

**Métodos de determinación de parámetros que estiman la  
disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas y su relación con  
la respuesta vegetal.**

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencia del Suelo*

LILIA BEATRIZ VENCE

Ingeniera Industrial- Facultad de Ingeniería  
Universidad de Buenos Aires - 1975

Lugar de trabajo: Facultad de Agronomía  
Universidad de Buenos Aires



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## **COMITÉ CONSEJERO**

Director de tesis

**Marta Elvira Conti**

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

M. Sc. en Ciencias del Suelo (Universidad de Buenos Aires)

Consejero de Estudios

**Oswaldo Rubén Valenzuela**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)

Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario)

Consejero de Estudios

**Pedro Insausti**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

M. Sc. en Recursos Naturales (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

## **JURADO DE TESIS**

Director de tesis

**Marta Elvira Conti**

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

M. Sc. en Ciencias del Suelo (Universidad de Buenos Aires)

## **JURADO**

**Atelene Normann Kämpf**

Lic. en Biología (Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil)

Master en Botánica (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil)

Dra en Ciencias Agrárias-Horticultura / Producción de plantas ornamentales.

(Technische Universität München, TUM, Alemania)

PóstDoctor en Sustrato para plantas (Purdue University, USA)

## **JURADO**

**Alicia Elena Rendina**

Lic. en Ciencias Químicas. Orientación: Química Analítica. (Univ. de Buenos Aires)

Master en Evaluación de Impacto Ambiental (Instituto de Investigaciones Ecológicas,

Málaga, España y Universidad Autónoma de Yucatán, México)

M. Sc. en Ciencias del Suelo (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de la defensa de la tesis: 7 de agosto de 2012

## Agradecimientos

A Osvaldo Valenzuela, compañero en todos los momentos de este proceso, por su motivación e ideas y la confianza, dedicación y paciencia que me brindó.

A Marta Conti por toda la amplia colaboración recibida

A Pedro Insausti, solícito y presente en la recta final

A los jurados A. Kämpf y A. Rendina por haber aceptado evaluar este escrito

A mi amigo Héctor Svartz por el apoyo incondicional y por abrirme generosamente las puertas de los lugares de trabajo

A Daniel Martínez, *alias el físico*, gran amigo, con quien compartimos largas horas de maravillosas discusiones!!! que enriquecieron mis conocimientos y sin cuya colaboración hubiera sido mucho más difícil realizar este trabajo

A todos mis amigos que ayudaron desinteresadamente *haciendome el aguante*, compartiendo y disfrutando horas de trabajo en equipo: Ofelia Ludueña, Esteban Gandolfo, Daniel Ojeda, Carlos Boschi, Mirta Ciaponi, Maria Garriga

A Helena Fermino, Anna Puerta, Oriol Marfà, Rafi Cáceres, Joaquín Gonzalez, Karina del Pardo, Maricel Rode, Claudia Gallardo, Marcos de Almeida Leal, Claudia Sainato por la generosa acogida en sus lugares de trabajo.

A mis compañeras “que ya vieron esta película”: Valeria Faggioli, Lola Narvaes, Alicia Irizar, Carolina Alvarez, Gisela Moreno, Gabriela Civeira, por las horas compartidas

A mis alumnos que retroalimentan la pasión que siento por la docencia

A las empresas Terrafertil, Agriservice, Multiquim y Viveros Fucsia que aportaron el material para los ensayos

....Y a toda mi familia y amigos íntimos que entendieron mis momentos y me soportaron siendo *mi cable a tierra*.....

*Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.*

*Lilia Beatriz Vence*

### **Publicaciones derivadas de la tesis:**

#### *Publicaciones en revistas con referato:*

Vence, L. 2008. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. Revista Ciencia del Suelo (Argentina), volumen 26 (2): 105:114

Martinez, D., Landini, A.M., Svartz, H., Vence, L., Bottini, L., Mascarini, L., Orden, S. y Villela, F. 2006. Propiedades físicas e hidráulicas de perlita en cultivo de rosas y sus variaciones temporales. Ci. Suelo (Argentina) 24 (2): 177-182

#### *Trabajos presentados en Congresos en el exterior:*

Vence, L., Valenzuela, O. y Svartz, H. 2012. Comparación de métodos de laboratorio para determinar las curvas de retención de agua en sustratos para plantas. “VIII ENSUB, Encontro Nacional de Substratos para Plantas”, Campo Grande, MS, Brasil.

Vence, L., Valenzuela, O. y Svartz, H. 2010. Caracterización física de sustratos con fines comerciales: densidad y capacidad de retención de agua medidas por diferentes métodos. En actas “V ENSUB, Encontro Nacional de Substratos para Plantas”, Goiania, GO, Brasil.

Martinez, D., Svartz, H., Vence, L. y Vilella, F. 2004. Retención de agua en perlitas en cultivos bajo cubierta y sus variaciones en el tiempo. Pp 347 en: Nutrição e Adubação de Plantas Cultivadas em Sustrato, Barbosa, J.G. (ed.), “IV ENSUB, Encontro Nacional sobre sustrato para plantas”, Viçosa, MG, Brasil.

#### *Trabajos presentados en Congresos nacionales:*

Vence, L., Valenzuela, O., Svartz, H y Boschi, C. 2012. Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. Trabajo completo presentado en el XXXV congreso de la Asociación Argentina de Horticultura, ASAHO. Exposición oral. Resumen en Libro de Resúmenes, ISBN 978-987-97812-9-6, septiembre 2012.

Vence, L B; Conti, M E; Svartz, H A y Valenzuela, O R. 2012. Métodos de medición de densidad en sustratos para producción de plantas. XIX Congreso latinoamericano de la Ciencia del Suelo, XXIII, Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012

Vence, L., Valenzuela, O., Svartz, H y Gandolfo, E. 2010. Densidad de partícula en sustratos para plantas: métodos y su incidencia en el cálculo de la porosidad total. Pp 32 en: XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, ISBN: 978-987-24771-1-0, resumen expandido en versión electrónica ISBN 978-987-24771-3-4,

Vence, L., Conti, M. y Valenzuela, O. 2010. Disponibilidad de agua-aire en sustratos y su relación con el crecimiento de la planta. Pp 58 en: XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo” ISBN: 978-987-24771-1-0, resumen expandido en versión electrónica ISBN 978-987-24771-3-4

Vence, L. y Martinez, D. 2008. Caracterización física de 4 sustratos para plantas, parte I: Determinación de la densidad de sustrato seca, capacidad de retención de agua, porosidad total y porosidad de aire por 2 métodos. Pp 236-240 en Verón, R. y Lange, P. (eds.).4to Congreso Argentino de Floricultura y Plantas ornamentales y X Jornadas nacionales de Floricultura, editorial INTA, ISBN 978-987-521-326-5

Vence, L. y Martinez, D. 2008. Caracterización física de 4 sustratos para plantas, parte II: Curvas de liberación de agua obtenidas con dos dispositivos de tensión diferentes. Pp 241-246 en Verón, R. y Lange, P. (eds.).4to Congreso Argentino de Floricultura y Plantas ornamentales y X Jornadas nacionales de Floricultura, editorial INTA, ISBN 978-987-521-326-5

## INDICE GENERAL

### INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Sustratos para plantas.....	1
2. Relación agua-aire en los sustratos.....	3
3. Metodologías: elección y estandarización.....	8
4. Los sustratos en Argentina.....	9
5. Objetivos e Hipótesis.....	10

<b>CAPÍTULO 1:</b> Comparación de métodos de medición de las variables consideradas en la caracterización física de los sustratos para plantas .....	11
--	----

#### 1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Propiedades físicas: factores directos e indirectos sobre el crecimiento de la planta.....	12
1.1.2. Influencia del método en los resultados de la variable medida.....	14
1.1.3. Objetivos específicos e Hipótesis .....	16

#### 1.2. MATERIALES Y MÉTODOS .....

1.2.1. Abordaje metodológico.....	16
1.2.2. Materiales y muestreo.....	18
1.2.3. Análisis de laboratorio.....	18
1.2.3.1. Densidad de sustrato .....	18
1.2.3.1.1. <i>Método de la legislación brasilera (IN 17)</i> .....	20
1.2.3.1.2. <i>Método basado en la norma EN-13040(EN 40)</i> .....	21
1.2.3.1.3. <i>Método basado en la norma EN-13041(EN13041)</i> .....	21
1.2.3.1.4. <i>Método en lecho de arena a 10 hPa (DBOT)</i> .....	21
1.2.3.1.5. <i>Método utilizando placas de yeso (EMBYESO)</i> .....	21
1.2.3.1.6. <i>Método de la North Caroline State University (NCSU)</i> .....	21
1.2.3.2. Densidad de partícula .....	22
1.2.3.2.1. <i>Método del matraz aforado</i> .....	22
1.2.3.2.2. <i>Método por fórmula</i> .....	22
1.2.3.3. Porosidad Total.....	22
1.2.3.3.1. <i>Porosidad total calculada por fórmula</i> .....	23
1.2.3.3.2. <i>Método de tensión cero (LEGBRAS)</i> .....	23
1.2.3.3.3. <i>Método de la North Caroline State University (NCSU)</i> .....	24
1.2.3.4. Contenido hídrico volumétrico y potencial mátrico.....	24
1.2.3.4.1. Contenido hídrico volumétrico a 10hPa .....	24
1.2.3.4.1.1. <i>Método DBOT</i> .....	24
1.2.3.4.1.2. <i>Método NCSU</i> .....	24
1.2.3.4.2. Contenido hídrico volumétrico de 0 a 100 hPa.....	24

1.2.3.4.2.1. Método utilizando lechos de arena (EN13041).....	25
1.2.3.4.2.2. Método utilizando embudos de tensión (EMBDBOT.)...	25
1.2.3.4.2.3. Método utilizando placas de yeso (EMBYESO).....	25
1.2.3.4.2.4. Método utilizando papel de filtro (LEGBRAS ).....	25
1.2.3.5. Porosidad de aire .....	25
1.2.3.5.1 Métodos indirectos.....	25
1.2.3.5.1.1. Método utilizando lechos de arena (EN13041).....	25
1.2.3.5.1.2. Método utilizando lecho de arena a 10 hPa (DBOT).....	26
1.2.3.5.1.3. Método utilizando embudos de tensión (EMBDBOT).....	26
1.2.3.5.1.3. Método utilizando placas de yeso (EMBYESO).....	26
1.2.3.5.2. Métodos directos .....	26
1.2.3.5.2.1. Método utilizando papel de filtro (LEGBRAS).....	26
1.2.3.5.2.2. Método NCSU.....	26
1.2.3.6 Granulometría.....	26
1.2.3.6.1. Distribución de tamaño de partículas .....	26
1.2.3.6.2. Índice de grosor.....	27
1.2.3.6.3. Parámetros estadísticos: Diámetro medio geométrico y desviación estándar geométrica .....	27
1.2.3.7. Determinación de parámetros que intervienen en las metodologías	27
1.2.3.7.1. Contenido de humedad y materia seca.....	27
1.2.3.7.2. Contenido de materia orgánica y cenizas.....	27
1.2.4. Análisis estadístico de los datos .....	27
1.2.4.1. Estudio de reproducibilidad .....	28
<b>1.3. RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
1.3.1 Densidad de sustrato .....	28
1.3.1.1. Densidad de sustrato húmeda .....	29
1.3.1.2. Densidad de sustrato seca.....	30
1.3.2 Densidad de partícula .....	34
1.3.3. Porosidad total .....	36
1.3.3.1. Porosidad total calculada mediante fórmula.....	36
1.3.3.2. Porosidad total por medición directa de volumen de agua .....	37
1.3.4. Contenido hídrico volumétrico a 10 hPa de tensión .....	38
1.3.5. Contenido hídrico volumétrico de 0-100 hPa de tensión .....	40
1.3.6. Porosidad de aire .....	41
1.3.7. Distribución de fases .....	42
1.3.8. Granulometría .....	45
1.3.9. Distribución de tamaño de partícula .....	45



<b>1.4. DISCUSIÓN</b> .....	47
<b>1.5. CONCLUSIONES</b> .....	54
 <b>CAPITULO 2:</b> Parámetros estáticos y dinámicos de sustratos según cuatro métodos de laboratorio: respuesta de la planta a riegos basados en los resultados y comparación con los obtenidos <i>in situ</i> .....	57
<b>2.1. INTRODUCCIÓN</b>	
2.1.1. Disponibilidad de agua: Concepto y parámetros que la definen .....	58
2.1.2. Medición del potencial mátrico en el sustrato en tiempo real.....	62
2.1.3. Relación entre la disponibilidad de agua en el sustrato y la planta .....	62
2.1.4. Objetivos específicos e Hipótesis .....	63
 <b>2.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	64
 PARTE A: Parámetros hidráulicos de los sustratos por distintos métodos y su influencia en el manejo de riego.....	64
2.2.1. Selección de materiales.....	64
2.2.2. Mediciones de laboratorio.....	65
2.2.2.1. Curvas de retención de agua: Pares $\theta - \psi$ de $\theta = f(\psi)$ .....	66
2.2.2.1.1. Método EN13041 utilizando lecho de arena.....	66
2.2.2.1.2. Método EMBDBOT utilizando embudos de tensión.....	66
2.2.2.1.3. Método EMBYESO utilizando placas de yeso.....	66
2.2.2.1.4. Método LEGBRAS de la legislación brasilera.....	66
2.2.2.2. Curvas de retención de agua: Ajuste matemático de $\theta = f(\psi)$ .....	66
2.2.2.3. Determinación de la conductividad hidráulica a flujo saturado.....	67
2.2.2.4. Determinación de la conductividad hidráulica flujo no saturado.....	67
2.2.2.5. Determinación del punto de umbral de riego en base a <i>Kns</i> .....	68
2.2.2.6. Análisis estadístico de los resultados.....	68
 PARTE B: Respuesta vegetal en función del riego diseñado con la <i>Kns</i> ( $\theta$ ) obtenida por los diferentes métodos. Medidas de $\theta - \psi$ <i>in situ</i> .....	69
2.2.3. Medición del potencial mátrico en el sustrato <i>in situ</i> en tiempo real .....	69
2.2.3.1. Mediciones preliminares <i>in situ</i> con tensiómetros.....	70
2.2.4. Experimentos con plantas .....	70
2.2.4.1 Procedimientos comunes a los tres experimentos .....	70
2.2.4.1.1 Elección de la planta.....	70
2.2.4.1.2. Elección de los sustratos.....	70
2.2.4.1.3. Cultivo .....	70
2.2.4.2. Experimento I: Evaluación de la <i>Kns</i> estimada por distintos métodos como indicador de la disponibilidad de agua en M1 y M2 a través de la respuesta hídrica de la planta.....	70

2.2.4.3. Experimento II: Estados energéticos del agua en los sustratos.....	72
2.2.4.4. Experimento III: Curva de retención de agua <i>in situ</i> : efecto de la planta .....	73
2.2.4.5. Análisis estadístico de los datos .....	74
<b>2.3. RESULTADOS</b>	
2.3.1. Caracterización física preliminar de los sustratos.....	74
2.3.2. Curvas de retención de agua .....	75
2.3.2.1. Pares $\theta - \psi$ de la función $\theta = f(\psi)$ por distintos métodos.....	75
2.3.2.2. Ajuste de la curva de retención de agua.....	78
2.3.3. Conductividad hidráulica saturada .....	82
2.3.4. Conductividad hidráulica no saturada y punto de umbral de riego.....	82
2.3.5. Mediciones de tensión en tiempo real en M1 y M2 sin planta.....	85
2.3.6. Experimento I .....	85
2.3.7. Experimento II .....	86
2.3.8. Experimento III.....	90
2.3.8.1. Contracción de volumen .....	95
<b>2.4. DISCUSIÓN</b> .....	96
<b>2.5. CONCLUSIONES</b> .....	99
<b>CAPÍTULO FINAL</b> .....	101
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	102
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	105
<b>APÉNDICE</b> (versión electrónica en CD) .....	123

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.1.:</b> Procedimientos realizados para el cálculo de la porosidad total por fórmula reemplazando la densidad de sustrato seca (DSs) según DBOT, EN13041 y EMBYESO y la densidad de partícula (DP) según valores obtenidos en 3 métodos distintos, en los procedimientos A,B,C; D,E,F y G,H,I respectivamente en 4 materiales .....	23
<b>Cuadro 1.2.:</b> Densidad de sustrato húmeda de cuatro materiales según IN 17 y EN 40 (n=15). Valores entre paréntesis indican desvío estándar.....	29
<b>Cuadro 1.3.:</b> Variabilidad de los resultados de la densidad de sustrato húmeda expresada mediante el coeficiente de variación (CV) (n = 15). Error máximo cometido ( $\epsilon$ max) calculado para distintas probabilidades ( $P < 0,10$ y $P < 0,05$ ) y número de repeticiones necesarias ( $\eta$ ) calculadas para errores ( $\epsilon$ ) máximos del 15% , 10% y 5%, obtenidos de dos métodos y en cuatro materiales.....	29
<b>Cuadro 1.4.:</b> Densidad de sustrato seca (DSs) calculada a partir de la densidad de sustrato húmeda (DSh) y la materia seca, según IN 17 en 4 materiales con 2 humedad inicial de las muestras (H % m/m) (n = 15) CV%: coeficiente de variación .....	30
<b>Cuadro 1.5.:</b> Densidad de sustrato seca según 6 métodos en 4 materiales (n=15) .....	31
<b>Cuadro 1.6.:</b> Ecuaciones de la regresión lineal de las densidades de sustrato seca (DSs) por distintos métodos referidos a la DSs según método EN13041, en A para: perlita (P), turba de tierra del fuego (TTF), turba europea (TKL) y tierra+compost +resaca (TCR); y en B para: P, TTF y TKL. R2: coeficiente de determinación .....	32
<b>Cuadro 1.7.:</b> Matriz de correlación que surge de la asociación entre los métodos sin compactación externa (A) y con compactación externa (B) en la preparación de la muestra inicial en los materiales de baja DSs .....	32
<b>Cuadro 1.8.:</b> Variabilidad de los resultados de la densidad de sustrato seca expresada mediante el coeficiente de variación (CV) (n = 15). Error máximo cometido ( $\epsilon$ max) para distintas probabilidades ( $P < 0,10$ y $P < 0,05$ ) y número de repeticiones ( $\eta$ ), para errores ( $\epsilon$ ) máximos del 15%, 10% y 5% ( $P < 0,05$ ), en 4 materiales según 6 métodos.....	33
<b>Cuadro 1.9.:</b> Densidad de partícula (DP) según: A) método del matraz aforado con muestra inicial entera húmeda o seca; B) método del matraz aforado con muestra inicial triturada y seca y por fórmula, en 4 materiales (n = 15).....	34
<b>Cuadro 1.10.:</b> Variabilidad de los resultados de la DP expresado mediante su coeficiente de variación (CV) (n=15). Error máximo cometido ( $\epsilon$ max )	

calculado para distintas probabilidades ( $P < 0,10$  y  $P < 0,05$ ) y número de repeticiones ( $\eta$ ) a realizar en rutina de laboratorio calculadas para errores ( $\varepsilon$ ) máximos del 15% , 10% y 5% respectivamente, según 4 métodos y en cuatro materiales. EH: tratamiento con muestra inicial entera y húmeda; ES: con muestra inicial entera y seca; T: con muestra inicial seca y triturada ..... 35

**Cuadro 1.11.:** Porosidad total calculada por fórmula en 4 materiales con los procedimientos: A , B y C : considerando la densidad de sustrato seca DSs según EN13041 y la DP según métodos de matraz aforado con: A: muestra entera y húmeda (EH); en B: muestra triturada (T) y en C: cálculo por fórmula; D, E y F con DSs según DBOT y la DP según métodos de matraz aforado en D: con EH; en E: con T y en F: cálculo por fórmula; y G, H, I con DSs según EMBYESO y la DP según métodos de matraz aforado G: con EH; H: con T y I: cálculo por fórmula ..... 36

**Cuadro 1.12.:** Porosidad total calculada por fórmula según 3 métodos en 4 materiales ..... 37

**Cuadro 1.13.:** Porosidad total según el método LEGBRAS de tensión cero y NCSU..... 38

**Cuadro 1.14.:** Valores medios de la capacidad de retención de agua en 4 materiales según 6 métodos..... 38

**Cuadro 1.15.:** Variabilidad de los resultados de la CRA expresada por su coeficiente de variación (CV). Error máximo cometido ( $\varepsilon_{\max}$ ) calculado para distintas probabilidades ( $P \leq 0,10$  y  $P \leq 0,05$ ) y número de repeticiones necesarios ( $\eta$ ) calculadas para errores ( $\varepsilon$ ) máximos del 15% , 10% y 5%, según 6 métodos y en 4 materiales..... 39

**Cuadro 1.16.:** Agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) según 4 métodos en 4 materiales..... 40

**Cuadro 1.17.:** Coeficientes de variación de: Agua fácilmente disponible (AFD); agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) en 4 materiales según 4 métodos..... 41

**Cuadro 1.18.:** Capacidad de aireación en 4 materiales según 6 métodos..... 42

**Cuadro 1.19.:** Valores medios de los porcentajes en peso relativos ( $P\% \text{ g g}^{-1}$ ) del material retenido en cada tamiz y su coeficiente de variación ( $CV\%$ ) en 4 materiales ..... 46

**Cuadro 1.20.:** Distribución de tamaño de partícula de 4 materiales expresada mediante el índice de grosor (IG), el diámetro medio geométrico (dg) y la desviación estándar geométrica ( $\sigma$ ) ..... 46

**Cuadro 1.21.:** Ecuaciones de la relación entre la distribución de tamaño de partícula del material expresada a través del índice de grosor y los parámetros

A) capacidad de retención de agua (CRA) y B) capacidad de aireación (CA), según 6 métodos en perlita, turba de tierra del fuego, turba europea y tierra+compost+resaca.  $x$ = Índice de grosor en m/m;  $R^2$ : coeficiente de determinación ..... 47

