los factores considerados*

La discusión detallada en estos apartados, pone de manifiesto que son varios los factores que inciden en la precisión de las mediciones efectuadas. En cualquier caso, en el proceso de medida se debe tener en cuenta si se requiere información sobre la heterogeneidad del sustrato. Si es así, se debe valorar si la información aportada por la muestra sin homogeneizar es suficiente. Si no se requiere esta información o se diseñan trabajos al efecto, la homogeneización de la muestra proporciona un valor más bajo de la RCME.

Respecto a la exactitud, parece que el factor que más ha incidido ha sido el de los errores de tensionado. La obtención de errores mayores para las tensiones bajas se explica por la forma de la curva de retención de agua. Los elevados gradientes del contenido hídrico con respecto a la tensión de humedad tiene como consecuencia una mayor sensibilidad de éste a las pequeñas diferencias de tensión.

7.5.2 *Errores experimentales*

7.5.2.1 *Precisión y exactitud de las medidas*

En el apartado 7.4.1 se han presentado los resultados relativos a la precisión de los datos experimentales de contenido de agua en los que se basa el desarrollo del modelo. Para evaluar esta precisión, se ha empleado como indicador el valor de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCME). Sin embargo, el valor obtenido para este parámetro es, como ya se ha visto, la resultante de dos componentes, la precisión de las medidas y la heterogeneidad de las muestras sometidas a análisis.

El valor obtenido para la RCME varía considerablemente en función de los sustratos y de las tensiones consideradas (Tabla 125). En el caso de los sustratos, la RCME varía entre $1.23 \cdot 10^{-2}$ para el sustrato 6, y $2.53 \cdot 10^{-3}$ para el sustrato 1. En relación a las tensiones de humedad, el valor mínimo de la RCME corresponde a la tensión 50 cm de columna de agua, con $1.21 \cdot 10^{-2}$, y el máximo, a la tensión 8 cm de columna de agua, con $2.44 \cdot 10^{-2}$.

7.5.2.1.1 *Precisión*

La precisión de las medidas es consecuencia de los factores aleatorios que inciden durante el proceso de medida. Estos factores aleatorios dependen de los instrumentos de medida empleados, de las rutinas de laboratorio, y del propio operario.

7.5.2.1.1.1 *Incidencia del factor sustrato*

El valor de la RCME presenta variaciones importantes entre los diferentes sustratos considerados (ver Tabla 125). Los valores más bajos corresponden a los sustratos 5, 6, 7, y 8 en cuya composición interviene la escoria granulada o cristalizada en una proporción de 25% en volumen. El valor del cuadrado medio del error (RCME) oscila entre 1.23 y $1.45 \cdot 10^{-2}$ (Tabla 125). Aumenta cuando las medidas se realizan con sustratos formados por una mezcla de turba y corteza de pino. El valor de la RCME es 1.93 y $2.11 \cdot 10^{-2}$, para las mezclas C25:T75 y C50:T50, respectivamente. Los valores más elevados corresponden a los sustratos C100, Cyclamenerde y Lana de escoria, con unos valores para RCME por encima de $2.3 \cdot 10^{-2}$.

Como ya se ha visto, el valor de la RCME para estos sustratos tiene dos componentes, uno debido a la precisión de las mediciones efectuadas y otro debido a la heterogeneidad del sustrato. Los instrumentos de medida y las rutinas de laboratorio han sido las mismas en todos los casos, por lo que la componente de la RCME debida a la precisión de las medidas es la misma, o al menos similar, para todos los sustratos. Las diferencias entre los valores de la RCME para los diferentes sustratos han de ser debidas, por lo tanto, a la componente correspondiente a la heterogeneidad del sustrato.

La homogeneidad o heterogeneidad de los sustratos y sus muestras depende del manejo dado en cada caso y, en concreto, de las labores de homogeneización aplicadas. Las muestras de laboratorio de Cyclamenerde y lana de escoria, se han obtenido directamente del producto suministrado por el fabricante. La muestra de laboratorio de corteza de pino se tomó del material resultante de la pila de compostaje. Las mezclas son de elaboración propia y, antes de obtener la muestra de laboratorio, se han sometido a un proceso exhaustivo de homogeneización.

Las muestras de laboratorio así obtenidas se han sometido a un proceso de homogeneización similar para todos los sustratos. Sin embargo, esto no ha sido suficiente para que todas las muestras tengan un nivel similar de homogeneidad. Si así fuera, la componente de la RCME debida a la heterogeneidad del sustrato sería similar en todos los casos, y, en consecuencia, el valor de la RCME tendría valores similares para todos los sustratos. Los resultados obtenidos ponen claramente de manifiesto que esto no ocurre.

Por lo tanto, podemos deducir que las diferencias en el valor de la RCME obtenido para los distintos sustratos son consecuencia, al menos en parte, de las diferencias en homogeneidad de las partidas originales de sustrato. Los sustratos obtenidos como mezcla, que han sido sometidos a una homogeneización exhaustiva antes de la toma de muestra, proporcionan los valores más bajos de la RCME. Los sustratos no homogeneizados antes de la toma de la muestra del laboratorio, presentan valores más altos. No se puede descartar la incidencia de otros factores. Así, la corteza de pino tiene tendencia a la segregación por granulometrías, pero sin embargo, las circunstancias son similares en las mezclas de corteza y escoria, y el valor de la RCME es considerablemente más bajo. Las fibras de lana de escoria están agrupadas en copos, lo que dificulta su homogeneización y el ajuste del volumen del sustrato al volumen del anillo portamuestras tomado como referencia de volumen. El Cyclamenerde está elaborado a partir de una mezcla de turbas, siendo posible que la presencia de aglomerados o copos dificulte su homogeneización.

El valor de la RCME se presenta pues como un parámetro relacionado con la homogeneidad de la partida o lote original de sustrato, y no sólo de la muestra de laboratorio.

Esta información tiene una gran importancia desde el punto de vista práctico. El sustrato empleado para llenar cada maceta se puede considerar como una muestra de un tamaño determinado, por lo que, aplicando lo dicho anteriormente para las muestras, seguirá una distribución normal. Conocido el valor medio y la desviación estándar de esta distribución normal, se puede conocer la heterogeneidad de las macetas llenadas con la mencionada partida de sustrato, y su incidencia en el manejo y desarrollo del cultivo.

El valor de la RCME se puede considerar como un estimador de la desviación estándar de la mencionada distribución normal. Su fiabilidad está fuertemente condicionada por las labores de homogeneización aplicadas a la muestra de laboratorio y,

en general, por el manejo del lote de sustrato y de la muestra de laboratorio. Además ha de tenerse en cuenta la relación entre el tamaño de la muestra de análisis y el tamaño de la maceta, y la componente de la RCME debida a los errores de medida. En cualquier caso, el valor de la RCME proporciona una herramienta para evaluar, al menos de forma relativa, la homogeneidad de una partida de sustrato y la eficacia de los métodos de homogeneización empleados.

El factor que más condiciona la fiabilidad de la RCME como evaluador de la desviación estándar, es el manejo de la muestra de laboratorio. En relación con este manejo, se presentan dos casos extremos. El primero corresponde a la homogeneización exhaustiva de la muestra de laboratorio. Si se llegara a la homogeneización total de la muestra, todas las submuestras tomadas para el análisis serían exactamente iguales. La componente de la RCME debida a la heterogeneidad del sustrato sería cero, su valor correspondería a la precisión de las medidas y sería totalmente independiente de la heterogeneidad del sustrato original. El segundo caso corresponde a la no homogeneización de la muestra de laboratorio. La heterogeneidad de la muestra de laboratorio sería representativa de la heterogeneidad del lote de sustrato. El valor de la RCME sería la resultante de las dos componentes, precisión de las medidas y heterogeneidad del sustrato.

En el primer caso, el valor de la RCME sería menor, y las medidas serían, al menos en apariencia, más precisas. Su valor no tendría utilidad como evaluador de la desviación estándar de la distribución normal. En el segundo caso, las medidas se considerarían menos precisas, pero se tendría una información adicional sobre la heterogeneidad del sustrato. Si se conoce, por trabajos previos, la componente debida a la precisión de las medidas, se puede tener una buena estimación de la componente debida a la heterogeneidad, es decir, de la desviación estándar de la distribución normal.

7.5.2.1.1.2 Incidencia del factor tensión

En relación con las tensiones de humedad, los valores más bajos de la RCME corresponden a las tensiones de 50 y 100 cm de columna de agua, con 1.21 y $1.30 \cdot 10^{-2}$, respectivamente. Para las tensiones de humedad entre 0 y 30 cm de columna de agua, la RCME oscila entre $1.83 \cdot 10^{-2}$ y $2.44 \cdot 10^{-2}$ (ver Tabla 125). En un análisis más detallado de los datos se observa que la tensión correspondiente al valor máximo de la RCME varía para los diferentes sustratos entre 8 y 20 cm de columna de agua, salvo para la corteza de pino, en la que el valor máximo de la RCME corresponde a la tensión 2 cm de columna de agua (ver Tabla 126).