**Cuadro 2.1.:** Caracterización física de los sustratos M1 y M2 según 4 métodos. DS: densidad de sustrato; PT porosidad total; CRA capacidad de retención de agua; CA capacidad de aireación.; AFD agua fácilmente disponible; AR agua de reserva; ADD agua difícilmente disponible. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego..... 74

**Cuadro 2.2.:** Contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en función de la tensión  $\psi$  aplicada según 4 métodos en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego ( $n=3$ )..... 76

**Cuadro 2.3.:** Valores de los parámetros  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico en saturación;  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$  es el coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego ..... 82

**Cuadro 2.4.:** Conductividad hidráulica no saturada ( $K_{ns}$ ) calculados según van Genuchten (1980) para M1 y M2 con datos  $\psi$ -  $\theta$  medidos por los diferentes métodos. Tr: tratamientos;  $R^2$ ; coeficiente de determinación adoptado para la regresión lineal entre  $\theta$  y el log  $K_{ns}$ .  $\psi$ : tensión;  $\theta$ : contenido hídrico volumétrico; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego ..... 83

**Cuadro 2.5.:** Mediciones A) el 25/8 y B) 6/9; Trat: tratamientos; Cond.: conductancia; temp.: temperatura;  $\psi$  agua : potencial agua en hoja( $n=4$ );  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada al comienzo de las mediciones, CV%: coeficientes de variación. Se indicaron en negrita los tratamientos donde se consideró la  $\psi$  umbral era similar a la  $\psi$  del sustrato ..... 85

**Cuadro 2.6.:** Variables fisiológicas medidas el día 9/9 ( $n=4$ ). Trat: tratamientos; Cond. conductancia; temp : temperatura;  $\psi$  agua : potencial agua en hoja;  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada al comienzo de las mediciones; CV%: coeficiente de variación. .... 86

**Cuadro 2.7.:** Valores de los parámetros  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico relativo a la capacidad de contenedor (CC);  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual relativo a CC;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$  es el coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego ..... 87

**Cuadro 2.8.:** Valores medios de las variables ( $n=12$ ): Cond.: conductancia; temp: temperatura;  $\psi$  agua: potencial agua en hoja;  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada en la mitad de la duración de las mediciones ( $n=3$ ); CV%: coeficientes de variación. .... 73;90

- Cuadro 2.9.:** Pares  $\theta$ - $\psi$  medidos *in situ*; coeficientes de variación (CV %),  $\theta$ : contenido hídrico volumétrico;  $\psi$ : tensión en el sustrato; M1 y M2 con planta: T: tolerantes y S: sensibles al estrés hídrico. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible; B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible ..... 91
- Cuadro 2.10.:** Pares  $\theta$ - $\psi$  medidos *in situ* a capacidad de contenedor (CC) y parámetros: CC; agua fácilmente disponible (AFD); agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) calculados según pares  $\theta$ - $\psi$  obtenidos del ajuste. CV %: coeficiente de variación; n: número de repeticiones; M1 y M2 con planta: T: tolerantes y S: sensibles al estrés hídrico. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego... 92
- Cuadro 2.11.:** Valores de los parámetros de ajuste matemático por van Genuchten de las curvas de retención de M1 y M2 *in situ*, con plantas tolerantes al estrés hídrico (T) y plantas sensibles (S).  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico en saturación;  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$ : coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego ..... 93
- Cuadro 2.12.:** Conductancia estomática (Cond. Estom.); temperatura de hoja (T. hoja); irradiancia; potencial agua en hoja ( $\psi$  agua hoja); tensión en sustrato ( $\psi$  sustrato); contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ), medidos el día de finalización del ensayo en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible; B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible..... 95
- Cuadro 2.13.:** Índice de contracción de volumen (IC) al finalizar los ensayos, en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego (n=24) CV %: coeficiente de variación ..... 96

## INDICE DE FIGURAS

<b>Fig.1.1.:</b> Esquema conceptual del abordaje metodológico de la medición de variables mediante distintos métodos de medida: DSs: densidad de sustrato seca; DSh: densidad de sustrato húmeda; DP: densidad de partícula; DTP: distribución de tamaño de partícula; IG; índice de grosor; dg: diámetro medio geométrico; $\sigma_g$ : desviación estándar geométrica; PT: porosidad total; CRA: capacidad de retención de agua; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; CA; capacidad de aireación.....	17
<b>Fig.1.2.:</b> Capacidad de retención de agua en 4 materiales según 6 métodos.....	38
<b>Fig.1.3.:</b> Distribución de fases en volumen: sólida, líquida y gaseosa en 4 materiales según 6 métodos .....	43
<b>Fig.1.4.:</b> Porosidad total calculada por fórmula y distribución de fases, en 4 materiales con los procedimientos: A , B y C : considerando la densidad de sustrato seca DSs según EN13041 y la DP según métodos de matraz aforado con: A: muestra entera y húmeda (EH); en B: muestra triturada (T) y en C: cálculo por fórmula; D, E y F con DSs según DBOT y la DP según métodos de matraz aforado en D: con EH; en E: con T y en F: cálculo por fórmula; y G, H, I con DSs según EMBYESO y la DP según métodos de matraz aforado G: con EH; H: con T y I: cálculo por fórmula .....	44
<b>Fig.1.5.:</b> Distribución de tamaño de partícula (DTP) según el método del tamizado de 4 materiales.....	45
<b>Fig.2.1.:</b> A) Figura esquemática de curva de liberación de agua. Fuente: De Boodt et al. (1978) y B) Curva de retención de agua sin ajustar de una turba. Fuente: Michel (2010).....	60
<b>Fig.2.2.:</b> esquema metodológico de medición de variables, determinación de parámetros y diseño de los momentos de riego basados en la $\psi$ correspondiente al par $\theta$ - $\psi$ y a $K_{ns}(\theta)$ para M1. $K_s$ : conductividad hidráulica saturada; $K_{ns}$ : conductividad hidráulica no saturada, T1: tratamiento en M1 con momento de riego según EN13041; T2: tratamiento en M1 según EMBDBOT; T3: tratamiento en M1 según EMBYESO y T4: tratamiento en M1 según LEGBRAS; M1 (80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego); T5: tratamiento en M1 con momento de riego según EN13041; T6: tratamiento en M2 según EMBDBOT; T7: tratamiento en M2 según EMBYESO y T8: tratamiento en M2 según LEGBRAS; M2 (20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego).....	65
<b>Fig.2.3.:</b> Cilindro de acrílico utilizado para contener las muestras durante las mediciones de la conductividad hidráulica saturada en los sustrato M1 (foto centro) M2 (foto izquierda). La foto de la derecha muestra las columnas graduadas con agua donde se midieron las diferencias de pérdidas de carga ( $\Delta h$ )..	67

<b>Fig.2.4.:</b> Tensiómetros colocados en M2: 20% de perlita + 80% Turba de Tierra del Fuego, drenando libremente luego de la saturación .....	70
<b>Fig.2.5.:</b> <i>Primulas</i> en floración (foto izquierda) y sin flores listas para comenzar el experimento (foto derecha).....	71
<b>Fig.2.6.:</b> medición del potencial agua en hoja con la cámara de presión (foto izquierda) y medición de la conductancia estomática con el podómetro de difusión (foto derecha).....	72
<b>Fig.2.7.:</b> Distribución de tamaño de partícula de M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego .....	75
<b>Fig.2.8.:</b> Valores medios unidos por líneas continuas y error estándar del contenido hídrico volumétrico $\theta$ en función de la tensión $\psi$ aplicada según los métodos: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS en: A) M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego .....	77
B)M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.....	78
<b>Fig.2.9.:</b> Curvas de retención de agua trazadas con los datos provenientes de los valores del contenido hídrico volumétrico $\theta$ en función de la tensión $\psi$ aplicada por cuatro métodos de medida: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS y ajustados según el modelo de van Genuchten en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego .....	79
<b>Fig.2.10.:</b> Curvas de retención de agua trazadas con los datos provenientes de los valores del contenido hídrico volumétrico $\theta$ en función de la tensión $\psi$ aplicada por cuatro métodos de medida: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS y ajustados según el modelo de van Genuchten en M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.....	80
<b>Fig.2.11.:</b> Curvas de retención de agua en el rango 0-30 hPa de medidas con 4 métodos: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS y ajustadas según el modelo de van Genuchten en A) M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y B) M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.....	81
<b>Fig.2.12.:</b> Curvas de la conductividad hidráulica no saturada $K_{ns}$ ( $\text{cm min}^{-1}$ ) en función del contenido hídrico volumétrico $\theta$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) con datos provenientes de los métodos de medida de los pares $\psi$ - $\theta$ : EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS, A) en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, B) en M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego. Los puntos resaltados corresponden a los valores $\psi$ umbral. ....	84
<b>Fig.2.13.:</b> Valores medios de los contenidos hídricos $\theta$ relativos a la capacidad de contenedor $\theta_{CC}$ (n=12) en función de las tensiones (n=3) de M1 y M2. El ajuste corresponde a la función de van Genuchten: VG M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; VG M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.	87



<b>Fig.2.14.:</b> Curvas de retención de agua ajustadas con los pares $\theta$ - $\psi$ según EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS comparados con los contenidos hídricos relativos a CC obtenidos <i>in situ</i> , en A) para M1 y en B) para M2 .....	88
<b>Fig.2.15.:</b> Registro de los tensiómetros t2-t5-t8 colocados en M1 (color azul) y t3-t4-t7 colocados en M2 (color marrón) en: A) desde el día 2/10 al 12/10, B) durante el día 8/10/2010 .....	89
y C) el 8/10 durante el horario en que se midieron las variables fisiológicas. Las flechas negras indican el momento en que se realizaron las mediciones de las variables fisiológicas y la flecha roja el momento de riego.....	90
<b>Fig.2.16.:</b> Puntos $\theta$ - $\psi$ medidos <i>in situ</i> y curvas de retención de agua ajustadas por el modelo de van Genuchten de M1 y M2 con 2 tipos de planta: T: tolerantes y S: sensibles al estrés hídrico. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible (líneas azul y celeste); B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible (líneas marrón y naranja). Los puntos resaltados corresponden a los pares $\theta$ - $\psi$ utilizados para el cálculo del agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible.....	91
<b>Fig.2.17.:</b> Curvas de retención de agua CR trazadas con los datos medidos por 4 y las estimadas a partir de mediciones <i>in situ</i> , ajustadas según modelo de van Genuchten: A) para M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible;.....	93
B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible.....	94
<b>Fig.2.18.:</b> Nivel de los sustratos M1 y M2 a una semana del enmacetado .....	95
<b>Fig.2.19.:</b> Contracción de volumen después de 7 meses de cultivo y sometido a régimen de sequía: A) en M1 y B) en M2; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego .....	95

## ABREVIATURAS Y GLOSARIO

**Agua fácilmente disponible (AFD):** volumen de agua relativo al volumen total del sustrato que el material libera entre 10-50 hPa de tensión. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Agua de reserva (AR):** volumen de agua relativo al volumen total del sustrato, que el material libera entre 50-100 hPa. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Agua difícilmente disponible o residual (ADD):** contenido hídrico volumétrico del sustrato después de sometido a una tensión de 100 hPa. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Agua disponible (AD):** volumen de agua relativo al volumen total del sustrato que el material libera entre 10-100 hPa de tensión. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Aditivos:** componentes opcionales en la formulación de un sustrato agregados en pequeñas cantidades con funciones definidas. Generalmente se cuantifican con la magnitud masa. Ej: fertilizantes, correctores de pH, humectantes, retardadores o aceleradores de crecimiento etc.

**Capacidad de contenedor (CC):** máximo contenido hídrico volumétrico de un sustrato colocado en un determinado contenedor. Es un coeficiente adimensional expresado en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Capacidad de retención de agua (CRA):** contenido hídrico volumétrico de un sustrato después de sometido a una tensión de 10 hPa. Se calcula como el volumen de agua retenido relativo al volumen total del sustrato. Es un coeficiente adimensional expresado en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Capacidad de aireación (CA):** porosidad de aire de un sustrato después de sometido a una tensión de 10 hPa. Se calcula como volumen de aire relativo al volumen total del sustrato y sumada a la CRA da la porosidad total. Es un coeficiente adimensional expresado en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ):** volumen de agua relativo al volumen total de la porción del sustrato considerada que queda retenido después de ejercer una tensión determinada. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .

**Componentes básicos:** materiales usados en mayor proporción en la formulación de un sustrato. Se cuantifican con la magnitud volumen.

**Complementos:** materiales usados en menor proporción que el componente básico en la formulación de un sustrato con el objetivo de mejorar alguna de las propiedades del básico. Se cuantifican con la magnitud volumen.

**Conductividad hidráulica:** es la velocidad de movimiento de agua en el sustrato e indica la facilidad con que dicho sustrato transmite agua, 1) **saturada (Ks)** cuando todos los poros están llenos de agua (permeabilidad del sustrato) y 2) **no saturada (Kns)** cuando los poros están parcialmente llenos de agua. Se expresa en  $\text{cm min}^{-1}$

**Contenido de cenizas (CZ%):** relación entre la masa del material de origen inorgánico y la masa total del sustrato expresado en porcentaje : % m/m

**Contenido de materia orgánica (MO%):** relación entre la masa del material de origen orgánico y la masa total del sustrato expresado en porcentaje % m/m .

**Densidad de sustrato seca (DSs):** relación entre la masa seca de un sustrato y el volumen total que ocupa en condiciones de humedad y compactación establecidas, teniendo en cuenta el volumen total de poros. Se expresa en  $\text{kg m}^{-3}$ .

Sinónimos: Se la puede encontrar en la bibliografía como: densidad aparente (UNE-EN 13041:1999; Burés 1997; Abad et al. 1993m/m; Marfà 1995); masa volumétrica (Martinez Farré 1992); en portugués : densidade de volume (Fermino 1996; 2003); en inglés : bulk density ( Raviv 2002; Fonteno 1993); volume weight ( Verdonck et al. 1983)

**Densidad de sustrato húmeda (DSh):** relación entre la masa húmeda de un sustrato y el volumen total que ocupa en condiciones de humedad y compactación establecidas, teniendo en cuenta el volumen total de poros. Se expresa en  $\text{kg m}^{-3}$ .

**Densidad de partícula (DP):** relación entre la masa seca de un sustrato y el volumen del sólido seco, sin considerar el volumen total de poros. Se expresa en  $\text{kg m}^{-3}$ .

**Distribución de tamaño de partícula (DTP):** es una forma de expresar el análisis granulométrico como % en peso de las partículas que corresponden a varios intervalos de tamaños determinados.

**Espacio poroso (EP):** volumen total de poros que posee el sustrato en un volumen cualquiera. Se expresa con la magnitud volumen.

**Horticultura :** 1) En países de habla hispana el término "Horticultura" designa el estudio y prácticas efectuadas en un huerto con especies herbáceas cuyo destino es la

alimentación humana ; 2) En los países de habla inglesa, y considerando el término "*Horticulture*" como las prácticas que se realizan en un huerto, la Sociedad Internacional para las Ciencias Hortícolas (ISHS), indica que la horticultura comprende áreas adicionales de estudio: floricultura (flores y plantas ornamentales); horticultura (incluye producción y mercadeo de las hortalizas, sean de hoja, raíz, tubérculo o fruto); fruticultura; y aromáticas, medicinales y perfumíferas .

**Humedad gravimétrica en base húmeda (H):** relación entre la masa de agua contenida en el material y la masa total del sustrato húmedo. Es un coeficiente adimensional que se expresa en porcentaje % m/m

**Humedad gravimétrica en base seca (Hbs):** relación entre la masa de agua contenida en el material y la masa total del sustrato seco. Es un coeficiente adimensional que se expresa porcentaje en % m/m

**Humedad residual:** la humedad que queda en el sustrato después que es secado al aire. Es un coeficiente adimensional que se expresa en porcentaje % m/m

**Índice de grosor (IG):** relación entre la masa de partículas mayores a 1mm y la masa total del sustrato. Es un coeficiente adimensional que se expresa en porcentaje % m/m

**Índice de contracción de volumen (IC):** relación entre el volumen de un sustrato sometido a algún proceso o ciclo de cultivo y el volumen total que ocupaba originalmente. Es un coeficiente adimensional que se expresa en porcentaje % v/v

**Materia seca (MS):** relación entre la masa seca y la masa total del sustrato húmedo. Es un coeficiente adimensional que se expresa en porcentaje % m/m

**Muestra de laboratorio:** muestra representativa del material recibida en el laboratorio para ser analizada.

**Muestra de ensayo:** muestra de laboratorio o porción de ella que se prepara para el análisis.

**Porosidad de aire (PA):** volumen de aire relativo al volumen total del sustrato que posee un material después de sometido a una tensión determinada. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

**Porosidad total (PT):** volumen de poros relativo al volumen total del sustrato. Se lo asemeja al volumen de agua relativo al volumen total en un sustrato totalmente saturado. Es un coeficiente adimensional que se expresa en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

Sinónimo: espacio poroso total; en inglés: total porosity , total pore space

**Portamuestra:** cualquier recipiente que contenga la submuestra de ensayo sobre la que se hacen los análisis y los cálculos correspondientes a los parámetros determinados en el método.

**Submuestra:** porción de la muestra de ensayo sometida a análisis

**Subsidencia:** fenómeno que describe el movimiento de una superficie en la que la componente vertical del desplazamiento es claramente predominante sobre la horizontal, produciendo acomodamiento y asentamiento de las partículas de un suelo o sustrato.

## Resumen

**Métodos de determinación de parámetros que estiman la disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas y su relación con la respuesta vegetal.**

Las propiedades físicas e hidráulicas de los sustratos para plantas son las más importantes en relación con la disponibilidad de agua-aire para las raíces. En la Argentina el estudio de sustratos es incipiente y la definición de un protocolo nacional específico es de fundamental importancia para el desarrollo del sector. Como forma de contribución, se propuso como uno de los objetivos, comparar evaluativamente 10 métodos de referencia internacional, para distintos parámetros, sobre perlita (P), 2 turbas (T) y tierra mejorada. Los valores obtenidos resultaron función del método y del sustrato estudiado y no se pudo establecer una equivalencia, en la mayoría de los casos. El método EN13041 resultó el recomendado para una caracterización física completa en el rango 0-100 hPa, mientras que el método utilizando el “porómetro” diseñado por la NCSU (North Carolina State University) se recomienda para las propiedades físicas en valores próximos a 0-10 hPa. En una segunda parte fueron comparadas las curvas de retención de agua (CR), según 4 métodos de laboratorio en 2 sustratos (80%P+20%T; 20%P+80%T) con valores *in situ* en un cultivo de *Primula polyantha* bajo cubierta. Se midieron potencial agua en hoja y conductancia estomática como forma de evaluar los resultados de los 4 métodos y la modelización de conductividad hidráulica no saturada, en base a los cuales, se diseñaron 4 tratamientos de riego para cada sustrato. No se encontraron diferencias significativas en la respuesta hídrica de las plantas, por lo que se puede decir que los 4 métodos son apropiados de igual forma para el manejo del riego. Cuando se las sometió a tratamiento de sequía se observó una tolerancia diferencial en los individuos, presentando las plantas tolerantes mayor contenido hídrico que las sensibles. Las CR *in situ* presentaron mayor contenido hídrico que las CR de laboratorio, asociados con la compactación del sustrato y evidenciando el efecto de de las raíces. La CR según EN13041 en 20% P+80%T, fue la más cercana a las mediciones *in situ*, útil para una interpretación agronómica.

Palabras clave. Propiedades físicas de sustratos, disponibilidad de agua, relación agua-aire, curva de liberación de agua, conductividad hidráulica no saturada, respuesta fisiológica

## Abstract

**Methods for the determination of parameters to estimate the air-water availability in substrates and its relationship with the vegetable response**

The physical and hydraulic properties of the substrates are the most important relation with the air-water availability for the roots. In Argentina the substrate studies are incipient and the definition of a specific national protocol is of fundamental importance for the development of the area. As a contribution, it was suggested as one of the objectives, to compare evaluatively 10 methods of international reference, for different parameters, about perlite (P), 2 peat (T) and improved soil. The figures obtained were related to the method and the substrate, and an equivalence could not be found, in most of the cases. The method EN13041 became the one recommended for the complete physical characterization in the range 0-100hPa, while the method using the porometer designed by the NCSU (North Carolina State University) is suggested for physical properties with figures close to 0-10hPa. On a second step, the water retention curves (CR) were compared according to 4 laboratory methods in 2 substrates (80%P+20%T; 20%P+80%T) with CR *in situ* in a *Primula polyantha* culture under greenhouse conditions. Leaf water potential and stomatal conductance were measured as a means to evaluate the results of 4 methods and the modeling of the unsaturated hydraulic conductivity based on which 4 irrigation treatments for each substrate were designed. No significant differences were found in the hydric response of the plants under the irrigation treatments, therefore any method is suitable for irrigation management in the conditions experienced. When plants were exposed to a drought treatment they had different responses to the hydric stress, with higher water content in substrate of tolerant plants. The CR *in situ* presented in the 2 substrates more hydric content than the CR from lab, associated with the compaction of the substrate and showing evidence of the roots effect. The CR drawn according to EN13041 in the substrate 20%P+80%T was the closest in measures *in situ*, useful for an agronomic interpretation.

Key words: Physical properties of substrates, water availability, water-air relation, water retention curves, unsaturated hydraulic conductivity, physiological response.

## INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1. Sustratos para plantas

Un sustrato es considerado un sistema de matriz sólida-matriz porosa de modo análogo al que se utiliza en edafología para definir los suelos naturales (Burés 1997). La investigadora se refiere al sustrato en general como cualquier material que se utilice para el cultivo de plantas en contenedor, entendiendo por contenedor cualquier recipiente que tenga altura limitada y su base se halle a presión atmosférica. Por otro lado, Röber (2000), dice que los sustratos hortícolas<sup>1</sup> son la tierra para las plantas, las mezclas a base de turbas y otros materiales que sirven de ambiente para las raíces. Kämpf et al. (2005; 2006), definen el término sustrato para plantas como el medio poroso donde se desarrollan las raíces y agregan que está relacionado en general con el cultivo en recipientes fuera del suelo *in situ*, mientras que si los mismos materiales son usados para corregir la calidad del suelo *in situ* se los denomina mejoradores de suelo. Se podría resumir diciendo que sustrato para plantas es todo material poroso, usado solo o en combinación con otros, que colocado en un contenedor o maceta, proporciona anclaje y capacidad para aportar agua y oxígeno para las plantas que crecen en él. En este trabajo se considera que cuando el suelo mineral se coloca en un contenedor pasa a ser considerado un sustrato (Fonteno 1996), contrariamente a Raviv y Lieth (2008) que mencionan el término sustrato como materiales que pueden incluir arcillas y arenas como componentes, pero no el suelo directamente.

Por otro lado, mientras que los suelos son producto de una génesis natural, los sustratos, que pueden ser de origen orgánico, inorgánico o /y sintéticos, casi siempre pasan por procesos de manufactura o sea tienen una génesis artificial (Valenzuela 2009).

Los materiales usados como sustratos han sido ampliamente estudiados y tratados en la literatura (Fonteno 1996; Burés 1997; Cadahia Lopez 2005; Raviv et al. 2002; Kämpf 2005; Schmilewski 2009). Algunos de los más difundidos a nivel mundial son:

1) Orgánicos naturales: turba de musgo *Sphagnum* (Puustjärvi 1974; Prasad y Maher 1993; Michiels et al. 1993; Aendereck 1997; Michel et al. 2004; Picken y Reinikainen 2009; Amha et al. 2010), corteza de pino (Verdonck y Penninck 1985; Bilderback y Fonteno 1993; Nkongolo y Caron 1999; Caron et al. 2005; Jackson et al. 2008), residuo de fibra de coco (Noguera 1999; Shinohara et al. 1999; Nelson et al. 2004, Perez Buenafuente et al. 2004), compost proveniente de residuos vegetales (Lemaire 1997; Burger et al. 1997; Gabriëls 1998; Valenzuela et al. 2003; Molitor et al. 2004; Prasad y Carlile 2009); varios (Taha y De Boodt 1985; Maher et al. 2008)

2) Inorgánicos: perlita (Marfà et al. 1993; Orozco 1995; Orozco y Marfà 1995; Marfà et al. 1998; Martinez et al. 2006), arena (Burés et al. 1997); Urrestárazu et al. 1999; Salvador et al. 2005), Vermiculita (Verdonck et al. 1978; Milks et al. 1989c), tierra (Fonteno et al. 1981; Karlovich y Fonteno 1986), escoria volcánica (Wallach et al. 1992b; Raviv et al. 1999), lana de roca (Blok 1999); arcilla calcinada (Bohnert et al. 2008; Michel 2009b); generalidades (Papadopoulus et al. 2008; Savvas 2009)

3) Orgánicos sintéticos: poliuretano y poliestireno (Papadopoulus et al. 2008); fibra de vidrio (Elstein et al. 2008)

Además se pueden utilizar como sustrato muchos subproductos de actividades industriales (Chong 1999), explotaciones ganaderas (Inbar et al. 1985),

---

<sup>1</sup> acepción del término según ISHS, ver glosario



agroindustriales (Kämpf y Jung 1991; Wells 2008; Raviv et al. 2009; Buck y Evans 2010; Nair et al. 2011; Gomez y Robbins 2011), forestales (Boyer et al. 2008; Jackson et al. 2010), residuos domiciliarios (Lu et al. 2008), después de someterlos a procesos de tratamiento para su adecuación, contribuyendo a una mejora en la calidad medioambiental (Burés 1997).

La producción de plantas en contenedor surge con dos avances claves: el primero fue el conocimiento de los requerimientos nutricionales de las plantas durante el siglo XIX que culminó en el siglo XX y con el desarrollo de las soluciones nutritivas en los años setenta, lo que permitió un ajustado control de la disponibilidad de nutrientes para las plantas que no puede realizarse en los cultivos en suelo. El segundo fue el descubrimiento y divulgación en los años cincuenta y sesenta de la facilidad en el control de microorganismos patógenos mediante desinfección de los sustratos, mientras resulta muy difícil hacerlo en cultivos en suelo (Raviv y Lieth 2008). Se observa así la gran expansión de los sistemas de producción de los cultivos sin suelo, más específicamente cultivos en sustratos y en ambientes protegidos (Abad y Noguera 1997). Las causas de este impulso se deben a consideraciones tanto económicas como agronómicas: una fuerte y progresiva demanda mundial de alimentos y plantas ornamentales de alta calidad en contra estación; posibilidad de alto valor de ganancias en pequeñas áreas cercanas a los centros de consumo donde los terrenos son caros y con suelos degradados (van Os 1999); avances tecnológicos en la industria plástica y en automatización de riego y control ambiental. Teniendo en cuenta los costos de producción se obtienen una disminución de cuantiosas pérdidas por patógenos del suelo (Postma et al. 2008) y menores costos de transporte; facilidad del flujo de material en el invernáculo y posibilidad de control ajustado del riego y fertilización. En este sentido, la mayor eficiencia en el uso del agua en la producción en cultivos sin suelo es una ventaja en zonas con escasez de agua o de mala calidad, con alta necesidad de producción de alimentos (Raviv y Lieth 2008). Cuando a partir del Protocolo de Montreal de 1992 se incluye el bromuro de metilo como sustancia destructora de la capa de ozono y se recomienda su sustitución de manera progresiva para la desinfección de suelo, el cultivo en sustratos aparece como una alternativa promisorio (Savvas 2009). Sin embargo la producción intensiva en gran escala con sustratos en invernáculo puede producir riesgo de contaminación del suelo y del agua subterránea con nitratos y agroquímicos. Surgen así investigaciones para optimizar la eficiencia en fertirriego y drenaje (Raviv et al. 1997; Bilderback 2001; van Os 1999; Owen et al. 2007) y también los sistemas de cultivos en sustratos con recirculación de la solución nutritiva cerrados o semicerrados, como una opción más sustentable, aunque todavía poco difundidos en Europa (Marfà 2007), son utilizados mayormente en clima semi-árido (Raviv et al. 1998, 2004).

La mayor limitación a tener en cuenta en la producción de plantas en contenedor, en comparación con el cultivo en el suelo, es el confinamiento que sufren las raíces de las plantas. Plantas cultivadas en suelo exhiben un buen crecimiento de raíces para acceder al agua, aire y a los nutrientes, donde el limitante depende de la genética de la especie botánica (Kafkafi 2008). En el volumen limitado del contenedor, a pesar de que el agua está más disponible, los sistemas de raíces se densifican por estar acotados al volumen, presentando así una demanda mucho mayor de oxígeno por unidad de volumen de la rizósfera si se compara con el suelo. Si el medio es orgánico, esto se ve agravado por el consumo de oxígeno por los microorganismos (Raviv et al. 2008). A pesar de estas restricciones de espacio la planta debe encontrar en el medio de cultivo condiciones satisfactorias para su crecimiento y desarrollo (Kämpf 2005). De esto surge la condición más importante que debe cumplir un buen sustrato: proveer suficiente agua para la planta y al mismo tiempo un buen volumen de aire. Esta porosidad de aire que a

menudo no se tiene en cuenta, está relacionada con la capacidad de realizar un adecuado intercambio gaseoso, removiendo el exceso del CO<sub>2</sub> en el aire cercano a la rizósfera y con la disponibilidad de oxígeno necesario para la respiración de las raíces.

El conocimiento de las características físicas en la etapa de planificación del cultivo es de gran importancia ya que no pueden ser modificadas una vez que el sustrato está en el contenedor y la planta está creciendo en él (De Boodt y Verdonck 1971). En cambio, si bien la determinación a priori del contenido de nutrientes, el pH y la conductividad eléctrica permite establecer un adecuado manejo, estas variables se pueden modificar con facilidad y deben ser monitoreadas durante la etapa del cultivo. Las propiedades biológicas relacionadas a la presencia de microorganismos que viven de la materia orgánica afectan los procesos de descomposición modificando las condiciones de aireación y afectando las principales variables físicas relacionadas con la disponibilidad de aire y flujos de agua. En el uso de sustratos es importante el mantenimiento de la estabilidad de las variables físicas.

## 2. Relación agua-aire en los sustratos

La relación entre el contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ) y la fuerza con que dicha agua está retenida se expresa por la función que se grafica en la curva de retención de agua. Esta función relaciona un factor de capacidad, el contenido de agua, con un factor de intensidad, el estado energético del agua en el sustrato ( $\psi$ ) (Klute 1986) y expresa la evolución del proceso de desorción del agua de un medio poroso:  $\theta = f(\psi)$ .

El estado energético del agua se explica a través del potencial agua que es la capacidad que tiene el agua para realizar trabajo y desplazarse de un punto a otro, y se define como la energía potencial por unidad de volumen o de masa de agua en un sistema, en este caso sustrato-planta, comparada con la del agua pura y en estado libre y a un nivel de referencia. El movimiento del agua se produce desde los puntos de mayor a los de menor potencial agua y su valor se obtiene como la suma algebraica de los componentes matricial, osmótico o de soluto y gravitacional:  $\psi_a = \psi + \psi_s + \psi_g$  (Raviv y Wallach 2007). El agua retenida por el sustrato dentro de un contenedor está sometida al efecto de todas estas fuerzas, aunque no todas con la misma injerencia en un momento dado. Por ejemplo, en un contenedor regado con solución nutritiva diluida, el potencial osmótico o de soluto ( $\psi_s$ ) puede no afectar significativamente el flujo de agua, pero sí es importante en la interacción entre las raíces de las plantas y el sustrato (Hillel 1998). Se lo define como la energía que debe ser añadida a una solución para equilibrarla con agua pura a través de una membrana semipermeable por ósmosis. Su valor se corresponde con la presencia de solutos en la fase líquida ya que todo aumento del contenido de sales disueltas provoca un descenso del potencial osmótico y por lo tanto del potencial agua (Lemaire et al. 1989).

El potencial gravitatorio en cada punto del sistema ( $\psi_g$ ), es la expresión del nivel energético debido a la atracción gravitatoria y está determinado por la elevación del punto respecto a un plano de referencia tomado convencionalmente (Hillel 1998).

El potencial mátrico ( $\psi$ ), es uno de los componentes más importantes del potencial agua total ( $\psi_a$ ), en los sistema sustrato-planta ya que es la energía que provoca el flujo de agua en los sistemas no saturados y en las paredes celulares del tejido vegetal. Está relacionado con las fuerzas asociadas a los fenómenos de capilaridad, en la interfase agua-sólido-aire y su magnitud depende en gran parte del diámetro de los poros del sustrato si se acepta la simplificación de que poseen formas cilíndricas (Lemaire et al. 1989).

Por convención, los potenciales que aumentan la energía libre del agua se consideran positivos y los que la disminuyen negativos, por lo tanto el potencial

gravitatorio se considera positivo y el osmótico y mátrico serán negativos ya que restan energía respecto al agua libre (Hillel 1998). Dentro del contenedor el potencial gravitatorio es importante durante el drenaje rápido, sin embargo se puede considerar despreciable a partir del par  $\theta - \psi$  que se corresponde con la capacidad de contenedor y a partir de ese valor se puede considerar que el potencial agua total está definido por el valor del potencial mátrico (Raviv y Wallach 2007). A los efectos prácticos en este trabajo se adoptó el término tensión en vez de presión (o potencial) negativa de acuerdo a Hillel (1998) que expresa que los términos tensión o succión son herramientas semánticas para evitar el signo negativo que caracteriza al potencial mátrico en suelos insaturados.

La caracterización física de cualquier sustrato se basa en el estudio de la distribución de las tres fases: el volumen de sólidos del material, el volumen de poros y la relación agua-aire a diferentes condiciones de humedad. Esta caracterización se hace a través de parámetros que relacionan el contenido hídrico y el potencial agua. En suelos generalmente se usan dos puntos suficientemente distanciados a los que se los denomina “constantes hídricas”: contenido hídrico volumétrico a la tensión de 330 hPa (33 kPa, capacidad de campo) y contenido hídrico volumétrico a la tensión 15000 hPa (1500 kPa, punto de marchitez permanente). Los trabajos de De Boodt en los años 1970 pusieron de manifiesto las grandes diferencias existentes entre suelos y sustratos mediante la adaptación de la típica curva de retención de agua, marcando que para sustratos los puntos de mayor interés son los que corresponden a las bajas tensiones. Se estableció el rango de tensión entre 0-100 hPa ya que el agua en un contenedor está disponible para las raíces a bajas tensiones, considerando al mismo tiempo que debe mantenerse una adecuada cantidad de poros con aire en la zona radical. El punto de 0 tensión se definió como el máximo contenido de agua (saturación) cuyo valor coincide con el espacio poroso. El mismo autor definió tres nuevos conceptos, dependiendo de la relación agua-aire: capacidad de aireación, que representa el volumen de aire relativo del sustrato cuando está sometido a una tensión de 10 hPa; agua fácilmente disponible, como el contenido relativo de agua liberada por el sustrato entre 10-50 hPa y agua de reserva como el contenido relativo de agua liberada entre 50-100 hPa (De Boodt y Verdonk 1972). Goh y Haynes (1977) agregan que el espacio de aireación a 10 hPa es una medida de la habilidad del sustrato en regular su relación agua-aire después del riego. Martínez Farré (1992) define los siguientes conceptos: capacidad de retención de agua como la cantidad máxima de agua en volumen que puede retener un sustrato bajo condiciones de tensión normalizadas y agua difícilmente disponible como el volumen de agua retenido por el sustrato a la tensión de 100 hPa, ambos referidos al volumen total.

Otro parámetro básico e importante en la descripción del material es la porosidad total definida como el espacio poroso relativo al volumen total de una porción del sustrato, sin embargo este parámetro no nos da información respecto al tamaño de dichos poros. La relación agua-aire en los sustratos varía ampliamente de acuerdo al tamaño de las partículas que predominen en su composición, siendo uno de los factores que definen el volumen de los poros situados entre ellas. Noguera (1999) en fibra de coco, observó alta correlación del peso de partículas con diámetro mayor de 0,5 mm con la capacidad de aireación, el agua fácilmente disponible y la capacidad de retención de agua. Verdonck y Demeyer (2004) destacan la influencia del tamaño de partícula respecto de las relaciones agua-aire no sólo en materiales puros sino también en mezclas y además encontraron que una misma fracción de diferentes materiales tiene características físicas diferentes. Cuando se aplica una tensión a un sustrato saturado los primeros poros que se vacían son los macroporos que no pueden retener agua a esa

tensión. Hillel (1998) define macroporos en suelos, como poros interagregados que sirven para la infiltración, el drenaje de agua y para aireación, mientras que los microporos son intragregados responsables de la retención de agua. Bajo el supuesto de considerar un poro como un tubo capilar se puede aplicar la ley de capilaridad que predice el radio del poro que retiene agua a la tensión  $\psi$ , de acuerdo a la ecuación:

$$\psi = \frac{2\gamma \cos \alpha}{rg\rho} \quad \text{donde } \psi: \text{ es el potencial mátrico expresado como tensión, que es}$$

equivalente al déficit de presión, o sea, la diferencia de presión entre la presión atmosférica y la presión del agua dentro del poro (normalmente menor que la atmosférica) (Hillel 1998);

$\gamma$  : es la tensión superficial entre el agua y el aire, cuyo valor es  $0,073 \text{ N m}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$  ;

$\alpha$  : es el ángulo de contacto entre el agua retenida y la partícula sólida que se asumió igual a 0 (valor que toma para agua y vidrio), por lo tanto  $\cos \alpha = 1$  (Danielson y Sutherland 1986, Orozco 1995) ;

$\rho$  : es la densidad del agua considerada como  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  ;

$g$  : es la aceleración de la gravedad cuyo valor es  $9,81 \text{ m s}^{-2}$ , redondeado a  $10 \text{ m s}^{-2}$  y  $r$  : el radio del poro con la simplificación de considerarlo un tubo capilar cilíndrico. Algunos autores aplicando esta ley de capilaridad definen los macroporos como aquellos que tienen un diámetro superior a  $300 \mu\text{m}$  y los microporos un diámetro menor a ese valor (Martinez 2002; Handreck y Black 2002).

Además del tamaño de los poros, es importante su forma (Handreck y Black 2002) y como se interrelacionan respecto a la relación agua-aire. Caron y Nkongolo (1999), muestran que el almacenamiento y el abastecimiento de agua para la planta están controlados por el tamaño, la tortuosidad y el continuo en el poro. Estos parámetros están influenciados por el tamaño de las partículas y su forma (Nkongolo y Caron 1999; Caron et al. 2001). Allaire et al. (2004) obtuvieron una relación entre el tamaño y la forma de las partículas de diferentes sustratos con el rendimiento en la cosecha en un cultivo de tomate. Campos Motta et al. (2009) confirman el efecto directo de la distribución de tamaño de partícula en la disponibilidad de agua y aire en mezclas de perlita: compost y perlita: compost de lombriz.

En sustratos, es arbitrario asociar el tamaño del poro directamente con la función, sin referirnos a la tensión a la que está sometido, ya que un poro suficientemente grande como para drenar en la porción superior de un contenedor de 15 cm de altura puede no drenar si se encuentra en la base o en el medio de una minicelda de 2 cm de altura (Puustjärvi 1974). De ahí que, Dzral et al. (1999) proponen otra clasificación, basada en una succión promedio efectiva que se ejerce sobre un poro en la mitad de un contenedor de 11 cm y forma troncocónica invertida y define macroporos en ese sistema como poros de diámetro mayor de  $416 \mu\text{m}$ .

Al igual que en suelos, hay otra clasificación de poros basada en su ubicación respecto a las partículas. Los poros externos se forman entre las partículas y los internos están dentro del sólido y a su vez pueden ser cerrados o sea sin contacto con el medio externo como en algunos materiales inorgánicos como la perlita, o abiertos como en las turbas formando una red de canales con el exterior (Burés 1997; Martinez 2002). Así un sustrato con partículas grandes y con poros internos abiertos garantiza una buena provisión de agua y niveles altos de aireación (Burés 1997) en el rango de tensiones 10-100 hPa.

Del mismo modo que en los suelos, en muchos casos la porosidad de un sustrato se correlaciona de manera inversa con la densidad, salvo en el caso que el material tenga gran cantidad de poros cerrados que influyen disminuyendo la densidad pero no son

totalmente ocupados por agua. En algunos materiales orgánicos puede existir una fracción significativa de poros que no se saturan probablemente asociado a una fuerte hidrofobicidad (Raviv et al. 2002; 2004).

Dependiendo de la cantidad de macroporos en el sustrato, las condiciones de insaturación pueden ocurrir aún durante el riego, y el conocimiento del comportamiento de la función  $\theta=f(\psi)$  es una herramienta que permite analizar el flujo y la disponibilidad de agua para un control del riego intentando inferir lo que ocurre dentro del contenedor durante el cultivo.

El concepto de capacidad de contenedor, que puede ayudar a comprender mejor lo que sucede, fue introducido por White & Mastalerz (1966) y se refiere al máximo volumen de agua que es retenida por el medio de cultivo que llena un contenedor de altura  $h$ , una vez saturado el sustrato y dejando drenar libremente sin sufrir evaporación. El contenido volumétrico de agua retenido referido al volumen del contenedor varía con la altura. En recipientes de alturas diferentes, la capacidad de contenedor de un sustrato es menor cuanto mayor sea la altura y dentro del mismo contenedor el contenido volumétrico de agua es menor (más seco) en la superficie y llega próximo a la saturación en la base cuando el drenaje está a presión atmosférica (Spomer 1974). Esa porción al límite de la saturación se denomina “tabla de agua” cuya altura depende de la distribución del tamaño de poros del sustrato y es independiente de las características del recipiente. Berenguer et al. (2004) comparan cultivos de plantas hortícolas en sacos de 40 L ( $h=20$  cm) con sacos de 20L ( $h=10$  cm) y contenedores de 20 L ( $h=25$  cm) usando como sustrato fibra de coco, encontrando diferencias en los rendimientos, dificultades de encharcamiento y deficiente drenaje en los sacos de 20L con menor altura. Dentro del contenedor el contenido de agua sigue un gradiente similar a la curva de retención de agua del sustrato (Fonteno 1989). Debido a este gradiente de humedades dentro del recipiente, la capacidad de contenedor está también influenciada por el diámetro, el volumen y por la forma del contenedor, o sea por su geometría (Hanson et al. 1987; Latimer 1991). Owen y Altland (2008), comparando cortezas de pino de granulometrías fina y mediana, encontraron para la misma altura de cilindros portamuestras mayor capacidad de contenedor en la corteza fina pero el mismo gradiente en los porcentajes de contenido de agua. Además, midiendo en cilindros con tres alturas diferentes registraron para la mayor altura y la corteza fina, menor capacidad de contenedor, mayor porosidad de aire, menor porosidad total y mayor densidad de sustrato. Spomer (1982) demuestra el efecto del volumen del recipiente en el crecimiento de las plantas siendo más acentuado el efecto y más rápidamente observado cuanto menor es el volumen en cuestión. Tilt et al. (1987) comparan respuestas de *Rhododendrom* en tres tamaños de contenedor, obteniendo aumento de crecimiento en los contenedores de mayor volumen. Bilderback y Fonteno (1987) explican los diferentes volúmenes de agua y aire para un mismo material ubicado en contenedores de igual altura, pero con diferente geometría, presentando mayor volumen de aire y por consiguiente menor volumen de agua cuanto más acentuada es la forma troncocónica invertida, o sea cuanto menor es el volumen del contenedor en la altura donde se presenta la “tabla de agua” (Gallardo 2006). Heiskanen (1997) encontró que la forma y el tamaño del contenedor afectan el contenido volumétrico de agua y de aire a capacidad de contenedor por influencia en la compactación y en la porosidad del medio.

En este trabajo se adopta la definición de la capacidad de retención de agua como el máximo contenido volumétrico de agua que queda retenido en un sustrato sometido a una tensión de 10 hPa. A su vez, la capacidad de contenedor está referida al máximo contenido volumétrico de agua que ese sustrato presenta en un determinado contenedor (Martinez et al. 1991). Mientras que la capacidad de retención de agua es

un parámetro de caracterización del sustrato, la capacidad de contenedor indica como se comporta ese sustrato en cada contenedor en particular. Los valores pueden coincidir en contenedores cilíndricos y con una altura de 20 cm (Caron y Nkongolo 1999).

Considerar el agua fácilmente disponible en el rango 10-50 hPa se basa en el supuesto que la diferencia en la absorción de agua entre esos dos valores no tendrá importancia fisiológica ya que está muy alejada de los valores de potenciales agua que pueden ejercer las raíces (normalmente en un rango entre -0,1 a -0,4 MPa). Sin embargo, en sustratos macroporosos las restricciones al flujo de agua no son por potenciales mátricos sino que la limitación en la disponibilidad de agua se produce por una brusca caída de la conductividad hidráulica no saturada ( $K_{ns}$ ) (Raviv et al. 2002). Según los datos de Wallach et al. (1992b) hay cambios significativos en los valores de  $K_{ns}$  aún cuando el contenido hídrico volumétrico está dentro del rango de agua fácilmente disponible o sea entre 10-50 hPa. Por lo tanto el contenido de agua relativo es importante pero también lo es la capacidad para transmitirla es decir su conductividad hidráulica la cual depende de las características del poro como forma, tamaño, bifurcaciones, uniones, tortuosidad, de las características hidrófilas o hidrófobas de las partículas y del contenido de agua en el sustrato. Para un correcto diseño y un manejo ajustado en los sistemas de cultivo es de fundamental importancia el conocimiento de los movimientos del agua en el contenedor hacia las raíces. No basta que haya suficiente volumen de agua y de aire en el medio, estos tienen que estar realmente disponibles para las plantas.

Los parámetros definidos por De Boodt y Verdonk (1972) y Martínez Farré (1992) basados en el análisis de los estados energéticos del agua y su relación con el manejo del riego (De Boodt et al. 1974a; Verdonk 1983) representan un promedio de lo que sucede en todo el volumen del contenedor. Pero la heterogeneidad en los contenidos de agua y aire a lo largo del contenedor y su efecto en las propiedades hidráulicas en estos medios debe ser tomada en cuenta (Michel 2009a). Progresos en el campo de la metrología y la modelización fueron permitiendo el estudio de flujo de agua y aire (Milks et al. 1989a; 1989b; 1989c). A partir del desarrollo de nuevas tecnologías en sistemas de riego por subirrigación, aparecen nuevas necesidades de investigación respecto a otros parámetros físicos como capilaridad y mojabilidad. (Rivière y Caron 2001, Caron et al. 2005, Naasz et al. 2009).

Surgen así las investigaciones sobre las propiedades hidráulicas y movimientos de flujo de gases de los sustratos y comienza a producirse una controversia entre el uso de los parámetros que determinan los estados energéticos del agua y los parámetros hidráulicos como indicadores de la disponibilidad de agua-aire en sustratos. Marfà et al. (1998) sugirieron la utilidad de la conductividad hidráulica no saturada ( $K_{ns}$ ) como criterio diagnóstico complementario para la gestión de riego en cultivos sin suelo con sustratos granulares como la perlita. Raviv et al. (1999) estudiaron las características hidráulicas de materiales volcánicos hallando que el concepto tradicional de agua fácilmente disponible basado en un rango de tensión predeterminado independiente de la  $K_{ns}$  del medio no es un parámetro apropiado para el manejo del riego en cultivos sin suelo. Agregan que la  $K_{ns}$  al ser una función característica del medio y altamente sensible a variaciones de humedad, indica mejor la real disponibilidad de agua para las raíces y es más útil para el control de riego en contenedores con sustratos macroporosos.

El mayor objetivo del riego es incrementar el potencial agua del sustrato, pero la resistencia al flujo de agua es la  $K_{ns}$ , que depende de manera no lineal del contenido hídrico y del potencial agua. Variaciones pequeñas en estas dos variables representan efectos significativos en  $K_{ns}$  (Wallach et al. 1992a, b). Raviv et al. (2001) demuestran el rol crucial de alcanzar una porosidad de aire suficiente en el medio inmediatamente

después de la irrigación y sugieren que la Kns es una medida más representativa del agua disponible que la tensión. Raviv y Blom (2001) encontraron que potenciales mátricos bajos en sustratos son acompañados usualmente por bajas Kns, causando zonas localizadas de muy bajos potenciales mátricos cercanos a la interfase sustrato-raíz, siendo este el factor más importante que limita la absorción por parte de las raíces y que además esta restricción se traslada a un bajo potencial agua en la hoja produciendo detenimiento en la expansión de la hoja y la raíz.

Respecto al estudio del flujo gaseoso ya Bunt (1991) estudió la distribución de los niveles oxígeno en distintas profundidades del contenedor mediante el coeficiente de difusión de oxígeno y estableció una expresión matemática que lo relaciona con la porosidad de aire medida en el contenedor. Allaire et al. (1996) estudiaron que el crecimiento de *Prunus x cisterna*, se correlacionó significativa y positivamente con la difusión relativa del gas pero no hubo correlación con la capacidad de aireación. Al mismo resultado llegaron Caron et al. (2001) en cultivo de *Euphorbia pulcherima* cultivada en sustratos con partículas de gran tamaño. Las mediciones de flujos gaseosos *in situ* por el momento, son complejas, costosas, presentan mucha variabilidad y requieren equipamiento especial (Blok et al. 2008), por lo que a pesar de que estos parámetros dinámicos describen mejor la disponibilidad de oxígeno que el sustrato ofrece, en análisis de rutina se continúa utilizando el parámetro capacidad de aireación debido a la simplicidad en su cálculo (Raviv et al. 2002).

Michel (2009a) propone como uno de los futuros desafíos en la investigación de la física de sustratos incorporar el desarrollo de la raíz y sus respuestas en función de la dinámica del agua-aire y más aún en el manejo de riego.

### **3. Metodologías: elección y estandarización**

En la bibliografía internacional se encuentra numerosa literatura referida a métodos para determinación de parámetros físicos en sustratos (Verdonck et al. 1978; Fonteno et al. 1981; Bunt 1983; Bragg y Chamber 1988; Kreij y de Bes 1989; Gabriëls y Verdonck 1991; Martínez-Farré 1992; Wallach et al. 1992b; Wever 1995; Bohne y Günther 1997; Kreij et al. 2001; Fermino 2003; Wever y van Winkel 2004; Fermino y Kämpf 2005; Caron et al. 2005). Surgen así métodos específicos para sustratos, y con los avances tecnológicos comienzan a desarrollarse metodologías para determinar nuevos parámetros necesarios para caracterizar algunos sustratos (contracción de volumen, mojabilidad, hidrofobicidad) (Burés y Pokorny 1991; Naasz et al. 2009).

Según Fonteno (1993) la elección de un método depende de varios factores: 1) disponibilidad del equipamiento, 2) la naturaleza del material, 3) el tipo de muestra disponible, 4) el conocimiento y la habilidad del operador 5) el rango del parámetro a ser medido y 6) el propósito para el cual las mediciones son hechas. Teniendo en cuenta que los laboratorios de análisis de sustratos pueden optar por trabajar con el método que les resulte más conveniente, y que en general hay resistencia al cambio de metodologías es necesario establecer métodos de referencia. La estandarización de técnicas analíticas es esencial respecto a dos aspectos diferentes: en la comunidad científica la comparación de los resultados sólo se puede hacer si se usan los mismos métodos. En relación a controles en la industria de sustratos y a la información para los productores de plantas, uniformizar métodos en el país e internacionalmente facilita el control de calidad para la comercialización, como así también los registros y declaraciones en el rótulo. En Europa se han hecho importantes esfuerzos en el camino de la estandarización de métodos de análisis físicos (Schmilewski y Günther 1988; Verdonck y Gabriëls 1988; Gabriëls y Verdonck 1991; Martínez Farré 1992; Ansorena Miner 1994; Gabriëls 1995) y también trabajos de interlaboratorios (Verdonck et al. 1978;

Gabriëls et al. 1991; Baumgarten 2001; Wever y van Winkel 2004) como para establecer límites confiables de reproducibilidad y repetitividad.

Rivière y Caron (2001) proponen que los resultados de las investigaciones deberían estar integrados para establecer referencias y normas para propósitos comerciales. Baumgarten (2009) en un informe sobre los avances en la estandarización relacionada con las propiedades físicas y químicas, aclara que se han hecho considerables trabajos preliminares con nuevos métodos para la evaluación de la respuesta de la planta a los sustratos y a sus componentes.

#### **4. Los sustratos en Argentina**

En Argentina el estudio de sustratos constituye un área de conocimiento nueva y en desarrollo y exige un trabajo interdisciplinario donde hay que consensuar algunos aspectos básicos para evitar interpretaciones erróneas. Uno es el uso de un lenguaje en común referido a definiciones de las propiedades y de los términos técnicos, otro sería la elección de las metodologías analíticas para sustratos a ser tomadas como referencia y sobre todo una legislación apropiada actualizada y específica a los tipos de material. La gran cantidad de información que se tiene de otros países es para nosotros una ventaja. A pesar de que nuestras necesidades son diferentes, si se hace un estudio crítico de sus avances y retrocesos, se podrán adaptar los conocimientos sobre las variables estudiadas y las metodologías de análisis a nuestra realidad (Vence 2008).

A nivel nacional, en la década de los 1990, debido a la relación peso-dólar favorable comienzan a importarse sustratos de excelente calidad provenientes de Europa, USA y Canadá a base de turbas negras y rubias de musgo *Sphagnum* mezcladas con perlita y vermiculita, a los que los productores se adaptaron rápidamente. Surgen así empresas dedicadas a la producción de plantines en bandejas multiceldas para propagación de todo tipo de plantas en cultivos intensivos como: forestales, frutales, hortícolas, florícolas, ornamentales, tabaco, etc., con las ventajas de uniformidad, eliminación de patógenos y estrés de transplante (Valenzuela 2009). El uso de sustratos también se expande a la producción en cultivo de ornamentales, florícolas, hortícolas en ambientes protegidos. A partir del 2002 con la devaluación del peso se producen aumentos en los costos de producción y las empresas se ven obligadas a usar sustratos de origen nacional. Se produce entonces un aumento en la escala de producción en la industria nacional de sustratos y una demanda creciente de productos de buena calidad (Valenzuela y Gallardo 2003).

Con respecto a los productos fabricados en el país, la calidad del sustrato es aún un desafío a alcanzar. Una de las problemáticas a resolver es el vacío legal que existe en términos de exigencias para el registro de los productos fabricados. Desde 1973 está vigente la ley 20.466 y su decreto reglamentario N° 4830, que se refiere a fertilizantes y enmiendas y no menciona el término sustrato o concepto similar. La inscripción para habilitar la comercialización de sustratos en la Secretaria de Agricultura se realiza sobre la base de análisis de humedad, materia orgánica, cenizas, pH, conductividad eléctrica y relación carbono/nitrógeno según los métodos de referencia para suelos. Esto resulta en una errónea interpretación de los resultados de los análisis, que muchas veces son contradictorias, además de la ausencia de cualquier información sobre las propiedades físicas. Esta confusión y falta de normativas claras, afectan al sector productivo siendo una de las causas de la falta de desarrollo de la cadena productiva en el mercado de cultivos en contenedores.

En la actualidad está muy difundida la práctica de parte de los productores de armar sus propios sustratos, sin control de calidad. A lo largo del país se usan como materias primas, distintos materiales regionales de los cuales no siempre se tiene el



conocimiento de las propiedades físicas y químicas resultando su uso en prueba y error que hace perder demasiado tiempo y dinero (Valenzuela et al. 2008, Valenzuela 2009). Por otra parte a menudo, estos materiales provienen de extracciones de recursos no renovables con el consiguiente perjuicio para el ecosistema. Estas soluciones regionales y caseras están intentando resolver momentáneamente el problema, pero es de esperar que con el aporte de todos los integrantes de la cadena desde el fabricante al productor, el sector se vaya profesionalizando y se pueda contar con sustratos industriales de buena calidad, a un costo compatible con la realidad de cada tipo de producción.

En el país hay suficiente acuerdo para avanzar en los siguientes puntos: un lenguaje común de términos técnicos, calibración de métodos analíticos específicos para sustratos, legislación actualizada y adecuada a esta temática específica y evaluación agronómica de materiales alternativos (Valenzuela y Gallardo 2003, Valenzuela 2009). Los grupos de investigación que trabajan en el tema, aún no han consensuado cuales serían los métodos a utilizar en el país, ni se han discutido estos aspectos con suficiente profundidad. Trabajos recientes indican que ha comenzado un proceso de estandarización incipiente pero promisorio (Gallardo et al. 2007; Bárbaro et al. 2008; Vence et al. 2010a y b; Vence et al. 2012).

La conveniencia de uso de materiales nacionales y más específicamente de materiales locales provenientes de residuos de actividades industriales o agropecuarias de las regiones cercanas a las producciones hace necesario el conocimiento de las propiedades de los materiales y su interpretación para un posible uso agronómico, sin embargo en el país hay pocos laboratorios de sustratos que trabajen con métodos específicos.

## **OBJETIVOS E HIPOTESIS**

### **Objetivos generales:**

- 1) Evaluar comparativamente los métodos que estiman la disponibilidad de agua-aire de materiales usados como componentes de sustratos en la Argentina, según la sensibilidad de sus variables, correlacionadas con las respuestas de la planta
- 2) Establecer criterios de selección de estos métodos para ser usados como rutina en el país.
- 3) Contribuir a la difusión de los métodos adecuados para la evaluación de diferentes materiales.

### **Hipótesis generales:**

- 1) Los estados energéticos y dinámicos del agua y los indicadores fisiológicos de estrés hídrico de la planta son variables adecuadas usadas metodológicamente en la evaluación de la disponibilidad de agua en los sustratos.
- 2) Es posible correlacionar los resultados de análisis de sustratos obtenidos a través de diferentes métodos de laboratorio.
- 3) Las variaciones presentadas por los distintos métodos determinan su característica en la bondad y adecuación de su uso.

## CAPITULO 1

Comparación de métodos de medición de variables consideradas en la caracterización física de los sustratos para plantas

## 1. 1. INTRODUCCION

### 1.1.1. Propiedades físicas: factores directos e indirectos sobre el crecimiento vegetal

Según Letey (1985) considerando las propiedades físicas del suelo que son importantes en la producción vegetal, es conveniente identificar los factores que la afectan directamente de los que lo hacen indirectamente. Agua, oxígeno, temperatura y resistencia mecánica del suelo son los factores que actúan directamente sobre la productividad de la planta. El autor agrega con respecto al factor agua, que el potencial agua mediante su gradiente se correlaciona mejor que su volumen con el crecimiento de la planta. El factor oxígeno influye a través de la respiración de las raíces que a su vez producen CO<sub>2</sub>, necesitando un adecuado intercambio de gases con la atmósfera exterior, denominado frecuentemente aireación. Letey (1985) agrega la temperatura y la resistencia mecánica como factores directos pues la primera la relaciona con los procesos metabólicos y la segunda determina la arquitectura y alargamiento de las raíces, importante dado el volumen restringido del contenedor.

La caracterización física clásica de los sustratos incluye la densidad de sustrato, densidad de partícula, porosidad total, contenido hídrico volumétrico de 0 a 100 hPa, porosidad de aire y distribución de tamaño de partículas (Burés 1997, Raviv et al. 2002, Wallach 2008). Si se aplica por analogía el modelo de Letey (1985) a los sustratos, se puede considerar que la densidad, la porosidad total y la distribución de tamaño de partícula se relacionan con la respuesta vegetal a través del efecto que tienen sobre los cuatro factores directos. Además los factores directos son interdependientes ya que cuando uno se modifica alteran los valores de uno o más de los demás factores, siendo el agua el factor controlable dominante y afectando los demás. El volumen del agua y el del aire son opuestos, mientras que la densidad y el tamaño de partícula alteran el contenido de agua-aire y la resistencia mecánica. Kämpf et al. (1999a y b) relacionaron los valores obtenidos de resistencia mecánica en un mismo material con distintas densidades y contenidos de humedad hallando que la resistencia aumentaba con la densidad pero disminuía con la humedad, sin embargo en la arena el comportamiento fue opuesto.

El agua y el aire de un sustrato están regidos por un sistema de fuerzas físicas estrechamente dependiente de la relación sustrato-agua-contenedor que pueden analizarse según estados energéticos y dinámicos del agua (Marfà 1995, Raviv et al. 2002, Wallach 2008). Bajo una visión sistémica e integral del cultivo cuando se incorpora la planta y el ambiente, teniendo como objetivo comprender mejor que sucede en la relación contenedor-sustrato cuando se produce el continuo agua-aire-raíces-parte aérea-atmósfera que condiciona la disponibilidad de agua, se deberá reunir información proveniente de varios parámetros armando un rompecabezas que ayudará para decidir la elección del sustrato y el diseño de un manejo adecuado del sistema (Wallach y Raviv 2005, Valenzuela 2010).

La densidad de sustrato y la porosidad total son parámetros importantes que están relacionados de forma inversa y que presentan sucesivos cambios durante el uso del material brindando información sobre la compactación (Michiels et al. 1993, Wallach 2008).

De las mediciones de las variables del contenido hídrico volumétrico en función del potencial surgen los parámetros que relacionan volúmenes relativos de agua y aire (De Boodt y Verdonck 1972; Martínez Farré 1992), que brindan información básica del factor agua, útil para la programación del riego. Según De Boodt y Verdonck (1972) el agua en los sustratos debe estar disponible a las más bajas tensiones posibles (o sea mayores contenidos hídricos) mientras no limite el volumen de aire necesario para las

raíces. El valor del rango 10-100 hPa proviene de la consideración que la mayor parte de las plantas en invernaderos en los años 1970 se cultivaban en contenedores de 10 a 15 cm de altura y que el valor de 10 hPa sería próximo a la tensión correspondiente a la finalización del libre drenaje (capacidad de contenedor), mientras que 100 hPa como límite superior esta basado en resultados experimentales (De Boodt y de Waele 1968). Entonces, el agua disponible (AD) después del drenaje debería repartirse en el 75-90% como fácilmente disponible entre 10-50 hPa y un 4-5% de agua de reserva entre 50-100 hPa, para ser usada por la planta en momentos de excesiva transpiración, producto de repentinos aumentos de la temperatura dentro del invernadero (el resto sería agua difícilmente disponible). Este paradigma introducido por De Boodt, ha sido adoptado hasta nuestros días y el diseño del riego se ha condicionado a los materiales, contenedores y especies que se cultivan en la industria viverista moderna. Así surgen trabajos que relacionan la disponibilidad de agua a esas tensiones como umbral de riego y la productividad de la planta: *Euphorbia pulcherrima* en turba de *sphagnum*, en perlita, en arena y mezclas (Fonteno et al. 1981), *Begonia elatior* y *Primula obcónica* (Haas y Röber 1986), *Cyclamen* y *Pelargonium* (Röber et al. 1982); *Chrysanthemum* en sustratos a base de corteza, tierra y turba (Karlovič y Fonteno 1986), *Forsythia* sp (Rivière et al. 1995), *Pinus sylvestris* en sustratos a base de turba *sphagnum* y perlita (Heiskanen 1995; 1997), *Dianthus* sp. (Marfà et al. 1998), *Rosa hybrida* (Raviv y Wallach 2007).

La relación agua-aire en los sustratos varía de acuerdo al tamaño de las partículas que predominan en su composición, siendo uno de los factores que definen el tamaño de los poros situados entre ellas. La distribución de tamaño de partícula puede ser expresada por diferentes indicadores basados en el análisis granulométrico y ha sido relacionada con el crecimiento vegetal por varios investigadores, a través de su influencia en los factores agua y aire (Verdonck et al. 1983; Orozco 1995; Noguera 1999; Verdonck y Demeyer 2004; Campos Motta et al. 2009), mientras que otras agregan las variables forma, tortuosidad, continuidad, interrelación (Caron y Nkongolo 1999; Handreck y Black 2002; Caron et al. 2001; Allaire et al. 2004). La información que brinda el análisis granulométrico, está relacionada a los poros interpartículas, sin embargo a menudo los que más influyen en la relación agua-aire son los poros intrapartícula que dependen de las diversas morfologías de los poros de cada material que pueden ser estudiados mediante ecografías, microscopía y que no son evidenciados en el análisis granulométrico. Por ello, para un mismo material la información de cada intervalo de tamaño es altamente asociada con la relación agua-aire, sin embargo puede no cumplirse para la misma fracción granulométrica en otro material.