Este comportamiento tiene una explicación lógica si se considera la forma de la curva de retención de agua y las variaciones entre muestras discutidas en el apartado anterior.

El gradiente del contenido de agua con respecto a la tensión de humedad es siempre ≤ 0 . A partir de la tensión cero, el gradiente se hace cada vez más negativo hasta alcanzar un mínimo, a partir del cual el gradiente se va aproximando de nuevo al valor cero. El valor de tensión correspondiente al gradiente mínimo depende de las características del sustrato. Lo normal es que varíe entre valores de tensión próximos a cero, para los sustratos gruesos y valores de tensión cercanos a los 20 cm de columna de agua, para los sustratos más finos.

Este valor extremo del gradiente de humedad es mínimo por su signo negativo, pero es máximo en valor absoluto. Esto implica que en la zona de tensiones próxima a este mínimo, la variación del contenido de humedad es muy sensible a pequeñas variaciones de tensión. La metodología empleada hace que la incidencia de las variaciones de tensión de humedad afecten a todas las muestras por igual, incidiendo en la exactitud y no en la precisión por lo que se discutirá en el apartado correspondiente a exactitud.

La zona de la curva correspondiente al gradiente mínimo es también la más sensible a las pequeñas variaciones en la composición de la mezcla. Una pequeña variación en la distribución del tamaño de partícula, da lugar a diferencias en la retención de agua. Estas diferencias son tanto mayores cuanto mayor sea el valor absoluto del gradiente de humedad.

Los valores más elevados de la RCME para las tensiones bajas se justifican por las variaciones de las muestras y por la presencia de los gradientes máximos, en magnitud, para estos valores de tensión. Los gradientes próximos a cero para las tensiones altas, tienen como consecuencia una menor sensibilidad a las variaciones en la composición del sustrato de las diferentes muestras de análisis; los valores de humedad son más próximos y, en consecuencia, el valor de la RCME correspondiente a estos valores de tensión es más bajo.

7.5.2.1.2 *Exactitud de las medidas*

En el apartado 7.3.2 se han señalado las limitaciones de las metodologías de caracterización física para evaluar la exactitud de las mediciones efectuadas. Para evaluar la exactitud se debe disponer de un valor de referencia conocido, con el que comparar los valores obtenidos.

Los patrones de medida proporcionan un valor de referencia de alta fiabilidad. Esta fiabilidad se basa en que el valor de referencia proporcionado por el patrón está libre de errores de medida, o en su defecto, se tiene la garantía de que los posibles errores son de un orden de magnitud inferior a los errores propios de la metodología empleada. Sin embargo, no se dispone de patrones de referencia que permitan contrastar las mediciones realizadas para determinar las propiedades físicas de un sustrato.

Los valores de referencia relativos proporcionan una alternativa para evaluar la exactitud, cuando no se dispone de patrones de medida. Estos valores de referencia relativos son valores ciertos, que derivan de relaciones conceptuales entre los valores medidos. En el caso de sustratos, se ha empleado como criterio la hipótesis de que el gradiente del contenido de agua con respecto a la tensión de humedad es menor o igual que cero. La aplicación de este método está limitada por el tipo de relación conceptual empleada y por la incidencia de errores sistemáticos, que afecten a más de uno de los valores considerados en la relación.

Cuando los valores de referencia ciertos disponibles no son suficientes para evaluar la exactitud de las mediciones realizadas, se puede recurrir a valores de referencia probables. En ocasiones, se puede disponer de los valores más probables que sirvan de referencia para evaluar la exactitud de las medidas efectuadas. El método para obtener estos valores más probables depende de los diferentes factores que intervienen en cada caso, y su fiabilidad condiciona la fiabilidad de la evaluación de la exactitud. La aplicación de modelos matemáticos para la curva de retención de agua proporciona los

valores más probables del contenido de humedad para cada valor de tensión. En nuestro caso, la cantidad de información obtenida con esta opción para el estudio de la exactitud, es muy superior a la obtenida con la opción anterior.

7.5.2.1.2.1 Valor de referencia relativo: $d\Theta/dh \leq 0$

Las posibilidades de aplicar valores de referencia relativos y su utilidad para evaluar la exactitud dependen, en gran medida, del tipo de relación que da lugar al valor relativo. Desde el punto de vista matemático, el valor de referencia puede estar definido por una igualdad o por una desigualdad. Las posibilidades de aplicación y la utilidad disminuyen considerablemente cuando se trata de una desigualdad. La igualdad es útil para todas combinaciones de valores que intervienen en la relación. En todos los casos, se tiene una evaluación del error que puede ser de un signo u otro. La desigualdad permite detectar errores únicamente cuando el signo del valor obtenido es contrario al previsto en la desigualdad. Así pues, únicamente permite detectar errores de un determinado signo cuando no se cumple la desigualdad.

En uno y otro caso, igualdad y desigualdad, la fiabilidad de estas evaluaciones está limitada por las características de la metodología de medida empleada. Los errores sistemáticos pueden incidir, de distinta forma, en los valores medidos, que intervienen en la relación que da lugar al valor relativo. Se puede producir una ocultación de errores cuando un mismo factor afecta a la medición de dos o más valores, considerados en la relación.

Las relaciones de igualdad permiten evaluar los errores sistemáticos que no se han compensado con otros de signo contrario. En las relaciones de desigualdad, cuando los valores obtenidos la cumplen, no se puede afirmar ni negar nada sobre la incidencia de errores sistemáticos. Cuando los valores no cumplen la desigualdad, se puede afirmar que los errores sistemáticos están incidiendo en un determinado sentido. Las posibilidades de evaluar la magnitud de estos errores deben considerarse en cada caso.

En el apartado 7.4.2 se hace una evaluación de la exactitud, aplicando un valor de referencia relativo. La relación que define este valor es que el gradiente de humedad con respecto a la tensión es menor o igual que cero. Para aplicarlo, se consideran todas las parejas de valores obtenidos experimentalmente para valores de tensión consecutivos. La relación de desigualdad se incumple en 7 de los 90 casos posibles. En los 83 casos en los que se cumple la desigualdad, no se puede afirmar nada. Respecto a los 7 casos mencionados, se puede afirmar que inciden una serie de errores sistemáticos, que afectan a la exactitud de las medidas efectuadas. La magnitud del error es mayor o igual que la mitad de la diferencia entre los dos valores consecutivos considerados.

En el supuesto de que el gradiente de humedad entre los dos puntos considerados fuera cero, y además, en los dos valores considerados hayan incidido errores sistemáticos de la misma magnitud y sentido contrario, el error sería igual a la mitad de la diferencia entre ambos casos. En cualquier otro caso, la magnitud del error será mayor que la mitad de la diferencia, al menos para uno de los dos valores considerados.

En la Tabla 127 se detallan, para cada sustrato, los intervalos de tensión en los que se ha detectado error aplicando este criterio. Se detalla también el valor de la diferencia entre los contenidos de humedad para los dos valores de tensión. De los errores detectados, los valores más elevados corresponden a lana de escoria para el intervalo de

tensión 2-4, y a corteza de pino para los intervalos de tensión 0-2 y 10-16 cm de columna de agua. En estos casos, el error oscila entre 2.46 y $3.06 \cdot 10^{-2}$. El sustrato C25:T75 da un error de $1.72 \cdot 10^{-2}$, para el intervalo de tensiones 2-4. El resto de los errores detectados está por debajo del $1 \cdot 10^{-2}$ (1% del volumen total del sustrato). Aplicando los criterios mencionados en este mismo apartado, podemos decir que, al menos en un caso, el error de exactitud ha sido no inferior a $1.53 \cdot 10^{-2}$ (1.53% del volumen total del sustrato).

7.5.2.1.2.2 Valor de referencia más probable: Análisis de residuos

El único valor de referencia cierto disponible para evaluar la exactitud de las mediciones efectuadas, es relativo y está definido por una relación de desigualdad. La información obtenida por esta vía es escasa, y los errores detectados se reducen a 7 casos de los 90 posibles.

Los modelos matemáticos empleados para ajustar los datos experimentales, proporcionan los valores más probables del contenido de agua para cada valor de tensión. La fiabilidad de estos valores como referencia para el cálculo de la exactitud depende de la fiabilidad del valor de referencia obtenido.

El ajuste de los datos experimentales a un modelo matemático determinado, proporciona los valores más probables del contenido de agua para cada valor de tensión. Este valor más probable puede presentar variaciones en función del modelo matemático considerado y del método estadístico empleado para el ajuste. En nuestro caso, los datos experimentales se han ajustados a varios modelos matemáticos: dos modelos polinómicos, dos variantes del modelo de Van Genuchten y cuatro variantes del modelo logarítmico normal de distribución del tamaño de poro. En todos los casos, el método de ajuste empleado ha sido el de mínimos cuadrados.