Según Baungarten (2004), Fermino y Kämpf (2005), Valenzuela (2009), Vence et al. (2010b) se pueden aplicar para la caracterización física de los sustratos distintas metodologías, en cuyos procedimientos se tratan de simular las condiciones de cultivo y así inferir en parte el comportamiento de ese material en un sistema cuando se incorpore la planta. Sin embargo, los materiales usados como materias primas para la formulación de sustratos son de muy variada procedencia, presentando diferentes valores y por lo tanto no existen procedimientos que sean igualmente apropiados para todos los materiales (Wever 1995, norma CEN EN-13040:1999, Martínez Farré 1992, Fonteno y Harden 2003, Nemati et al. 2009). Por otro lado, dependiendo del tratamiento sobre la muestra, los resultados podrán tener distintas interpretaciones (Fermino y Kämpf 2005)

Según la finalidad, existen métodos para medir las propiedades físicas con fines comerciales. Analizan el sustrato envasado o en la pila y contrastan los resultados con valores estandarizados de los parámetros de calidad comercial de ese material, relacionados con la satisfacción de una necesidad determinada. Una interpretación

comercial del resultado esta asociada a las disposiciones legales sobre registro de productos y confección de los rótulos. En este sentido es importante que la precisión del método empleado para la medición de las variables se mantenga superior a los límites de tolerancia legales. Otros métodos arrojaran resultados de variables que permiten predecir el comportamiento del sustrato en cultivo. Esta valoración agronómica de los resultados tiene que ver con la toma de decisiones técnico-empresarial relacionadas con los aspectos de manejo de tecnología de la planta. Para la elección de los parámetros a determinar y las metodologías a seguir en la medición de las variables en laboratorio se debería procurar que los resultados sirvan para ambos propósitos, o sea, realizar los controles para el aseguramiento de la calidad y además brindar información agronómica valiosa para la elección del sustrato y su posterior manejo (Valenzuela 2004).

### **1.1.2. Influencia del método sobre la variable medida**

Los sustratos provienen de una amplia diversidad de materiales que a su vez presentan heterogeneidad en su composición. Un sustrato se puede considerar como una mezcla de materiales, con propiedades físicas diferentes. En el caso de materiales puros los diferentes intervalos de tamaño de partícula que lo constituyen son los componentes de la mezcla. En sustratos compuestos donde se mezclan materiales de distintos orígenes, los componentes son cada uno de los diferentes tamaños, forma y tipo de partícula de cada uno de los materiales. Los materiales granulares tienen tendencia a segregarse por tamaños (Ej: corteza, perlita), mientras que los productos fibrosos tienden a formar aglomerados o grumos (Ej: turbas) y además se presentan problemas derivados de las diferencias de densidad de unos y otros (mezclas de turba y corteza; turba y perlita). Una muestra de laboratorio no representativa incide sistemáticamente en todos los análisis afectando la exactitud de los resultados (Terés 2002), mientras que una muestra de ensayo no homogénea afecta la precisión (Kämpf et al. 2005). Por lo tanto es necesario estandarizar la preparación de las muestras de ensayo. En ese sentido, los métodos utilizan mallas de diferentes aberturas para homogenización de materiales con distintas características (ver Materiales y Métodos).

La humedad afecta, en la mayoría de los materiales, su volumen final. Por lo tanto, los parámetros que se expresan referidos al volumen total son afectados por la humedad inicial de la muestra. Cuando en los años 1970, investigadores de varios países comienzan a plantearse la necesidad de desarrollar métodos específicos para sustratos, hubo consenso que la expresión más adecuada de los parámetros fuera por volumen y no por masa (Terés 2002), debido al amplio rango en la densidad de sustrato que presentan los materiales (Valenzuela 2009; Vence et al. 2010b). Además tanto productores de plantas como fabricantes de sustratos deben llenar diferentes tipos de recipientes y el volumen es la magnitud apropiada para la medida. Sin embargo la cuantificación del volumen presenta dificultades. La mayoría de los materiales, especialmente los orgánicos, a menudo tienen una débil resistencia mecánica a la compresión y pueden aún expandirse en la manipulación (Morel y Rivière 2000), efecto que se acentúa a diferentes humedades. Por ello, se estandarizan varias formas de compactación en los distintos métodos para trabajar con una muestra cuya relación masa-volumen sea conocida o establecida previamente a las determinaciones analíticas, intentando simular lo que ocurre en el cultivo durante los ciclos de humedecimiento y secado. Estos procedimientos influirán en la cantidad de sólidos que ocupa un determinado volumen (Martinez Farré 1992), y los resultados obtenidos se interpretan de acuerdo a esa compactación que afectará todas las variables relacionadas con la disponibilidad de agua-aire. Kämpf et al. (1999a, b) consideran que durante el enmacetado la presión ejercida por el peso propio de las partículas cayendo unas sobre

otras, la humedad y el efecto del riego afectan las diferentes densidades de empaquetamiento definida por Burés (1997) como una modificación en la relación masa/volumen efectivamente observada en un momento dado. Existen métodos que ejercen una fuerza estandarizada externa a la muestra para producir una compactación (Fermino 2003, Baungarten 2004), mientras que en otros citados como “sin compactación” (De Boodt et al. 1974b, Valenzuela 2009), el material se compacta en forma natural por la acción del agua durante la saturación. Verdonck et al. (1978) concluyen que una muestra representativa para la determinación de la densidad de sustrato debe tener 50-60% de humedad inicial. Fermino (2003) y Fermino y Kämpf (2005) afirman que la humedad inicial presente en la muestra interfiere en la determinación de la densidad de sustrato seca modificando la cantidad de sólidos en la muestra. Una vez más la diversidad de materiales representa una dificultad a la hora de estandarizar la humedad inicial de la muestra con valores prefijados, ya que el comportamiento en cuanto consistencia, agregación, de cada material pone límites a estas generalidades.

Otra consideración en los métodos es el volumen y la geometría de los recipientes portamuestras donde se coloca el material bajo análisis. Debido a la heterogeneidad de los materiales, se han aumentado los tamaños de los cilindros portamuestras que se utilizan en suelos para que las submuestras sean representativas. Fernández y Corá (2002) encontraron que la altura del cilindro portamuestra afectó la determinación de aire en vermiculita. Owen y Altland (2008) encontraron variaciones en la capacidad de contenedor (CC) de corteza de pino oregón, entre 5-15% en granulometría mediana y entre 10-25% en granulometría fina, midiendo en cilindros de 3,8 cm; 7,6 cm y 15,2 cm de altura.

De Boodt et al. (1974) utilizaron dos anillos de 175 cm<sup>3</sup>, Puustjarvi (1974) un cilindro de 1 L, Goh y Mass (1980) 2 cilindros de 317 cm<sup>3</sup>, Dartiguès (1982) un anillo simple, y Bragg y Chamber (1988) un contenedor de 1150 cm<sup>3</sup>. En ese sentido, Verdonck y Gabriels (1988), pertenecientes al grupo de “Estandarización de los métodos analíticos para sustratos” de la International Society for Horticultural Science (ISHS), expresaron el consenso en usar el recipiente portamuestra lo más grande posible proponiendo usar para análisis de rutina dos cilindros de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura superpuestos, pudiendo analizar hasta 750 cm<sup>3</sup> de material. Por otro lado, Fonteno et al. (1981) desarrollaron cilindros especiales llamados porómetros de 384 cm<sup>3</sup> recomendando que los volúmenes de sustrato que forman la unidad de análisis abarquen el total de la heterogeneidad de la muestra ya que si esta es escasa puede no ser representativa.

En la determinación del espacio poroso y la relación agua-aire, los métodos indican saturar completamente el sustrato antes de tensionarlo. Durante la saturación el agua puede penetrar por diferencia de presión o por capilaridad, con diferentes velocidades, temperaturas, y tiempo de hidratación que dependerá de cada material y de cada método (Terés et al. 1997; 2001). Para poder interpretar los resultados según cada método se deben tener en cuenta la proporción de poros externos a las partículas (interparticulares) y de poros internos (intraparticulares) (Pokorny y Wetzstein 1984; Bunt 1988). El volumen de los poros cerrados o aislados relativo es utilizado para calcular la porosidad ocluida (PO) y los que se conectan con el exterior para la porosidad no ocluida que sumada a la porosidad interparticular dará la porosidad total efectiva (PTE) (Ansorena Miner 1994). En algunos materiales aún los poros abiertos pueden presentar dificultades para hidratarse por ser ultramicroporos, por tener aire atrapado o por hidrofobicidad, tal como se comportan las turbas con baja humedad en la muestra inicial. Por lo tanto, los pasos a seguir para la saturación de los materiales

que adopte cada método, influirá en la determinación de la porosidad total y la efectiva y en los demás parámetros que se basen indirectamente en su valor.

La mayoría de los procedimientos para analizar las relaciones agua-aire son los mismos que determinan la densidad de sustrato y la porosidad por lo que las consideraciones de compactación y humedad inicial en las muestras rigen también para las mediciones de las variables contenido hídrico volumétrico en función de la tensión aplicada. Las diferencias en los dispositivos de tensión radica en los materiales que actúan como placas porosas: lecho de arena, papel de filtro, vidrio fritado, pasta de yeso, yeso y arena o placa de cerámica, con el requisito de tener una presión de entrada de aire mayor que la máxima tensión a la que estarán sometidas, para mantenerse durante todo el análisis saturadas a la tensión que se le aplica manteniendo de ese modo el continuo de la columna de agua que ejerce la tensión. Esto se consigue con un adecuado del tamaño de poro en el material de la placa porosa. Existen métodos donde el agua es evacuada ejerciendo una tensión, otros usan una presión positiva para empujar el agua a través de la placa porosa (Fonteno et al. 1981).

Tal como se menciona en los párrafos precedentes, existe una amplia oferta de métodos con distintos procedimientos para medir las relaciones agua-aire en los sustratos para plantas, sin embargo, no se ha realizado hasta el momento un estudio exhaustivo de las ventajas y desventajas de cada uno, tanto en aspectos relacionados a las propiedades y parámetros definidos, como en cuanto a la precisión, exactitud, dificultades en la rutina, costos, entre los más significativos

### **1.1.3. Objetivos específicos e Hipótesis**

#### **Objetivos:**

1) Comparar valores de la densidad, porosidad total y las relaciones agua-aire a 10, 50 y 100 hPa de tensión, medidas con distintos métodos internacionales de referencia para su uso en sustratos para plantas.

2) Evaluar los métodos en función de sus procedimientos, describir sus ventajas y desventajas según un criterio de elección

#### **Hipótesis:**

1) La DSs y DSh, la PT, y los parámetros relacionados con los contenidos hídricos: CRA, AFD, AR, ADD y PA, presentaran valores diferentes según el método de medida utilizado (ver abreviaturas pagina xvi).

Predicción: Los métodos que apliquen alguna compactación externa y/o realicen una efectiva saturación a la muestra inicial, darán valores más altos en las densidades y contenidos hídricos.

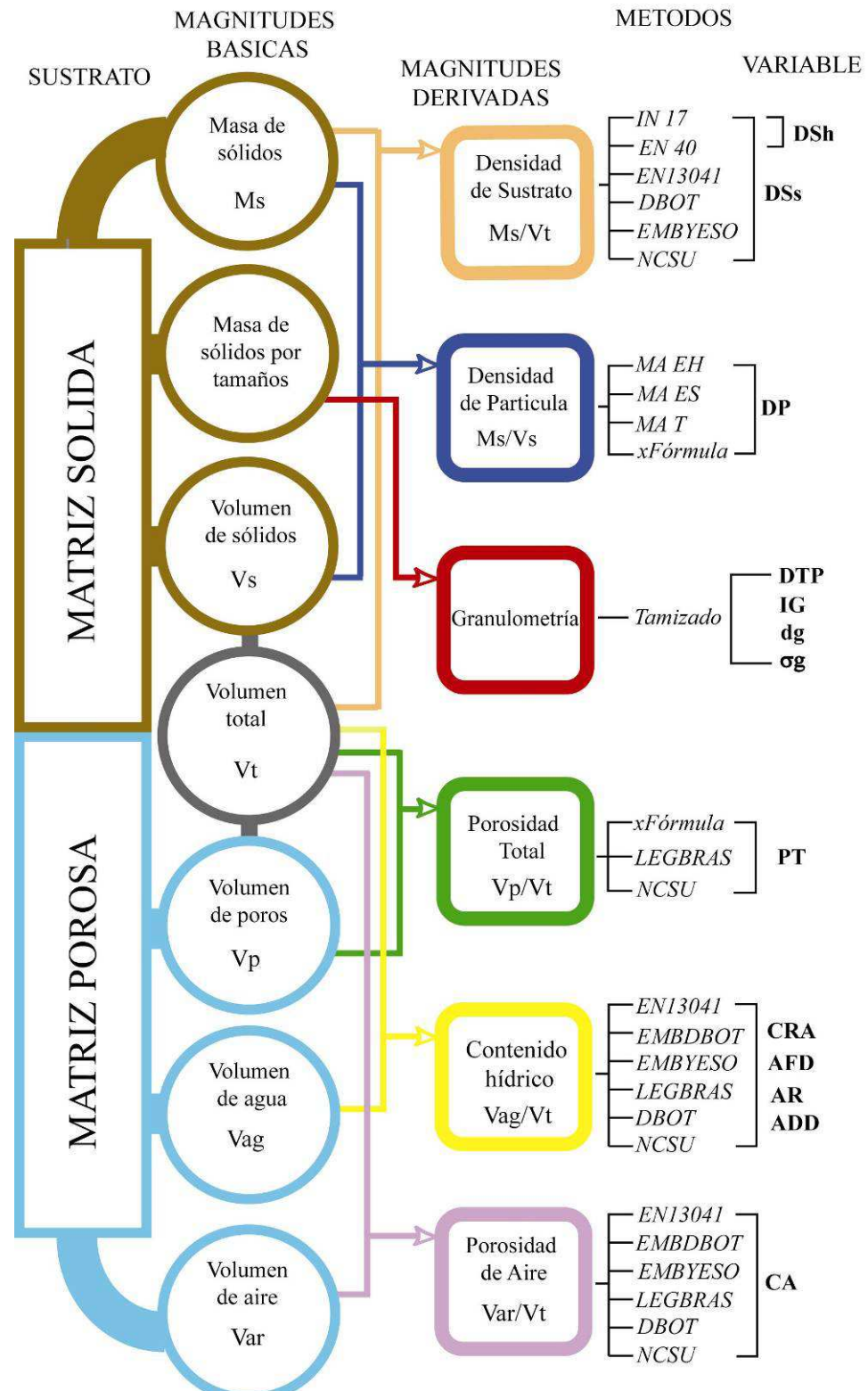
2) Existen relaciones entre los procedimientos de las metodologías y los resultados obtenidos y la interpretación que puede darse a los mismos.

Predicción: los métodos que asemejen sus procedimientos a las condiciones de cultivo tendrán resultados útiles para una interpretación agronómica, mientras que aquellos que sean más precisos y sencillos podrán ser usados para fines comerciales.

## **1.2. MATERIALES Y METODOS**

### **1.2.1. Abordaje metodológico**

La determinación de parámetros que intervienen en una caracterización física de los materiales y la comparación de los métodos de medida de las magnitudes, se realizó siguiendo un esquema conceptual de un sustrato hipotético (fig 1.1) constituido por una matriz sólida y una matriz porosa a partir de las cuales se determinaron las magnitudes básicas de interés: masa de sólidos, masa de partículas sólidas clasificadas por tamaño, volumen de sólidos, volumen de poros, volumen de agua y volumen de aire.



**Fig.1.1:** Esquema conceptual del abordaje metodológico de la medición de variables mediante distintos métodos de medida: DS<sub>s</sub>: densidad de sustrato seca; DS<sub>h</sub>: densidad de sustrato húmeda; DP: densidad de partícula; DTP: distribución de tamaño de partícula; IG; índice de grosor; dg: diámetro medio geométrico;  $\sigma_g$ : desviación estándar geométrica; PT: porosidad total; CRA: capacidad de retención de agua; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; CA; capacidad de aireación



Considerando las relaciones que las vinculan se generaron nuevas magnitudes derivadas a través de funciones. Se enumeraron las distintas metodologías abordadas en este trabajo y los parámetros e indicadores que se estimaron con el objetivo de ayudar a entender en parte los fenómenos físicos que ocurren dentro del contenedor que afectan el comportamiento de los sustratos durante el cultivo.

Se enumeraron los distintos métodos estudiados para medir cada variable y las diversas formas de expresar los resultados de maneras más simples o complejas con la utilización de parámetros, índices e indicadores que generalmente proporcionan información complementaria. En la matriz sólida, la masa y el volumen de los sólidos se consideraron magnitudes básicas constantes a lo largo del uso del material. No ocurre lo mismo con la masa clasificada por tamaño de partícula que se va modificando a lo largo del cultivo. La matriz porosa se la consideró constituida por un volumen de poros, que es una magnitud en constante modificación, formada por dos volúmenes complementarios: volumen de poros con agua, y volumen de poros con aire, a medida que uno aumenta, el otro disminuye.

### 1.2.2. Materiales y muestreo

Los materiales seleccionados para la comparación de métodos de medida de las variables físicas fueron : Perlita agrícola comercial tipo PAC de Multiquim (P); turba de musgo *Sphagnum* rubia de procedencia de Tierra del Fuego, producto comercializado en bolsas bajo la marca Grow Mix rotulado como granulometría fina, sin enclado ni fertilizantes, recomendado por el fabricante para formulación de sustratos de siembra en bandejas multiceldas (TTF) ; sustrato formulado a base turba *Sphagnum* rubia de procedencia europea importada de Alemania bajo marca Klasmann, de granulometría media (0-25mm) y recomendado por el fabricante para macetas del 1 litro (TKL) y un sustrato compuesto a base de 50 % de tierra negra, 30% de compost de estiércol vacuno y 20% de turba subtropical formulado en un establecimiento comercial (TCR).

Estos materiales fueron seleccionados por su amplio uso en producción de plantas ornamentales en el país con distintas aplicaciones y por abarcar un amplio rango de valores en la relación agua-aire.

La perlita es un material mineral que se obtiene por tratamiento térmico a 1000-1200 °C de una roca volcánica que en su interior tiene una pequeña porción retenida de agua. Durante la industrialización el agua se expande violentamente produciendo granos en cuyo interior quedan cavidades, muchas de las cuales son internas sin salida al exterior (Burés 1997). Por sus características macroporosas, dependiendo del tamaño de partícula, tiene amplio uso como componente para proporcionar aireación en sustratos compuestos (Marfà et al. 1995; Orozco 1995). Además por tener muy baja actividad química, se lo utiliza puro como medio de cultivo en sistemas hidropónicos de matriz inerte (Martinez et al. 2006).

La turba rubia de musgo *Sphagnum* de Tierra del Fuego es un material de color pardo-claro, extractivo de yacimientos mineros llamados turberas. En nuestro país la mayor parte de este material proviene de Tierra del Fuego a granel o en bolsas, siendo la molienda su único valor agregado. Es un material poco descompuesto y conserva parcialmente la estructura de los musgos y las plantas que la integran. Posee excelentes propiedades físicas y químicas: baja densidad, porosidad total elevada, alta capacidad de retención de agua, alto contenido en aire, baja salinidad y pH ácido (Di Benedetto 2007).

El sustrato europeo, importado de Alemania, es 100% en volumen turba de musgo *Sphagnum*, color pardo oscuro, con mezcla de fibras largas del mismo material. A diferencia de la turba de Tierra del Fuego, es un producto que viene formulado ya listo para su uso como sustrato. Posee aditivos, que son agregados en relación

peso/volumen para adecuar las características de la turba base a sistemas de cultivo. Presenta un pH=6 corregido con dolomita, 1 g /L de sustrato de fertilizante completo con macro y micro nutrientes y agentes humectantes para reducir los problemas de mojabilidad que suelen presentar las turbas a bajas humedades.

El sustrato compuesto por un 50 % de tierra negra, 30% de compost de origen animal y 20% de turba subtropical en volumen, es una mezcla de formulación artesanal hecha por un importante productor de Moreno, provincia de Buenos Aires, de plantines florales de estación en macetas de 10-12 cm de diámetro. La mezcla con materiales más livianos tiene como objetivo mejorar las características físicas de la tierra negra como alta densidad, baja porosidad total, baja porosidad de aire (Paul y Lee 1976; Warren y Fonteno 1993), inadecuadas para ser usada en contenedores, pero con la ventaja de su bajo costo, fácil disponibilidad y alto poder buffer (Valenzuela y Gallardo 2003). La turba subtropical, comúnmente denominada “resaca de río” (Di Benedetto, 2007), es un producto generalmente compuesto por vegetación de ciperáceas, pteridófitas y gramíneas, de color marrón oscuro, reacción ácida y cuyo grado de descomposición varía según la profundidad a la que se encuentra. Tiene altos valores de porosidad total (Gallardo 2006; Gallardo et al. 2006; Valenzuela 2009).

Martínez Farré (1992) recomienda partir de una muestra no menor de 10 L para análisis de laboratorio considerando 3 repeticiones. Teniendo en cuenta el n=15 de este trabajo, se prepararon 300 L de cada material. En el caso de la perlita y las dos turbas de musgo *Sphagnum* que se comercializan en bolsas, la toma de muestras se hizo teniendo en cuenta la heterogeneidad dentro del mismo lote o partida, de la siguiente manera: se colocaron 4 bolsas provenientes de dos lotes distintos en una pila sobre un polietileno que se mezclaron cuidadosamente con pala al principio y luego moviendo el polietileno base en 4 direcciones. Se volvieron a mezclar por cuartos y se colocaron en bolsas negras bien cerradas e identificadas. Las submuestras de laboratorio se tomaron en varias direcciones, de distintos puntos del envase (Kipp et al. 2000), que previamente se sacudía para mezclar el material.

En el caso del material con componente tierra, se recogió a granel de una pila que estaba en la línea de enmacetado en el establecimiento del productor. Se tomaron porciones de alrededor de 15 L en 10 puntos diferentes de la pila a distintas profundidades y horizontalidad al azar hasta totalizar algo más de 300 L y se procedió luego a mezclarlas de igual manera para su homogenización.

### **1.2.3. Análisis de laboratorio**

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Sustratos de las Cátedras de Jardinería y Floricultura de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA) y en el Laboratorio del Grupo Suelos de la EEA-INTA San Pedro, determinando los parámetros y según los métodos de la fig 1.