Los diferentes modelos dan lugar a distintos valores de referencia, cuya fiabilidad está en función de la fiabilidad del modelo. Es previsible que la fiabilidad del valor de referencia esté en función del valor explicativo del modelo que lo genera. Desde este punto de vista, la fiabilidad mayor corresponde al modelo logarítmico normal y la menor, a los modelos polinómicos.

En el apartado 6.3.4.2.2 se analizan los resultados de los residuos obtenidos como diferencia entre el valor observado y el calculado por los modelos empleados. Si se considera como valor de referencia al calculado por el modelo, el residuo constituye una estimación de la exactitud. El empleo de varios modelos da lugar a varios valores de referencia, de los que se podrían obtener conclusiones contradictorias. Sin embargo, cuando todos los valores de referencia indican una desviación de los resultados en un mismo sentido, es muy probable que se esté detectando la presencia de un error sistemático.

El análisis de varianza de los residuos presentado en el apartado 6.3.4.2.2.1.3 presenta como significativos los efectos de la interacción del factor tensión con los factores sustrato y modelo. En los análisis de varianza para cada uno de los valores de tensión (6.3.4.2.2.1.5), en todos los casos se presentan diferencias significativas entre sustratos; las diferencias entre modelos son significativas para las tensiones 0, 50 y 100 cm de columna de agua; y, el efecto interacción únicamente es significativo para las tensiones 50 y 100 cm de columna de agua. La no significación del efecto interacción para los

valores de tensión entre 0 y 30 cm de columna de agua, permite comparar los dos factores de variación, sustrato y modelo, independientemente uno de otro.

Si se consideran los valores medios de los residuos para cada modelo, para las tensiones 4, 6, 10 y 16 cm de columna de agua, todos son del mismo signo, >0 , para las tensiones 4, 6 y 16, y <0 para la tensión de 10 cm de columna de agua. Para el resto de valores de tensión, el valor medio de los residuos es positivo para unos modelos y negativo para otros.

Si se consideran los valores medios para cada sustrato, en el caso de la tensión 10 todos son negativos, para la tensión 16 todos son positivos, para la tensión 4 el sustrato 9 tiene un valor medio <0 , mientras que para el resto de los sustratos el valor medio es >0 . Para el resto de tensiones, los valores medios de los residuos son positivos para unos sustratos y negativos para otros.

Se deduce, por tanto, que al menos en los casos de las tensiones 10 y 16 cm de columna de agua, están incidiendo errores sistemáticos, que tienen como consecuencia la infravaloración de los resultados (residuo <0 ; observado $<$ referencia) en el caso de la tensión 10 y una sobrevaloración (residuo >0 ; observado $>$ referencia) en el caso de la tensión 16. Para la tensión 10, las desviaciones de los diferentes modelos varían entre $-2.13 \cdot 10^{-2}$ para el modelo V17 y $-3.02 \cdot 10^{-2}$ para el modelo C1. En el caso de la tensión 16, las desviaciones son menores, con unos valores extremos de $+1.11 \cdot 10^{-2}$, para el modelo C1, y $+1.93 \cdot 10^{-2}$, para el modelo C3. Los valores medios son $-2.54 \cdot 10^{-2}$, para la tensión 10, y $+1.56 \cdot 10^{-2}$, para la tensión 16. Estos valores medios los podemos considerar como las estimaciones más fiables del error de exactitud para estos dos valores de tensión.

Por otra parte, en el apartado 7.4.3 se ha estudiado la incidencia relativa de la exactitud y la precisión en los errores de medida. Para ello, se ha aplicado la metodología descrita en 7.3.3. El resultado obtenido indica que el 70% del valor de la SC_{EA} es debido a la incidencia de factores aleatorios, y el 30% (Tabla 129) a la incidencia de factores fijos. La incidencia de factores fijos tiene como consecuencia el aumento de un 24.22% de la media de los valores absolutos.

No tenemos un criterio definido para evaluar la importancia de este reparto. La falta de referencias anteriores impide una evaluación comparativa con otros ensayos similares.

En una primera evaluación, en términos absolutos, se desprende que la incidencia de los factores aleatorios es muy superior a la incidencia de los factores fijos. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que la componente debida a los factores aleatorios incluye la incidencia de la heterogeneidad del sustrato. La metodología empleada no permite conocer como se reparte el 70% debido a los factores aleatorios entre la heterogeneidad del sustrato y la precisión de las medidas propiamente dicha. La fuerte incidencia que suponen conjuntamente estos factores, pone de manifiesto la necesidad de planificar experimentos que proporcionen información sobre la incidencia de cada una de las dos componentes. Esta información permitirá establecer, con una mayor fiabilidad, las líneas de trabajo a desarrollar para mejorar la metodología de laboratorio para el estudio de las propiedades físicas.

7.6 Recapitulación

7.6.1 *Fundamentos*

La metodología de laboratorio empleada para la medida de las propiedades físicas, puede proporcionar información suficiente sobre la precisión de las mediciones efectuadas, pero la información sobre la exactitud es muy escasa y, en ningún caso, suficiente. No se dispone de valores de referencia absolutos (patrones de medida) y la información aportada por el único valor de referencia relativo cierto (gradiente de humedad negativo), es muy escasa.

Ante la falta de valores de referencia ciertos, algunos autores plantean la utilidad de los valores de referencia más probables. En base a los resultados obtenidos, se estima que el valor calculado por el modelo se puede considerar como valor de referencia más probable. En este caso, el residuo de ajuste del modelo pasa a tener la consideración de error.

El estudio analítico de la suma de los residuos de los modelos (considerados como errores de medida), y de sus valores absolutos, permite relacionar sus similitudes y diferencias con la incidencia en el proceso de medida de factores fijos (exactitud), aleatorios (precisión). El empleo de valores globales, en lugar de los valores correspondientes a cada tratamiento, supone una gran simplificación del cálculo, a cambio de una menor fiabilidad en la estimación de la incidencia de uno y otro tipo de errores.

El valor de la suma de cuadrados del error de los residuos, y de la suma de cuadrados del error de sus valores absolutos, informa sobre la incidencia relativa de uno y otro tipo de errores. La importancia de esta información radica en que la forma de resolver unos y otros es diferente. Los errores de precisión se mejoran aumentando el número de repeticiones o el tamaño muestral. La solución a los errores de exactitud requiere un estudio detallado de las rutinas de laboratorio y del instrumental empleado.

7.6.2 *Resultados*

7.6.2.1 Precisión y exactitud

La precisión de las mediciones efectuadas presenta variaciones importantes entre los diferentes sustratos y entre los diferentes valores de tensión de humedad considerados.

Respecto a sustratos, el valor de la SC_{Error} para los menos precisos es de 2 a 3 veces superior al de los más precisos. Respecto a tensiones, las mediciones más precisas corresponden a las tensiones altas, 50 y 100 cm de columna de agua; los valores de la SC_{Error} para las tensiones entre 0 y 30 cm de columna de agua son entre 2 y 5 veces superiores.

Los pocos datos disponibles sobre exactitud indican que los mayores errores se corresponden con los mismos sustratos en los que se presentan los errores de precisión, y con las mismas tensiones bajas.

7.6.2.2 Incidencia relativa de exactitud y precisión

La incidencia de los errores sistemáticos (factores fijos) en el proceso de medida supone el 30% de la suma de cuadrados del error de los valores absolutos de los residuos; el proceso de cálculo seguido infravalora esta incidencia, por lo que podemos afirmar que es de al menos el 30%. Estos errores aumentan en un 24% el valor de la media de los valores absolutos de los residuos.

7.6.2.3 Variabilidad de las mediciones

La metodología de laboratorio no permite evaluar la incidencia de la heterogeneidad del sustrato ni de los errores de medida en la variabilidad de las mediciones efectuadas. Los efectos de ambos factores están claramente diferenciados. La heterogeneidad del sustrato se manifiesta en la heterogeneidad de las macetas, contenedores, sacos de cultivo, etc, que lo contienen. Los errores de medida permiten calcular los intervalos de confianza de las mediciones efectuadas.

El desarrollo de metodologías que permitan evaluar estas dos componentes tiene consecuencias muy importantes, tanto para la aplicación en riego como para el aumento de la fiabilidad de la información obtenida sobre las características físicas del medio poroso.

7.6.2.4 Incidencia de la metodología en la exactitud y en la precisión

Se ha analizado la incidencia de los pasos sucesivos de la rutina metodológica en la exactitud y en la precisión de las mediciones efectuadas

- Muestreo: Un error de muestreo afecta a la exactitud de las medidas.
- Homogeneización de la muestra: Afecta a la precisión y puede ocultar información sobre la variabilidad de la partida de sustrato.
- Método de saturación: Dependiendo de la eficacia del método de saturación y de la rutina de laboratorio, las diferencias de saturación pueden incidir en la exactitud o en la precisión.
- Los errores de tensionado de las muestras y de lectura de la tensión aplicada inciden en la exactitud, dentro del lote de muestras tensionadas conjuntamente, y en la precisión, cuando se comparan valores de muestras tensionadas por separado.
- Los errores en el secado de las muestras inciden en la exactitud, dentro del lote de muestras secadas conjuntamente, y en la precisión, cuando se comparan valores de muestras secadas en distintos lotes.

8 CONCLUSIONES

1. Metodología de laboratorio

1.1. Accesibilidad

1.1.1. Se han introducido modificaciones metodológicas que permiten un estudio más ajustado de las funciones del sustrato para suministrar aire y agua al sistema radicular de la planta.

- a) Saturación de las muestras: La eficacia de la saturación por ebullición se ha mostrado claramente superior a la de la saturación por capilaridad o por inmersión, empleadas en otras metodologías. La sustitución de la ebullición por vacío aumenta el control sobre el proceso de saturación, requiere periodos de tiempo más cortos, y presenta amplias posibilidades para el estudio de las características del espacio poroso no consideradas hasta ahora.
- b) Aplicación del principio de Arquímedes para la medida del volumen ocupado por el material sólido: Presenta ventajas importantes respecto a los métodos actuales y es válido para cualquier tipo de sustrato. Respeta la estructura propia del mismo, a diferencia de la incineración. Con respecto a la picnometría, simplifica el método y elimina la subjetividad que se presenta cuando la densidad real es $\leq 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

1.2. Errores de medida

1.2.1. Pérdida de sustrato durante la saturación

- a) La cantidad de sustrato perdida puede representar hasta el 5-6% del peso inicial de la muestra, y depende fundamentalmente del sustrato empleado. La incidencia del tipo de cierre del contenedor portamuestras y del método de saturación es mínima. El manejo de la muestra de laboratorio puede aumentar la cantidad de sustrato perdida.
- b) Se observa una cierta relación entre la luz de malla y la cantidad de material perdido.
- c) La componente soluble del sustrato se mantiene dentro de márgenes estrechos.

1.2.2. Incidencia de la instrumentación

- a) Densidad del agua del baño y medida de volúmenes por aplicación del principio de Arquímedes
 - a.1) El empleo del valor medio de las cuatro determinaciones de la densidad proporciona una medida de gran fiabilidad, siendo la precisión del orden de $4,5\cdot 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
 - a.2) La incidencia del factor baño es más elevada, por lo que se hace necesario evaluar la densidad cada vez que se cambia de baño
 - a.3) El cálculo de la tara de pesos y volúmenes del contenedor portamuestras a partir de datos previos tiene una incidencia pequeña en el error. Se han empleado valores individualizados para los anillos metálicos, valores medios para las juntas tóricas de silicona y telas, y valores individualizados para las bandas elásticas de caucho, en el caso de emplear estos tipos de cierre. En estas condiciones, hay una probabilidad del 1% de que el error sea mayor de 0,1755 g en la tara de peso, y de $0,8617 \text{ cm}^3$ en la tara de volumen, que suponen el 0,82% y 0,40% del peso y volumen de la muestra, respectivamente, en el caso de utilizar bandas elásticas de caucho. Si se utilizan juntas tóricas de silicona, los valores correspondientes al 1% de probabilidad son 0,1433 g y $0,8787 \text{ cm}^3$ para el peso y el volumen, que suponen el 0,67% y 0,41% del tamaño muestral, respectivamente.

- b) El empleo de un valor único e igual a 215 cm^3 para el volumen interno del anillo metálico implica una probabilidad menor del 1% de que el error sea mayor de $0,8361 \text{ cm}^3$, que supone el 0,39% del volumen de referencia.
- c) La magnitud máxima del error para pesos y volúmenes oscila en el intervalo de 0,4% a 0,8% del tamaño muestral en el 99% de los casos. Si los límites se rebajan al 95%, el error oscila en la banda del 0,3% al 0,6%.

1.2.3. Error en la medida del volumen ocupado por aire

- a) Las metodologías de laboratorio empleadas permiten evaluar la precisión, pero no la exactitud de las mediciones realizadas.
- b) La pérdida de sustrato durante el proceso de caracterización tiene como consecuencia la infravaloración del volumen ocupado por aire. En el ensayo llevado a cabo para evaluar esta incidencia, se ha registrado una infravaloración de este parámetro de $-6,26 \text{ cm}^3$, que ha sido causada por la pérdida de sustrato durante la saturación.
- c) Las rutinas normales de laboratorio no permiten identificar estos errores, por lo que es necesario desarrollar nuevas metodologías que permitan detectarlos y evaluarlos.
- d) Se ha planteado la picnometría de gases como método para obtener una medida independiente del volumen ocupado por el aire. De esta forma, se puede obtener una estimación del error global del método de medida, que permite detectar y estimar los errores mencionados.

1.2.4. Picnometría de gases

- a) El picnómetro de gas proporciona una alternativa viable para obtener una medida independiente del volumen ocupado por aire en la muestra de sustrato. El picnómetro de doble cámara presenta dos ventajas importantes respecto a otros diseños: el control de la incidencia debida a las variaciones de temperatura, y la elevada precisión en el ajuste de las presiones de ambas cámaras.
- b) La fiabilidad del calibrado de la cámara de medida mejora considerablemente con el aumento del volumen de los patrones de referencia empleados. La desviación estándar obtenida empleando el patrón de mayor volumen es de 0.197 cm^3
- c) Se ha obtenido una fiabilidad baja para el calibrado de los puntos fijos de la cámara de medida ($\sigma=1,1228 \text{ cm}^3$), y aceptable para los de la cámara de referencia (error global del calibrado $<0,003$ -3 por mil-).
- d) La adsorción de gases interfiere con el proceso de medida cuando se emplea aire atmosférico. Esta adsorción está fuertemente condicionada por el estado del sustrato, seco o húmedo. La relación de compresión de gas durante la medición no incide en la adsorción. El bajo control de la variabilidad del ensayo realizado recomienda la realización de nuevos ensayos, que confirmen o desmientan estos resultados.

2. Modelo logarítmico normal de distribución de tamaño de poro

2.1. Valores iniciales empleados en el proceso iterativo de ajuste de los datos experimentales al modelo

- 2.1.1. Las exigencias del modelo simplificado (integral sencilla) son muy bajas. El modelo converge cuando los valores están dentro de un intervalo de variación muy amplio. Es suficiente con una cifra significativa.

- 2.1.2. Cuando se utiliza el modelo completo (integral doble), las exigencias son muy estrictas. Para que el modelo converja, es necesario partir de unos datos iniciales muy ajustados, con varias cifras significativas.
- 2.2. Ajuste entre datos experimentales y modelos
 - 2.2.1. El test de falta de ajuste entre datos experimentales y modelos es significativo para la mayor parte de los casos estudiados. En esta falta de ajuste incide más la variabilidad de los datos experimentales que las diferencias entre los modelos.
 - 2.2.2. Los resultados obtenidos con los diferentes sustratos permiten clasificar a los modelos en tres grupos: a) modelos logarítmico normal y de Van Genuchten, en los que el valor de la porosidad total interviene como dato; b) modelos logarítmico normal y de Van Genuchten, en los que el valor de la porosidad total no interviene como dato; y c) modelos polinómicos
 - 2.2.3. El paso del modelo completo de integral doble al modelo simplificado de integral sencilla, no supone una pérdida de la bondad del ajuste; los valores obtenidos en ambos casos son equivalentes.
 - 2.2.4. El empleo, como dato del ajuste, del valor de la porosidad total obtenido experimentalmente incide en el ajuste obtenido. Esta incidencia es tanto mayor cuanto mayor es la pendiente de la curva de retención de agua a tensiones próximas a cero. Cuanto mayor es esta incidencia, mayor es la diferencia entre el valor de la porosidad obtenido experimentalmente y el estimado por el modelo.
- 2.3. Comparación del modelo logarítmico normal con el modelo de Van Genuchten
 - 2.3.1. Desde el punto de vista matemático, el modelo logarítmico normal es equivalente al modelo de Van Genuchten.
 - 2.3.2. Desde el punto de vista conceptual, el modelo logarítmico normal es más favorable, ya que los cuatro parámetros que lo definen corresponden a características físicas previamente definidas.
- 2.4. Comparación del modelo logarítmico normal con los modelos polinómicos
 - 2.4.1. Desde el punto de vista matemático, los modelos polinómicos presentan un comportamiento menos favorable que los anteriores.
 - 2.4.2. Desde el punto de vista conceptual, ninguno de los parámetros de estos modelos polinómicos se corresponde con características físicas, lo que limita su capacidad de simulación.
- 2.5. Análisis de sensibilidad
 - 2.5.1. El modelo logarítmico normal proporciona un gran polimorfismo a la curva de retención de agua. La forma está condicionada por los valores de la media y de la desviación estándar de la distribución normal.
 - 2.5.2. El valor de la media (μ) incide en el valor de la tensión a la que se produce el máximo incremento de la integral (ΔL), pero no en su magnitud.
 - 2.5.3. El ΔL es tanto menor cuanto mayor es el valor de la desviación estándar (σ).
Estos dos valores están relacionados por la ecuación $\Delta L = a\sigma^b$, donde a y b son función de $\Delta\mu$ (error de la media) y $\Delta\sigma$ (error de la desviación estándar).
 - 2.5.4. Las relaciones de a y b con $\Delta\mu$ y $\Delta\sigma$ se ajustan a sendos planos. El valor de a está fuertemente condicionado por $\Delta\sigma$, mientras que $\Delta\mu$ tiene una mayor incidencia en el valor de b .