El criterio para la elección de los métodos que se evaluaron fue, que sean de amplia difusión internacional, que varíen entre sí en algunos procedimientos que influyen en las variables respuesta (de Kreij y de Bes 1989) y que por su instrumental pudieran ser utilizados fácilmente en cualquier laboratorio del país. Los métodos se enumeran teniendo en cuenta el esquema de la fig 1.1 con una breve descripción del procedimiento adjuntando en el apéndice I, los protocolos detallados.

#### **1.2.3.1. Densidad de sustrato**

Este parámetro surge de analizar la relación entre matriz sólida – matriz porosa , a través de la relación entre las magnitudes masa de sólidos, volumen de sólidos y volumen de poros ya que la densidad de sustrato se define como la masa de las

partículas sólidas que ocupan un volumen determinado incluyendo el volumen de poros que configuran. Se calcula como el cociente entre la masa del sustrato y el volumen total. Si se considera en el cálculo, la masa de sustrato seca se obtendrá la densidad de sustrato seca (DSs), si por el contrario se indica la medición de la densidad en condiciones de humedad y se considera para cálculo la masa del sustrato húmeda, se obtendrá la densidad de sustrato húmeda (DSh) referida a esa humedad.

#### **1.2.3.1.1. Método según legislación brasilera (IN 17).**

Este método fue adoptado oficialmente en Alemania para la determinación de la densidad de sustrato húmeda en los años 1970, y fue descrito por Hoffmann (1970) en una versión del Manual de Análisis de LUFA (Instituto de Investigación y Análisis Agrícolas) y recomendado por VDLUFA (Federación de los LUFA). De igual manera fue adoptado en Austria por ALVA (Alianza de Institutos de Investigaciones Agrícolas en Austria) como método oficial. A mediados de los años 1980 el método fue introducido en Brasil (Kämpf 2010, com.pers.) y actualmente fue adoptado en ese país como metodología oficial para la determinación de densidad de sustrato húmeda y seca (Fermino 2003) y publicado en la Instrução Normativa N° 17 del 21/05/2007 y su rectificación en la Instrução Normativa N° 31 del 23/10/2008 del Ministerio de Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento, MAPA, en el anexo “Métodos para Análisis de Sustratos para plantas y Acondicionadores de suelo”.

Se utiliza instrumental básico de laboratorio y fue reproducido en este trabajo según protocolo obtenido en un entrenamiento metodológico realizado en el Laboratorio de Sustratos y Tejidos Vegetales de la FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuaria) en Porto Alegre. Se colocaron 300 mL de sustrato en una probeta plástica. Se dejó caer la probeta bajo la acción de su propio peso de una altura de 10 cm, diez veces consecutivas, se leyó el volumen obtenido y se pesó el material y con estos datos se calculó la DSh. Se llevó a estufa a  $65 \pm 5$  °C hasta peso constante y se calculó la DSs (protocolo n° 112 del Apéndice). Luego las muestras secas se colocaron en la estufa de 105° para verificar si el peso seco se mantenía constante.

Para verificar el efecto de la humedad inicial de la muestra se comparó la DSh y DSs con dos humedades diferentes sólo en este método, ya que cuantificar el efecto en todos los demás métodos sería tema para otro trabajo. Se realizaron mediciones para cada material, expresadas en porcentaje en base húmeda: P 67 %; TTF 75 %; TKL 58% y TCR 12 % y luego de secas al aire con humedad residual: P 0,53%, TTF 9,5 %, TKL 12,5% y TCR 2,4%.

#### **1.2.3.1.2. Método según la norma EN-13040 (EN 40)**

Está basado en la norma EN-13040: 2007- Anexo A del Comité Europeo de Normalización (CEN), que determina la DSh. Según el protocolo de la norma este parámetro se utiliza para pasar de la magnitud peso a la magnitud volumen cuando es necesario para la expresión de resultados químicas o físicos. Si bien la norma no lo indica, se calculó también la DSs multiplicando la DSh por la fracción de la materia seca (MS m/m) siguiendo la norma inglesa BS 4156 1990 (Ansorena Miner 1994). Se utilizó un cilindro de ensayo de 1 L al que se le colocó encima un collar desmontable de 50 mm de altura y un tamiz desvinculado que regula la caída de la muestra dentro del cilindro. Una vez lleno, se enrasó el material y se aplicó un pistón de 670 g para compactar la muestra durante 180 s. Con estos datos se determinó la DSh, se llevó el material a estufa a 105 °C y se calculó la DSs (protocolo n° 113 del Apéndice).

#### **1.2.3.1.3. Método basado en la norma EN-13041 (EN13041)**

El método EN 13041 corresponde a la norma CEN EN-13041:1999 y su anexo A1:2007, que determina simultáneamente: DSs, CRA, PT, CA, AFD, AR y ADD.

Como dispositivo de tensión se utilizaron 4 lechos de arena calibrada construidos artesanalmente en el Laboratorio de Sustratos de la FAUBA. Las muestras se colocaron en un tubo de 2 L de capacidad, saturando y tensionandolas en un lecho de arena a 50 hPa. Con ese material se llenó el conjunto de dos cilindros superpuestos de 5 cm de altura y 10 cm de diámetro, con nueva saturación por 24 h y luego sometidos a la tensión de 10 hPa. Al alcanzar el equilibrio, se separó el cilindro superior, se enrasó, pesando y llevando a estufa a 105 °C. Con los datos obtenidos se calculó la DSs, (protocolo n° 114 del Apéndice).

#### **1.2.3.1.4. Método utilizando lecho de arena (DBOT)**

Este método está basado en la propuesta de De Boodt et al. (1974b) que requiere un equipamiento de tensión simple y de bajo costo usando un lecho de arena calibrada como placa porosa con una salida fija de drenaje a 10 cm de la superficie de la arena. De Boodt propuso los dos cilindros superpuestos como portamuestras con el material sin compactar y saturándolos en una inmersión en agua. De esa manera evitó la reducción de volumen pos subsidencia ya que durante la saturación y el posterior tensionado a 10 hPa, el material que ocupa el cilindro superior puede desplazarse hacia el inferior y el volumen interno del cilindro se puede considerar como volumen total del sustrato en el cálculo de la DSs.

Los lechos se construyeron de manera artesanal en el Laboratorio de Sustratos de la Facultad de Agronomía de la UBA en base a un entrenamiento metodológico realizado en el Laboratorio de Sustrato de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos donde el método se utiliza como rutina hace más de 10 años y difundido hacia otros laboratorios del país (protocolo n° 115 del Apéndice)

#### **1.2.3.1.5. Método utilizando placas de yeso (EMBYESO)**

El equipamiento de tensión fue construido en el Laboratorio de Sustratos de la FAUBA basado en la descripción de Valenzuela (2009) quién adaptó la metodología de suelos enunciada por Danielson & Sutherland (1986) para su uso en análisis de sustratos. Consiste en embudos büchner de pvc con una placa porosa de yeso de 2 cm de altura fabricada artesanalmente. Se utilizó como portamuestra un conjunto de dos cilindros superpuestos de 10cm de diámetro y 5cm de altura y la muestra se colocó sin compactación. Se saturó el material 24 h y luego se los sometió a una tensión de 10 hPa hasta equilibrio. El material se secó en estufa a 105 °C, hasta peso constante. A partir de estos datos se calculó la DSs (protocolo n° 117 del Apéndice).

#### **1.2.3.1.6. Método de la North Caroline State University (NCSU)**

Esta metodología emplea un equipamiento diseñado en el Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la North Carolina State University NCSU, ([www.ncsu.edu/project/hortsublab](http://www.ncsu.edu/project/hortsublab)). El equipamiento utilizado en este trabajo fue importado desde la NCSU, con un set para tres repeticiones. Utiliza un cilindro de aluminio de 7,62 cm de altura y un volumen de 347,5 cm<sup>3</sup> denominado porómetro, con 8 orificios en la base que pueden estar cerrados o abiertos mediante un plato giratorio (Fonteno et al. 1981; Karlovich y Fonteno 1986). Se colocó el material dentro del porómetro con una compactación estandarizada y una humedad que depende de cada material. Se saturó con agua destilada por 15 min en un embudo Büchner cerrado y luego se dejó drenar (Fonteno y Bilderback 1993). Se midió el agua drenada en 60 min. La masa seca se

determinó secando en estufa a 105 °C por 24 h. Con estos datos se calculó la DSs (protocolo n° 119 del Apéndice).

### 1.2.3.2. Densidad de partícula

La densidad de partícula (DP) es un parámetro que surge de estudiar la matriz sólida a través de la relación entre las magnitudes masa del sólido y volumen del sólido. Se define como la relación entre la masa del sólido y el volumen total ocupado por el sólido excluyendo el espacio poroso entre las partículas (Martínez Farré 1992). Rowell (1994) la define como el volumen que ocupa una masa conocida de partículas. Se calcula como el cociente entre la masa seca del sustrato y el volumen de ese sólido. Su valor depende de la estructura interna de cada sólido determinada por las proporciones de componentes orgánicos y/o inorgánicos de cada material y cuyas DP son aproximadamente 1550 y 2650 kg m<sup>-3</sup> respectivamente. Este parámetro se lo utiliza para el cálculo de la porosidad total.

#### 1.2.3.2.1. Método del matraz aforado

Esta metodología proviene de la ciencia del suelo propuesta por Rowell (1994). Se coloca en agua una masa de sólidos conocida y se somete a ebullición. Se enfría, se traspasa a un matraz aforado y se completa el volumen con agua hasta enrasar. Por el principio de Arquímedes se calcula el volumen del sólido como el peso del volumen del líquido desalojado. Se calculó la DP como el cociente entre la masa del sólido seca y el volumen del sólido. Para comprobar una adecuada adaptación para análisis de sustratos se realizaron tres propuestas de tratamiento de la muestra inicial: 1) partícula entera (intacta) húmeda, 2) entera seca y 3) seca y triturada (Vence et al. 2010a). Para la trituración se utilizó un molino para suelos marca ANALYZER MC-1. Las propuestas 1 y 2 tuvieron como objetivo comprobar el efecto de la humedad gravimétrica inicial en los resultados ya que el protocolo original para suelos utiliza muestra inicial seca lo que podría presentar hidrofobicidad en algunos materiales orgánicos. La 3 puede informar sobre la existencia de poros ocluidos (Vence et al. 2010a) (protocolo n° 120 del Apéndice).

#### 1.2.3.2.2. Método de cálculo por fórmula

La DP se calculó según la norma EN 13041:1999 según la siguiente ecuación:

$$DP = \frac{1}{\frac{MO}{100 \times 1550 \text{ kg m}^{-3}} + \frac{CZ}{100 \times 2650 \text{ kg m}^{-3}}}$$

Donde MO y CZ son el contenido de materia orgánica y cenizas ambas expresadas en porcentaje de masa. La determinación de MO y CZ se realizó por el método de calcinación en el Laboratorio de Suelos de la EEA-INTA San Pedro según en la norma EN-13039:1999 del CEN (protocolo n° 121 del Apéndice).

### 1.2.3.3. Porosidad Total

Este parámetro se determina analizando la matriz porosa relacionado la magnitud volumen de poros con el volumen total del material. Porosidad total (PT) es el parámetro que cuantifica el espacio no ocupado por los sólidos del material en un volumen determinado, incluyendo espacios inaccesibles para el agua referido al volumen total. Se calculó como la diferencia entre el volumen total del sustrato menos el volumen ocupado por los sólidos dividido por el volumen total.

### 1.2.3.3.1. Porosidad total calculada por fórmula

Los métodos DBOT, EN13041, EMBYESO determinan la PT en forma indirecta mediante la fórmula:

$$PT = 1 - \frac{DSs}{DP}$$

En este trabajo se hicieron las posibles combinaciones reemplazando la DSs según DBOT, EN13041 y EMBYESO y la DP según los resultados obtenidos en los métodos descritos en 1.2.3.2. Los procedimientos de cálculo se muestran en el cuadro 1.1, con las combinaciones A, B, C para DSs según DBOT; D, E, F para DSs según EN13041 y G, H, I para DSs según EMBYESO (Valenzuela 2009).

**Cuadro 1.1.:** Procedimientos realizados para el cálculo de la porosidad total por fórmula reemplazando la densidad de sustrato seca (DSs) según DBOT, EN13041 y EMBYESO y la densidad de partícula (DP) según valores obtenidos en 3 métodos distintos, en los procedimientos A,B,C; D,E,F y G,H,I respectivamente en 4 materiales

Procedimientos    Formas de calcular la Porosidad Total por fórmula

A	DSs EN13041 DP matraz aforado con muestra entera y húmeda
B	DSs EN13041 DP matraz aforado con muestra triturada
C	DSs EN13041 DP por cálculo de MO y CZ por calcinación
D	DSs DBOT DP matraz aforado con muestra entera y húmeda
E	DSs DBOT DP matraz aforado con muestra triturada
F	DSs DBOT DP por cálculo de MO y CZ por calcinación
G	DSs EMBYESO DP matraz aforado con muestra entera y húmeda
H	DSs EMBYESO DP matraz aforado con muestra triturada
I	DSs EMBYESO DP por cálculo de MO y CZ por calcinación

### 1.2.3.3.2. Método de tensión cero (LEGBRAS)

Este procedimiento es parte del método LEGBRAS para determinación de CRA a 10hPa, sin embargo la determinación del parámetro PT no forma parte del contenido de la legislación brasilera, pero sí de la rutina del Laboratorio de Sustratos y Tejidos Vegetales de la FEPAGRO en Porto Alegre.

La PT se obtuvo en forma directa a través de la determinación a tensión cero admitiendo el supuesto que todo el espacio poroso está lleno de agua. Luego de saturar en un baño de agua por 24 h el material contenido en un cilindro portamuestra de 5 cm de altura y 10 cm de diámetro, se retiró cuidadosamente del baño y se colocó rápidamente en un plato. Se pesó incluida el agua que drenaba en el plato, pues corresponde a agua gravitacional de los macroporos (Fermino 2003). Luego se le restó el peso seco en estufa a 65 °C y se tomó como valor de la PT el contenido hídrico volumétrico en saturación (protocolo n° 118 del Apéndice).

#### **1.2.3.3.3. Método desarrollado en la North Caroline State University (NCSU)**

El cálculo de la porosidad aplicando esta metodología, se basa en la medida de la cantidad de agua que penetra en los poros durante la saturación (1.2.3.1.5). El cálculo de la porosidad se realizó sumando el volumen de agua retenido más el drenado por el sustrato referidos al volumen total del porómetro (protocolo n° 119 del apéndice).

#### **1.2.3.4. Contenido hídrico volumétrico y potencial mátrico**

Las variables calculadas relacionan la magnitud volumen de agua dentro de la matriz porosa y lo refieren a la magnitud volumen total.

Existen métodos que determinan el contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en un solo punto cercano a la tensión  $\psi = 10$  hPa, ya que en el rango 0-10 hPa ocurren, en la mayoría de los materiales, las variaciones más importantes en dicha función. Otros métodos más complejos utilizan equipamientos que permiten medir múltiples pares  $\theta$ - $\psi$  de la función  $\theta = f(\psi)$  en el rango 0-100 hPa.

#### **1.2.3.4.1. Contenido hídrico volumétrico a 10 hPa**

Los 2 métodos detallados utilizan equipamientos sencillos con altura de drenaje fija que permite un solo punto de tensión para el par  $\theta - \psi$ .

##### **1.2.3.4.1.1. Método DBOT**

Este método fue propuesto originalmente por De Boedt para determinar la DSs (DBOT, 1.2.3.1.4) valor que se utiliza para los cálculos en el método EMBDBOT (1.2.3.4.2.2). Fue Martínez Farré (1992) quién introdujo una modificación y mediante el dato del volumen de agua que se desprende del método DBOT, agregó el cálculo de CRA, como el volumen de agua retenido por la muestra tensionada a 10 hPa, relativo al volumen total del sustrato (protocolo n° 115 del Apéndice).

##### **1.2.3.4.1.2. Método NCSU**

El contenido hídrico volumétrico  $\theta$  se calcula (1.2.3.1.5) relacionando el volumen de agua retenido por el sustrato relativo al volumen del porómetro después de la saturación y el drenaje libre (protocolo n° 119 del Apéndice).

#### **1.2.3.4.2. Contenido hídrico volumétrico de 0 a 100 hPa**

Los métodos que permiten medir múltiples pares  $\theta - \psi$  brindan mayor información describiendo el posible comportamiento de la liberación del agua del material hacia las raíces de las plantas en ese rango de tensiones.

A fin de evaluar estos procedimientos como análisis de rutina, se determinaron 4 puntos: tensión 0 (saturación) y aplicando las tensiones 10, 50, y 100 hPa. Con los valores obtenidos se determinaron los parámetros de capacidad de retención de agua (CRA), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD), según los siguientes métodos:

#### **1.2.3.4.2.1. Método utilizando lechos de arena (EN13041)**

Este método fue descrito en 1.2.3.1.3. (protocolo n° 114 del Apéndice).

#### **1.2.3.4.2.2. Método utilizando embudos de tensión (EMBDBOT).**

Las mediciones fueron hechas en el Laboratorio de Sustratos de la FAUBA utilizando un equipo con cuatro embudos de tensión con placa porosa de vidrio fritado, basado en De Boodt et al. (1974b). Se tomó como punto de tensión 0 el valor de la PT por fórmula (1.2.3.3.1). Se colocó una muestra de 2 – 3 cm de altura de cada material sobre la placa porosa de cada embudo y se saturó durante 24 h o hasta saturación completa, luego se las sometió a las tensiones prefijadas. Una vez alcanzado el equilibrio, se separó cada embudo del sistema y se determinó el par  $\theta - \psi$  (protocolo n° 116 del Apéndice).

#### **1.2.3.4.2.3. Método utilizando placas de yeso (EMBYESO)**

Este método fue descrito en 1.2.3.1.5. Se tomó como punto de tensión 0 el valor de la PT calculado por fórmula (1.2.3.3.1) (protocolo n° 117 del Apéndice).

#### **1.2.3.4.2.4. Método utilizando papel de filtro (LEGBRAS)**

Este método fue adoptado por la legislación brasilera para determinar la CRA en el punto de tensión 10 hPa, publicado en el boletín oficial del MAPA en la Instrução Normativa N° 17 del 2007 y su modificatoria N° 31 del 2008. La muestra se coloca en un cilindro de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura con una masa calculada de acuerdo a la DSh según IN 17 (1.2.3.1.1). El equipamiento consiste en una mesa de vidrio con un orificio de drenaje que sostiene un papel de filtro (cualitativo 250 g cm<sup>-2</sup>) que actúa como placa porosa. El material se saturó 24 h y luego se tensionó mediante un tubo de drenaje rígido con salidas fijas. Se llevó a estufa 65 ° C + 5° hasta peso constante y se calculan los contenidos hídricos. El par  $\theta - \psi$  para la tensión 0 se obtuvo según método de tensión cero para determinar PT (1.2.3.3.2.) (protocolo n° 118 del Apéndice).

En este trabajo una vez finalizado este ensayo las muestras secas se colocaron en estufa a 105° C por 24 h para comprobar si el peso seco se mantenía constante.

### **1.2.3.5. Porosidad de aire**

Este parámetro resulta de analizar la matriz porosa a través de la magnitud volumen de aire relativo al total del volumen del sustrato para distintos pares  $\theta - \psi$ . Se determinó la capacidad de aireación (CA) a 10 hPa (Abad et al. 1993; Burés 1997), mientras que con el término porosidad de aire (PA) se denominaron los contenidos de aire en el material sometido cualquier otro valor de tensión (Fonteno 1993)

Los valores de la CA están muy relacionados a la manera de determinar la PT. En los métodos de determinación de la PT por fórmula (1.2.3.3.1), la CA se obtuvo como diferencia entre la PT y la CRA y fueron clasificados como métodos indirectos. Por el contrario, cuando la PT se determinó a partir de una medición directa del agua de saturación los métodos se consideraron directos.

#### **1.2.3.5.1. Métodos indirectos**

##### **1.2.3.5.1.1. Método utilizando lechos de arena (EN13041)**

Basado en la norma EN-13041, la CA se calculó como la diferencia entre la PT calculada por fórmula según el procedimiento C del cuadro 1.1 (1.2.3.3.1) y la CRA según 1.2.3.4.2.1 (protocolo n° 114 del Apéndice)



#### **1.2.3.5.1.2. Método utilizando lecho de arena a 10 hPa (DBOT)**

Según lo propuesto por Martínez Farré (1992), la CA se calculó como la diferencia entre la PT calculada por fórmula según el procedimiento F del cuadro 1.1 (1.2.3.4.1.1) y la CRA según 1.2.3.4.1.1 (protocolo n° 115 del Apéndice)

#### **1.2.3.5.1.3. Método utilizando embudos de tensión (EMBDBOT).**

Según lo propuesto por De Boodt et al. (1974b), la CA se calculó como la diferencia entre la PT calculada por fórmula según el procedimiento F del cuadro 1.1 (1.2.3.4.1.1) y la CRA según 1.2.3.4.2.2 (protocolo n° 115 del Apéndice)

#### **1.2.3.5.1.4. Método utilizando placas de yeso (EMBYESO)**

La CA se calculó como la diferencia entre la PT calculada por fórmula según procedimiento I del cuadro 1.1 (1.2.3.4.1.1) y la CRA según 1.2.3.4.2.3. (protocolo n° 117 del Apéndice).

#### **1.2.3.5.2. Métodos directos**

##### **1.2.3.5.2.1. Método utilizando papel de filtro (LEGBRAS)**

La CA se calculó por diferencia entre la PT determinada por el método de tensión cero (1.2.3.3.2.) y la CRA según 1.2.3.4.2.4 (protocolo n° 118 del Apéndice).

##### **1.2.3.5.2.2. Método NCSU**

Según la metodología (1.2.3.1.6) la medición de la porosidad de aire se realizó en forma directa ya que el volumen de aire se toma como el volumen de agua de drenaje medido y se lo divide por el volumen del porómetro (protocolo n° 119 del Apéndice).

#### **1.2.3.6. Granulometría**

Los parámetros que se utilizan para la determinación de la granulometría relacionan en este caso las partículas de la matriz sólida, con las características de los espacios que formaran la matriz porosa ya que una parte importante de la distribución del tamaño de los poros depende del tamaño de las partículas y a su vez la distribución de tamaño de poros explica en gran parte la relación agua-aire en la matriz porosa.

El arreglo de las partículas sólidas de un sustrato puede ser dividido en grupos de acuerdo a su tamaño y la fase sólida puede en su conjunto ser caracterizada en relación a las proporciones de los grupos de tamaño de partícula (Raviv et al. 2002). La distribución de tamaño de partícula (DTP) es la clasificación de sus partículas en función de su tamaño (Martínez Farré 1992) y se expresa fácilmente mediante el porcentaje en peso de las fracciones que quedan retenidas por tamizado en una malla de determinada medida. La DTP está basada en el análisis granulométrico de los materiales que se realiza por el método del tamizado.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Suelos del EEA-INTA San Pedro según el método del tamizado basado en la norma EN 15428: 2007 (CEN). Se utilizaron una serie de tamices clasificados por la American Society for Testing and Materials, (ASTM) de 16; 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25 y 0,125 mm de abertura de malla cuadrada, con una agitación por eje excéntrico (2500 golpes por min.) durante 7 min con parada de 1s cada 30s mediante un equipo vibrador marca ZONYTEST (protocolo n° 122 del Apéndice). Los resultados se presentaron de acuerdo a las siguientes expresiones:

**1.2.3.6.1. Distribución de tamaño de partícula (DTP):** como fracciones en peso sobre el total de la muestra, % g g<sup>-1</sup>; gráficamente mediante histogramas de frecuencias.

**1.2.3.6.2. Índice de grosor (IG):** Se define como el porcentaje acumulado en peso de partículas con diámetro superior a 1 mm (Martinez Farré 2002, Noguera 1999)

**1.2.3.6.3. Parámetros estadísticos: Diámetro medio geométrico (dg) y desviación estándar geométrica de las partículas (σg)**

El cálculo de estos indicadores se realizó siguiendo las siguientes fórmulas:

$$dg = \exp(a) \quad \text{y} \quad \sigma g = \exp(b)$$

$$\text{donde } a = 0,01 \sum_i m_i \ln d_i \quad \text{y} \quad b = (0,01 \sum_i m_i (\ln d_i)^2 - a^2)^{1/2}$$

$d_i$ : es la media aritmética de dos límites consecutivos de tamaño de partícula,

$m_i$ : es el porcentaje de la masa de las partículas con diámetros iguales o menores que  $d_i$  referido al total. El factor 0,01 se ha incluido para convertir los porcentajes de las frecuencias en fracciones (Shirazi y Boersma 1984, Michiels et al. 1993; Marfà et al. 1993; Marfà 1995; Orozco et al. 1995, 1997; Burés et al. 1997a; Abad et al. 2005). El dg informa el tamaño medio de las partículas y representa el diámetro de partícula que corresponde a una probabilidad del 50% en la distribución. El σg informa la dispersión de la distribución granulométrica en términos de probabilidad de forma que la mayoría de las partículas tendrán un diámetro comprendido entre  $dg * \sigma g$  y  $dg/\sigma g$  (Marfà 1995).

### **1.2.3.7. Determinación de parámetros que intervienen en las metodologías**

#### **1.2.3.7.1. Contenido de humedad y materia seca**

Estos parámetros no caracterizan físicamente al sustrato, pero su conocimiento es importante ya que puede afectar el volumen y la capacidad de saturarse. La humedad ( $H \% g g^{-1}$ ) se expresó en base gravimétrica y se calculó como el cociente entre la masa de agua en la muestra y la masa total la muestra húmeda multiplicada por 100 para expresarla como porcentaje. En los análisis físicos se intenta estandarizar su valor para la preparación de las muestras ya que afecta los resultados de varios parámetros físicos.

La materia seca ( $MS \% g g^{-1}$ ) representa la masa del componente sólido seco relativa a la masa de la muestra húmeda y se calculó por la formula  $MS \% = 100 - H \%$  (protocolo n° 111 del Apéndice)

#### **1.2.3.7.2. Contenido de cenizas (CZ) y Materia orgánica (MO)**

Estos parámetros químicos no son de caracterización del sustrato, pero se utilizan para el cálculo de la DP por fórmula (1.2.3.2.2.)

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos del EEA-INTA San Pedro según un protocolo basado en la norma europea EN- 13039:1999 por calcinación de la muestra (protocolo n° 121 del Apéndice).

### **1.2.4. Análisis estadístico de los datos**

La muestra de laboratorio de cada material fue sometida a los métodos de medición de variables con un tamaño muestral de 15 repeticiones independientes en todos los ensayos siguiendo un diseño completamente aleatorizado.

Los resultados fueron sometidos a análisis de la varianza verificándose que se cumplan los supuestos de independencia de datos, distribución normalidad de las poblaciones y homocedasticidad de sus varianzas. En algunos los tratamientos (métodos) las varianzas de las poblaciones no cumplieron el supuesto de homogeneidad de varianzas. En esos casos se procedió de 2 maneras: cuando las comparaciones eran sobre 2 medias se procedió al cálculo de  $t'$  para muestras independientes y varianzas desiguales (Steel y Torrie 1988) y en el caso de comparación de más de 2 medias, mediante el análisis de los residuos se detectó el método no cumplía con el supuesto y tal tratamiento se excluyó del análisis (Steel y Torrie 1988).

Se realizaron pruebas de correlación (Pearson), pruebas t, test de comparaciones múltiples de medias y análisis de regresión con el software estadístico InfoStat 1.1. de la Cátedra de Estadística y Biometría y de Diseño de Experimentos de la Universidad Nacional de Córdoba.

#### 1.2.4.1. Estudio de reproducibilidad

Con cualquier metodología seguida, los resultados deben tener una variabilidad aceptable que se repita en el tiempo y por distintos laboratorios. En ese sentido, los estudios de reproducibilidad son la base para estimar la adecuación del método para ese material a fin de tener confiabilidad, y por ende validez de los resultados obtenidos en el laboratorio (OAA, 2008)

En todos los casos se siguió el procedimiento de Stein (Steel y Torrie, 1988) para determinar el número necesario de observaciones para datos continuos, tal que sea razonablemente fiable que el intervalo de confianza para un error escogido no será mayor de un valor determinado. A partir de los resultados obtenidos en cada determinación, se han calculado: 1) desviación estándar (S); 2) coeficiente de variación (CV %); 3) número de repeticiones ( $\eta$ ) que habría que realizar para alcanzar un nivel de confianza del 95 %; y 4) error máximo ( $\epsilon$ ) cometido para un nivel de confianza del 95 % y realizando 15 repeticiones. Las ecuaciones utilizadas han sido:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad cv\% = \frac{s}{x} \times 100$$

$$n \geq \left( \frac{s \times t_{(p\%, n-1)}}{\epsilon} \right)^2$$

$$\epsilon = \frac{s \times t_{(p\%, n-1)}}{\sqrt{n}}$$

donde  $x_i$  es el valor obtenido para cada repetición,  $\bar{x}$  su valor medio, y  $t_{p(\%, n-1)}$  el valor de la t de Student, que depende del nivel de confianza p (%) y de los grados de libertad (n-1) (Noguera 1999). Este estudio estadístico permite fijar el número de repeticiones a realizar para cada una de las determinaciones, con el fin de obtener resultados fiables (Vence 2008, 2010b, Valenzuela 2009).

### 1.3. RESULTADOS

#### 1.3.1. Densidad de sustrato

Los valores de la humedad gravimétrica (H %) inicial de las muestras de ensayo fueron: P 67 %; TTF 75 %; TKL 58% y TCR 12 %, salvo en los casos en que se aclara otro valor.

### 1.3.1.1. Densidad de sustrato húmeda (DSh)

Se compararon los métodos IN 17 y EN 40 (cuadro 1.2.) para la variable DSh.

**Cuadro 1.2.:** Densidad de sustrato húmeda de cuatro materiales según IN 17 y EN 40 (n=15). Valores entre paréntesis indican desvío estándar.

	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra +Compost +Resaca
Método	Densidad de sustrato húmeda (kg m <sup>-3</sup> )			
IN 17	312 (±8,18)	200 (±3,68)	227 (±4,67)	953 (±10,4)
EN 40	317 (±2,10)	177 (±1,41)	202 (±2,51)	871 (±5,45)
	*	***	***	***

Prueba t: \*\*\* diferencias altamente significativas al 5% (p<0,0001); Prueba t' en perlita para varianzas heterogéneas: \* diferencia significativa

Los resultados indican que el valor de la DSh depende del método empleado. Mediante una regresión lineal se encontró una alta correlación entre los métodos con un  $R^2 = 0,9971$  y una función  $y = 1,0945x - 5,7652$  donde  $y = \text{IN 17}$  y  $x = \text{EN 40}$ .

La variabilidad expresada por los coeficientes de variación (CV) (cuadro 1.3), se mantiene baja en ambos métodos. Sin embargo se observa una mayor variabilidad en el método IN 17 en todos los materiales. El estudio de reproducibilidad indica que se necesitaría sólo una repetición para no superar un error hasta 5%.

**Cuadro 1.3.:** Variabilidad de los resultados de la densidad de sustrato húmeda expresada mediante el coeficiente de variación (CV) (n = 15). Error máximo cometido ( $\epsilon$  max) calculado para distintas probabilidades ( $P \leq 0,10$  y  $P \leq 0,05$ ) y número de repeticiones necesarias ( $\eta$ ) calculadas para errores ( $\epsilon$ ) máximos del 15% , 10% y 5%, obtenidos de dos métodos y en cuatro materiales.

Material	Método	CV%	$\eta$				
			$\epsilon$ max		$P \leq 0,05$		
			$P \leq 0,1$	$P \leq 0,05$	$\epsilon = 15\%$	$\epsilon = 10\%$	$\epsilon = 5\%$
Perlita	IN 17	2,31	1,05	1,28	1	1	1
	EN 40	0,66	0,30	0,37	1	1	1
Turba Tierra del Fuego	IN 17	1,84	0,84	1,02	1	1	1
	EN 40	0,80	0,36	0,44	1	1	1
Turba europea	IN 17	2,06	0,94	1,14	1	1	1
	EN 40	1,24	0,56	0,69	1	1	1
Tierra+ Compost +Resaca	IN 17	1,05	0,48	0,58	1	1	1
	EN 40	0,63	0,28	0,35	1	1	1

### 1.3.1.2. Densidad de sustrato seca

Para analizar el efecto de la humedad inicial de la muestra se compararon los resultados de DSs, según IN 17 con dos contenidos de humedad inicial en los 4 materiales (cuadro 1.4.).

**Cuadro 1.4.:** Densidad de sustrato seca (DSs) calculada a partir de la densidad de sustrato húmeda (DSh) y la materia seca, según IN 17 en 4 materiales con 2 humedad inicial de las muestras (H% m/m) (n = 15) CV%: coeficiente de variación

Método IN 17				
Materiales	H% m/m	DSh	CV%	DSs
Perlita	67	312	2,31	103
	0,53	68	4,42	68
		***		***
Turba de Tierra del Fuego	75	200	1,84	50
	9,5	72	3,23	65
		***		***
Turba europea	58	227	2,06	95
	12,4	151	3,85	134
		***		***
Tierra +	12	953	1,05	839
Compost + Resaca	2,4	940	1.68	917
		ns		***

prueba t entre medias de la DSh y DSs en cada material: ns=diferencias no significativas, \*\*\* diferencias altamente significativas ( $p < 0,0001$ ) al 5%

Los resultados indican que la humedad inicial de la muestra afectó la DSh, sin embargo el efecto fue diferente dependiendo del material ya que en TCR con altos valores en las DS y menor diferencia de humedad no se detectaron diferencias. En los demás materiales se mantuvo la relación esperada: a mayor humedad mayor DSh. La humedad inicial también afectó la DSs, sin embargo con una relación inversa, a mayor humedad menor DSs, excepto en P.

En los resultados de la DSs según los 6 métodos (cuadro 1.5.) se observa un amplio intervalo de valores entre los materiales justificando el criterio que se adoptó para la elección de los mismos.

**Cuadro 1.5.:** Densidad de sustrato seca según 6 métodos en 4 materiales (n = 15).

	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra Compost Resaca
Método	Densidad de sustrato seca (kg m <sup>-3</sup> )			
IN 17	105 b	48 d	96 d	839 a
EN 40	107 b	42 e	86 e	781 e
EN13041	93 c	58 b	111 b	834 ab
DBOT	107 b	57 c	104 c	801 c
EMBYESO	93 c	60 a	115 a	820 bc
NCSU	109 a	56 c	88 e	764 d
prueba F	***	***	***	***

\*\*\* diferencias altamente significativas entre métodos ( $p < 0,0001$ ) al 5% .

Letras distintas por columna corresponden a diferencias significativas con el test de Tukey al 5%

El EN13041 y EMBYESO presentaron en P, los valores más bajos y muy diferentes a los demás métodos, cuyos valores fueron muy próximos entre si, a pesar de que se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Por el contrario, los mismos métodos EN13041 y EMBYESO dieron en las turbas los valores más altos de DSs, mientras los más bajos se presentaron en IN 17 y EN 40.

Se estudió la relación entre las DSs según cada uno de los métodos y el valor obtenido con EN13041 tomado como método de referencia por ser ampliamente utilizado en Europa. Se observa (cuadro 1.6 A y B) el ajuste de los modelos lineales siendo la DSs según EN13041 la variable dependiente (y). En A se aplica regresión lineal en DSs obtenidas para los 4 materiales. Se observa un alto coeficiente de determinación ( $R^2$ ) en todas las regresiones lineales. Sin embargo verificando las ecuaciones, el ajuste no es bueno para los materiales con baja DSs y sólo se cumple para TCR con alta DSs. Por lo tanto se calcularon nuevas regresiones sin considerar las DSs de TCR y los resultados se muestran en B, confirmando las disminuciones en las correlaciones. Sin embargo, se destaca la alta correlación con EMBYESO y una correlación aceptable con DBOT en contraste con los demás métodos.

En base a estos resultados se clasificaron los métodos según la forma de compactación inicial. Se detectaron dos grupos: el primer grupo comprende EN13041, EMBYESO y DBOT donde la muestra no sufre compactación inicial, sino que se produce durante la saturación y el tensionado, y un segundo grupo con IN 17, EN 40 y NCSU donde la muestra sufre una compactación externa con alguna fuerza estandarizada. Este criterio de clasificación se pudo comprobar en los resultados del cuadro 1.7 A que muestra la matriz de correlación entre los métodos sin compactación sobre la muestra inicial en los materiales que presentan baja DSs: P, TTF y TKL, con buenos niveles de asociación. El cuadro 1.7 B muestra la matriz de correlación entre los que aplican una compactación externa, sobre los mismos materiales.

**Cuadro 1.6.:** Ecuaciones de la regresión lineal de las densidades de sustrato seca (DSs) por distintos métodos referidos a la DSs según método EN13041, en A para: perlita (P), turba de tierra del fuego (TTF), turba europea (TKL) y tierra+compost +resaca (TCR); y en B para: P, TTF y TKL.  $R^2$ : coeficiente de determinación

A		
y = DSs según EN13041		
métodos	ecuaciones para 4 materiales	$R^2$
IN 17	$y = 0,9867 x_1 + 5,6081$	0,9990
EN 40	$y = 1,0601 x_2 + 4,7282$	0,9978
DBOT	$y = 1,0412 x_3 - 5,5710$	0,9994
EMBYESO	$y = 1,0217 x_4 - 3,9037$	1
NCSU	$y = 1,0971 x_5 - 4,9425$	0,9980
B		
ecuaciones para 3 materiales		
IN 17	$y = 0,7769 x_1 + 22,851$	0,7803
EN 40	$y = 0,6406 x_2 + 37,156$	0,6216
DBOT	$y = 0,8875 x_3 + 8,0543$	0,8526
EMBYESO	$y = 0,9713 x_4 + 0,5646$	0,9954
NCSU	$y = 0,7424 x_5 + 24,725$	0,5405

$x_1$  =DSs IN 17;  $x_2$  =DSs EN 40;  $x_3$  =DSs DBOT;  $x_4$  =DSs EMBYESO;  $x_5$  =DSs NCSU

**Cuadro 1.7.:** Matriz de correlación que surge de la asociación entre los métodos sin compactación externa (A) y con compactación externa (B) en la preparación de la muestra inicial en los materiales de baja DSs

A

Métodos	EN13041	DBOT	EMBYESO
EN13041	1	0,92338	0,99768
DBOT		1	0,89509
EMBYESO			1

B

Métodos	IN 17	EN 40	NCSU
IN 17	1	0,98478	0,98717
EN 40		1	0,99662
NCSU			1

El cuadro 1.8 muestra la variabilidad de la DSs para los 4 materiales según los 6 métodos y el resultado del estudio de la reproducibilidad indica que realizando 3 repeticiones se cometería un error máximo de 5% en todos los casos.

**Cuadro 1.8.:** Variabilidad de los resultados de la densidad de sustrato seca expresada mediante el coeficiente de variación (CV) ( $n = 15$ ). Error máximo cometido ( $\varepsilon$  max) para distintas probabilidades ( $P \leq 0,10$  y  $P \leq 0,05$ ) y número de repeticiones ( $\eta$ ), para errores ( $\varepsilon$ ) máximos del 15%, 10% y 5% ( $P \leq 0,05$ ), en 4 materiales según 6 métodos.

Material	Método	CV%	$\eta$				
			$\varepsilon$ max		$P \leq 0,05$		
			$P \leq 0,1$	$P \leq 0,05$	$\varepsilon = 15\%$	$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 5\%$
Perlita	IN 17	2,34	1,06	1,29	1	1	1
	EN 40	0,66	0,30	0,37	1	1	1
	EN13041	2,68	1,22	1,48	1	1	2
	DBOT	3,08	1,40	1,70	1	1	2
	EMBYESO	3,65	1,66	2,02	1	1	3
	NCSU	2,37	1,08	1,31	1	1	2
Turba Tierra del Fuego	IN 17	1,84	0,84	1,02	1	1	1
	EN 40	0,80	0,36	0,44	1	1	1
	EN13041	3,80	1,73	2,10	1	1	3
	DBOT	1,42	0,65	0,79	1	2	1
	EMBYESO	2,53	1,15	1,40	1	1	2
	NCSU	1,33	0,60	0,74	1	1	1
Turba europea	IN 17	2,06	0,94	1,14	1	1	1
	EN 40	1,24	0,56	0,69	1	1	1
	EN13041	2,25	1,03	1,25	1	1	1
	DBOT	2,47	1,13	1,37	1	1	2
	EMBYESO	3,56	1,62	1,97	1	1	3
	NCSU	2,29	1,04	1,27	1	1	1
Tierra Compost Resaca	IN 17	1,05	0,48	0,58	1	1	1
	EN 40	0,63	0,28	0,35	1	1	1
	EN13041	1,68	0,76	0,93	1	1	1
	DBOT	3,00	1,36	1,66	1	1	2
	EMBYESO	1,09	0,50	0,60	1	1	1
	NCSU	1,32	0,60	0,73	1	1	1



### 1.3.2. Densidad de partícula

Se procedió al análisis de los resultados de la DP con los distintos tratamientos sobre la muestra inicial en forma separada, para obtener la información de sus efectos. En el cuadro 1.9 se muestra en A) las DP con muestra inicial con partículas entera húmeda o seca y en B) la DP según el método del matraz aforado con muestra inicial seca triturada y la calculada por fórmula. Los valores con muestra seca o húmeda no presentaron diferencias excepto en TCR. Sin embargo, se puede considerar en este material, que los valores son muy próximos entre sí, a pesar de las diferencias significativas que aparecen debido a los valores medios altos y los desvíos muy bajos.

Con el tratamiento de triturar la muestra inicial, los valores de DP son más próximos a la DP por fórmula que a la DP con muestra de partícula entera, ya que en la fórmula de cálculo entra el valor de la materia orgánica obtenida por calcinación.

Los resultados del estudio de reproducibilidad (cuadro 1.10.) muestran que realizando 4 repeticiones se estaría cometiendo un error máximo del 10% en P y TCR y destacándose una mayor variabilidad en las turbas, que haría necesario hasta 8 repeticiones para mantenerse dentro de ese error.

**Cuadro 1.9.:** Densidad de partícula (DP) según: A) método del matraz aforado con muestra inicial entera húmeda o seca; B) método del matraz aforado con muestra inicial triturada y seca y por fórmula, en 4 materiales (n = 15).

	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra +Compost +Resaca
<b>A</b>				
Método del matraz aforado	Densidad de partícula (kg m <sup>-3</sup> )			
ME Húmeda	546	1102	1253	2338
ME Seca	531	1098	1219	2256
prueba t	ns	ns	ns	***
<b>B</b>				
Método	Densidad de partícula (kg m <sup>-3</sup> )			
matraz aforado T	2128	1583	1404	2302
por fórmula	2647	1684	1604	2463
prueba t	***	ns	***	***

Prueba t por columna: ns: diferencias no significativas, \*\*\* diferencia altamente significativas al 5% (p<0,0001). ME Húmeda: tratamiento con muestra inicial entera y húmeda; ME Seca: con muestra inicial entera y seca; T: con muestra inicial seca y triturada

**Cuadro 1.10.:** Variabilidad de los resultados de la DP expresado mediante su coeficiente de variación (CV) (n=15). Error máximo cometido ( $\epsilon$  max ) calculado para distintas probabilidades ( $P \leq 0,10$  y  $P \leq 0,05$ ) y número de repeticiones ( $\eta$ ) a realizar en rutina de laboratorio calculadas para errores ( $\epsilon$ ) máximos del 15% , 10% y 5% respectivamente, según 4 métodos y en cuatro materiales. EH: tratamiento con muestra inicial entera y húmeda; ES: con muestra inicial entera y seca; T: con muestra inicial seca y triturada.