3. Errores de medida

- 3.1. Las metodologías aplicadas permiten evaluar la precisión, pero no la exactitud de las mediciones efectuadas. Sin embargo, el estudio de los residuos y de sus valores absolutos proporciona una primera aproximación a la incidencia relativa de los errores sistemáticos y aleatorios, que se corresponden con la exactitud y la precisión, respectivamente.
 - 3.1.1. El estudio realizado con este planteamiento indica que la incidencia de los errores sistemáticos supone, al menos, el 30% de la variabilidad (error) medida como suma de cuadrados.
- 3.2. La precisión de las mediciones efectuadas presenta diferencias importantes entre los diferentes sustratos, y entre los diferentes valores de tensión
 - 3.2.1. El valor de la suma de cuadrados del error, para los sustratos que presentan más variabilidad, es de 2 a 3 veces superior a la de los más precisos.
 - 3.2.2. Los valores más precisos corresponden a los valores de tensión más elevados, 50 y 100 cm de columna de agua. Para las tensiones más bajas –0 a 30 cm-, el valor de la suma de cuadrados es de 2 a 5 veces superior.
- 3.3. La variabilidad de los sustratos tiene dos componentes –heterogeneidad del sustrato y errores de medida-, que las metodologías empleadas no permiten diferenciar. La primera incide en la variabilidad entre macetas, y se resuelve mediante homogeneización del sustrato. La segunda proporciona los intervalos de confianza de las mediciones efectuadas. Es importante desarrollar metodologías que permitan evaluar estas dos componentes, por la incidencia que tienen sobre el riego

9 BIBLIOGRAFÍA

- Abad M, 1991. Los sustratos hortícolas y las técnicas de cultivo sin suelo. *En:* L. Rallo y F. Nuez (Eds.). La Horticultura Española en la C.E.. pp. 270-280. Ediciones de Horticultura S.L., Reus (Tarragona).
- Abad M, 1993. Sustratos para el cultivo sin suelo: Inventario y características. *En:* F Cánovas, JR Díaz (Eds.). Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo. pp. 63-80. I.E.A./F.I.A.P.A., Almería,
- Abad M, 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. *En:* F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate. pp. 131-166. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid,
- Abad M, Noguera P, 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *En:* C Cadahía (Coord.). Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales. pp. 287-342. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Abad M, Noguera V, Martínez-Herrero MD, Fornes F, Martínez-Corts J, 1989a. Physical and chemical properties of sedge peat-based media and their relation to plant growth. *Acta Horticulturae*, 238:45-56.
- Abad M, Noguera V, Martínez-Herrero MD, Fornes F, Herrero MV, Martínez-Corts J, 1989b. The effects of sedge peat-based media and controlled-release fertilizer on the growth of pot begonia, french marigold and geranium. *Acta Horticulturae*, 246:199-212.
- Abad M, Fornes F, García D, Cegarra J, Roig A, 1991. Effects of humic substances from different sources on growth and nutrient content of cucumber plants. *In:* B. Allard, H. Boren and A. Grimvall (Eds.). *Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 391-396.
- Abad M, Martínez PF, Martínez MD, Martínez J, 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 11:141-154.
- Abad M, Noguera P, Noguera V, 1996. Turbas para semilleros. *En:* II Jornadas sobre Semillas y Semilleros Hortícolas. *Congresos y Jornadas 35/96*. pp. 79-102. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Dirección General de la Producción Agraria, Sevilla.
- Abad M, Noguera P, Noguera V, Roig A, Cegarra J, Paredes C, 1997. Reciclado de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 19: 92-109.
- Abad M, Burés S, Noguera P, Carbonell S, 1999. Resultados de la Acción Especial CICYT “Elaboración de un inventario de sustratos y materiales adecuados para ser utilizados como sustratos o componentes de sustratos en España”. *Actas de Horticultura* 23:43-62.
- Acosta F, 1997. Modelos. *Ecosistemas* 22:58-9.
- Adams WA, Gibbs RJ, 1994. Soil constituents and properties in turfgrass systems. *In:* *Natural Turf for Sport and Amenity: Science and Practice*. p. 1-40. CAB International, Wallingford UK.
- Addiscott TM, Wagenet RJ 1985; Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approaches. *Journal of Soil Sciences* 36:411-24.
- AENOR 1997. Hortalizas para consumo en fresco. Producción controlada de cultivos protegidos. Parte 1: Requisitos generales. Norma UNE 155001-1. pp 25. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.

- Anderson JR 1976. Essential probabilistics in modelling. *Agricultural Systems* 1:219-31.
- André JP, 1987. Propriétés chimiques des substrats. *In*: D. Blanc (Dir.). *Les Cultures Hors Sol*. 2^{ème} éd. pp. 127-152. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris.
- Ansorena J., 1994. *Sustratos. Propiedades y Caracterización*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 172 pp.
- Australian Standard (AS 3743), 1993. Australian Standard for Potting Mixes. 2nd ed. Standards Australia, Standards Association of Australia. Homebush, NSW (Australia), 28 pp.
- ASCE/American Society of Civil Engineers, 1990. *Agricultural Salinity Assessment and Management*. K.K. Tanji (Eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. pp 619. ASCE, New York,.
- Avilés M, Avilla C, Ordovás J., Tello JC, 1999. Supresividad de los sustratos a base de compost sobre las enfermedades de origen edáfico: Una revisión bibliográfica. *Actas de Horticultura*, 26:51-58.
- Baber LD, Gardner WH, Gardner WR, 1991a. Estructura del suelo. Evaluación e importancia en la agricultura. *En*: *Física de Suelos*. pp. 189-242. Grupo Noriega Editores. Union Tipográfica Editorial Hispano Americana S.A. de C. V.. Mexico.
- Baber LD, Gardner WH, Gardner WR. 1991b. Retención del agua del suelo. *En*: *Física de Suelos*. pp. 299-334. Grupo Noriega Editores. Union Tipográfica Editorial Hispano Americana S.A. de C. V.. Mexico.
- Bagge Olsen O. 1967. Determination of volume weight and other properties of peat. Report from the hydrotechnical laboratory and horticultural department of the Royal Veterinary and Agricultural College of Copenhagen, Horticulture
- Baker CH, Curry RB, 1976. Structure of agricultural simulators: a philosophical view. *Agricultural Systems* 1:201-18.
- Benoit F, Ceustermans N, 1990. The use of recycled polyurethane (PUR) as an ecological growing medium. *Plasticulture*, 88: 41-48.
- Bernal MP, Paredes C, Sánchez-Monedero A. Cegarra J, 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63:91-93.
- Bielders CL, De Baker LW, Delvaux B. 1990. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer. *Soil Science Society of America Journal* 54:822-826.
- Bilderback TE, Fonteno WC, 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *Journal of Environmental Horticulture* 5(4):180-2.
- Bilderback TE, Fonteno WC, Johnson DR, 1982. Physical properties of media composted of peanutes hulls, pine bark, and peatmoss and their effect on azalea growth *Journal of the American Society for Horticultural Science* 107(3):522-5.
- Blanc D. (Dir.), 1987. *Les Cultures Hors Sol*. 2^{ème} éd. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, 409 pp.

- Blake GR, Hartge KH, 1986. Particle Density. *In*: Arnold Klute, (Eds.) Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. pp. 377-382. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Boote KJ, Jones JW, Pickering NB, 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88:704-16.
- Bourgeois H, 1998. Recyclage des substrats de culture: Trouver une solution. *PHM Revue Horticole* 396:31-35.
- Bragg NC, Chambers BJ, 1988, Interpretation and advisory application of compost air-filled porosity (AFP) measurement. *Acta Horticulturae* 221:35-44.
- British Standard Institution. 1990, Recommendation for Peat for horticultural and landscape use. British Standard Institution BS 4156 : 1990
- Brooks RH, Corey AT. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hidrology papers. Colorado State University* 3:1-27.
- Brown KA, 1981. Biochemical activities in peat sterilized by gamma irradiation. *Soil Biology and Biochemistry* 13:469-474.
- Brunauer S, Emmett PH, Teller E, 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society.* 60:309-318.
- Brutsaert, W, 1966. Probability laws for pore size distributions. *Soil Science* 101:85-92.
- Bugbee GJ, Frink CR 1986. Aeration of potting media and plant growth. *Soil Science* 141:438-41.
- Bunt AC, 1961. Some physical properties of pot plant compost and their effect on plant growth I. Bulky physical conditioners. *Plant and soil* 4:322-32.
- Bunt, A.C., 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants. 2nd ed. Unwin Hyman Ltd., London, 309 pp.
- Burés S, 1997; Características de los sustratos. *Sustratos. En: Sustratos* pp. 49-154. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid.
- Byrne PJ, Carty B, 1989. Developements in the measurement of air filled porosity of peat substrates. *Acta Horticulturae* 238:37-44.
- Cadahía C, (Coord.), 1988. Fertilización en Riego por Goteo de Cultivos Hortícolas. Unión Explosivos Río Tinto S.A., Madrid, 234 pp.
- Cadahía C, 1995. Fertilización. *En: F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate.* pp. 167-187. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Cadahía C, 1998. Fertirrigación. Aspectos básicos. *En: Fertirrigación. C. Cadahía. (Coord.). Cultivos Hortícolas y Ornamentales.* pp. 63-80. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Cadahía C, Fernández M, 1992. Evaluación de los fertilizantes de liberación lenta: Ensayos de invernadero. *En: S. Jiménez (Coord.). Fertilizantes de Liberación Lenta. Tipos, Evaluación y Aplicaciones.* pp. 111-126. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Cánovas F, 1993. Principios básicos de la hidroponía. Aspectos comunes y diferenciales de los cultivos con y sin suelo. *En: F Cánovas y JR Díaz (Eds.). Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo. I.E.A./F.I.A.P.A., Almería,* pp. 29-42.

- Cappaert I, Verdonck O, De Boodt M, 1974. Barkwaste as a growing medium for plants. *Acta Horticulturae* 37:2013-22.
- Carter DL, Mortland MM, Kemper WD. 1986 Specific surface. *In: A. Klute (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods.* pp. 1-31. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Cassel DK, Nielsen DR, 1986; Field capacity and available water capacity. *In: A. Klute (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods.* pp. 901-926. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Chen Y, Stevenson FJ, 1986. Soil organic matter interaction with trace elements. *In: Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.). The Role of Organic Matter in Modern Agriculture.* pp. 73-116. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht (The Netherlands),.
- Climont MD, Aragón P, Camarero A, Abad M, 1995. Caracterización del compost de residuos sólidos urbanos (R.S.U.) producido en la Planta de Ador (Valencia). *Actas del III Congreso Internacional de Química de la A.N.Q.U.E., Tenerife (España), 1994, Vol. I: 235-240.*
- Climont MD, Abad M, Aragón P, 1996. El Compost de Residuos Sólidos Urbanos (R.S.U.). *Sus Características y Aprovechamiento en Agricultura.* pp. 185. Ediciones y Promociones LAV S.L., Valencia.
- Conover CA Poole RT, 1981. Effect of soil compaction on physical properties of potting media and growth of *Picea pubescens* Liebm. "Silver tree". *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106:604-607.
- Costa F, García C, Hernández MT, Polo A, 1991. Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización. CSIC-CEBAS, Murcia, 181 pp.
- Danielson RE, Shutherland PL, 1986. Porosity. *In: A. Klute (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods.* pp. 443-461. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- De Boodt M, 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* 81:59-72.
- De Boodt M, De Waele N. 1968. Study on the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. *Pedologie XVIII(3):275-300.*
- De Boodt M, Verdonck O. 1971. Physical properties of peat and peat-moulds improved by perlite and foam-plastics in relation to ornamental plant-growth. *Acta Horticulturae* 18:9-25.
- De Boodt M, Verdonck O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 26:37-44.
- De Boodt M, Verdonck O, Cappaert 1974a. I. Determination and study of the water availability of substrates for ornamental plant growing. *Acta Horticulturae* 35:51-58.
- De Boodt M, Verdonck O, Cappaert I. 1974b. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae* 37:2054-2062.

- De Vleeschauwer D, Verdonck O, De Boodt M. 1980. The use of town refuse compost in horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 99:149-55.
- De Wit CT, Penning de Vries FWT, 1982. Theory of Modelling. *In*: F.W.T.P Penning de Vries, H.Van Laar (Eds.). *Simulation of Plant Growth and Crop Production*. pp. 1-31 Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Escobar A, 1997. Residuos generados por la actividad productiva. Medidas respetuosas con el medio ambiente. *En*: I. M. Cuadrado y L. Fernández (Eds.). *Actualización de Temas sobre la Horticultura Almeriense*, pp. 49-82. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería, Almería.
- Escudero J, 1993. Cultivo hidropónico del tomate. *En*: F. Cánovas y J.R. Díaz (Eds.). *Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo*, pp. 261-297. I.E.A. /F.I.A.P.A., Almería.
- FAO, 1990. Soilless Culture for Horticultural Crop Production. *FAO Plant Production and Protection Paper No. 101*. FAO, Roma, 188 pp.
- Felipó MT, Verdonck O, Cappaert I, De Boodt M, 1979. Estudio de las propiedades físicas de los sustratos hortícolas. *Anales de Edafología y Agrobiología* 38(3-4):604-11.
- Fernández Rodríguez EJ, López-Bellido L, 1993a. Terminología. *En*: *Modelos de Simulación en Cultivos Herbáceos*. pp. 21-36. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid.
- Fernández Rodríguez E.J., López-Bellido L. 1993b; Adaptación de los modelos. Aplicación a los sistemas agrícolas mediterráneos. *En*: *Modelos de simulación en cultivos herbáceos*. pp. 203-40. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid.
- Fonteno WC, 1989. An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 238:67-74.
- Fonteno WC, 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 342:197-204.
- Fonteno WC, Bilderback TE, 1983. Physical property changes in 3 container media induced by a moisture extender. *Hortscience* 18:570
- Fonteno WC, Cassel DK, Larson RA, 1981. Physical properties of three container media and their effect on poinsettia growth. *Journal American Society for Horticultural Sciences* 106(6):736-741.
- Gabriëls R, 1995. Standardization of growing media analysis and evaluation: CEN / ISO / ISHS. *Acta Horticulturae* 401:555-7.
- Gabriëls R, Verdonck O, 1991. Physical and Chemical characterization of plant substrates: Towards a european standardization. *Acta Horticulturae* 294:249-259.
- Gabriëls R, Verdonck O, Mekers O, 1990. Physical and Chemical characterization of plant substrates: Towards a european standardization. *Chronica Horticulturae* 30:27-28.
- Gabriëls R, Van Kreirsbulck W, Verdonck O, 1991. Reference method for physical and chemical characterization of growing media: an international comparative study. *Acta Horticulturae* 294:147-60.

- Gabriëls R, Van Kreirsbulck W, Engels H, 1993. A rapid method for the determination of physical properties of growing media. *Acta Horticulturae* 342:243-247.
- Goh KM, Haynes RJ, 1977. Evaluation of potting media for commercial nursery production of container plants 1. Physical and chemical characteristics of soil and soilless media and their constituents. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 20:263-70.
- Goh KM, Maas EF, 1980. A procedure for determining air and water capacity of soilless media and a method for presenting the results for easier. *Acta Horticulturae* 99:81-91.
- Goodall DW, 1976. Critical evaluation of systems analysis in ecosystems research and management. Pudoc, Wageningen, Netherlands. 10p.
- Gordon G, 1969. System simulation. Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall.
- Green RE, Ahuja LR, Chong SK, 1986. Hydraulic conductivity diffusivity, and sorptivity of unsaturated soils: Field methods. *In: A. Klute (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods.* pp. 771-798. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Günther J, 1984. Analytics of substrates and problems by transmitting the results into horticultural practice. *Acta Horticulturae* 150:33-40.
- Guerrero F, 1987. Tesis doctoral "Estudio de las propiedades físicas y químicas de algunas turbas españolas y su posible aprovechamiento agrícola". Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Ed. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. M^o de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. pp. 234.
- Gutierrez MA, 1995. Comunicación personal. Catedrático de Ingeniería Química de la Universidad del País Vasco.
- Handreck KA, 1981. Air filled porosity of potting mixes. *Australian Horticulture* (October):21-3.
- Handreck KA, 1992. Rapid assessment of the rate of nitrogen immobilisation in organic components of potting media: II. Nitrogen drawdown index and plant growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23:217-230.
- Handreck KA, Black ND, 1986. Air filled porosity of potting mixes; Metod 2. *In: Growing Media for Ornamental Plants and Turf.* pp. 360-361. South Wales University Press, Kensington NSW Australia.
- Handreck KA, Black, ND, 1991. *Growing Media for Ornamental Plants and Turf.* New South Wales University Press, Kensington (Australia), 401 pp.
- Hillel D, 1980a. Properties of Water in Relation to Porous Media. *In: Fundamentals of Soil Physics.* pp. 21-52. Academic Press Inc. New York.
- Hillel D, 1980b. Texture, particle size distribution, and specific surface. *In: Fundamentals of Soil Physics.* pp. 55-69. Academic Press Inc. New York.
- Hillel D, 1980c. Soil Water: Content and potential. *In: Fundamentals of Soil Physics.* pp. 123-165. Academic Press Inc. New York.
- Hoitink HAJ, Poole HA, 1980. Factors affecting quality of composts for utilization in container media. *HortScience*, 15:171-173.

- Hoitink HAJ, Inbar Y, Boehm MJ, 1991. Status of composted-amended potting mixes naturally suppressive to soilborne diseases of floricultural crops. *Plant Disease*, 75:869-873.
- Hoitink, HAJ, Stone AG, Han DY, 1997. Suppression of plant diseases by composts. *HortScience*, 32:184-187.
- IMSL (1979) Library Reference Manual. International Mathematics and Statistics Library, Houston, Texas (revisión ZXSSQ 1982)
- Joyal P, Blair J, Parent LE, 1989. Utilization of Tempe cells in determination of physical properties of peat based substrates. *Acta Horticulturae* 298:63-66.
- Karlovich PT, Fonteno WC, 1986. Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111(2):191-5.
- Kemphorne O, Allmaras RR, 1986. Error and variability of observations. *In: A. Klute (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods.* pp. 1-31. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Kerr GP, Hanan J, 1985. Leaching of container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 110:474-480.
- King LG, 1965. Description of soil characteristics for partially saturated flow *Soil Science Society of America Proceedings* 29:359-62.
- Klute A, Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: *In: A. Klute (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods.* pp. 687-204. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Krug H, 1985. Growth process and crop growth modelling. *Acta Horticulturae* 174:193-204.
- Kummer FA, Cooper AW, 1945. The dynamic properties of soils. IX Soil porosity determination with the air pressure pycnometer as compared with the tension method. *Agricultural Engineering* 26:21-23, 1945.
- Laliberte GE, 1969. A mathematical function for describing capillary-desaturation data. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* 14:131-149.
- Langmuir I, 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society* 40:1361-1402.
- Lemaire F, Dartigues A, Rivière LM, Charpentier S, 1989. Cultures en Pots et Conteneurs. INRA - PHM Revue Horticole, Paris-Limoges, 184 pp.
- Llamas JM, 1993. Modelos matemáticos en hidrología. *En: Hidrología general: Principios y aplicaciones.* pp 571-582. Universidad del País
- López F, 1998. Mecanicismo. *Ecosistemas* 25:28-9.
- MAPA, 1985. Anuario de Estadística Agraria, 1985. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 660 pp.
- MAPA, 1990. Anuario de Estadística Agraria, 1990. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 678 pp.

- MAPA, 1991. Anuario de Estadística Agraria, 1991. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 686 pp.
- MAPA, 1992. Anuario de Estadística Agraria, 1992. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 686 pp.
- MAPA, 1993. Anuario de Estadística Agraria, 1993. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 707 pp.
- MAPA, 1994a. Densidad real. In: Métodos Oficiales de Análisis. pp. 315-316. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA, 1994b. Anuario de Estadística Agraria, 1994. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 710 pp.
- MAPA, 1997. Anuario de Estadística Agraria, 1995. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 660 pp.
- MAPA, 1999. Anuario de Estadística Agraria, 1995. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 660 pp.
- Marfà O, Tort JM, Olivella, C, Cáceres R, Martínez FX, 1998. Cattle manure compost as a substrate. II. Conditioning and formulation of growing media for cut flower cultures. *Acta Horticulturae*, 469:305-312.
- Maroto JV, 1995. *Horticultura Herbácea Especial*. 4ª ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 611 pp.
- Martínez FX, 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*, 11:55-66.
- Martínez E, García M, 1993. *Cultivos Sin Suelo: Hortalizas en Clima Mediterráneo*. Ediciones de Horticultura S.L., Reus (Tarragona), 123 pp.
- Martínez FX, Casasayas R, Burés S, Cañameras N, 1988. Titration curves of different organic substrates. *Acta Horticulturae*, 221:105-116.
- Martínez FX, Valero J, Marfà O, Orozco R, 1993. Regresión polinómica para el ajuste de las curvas de liberación de agua y predicción del contenido de agua en sacos de perlita. *Actas de Horticultura* 10:1143-1150.
- Mayr E, 1982. *The growth of biological thought*. Cambridge: Harvard University Press
- Michelot P, 1999. Relations substrat - irrigation. In: P Michelot, C Chambolle (Coord). *L'irrigation en pépinière hors sol* pp 19-27. Astredor Paris.
- Milks R, Fonteno WC, Larson RA, 1989a. Hydrology of horticultural substrates: I mathematical models for moisture characteristics of horticultural containers media. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114:48-52.
- Milks R, Fonteno WC, Larson RA, 1989b. Hydrology of horticultural substrates: II Predicting physical properties of media in containers. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114(1):53-56.
- Milks R, Fonteno WC, Larson RA 1989c. Hydrology of horticultural substrates: III Predicting air and water content of limited volume plug cells. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114(1):57-61.

- Moinereau J, Herrmann P, Favrot JC, Rivière LM, 1987. Les substrats-Inventaire, caractéristiques, ressources. *In*: D. Blanc (Dir.). Les Cultures Hors Sol. 2ème éd. pp. 15-77. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris.
- Monteith JL, 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal* 88:695-697.
- Moozegar A, Warrick AW, 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils: Field methods. *In*: A. Klute (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods*. pp. 735-770. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Mualen Y, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522.
- Mualen Y, 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. *Methods of soil analysis. In*: A. Klute (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods*. pp. 799-823. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Muñoz-Carpena R, 1993. Modeling Hydrology and Sediment Transport in Vegetative filter Strips North Carolina State University pp 174.
- Muñoz-Carpena R, Ramos C, 1997. Relaciones agua-suelo: I. Propiedades agua suelo en condiciones estáticas. VII Curso Internacional de Riego Localizado. Centro de Investigaciones y Tecnología Agrarias. Gobierno de Canarias. Tenerife.
- Noguera, V., 1993. Sistemas de solución perdida y recirculante. Descripción, análisis y valoración. *En*: F. Cánovas y J.R. Díaz (Eds.). *Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo* pp. 83-126. I.E.A./F.I.A.P.A., Almería,.
- Occam Guillermo de. Occam's razor. <http://pespmc1.vub.ac.be/OCCAMRAZ.html>. 1998
- Ordovás J, Carmona E, Moreno MT, Ortega MC, 1996. Characteristics or Internal Porosity of Cork Container Media. *Hortscience* 31:1177-1179.
- Oreskes N, Shrader-Frechette K, Belitz K, 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263:641-646.
- Orozco R, 1995. Propiedades físicas e hidrológicas de perlitas utilizadas para cultivos sin suelo. Su implicación con las relaciones Sustrato-Agua-Planta y con el riego de cultivos hortícolas Tesis doctoral. Escola Técnica Superior D'Ingenieria Agraria. Departament de Medi Ambient y Ciencia del Sol. Universitat de Lleida. pp 186
- Ortega MC, Ordovás J, Carmona E, Aguado MT, Moreno MT, 1998. El nitrógeno en la obtención y mejora de un sustrato de origen vegetal. *Actas de Horticultura* 23: 65-78.
- Otten W, Dynamic of water and nutrients for potted plants induced by flooded bench fertirrigation: experiments and simulation Wageningen; 1994; pp 115.
- Page JB, 1947. Advantages of the pressure pycnometer for measuring the pore space in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 12:81-84.
- Pagés M, Verdonck O, De Boodt M, 1981. Estudio comparativo de las propiedades físicas de los 'pequeños bloques prensados' y los sustratos más comunes en el cultivo hortícola. *Anales INIA* 14:251-65.

- Passioura JB, 1996. Simulation models: Science, Sanke oil, Education, or engineering? *Agronomy Journal* 88:690-4.
- Pease CM, Bull JJ 1992. Is science logical? *Bioscience* 42:293-298.
- Penning de Vries FWT, 1983. Modelling of growth and production. *In: OL Lang, PS Nobel, CB Osmond, H Ziegler (Eds). Encyclopedia of Plante Physiology.* pp. 117-50. Springer-Verlag Berlin.
- Perez-Parra J, 2001. Comunicación personal. Director de la Estación Experimental “Las Palmerillas” Almería.
- Perucci P, Giusquiani PL, Scarponi L, 1982. Nitrogen losses from added urea and urease activity of a clay-loam soil amended with crop residues. *Plant and Soil*, 69:457-469.
- Peterson JC, 1981. Modify your pH perspective. *Florists’ Review*, 169:34-35.
- Petrovic P, Vitorovic F, Jablanovic D, 1982. Investigations of biological effects of humic acids. *Acta Biologiae et Medicinae Experimentalis*, 7:21-25.
- Pieters J, Van Assche B, Buekens A, 1998. Reducing solid waste streams specific to soilless horticulture. *HortTechnology*, 8:39-40.
- Pryce S, 1991. *The Peat Alternatives Manual*. Friends of the Earth, London (UK), 133 pp.
- Puustjärvi V, 1994. *La Turba y su Manejo en Horticultura*. Ediciones de Horticultura S.L., Reus (Tarragona), pp. 123.
- Puustjarvi V, Robertson RA, 1975. Physical and chemical properties. *In: DWRobinson, JGD Lamb (Eds.) Peat in Horticulture* pp. 23-38.
- Quemada M, Cabrera ML 1995. CERES-N Prediction of nitrogen mineralized from crop residues. *Soil Science Society of America Journal* 59(4):1059-65.
- Quintana I, Castillo JJ, Antigüedad I, Morales T, Fernandez-Valderrama I, Muguerra I, Eraso A, Madariaga C, Sanz de Galdeano JM, 1997; Procesos de transporte de solutos. *In: Investigación de la contaminación del suelo. Análisis de riesgos: Migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en la aguas subterráneas.* pp. 33-70. IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente. Gobierno Vasco Vitoria Gasteiz.
- Ramos C, 1993. La hidroponía y el medio ambiente. *En: F. Cánovas y J.R. Díaz (Eds.). Curso Superior de Especialización sobre Cultivos Sin Suelo.*pp. 394-403. I.E.A./ F.I.A.P.A., Almería.
- Raviv M, Chen Y, Geler Z, Medina S, Putievski E, Inbar Y, 1984. Slurry produced by methanogenic fermentation of cow manure as a growth medium for some horticultural crops. *Acta Horticulturae*, 150: 563-573.
- Raviv M, Chen Y, Inbar Y, 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plant. *In: Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.). The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, pp. 257-287. Martinus Nijhoff Plublishers, Dordrecht (The Netherlands).
- Resh HM, 1997. *Cultivos Hidropónicos. Nuevas Técnicas de Producción.* 4ª ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 509 pp.

- Reynolds JF, Acock B, 1985. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: a critique of plant growth models. *Ecological Modelling* 29:107-29.
- Richards LA, 1960. Advances in soil physics. Transactions of the international Congress of Soil Science 1:67-79.
- Richards LA, Waldleigh CH, 1952. Soil water and plant growth, soil physical conditions and plant growth. *Agronomy monographs*, Academic Press N Y 3:102-6.
- Richards SJ, Warner JE, Aljibury FK, 1964. Physical properties of soil mixes. *Soil Science* 98:129-32.
- Richards D, Lane M, Beardsell, DV, 1986. The influence of particle-size distribution in pinebark : sand : brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Scientia Horticulturae*, 29:1-14.
- Russell EW, 1961. Soil conditions and plant growth. Longmans, Londres.
- Schmilewski G, Günther J 1988. International comparative study on the physical and chemical analysis of horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 221:425-42.
- Shirazi M.A, Boersma L, 1984. A unifying Quantitative analysis of soil texture *Soil Science Society of America Journal* 48:142-7.
- Sinclair TR, Seligman NG, 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy Journal* 88:698-704.
- Spitters CJT, 1990. Crop growth models: their usefulness and limitations. *Acta Horticulturae* 267:349-68.
- Stephens DB, Rehfeldt KR, 1985. Evaluation of closed form analytical models to calculate conductivity in a fine sand. *Soil Science Society of America Journal* 9:12-9.
- Stevenson FJ, 1982. *Humus Chemistry*. John Wiley & Sons, New York, 443 pp.
- Su C, Brooks RH, 1975. Soil hydraulic properties from infiltration tests *Watershed Management Proc.*, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, Logan Utha, Logan Utha.
- Thomas GV, Prabhu SR, Reeny MZ, Bopaiah BM, 1998. Evaluation of lignocellulosic biomass from coconut palm as substrate for cultivation of *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Singer. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 14:879-882.
- Tilt KM, 1983. Effects of physical and chemical properties of container and propagation media on the growth and rooting response of woody ornamentals North Carolina State University, Raleigh
- Tortensson G, and Ericson S, 1936. A new method for determining the porosity of the soil. *Soil Science* 42:405-417.
- Urrestarazu M, 1997. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. *En: M. Urrestarazu (Eds.). Manual de Cultivo Sin Suelo*. pp. 23-64. Universidad de Almería.
- Van Genuchten MT, 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model: Research Report 78-WR-08. Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princeton University, Princeton, New Jersey.

- Van Genuchten MT, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:892-8.
- Van Genuchten MT, Nielsen DR, 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae* 3(5):615-28.
- Van Keulen H, De Wit CT 1982. A hierarchical approach to agricultural production modeling. *Modeling agricultural - environmental processes in crop production Proceedings of a 2-4 june 1980 task force Meeting* :139-53.
- Van Os EA, Ruijs MNA, Van Weel PA, 1991. Closed business systems for less pollution from greenhouses. *Acta Horticulturae*, 294:49-57.
- Vanachter A, Van Assche C, Van Wambeke E, 1993. Problem shifts induced by modified growing substrates. *Acta Horticulturae*, 342:103-109.
- Vaughan D, Malcolm RE, 1985. Influence of humic substances on growth and physiological processes. *En: D. Vaughan and R.E. Malcolm (Eds.). Soil Organic Matter and Biological Activity*, pp. 37-75. Mortimus Nijhoff and M. Junk, Boston.
- Veihmeyer FJ, Hendrickson AH, 1927. The relation of soil moisture to cultivation and plantgrowth. *Proceedings of the 1st International Congress of Soil Science, Washington* 3:498
- Verdonck O, Cappaert I 1978. Growth experiments with barkcompost. *Acta Horticulturae* 82:55-7.
- Verdonck O, Gabriëls R, 1988. Summary and discussion session 'standardization of analytical methods'. *Acta Horticulturae* 221:443-54.
- Verdonck O, Gabriëls R, 1992. ISHS Reference method for the determination of physical properties of plant substrates. *Acta Horticulturae* 302:169-179, 1992.
- Verdonck O, Penninck R 1986. Air content in horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 178:101-105.
- Verdonck O, Cappaert I, De Boodt M, 1974. The properties of the normally used substrates in the region of Ghent. *Acta Horticulturae* 37:1930-44.
- Verdonck O, Cappaert I, De Boodt M, 1978. Physical characterization of horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 82:191-200.
- Verdonck O, De Vleeschauer D, De Boodt M, 1980. The use of bark-sludge compost as a substrate for ornamental plants. *Acta Horticulturae* 99:119-29.
- Verdonck O, De Boodt M, Stradiot P, Penninck R. 1985. The use of tree bark and tobacco waste in agriculture and horticulture. *In: JKR Gasser (Eds.) Composting of agricultural and other wastes*. pp 203-215. Elsevier Applied Science Publishers, New York.
- Verdonck O, Gabriëls R, Van Kreirsbulck W, 1995. Reference standar materials for the determination of physical characteristics of growing media. *Acta Horticulturae* 401:559-60.
- Vomocil JA, 1965. Porosity. *In: CA Black, DD Evans, JL White, LE Ensminger, FE Clark, RC Dinauer (Eds.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measured and Sampling*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.

- Wever G, 1995. Physical analysis of peat and peat-based growing media. *Acta Horticulturae* 401:561-567.
- Whisler FD, Acock B, Baker DN, Fye RE, Hodges HF, Lambert JR, Lemmon HE, McKinion JM, Reddy KR 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy* 40:141-208.
- White JW, Mastalerz JW, 1986. Soil moisture as related to container capacity. *Proceedings American Society for Horticultural Science* 89:758-65.
- Whitmore AP 1991. A method for assessing the goodness of computer simulation of soil processes. *Journal of Soil Sciences* 42:289-99.
- Willard HH, Furman NH, Bricker CE 1965. Mediciones científicas. *En: Análisis químico cuantitativo. Teoría y práctica.* pp 61-71. Editorial Marín, S.A. Mexico.
- Wilson GCS, 1984. The physico-chemical and physical properties of horticultural substrates. *Acta Horticulturae*, 150:19-32.
- Zuang H, Musard M, 1984. *Cultures Légumières sur Substrats.* Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Paris, 244 pp.