Material	Método	CV%	$\epsilon$ max		$\eta$ $P \leq 0,05$		
			$P \leq 0,1$	$P \leq 0,05$	$\epsilon$ =15%	$\epsilon$ =10%	$\epsilon$ =5%
Perlita	matraz aforado EH	5,8	2,64	3,21	1	2	7
	matraz aforado ES	3,35	1,52	1,85	1	1	3
	matraz aforado T	8,74	3,97	4,83	2	4	14
	por fórmula	0,19	0,09	0,11	1	1	1
Turba Tierra del Fuego	matraz aforado EH	12,41	5,64	6,86	4	8	29
	matraz aforado ES	7,29	3,32	4,03	2	3	10
	matraz aforado T	9,36	4,26	5,18	2	5	17
	por fórmula	1,2	0,55	0,66	1	1	1
Turba europea	matraz aforado EH	7,67	3,49	4,24	2	3	11
	matraz aforado ES	8,54	3,88	4,72	2	4	14
	matraz aforado T	5,69	2,59	3,15	1	2	6
	por fórmula	0,22	0,10	0,12	1	1	1
Tierra+ Compost +Resaca	matraz aforado EH	0,9	0,41	0,50	1	1	1
	matraz aforado ES	1,38	0,63	0,76	1	1	1
	matraz aforado T	2,49	1,13	1,38	1	1	2
	por fórmula	0,79	0,36	0,44	1	1	1

### 1.3.3. Porosidad total

#### 1.3.3.1. Porosidad total calculada mediante fórmula.

El cuadro 1.11 muestra los resultados obtenidos en el cálculo por fórmula de PT según los procedimientos A, B, C; D, E, F y G, H, I (1.2.3.3.1.). Los procedimientos C, F e I corresponden a los protocolos de los métodos EN13041, DBOT y EMBYESO respectivamente (cuadro 1.12) mientras que las demás combinaciones se realizaron para verificar el efecto del método de determinación de la DP en los valores de la PT por fórmula.

**Cuadro 1.11.:** Porosidad total calculada por fórmula en 4 materiales con los procedimientos: A, B y C : considerando la densidad de sustrato seca DSs según EN13041 y la DP según métodos de matraz aforado con: A: muestra entera y húmeda (EH); en B: muestra triturada (T) y en C: cálculo por fórmula; D, E y F con DSs según DBOT y la DP según métodos de matraz aforado en D: con EH; en E: con T y en F: cálculo por fórmula; y G, H, I con DSs según EMBYESO y la DP según métodos de matraz aforado G: con EH; H: con T y I: cálculo por fórmula

Procedimiento	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra+ Compost +Resaca
	Porosidad Total ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )			
A	0,829	0,947	0,912	0,639
B	0,956	0,963	0,921	0,634
C	0,965	0,966	0,931	0,658
D	0,804	0,947	0,917	0,656
E	0,949	0,964	0,926	0,651
F	0,960	0,966	0,935	0,673
G	0,824	0,945	0,908	0,649
H	0,956	0,962	0,918	0,643
I	0,965	0,964	0,928	0,667

La mayoría de los valores demostró escasa sensibilidad del parámetro PT a las variaciones de la DP. Sólo se destacan las diferencias obtenidas en P en A, D y G cuando se reemplazó la DP con los valores obtenidos según el método de matraz aforado con muestra inicial entera y húmeda, cuyo efecto se tratará en la sección Discusión de este capítulo. En los demás materiales se mantuvieron valores menores cuando se usó este tratamiento en las muestras.

**Cuadro 1.12.:** Porosidad total calculada por fórmula según 3 métodos en 4 materiales

Método	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra+ Compost +Resaca
	Porosidad Total ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )			
EN13041	0,965 a	0,966 a	0,931 b	0,658 c
DBOT	0,959 b	0,966 a	0,935 a	0,673 a
EMBYESO	0,965 a	0,964 b	0,928 c	0,667 b
Prueba F	***	***	***	***

\*\*\* indica diferencias altamente significativas con  $p < 0,0001$ . Letras distintas por columna indican diferencias significativas al 5% con el test de Tukey. (n = 15)

A pesar de las diferencias estadísticas significativas encontradas, se puede observar que los valores para cada material son muy próximos entre métodos.

### 1.3.3.2. Porosidad total por medición directa de volumen de agua

El cuadro 1.13. muestra las diferencias en la PT de todos los materiales, según los métodos: LEGBRAS, de tensión cero, que calcula la porosidad considerando el volumen de agua contenido en la saturación y el NCSU que calcula la porosidad como suma del volumen de agua retenido más el agua de drenaje.

**Cuadro 1.13.:** Porosidad total según el método LEGBRAS de tensión cero y NCSU.

Método	Perlita		Turba Tierra del Fuego		Turba europea		Tierra Compost Resaca	
	Porosidad Total ( $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ )							
	CV%		CV%		CV%		CV%	
LEGBRAS	0,480	9,05	0,932	1,58	0,789	2,45	0,635	5,34
NCSU	0,760	4,00	0,966	2,37	0,913	1,36	0,611	1,78
Prueba t	***		*		***		*	

\*; \*\*\*: indican diferencias significativas con  $p < 0,05$  y  $p < 0,0001$  respectivamente, al 5%

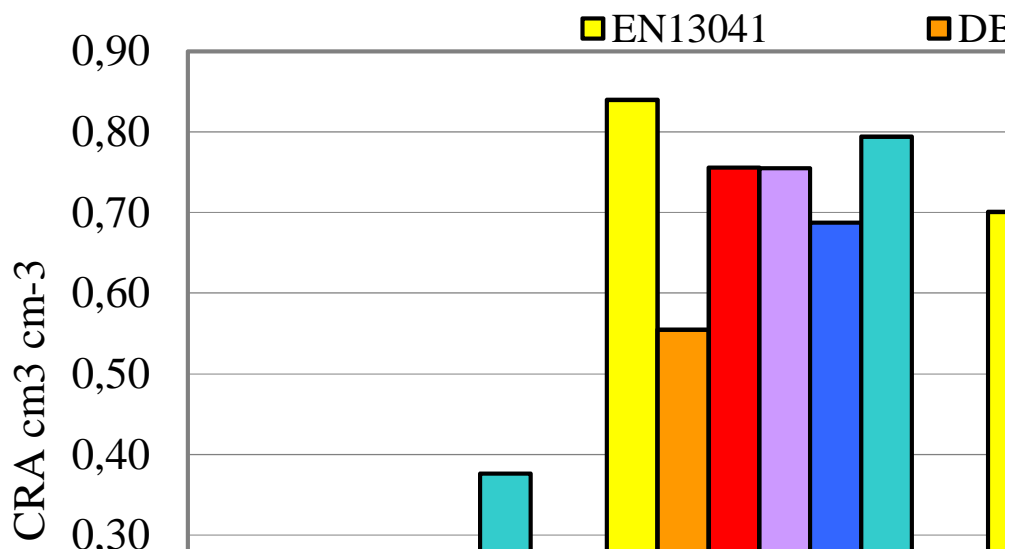
### 1.3.4. Contenido hídrico volumétrico a 10 hPa de tensión

De los resultados de la CRA (cuadro 1.14), se destacan los rangos más amplios de diferencias entre métodos en las turbas que en los otros 2 materiales. En P, la CRA según NCSU es más alta respecto al resto de los métodos. En las turbas los valores más altos se obtienen con el EN13041 y NCSU y los más bajos con DBOT.

**Cuadro 1.14.:** Valores medios de la capacidad de retención de agua en 4 materiales según 6 métodos.

	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra Compost Resaca
Método	Capacidad de retención de agua $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$			
EN13041	0,268 b	0,840 a	0,700 b	0,572 a
DBOT	0,266 b	0,554 e	0,522 f	0,534 b
EMBDBOT	0,255 bc	0,756 c	0,596 e	0,538 b
EMBYESO	0,259 bc	0,755 c	0,664 c	0,568 a
LEGBRAS	0,242 c	0,688 d	0,634 d	0,523 c
NCSU	0,376 a	0,794 b	0,748 a	0,570 a
Prueba F	***	***	***	***

\*\*\*: diferencias altamente significativas ( $p < 0,0001$ ). Letras distintas por columna corresponden a diferencias significativas al 5% con el test de Tukey.



**Fig. 1.2.:** Capacidad de retención de agua en 4 materiales según 6 métodos

**Cuadro 1.15.:** Variabilidad de la capacidad de retención de agua expresada por su coeficiente de variación (CV). Error máximo cometido ( $\epsilon$  max) calculado para distintas probabilidades ( $P \leq 0,10$  y  $P \leq 0,05$ ) y número de repeticiones necesarios ( $\eta$ ) calculadas para errores ( $\epsilon$ ) máximos del 15%, 10% y 5%, según 6 métodos y en 4 materiales.

Material	Método	CV%	$\epsilon$ max		$\eta$		
			$P < 0,05$		$P < 0,05$		
			$P \leq 0,1$	$P \leq 0,05$	$\epsilon=15\%$	$\epsilon=10\%$	$\epsilon=5\%$
Perlita	EN13041	1,57	0,72	0,87	1	1	1
	DBOT	4,19	1,91	2,32	1	1	4
	EMBDBOT	5,42	2,47	3,00	1	2	6
	EMBYESO	6,51	2,96	3,60	1	2	8
	LEGBRAS	8,42	3,83	4,66	2	4	13
	NCSU	7,49	3,41	4,14	2	3	11
Turba Tierra del Fuego	EN13041	2,60	1,18	1,44	1	1	2
	DBOT	4,07	1,85	2,25	1	1	4
	EMBDBOT	8,67	3,94	4,79	2	4	14
	EMBYESO	2,91	1,32	1,61	1	1	2
	LEGBRAS	2,69	1,22	1,49	1	1	2
	NCSU	1,98	0,90	1,09	1	1	1
Turba europea	EN13041	4,52	2,05	2,50	1	1	4
	DBOT	4,62	2,10	2,56	1	1	4
	EMBDBOT	6,73	3,06	3,72	1	2	9
	EMBYESO	3,32	1,51	1,84	1	1	2
	LEGBRAS	2,89	1,31	1,60	1	1	2
	NCSU	2,16	0,98	1,19	1	1	1
Tierra+ Compost +Resaca	EN13041	4,64	2,11	2,56	1	1	4
	DBOT	7,47	3,40	4,13	2	3	11
	EMBDBOT	5,97	2,71	3,30	1	2	7
	EMBYESO	1,68	0,76	0,93	1	1	1
	LEGBRAS	4,25	1,93	2,35	1	1	4
	NCSU	1,04	0,47	0,58	1	1	1

### 1.3.5. Contenido hídrico volumétrico de 0-100 hPa de tensión

Los resultados del contenido hídrico volumétrico a 10 hPa de tensión (CRA) en los métodos EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS que miden varios puntos en el rango 0-100 hPa, fueron mostrados en el cuadro 1.15, mientras que los parámetros AFD, AR y ADD se muestran en el cuadro 1.16.

**Cuadro 1.16.:** Agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) según 4 métodos en 4 materiales.

Material	Método	AFD	AR	ADD
		.....cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> .....		
Perlita	EN13041	0,098 b	0,015 d	0,154 a
	EMBDBOT	0,130 a	0,040 b	0,086 d
	EMBYESO	0,094 b	0,026 c	0,140 b
	LEGBRAS	0,063 c	0,052 a	0,127 c
Prueba F		***	***	***
Turba de Tierra del Fuego	EN13041	0,449	0,056 c	0,335 a
	EMBDBOT	0,462	0,063 b	0,231 c
	EMBYESO	0,411	0,047 d	0,297 b
	LEGBRAS	0,274	0,130 a	0,284 b
Prueba F			***	***
Turba europea	EN13041	0,321 a	0,063 b	0,316 b
	EMBDBOT	0,258 b	0,053 b	0,285 c
	EMBYESO	0,309 a	0,057 b	0,295 c
	LEGBRAS	0,161 c	0,139 a	0,335 a
Prueba F		***	***	***
Tierra+ Compost+ Resaca	EN13041	0,130 b	0,029 b	0,412 a
	EMBDBOT	0,165 a	0,044 b	0,329 b
	EMBYESO	0,185	0,042 b	0,342 b
	LEGBRAS	0,054 c	0,116 a	0,347 b
Prueba F		***	***	***

\*\*\* diferencias altamente significativas entre métodos ( $p < 0,0001$ ) Letras distintas por columna corresponden a diferencias significativas al 5% con el test de Tukey. Los casilleros sombreados corresponden a valores que no pudieron ser comparados por heterocedasticidad de sus varianzas.

En TTF donde no se pudo aplicar el ANOVA, se hicieron pruebas t entre los valores de AFD de los métodos LEGBRAS y EMBDDOT y entre los métodos EN13041 y EMBYESO. Se encontraron ambos casos diferencias altamente significativas al 5% con  $p < 0,0001$  y  $p < 0,0004$  respectivamente. La variabilidad de AFD, AR y ADD se muestran en el cuadro 1.17.

**Cuadro 1.17.:** Coeficientes de variación de: Agua fácilmente disponible (AFD); agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) en 4 materiales según 4 métodos

Material	Método	AFD	AR	ADD
		coeficiente de variación CV%		
Perlita	EN13041	5,15	38,57	3,74
	EMBDBOT	7,44	17,40	9,84
	EMBYESO	5,14	22,65	8,18
	LEGBRAS	7,53	18,83	15,77
Turba de Tierra del Fuego	EN13041	6,31	36,23	3,80
	EMBDBOT	13,98	11,22	3,20
	EMBYESO	5,02	11,68	3,29
	LEGBRAS	23,47	41,77	7,33
Turba europea	EN13041	8,79	11,06	3,52
	EMBDBOT	13,57	20,97	4,70
	EMBYESO	5,17	21,04	4,32
	LEGBRAS	20,81	26,63	7,47
Tierra+ Compost+ Resaca	EN13041	24,91	31,19	5,85
	EMBDBOT	18,44	19,35	3,46
	EMBYESO	2,47	10,92	2,51
	LEGBRAS	78,88	31,28	10,14

En los 4 materiales, la determinación de AFD presenta la mayor variabilidad según LEGBRAS y la menor EMBYESO. En AR los CV no guardan una relación definida presentando en todos los casos CV considerados altos y en ADD la variabilidad sigue una tendencia similar a AFD con valores más altos en LEGBRAS y más bajos en EMBYESO y EN13041.

### 1.3.6. Porosidad de aire

Los valores de la CA se muestran en el cuadro 1.18 donde en los 4 primeros métodos la PT se calculó por fórmula, mientras que en LEGBRAS y NCSU la PT se calculó en forma más directa.



**Cuadro 1.18.:** Capacidad de aireación en 4 materiales según 6 métodos.

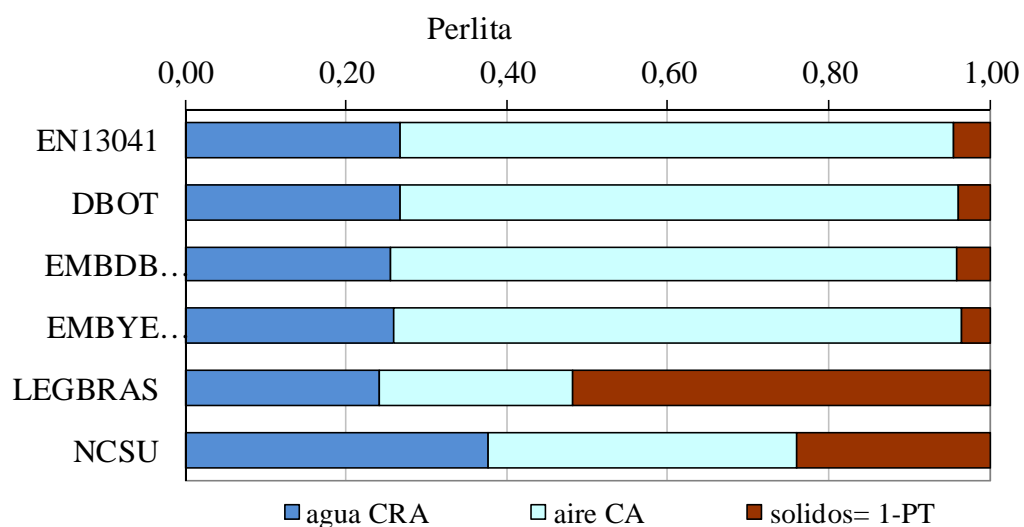
	Perlita	Turba Tierra del Fuego	Turba europea	Tierra Compost Resaca
Método	Capacidad de aireación ( $\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$ )			
EN13041	0,687 a	0,126 e	0,231 d	0,087 b
DBOT	0,695 a	0,412 a	0,410 a	0,138 a
EMBDBOT	0,703 a	0,210 c	0,339 b	0,136 a
EMBYESO	0,706 a	0,210 c	0,270 c	0,098 ab
LEGBRAS	0,240 c	0,244 b	0,155 e	0,099 ab
NCSU	0,384 b	0,174 d	0,147 e	0,041 c
Prueba F	***	***	***	***

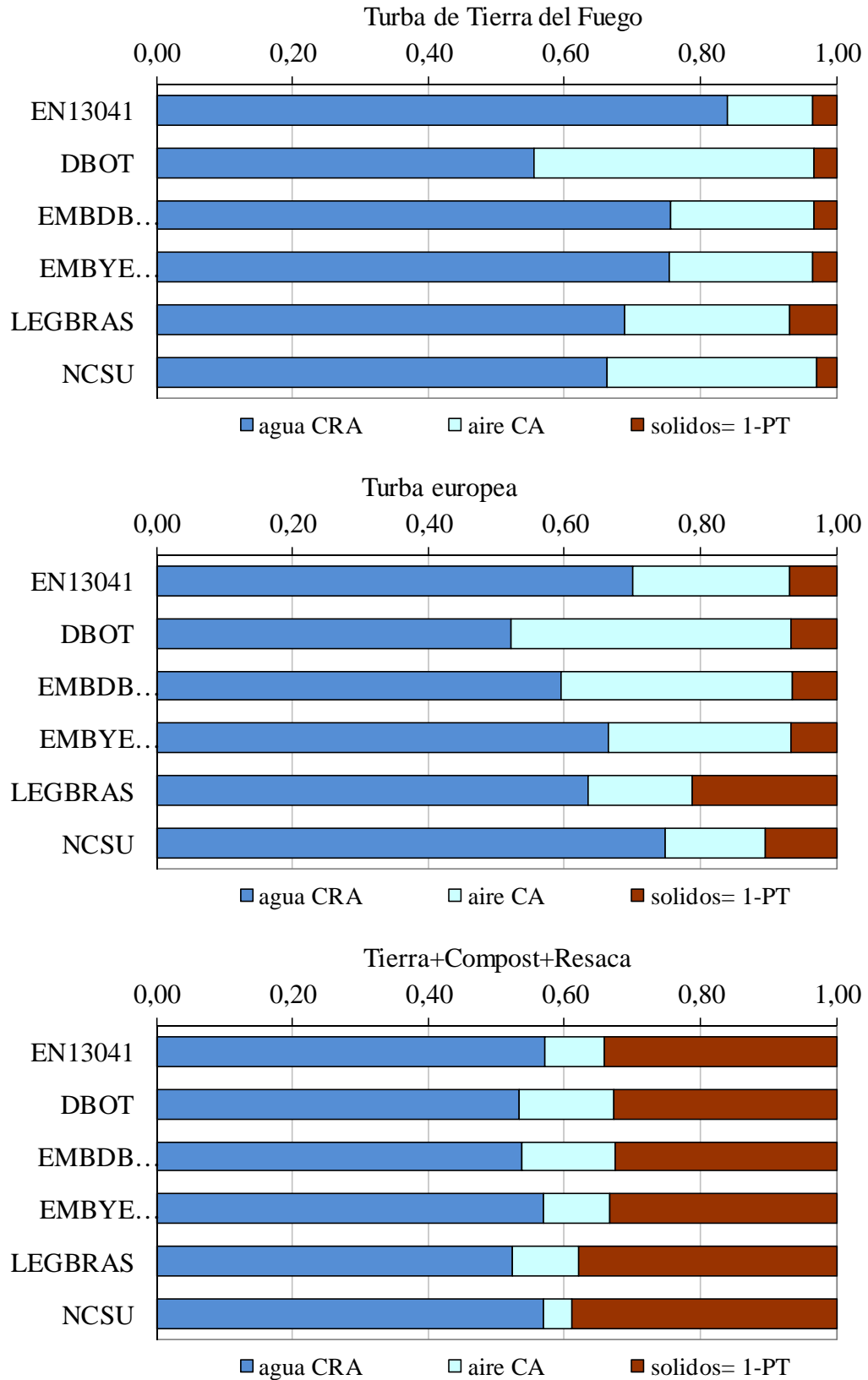
\*\*\* diferencias altamente significativas entre métodos con  $p < 0,0001$  . Letras distintas por columna corresponden a diferencias significativas al 5% con el test de Tukey.

Para la P se destacan valores más altos en los métodos indirectos respecto a los directos. Esta tendencia no se repite en los otros materiales.

### 1.3.7. Distribución de fases

Para una visualización conjunta de los resultados, se muestra en la fig 1.3 la distribución por fases sólida, líquida y gaseosa evidenciando el efecto método en la relación agua-aire a 10 hPa ( $PT = CRA + CA$ ). El volumen de sólidos representado en la figura no es un valor medido en forma independiente, sino que resulta de la diferencia entre 1 y el valor de la PT.



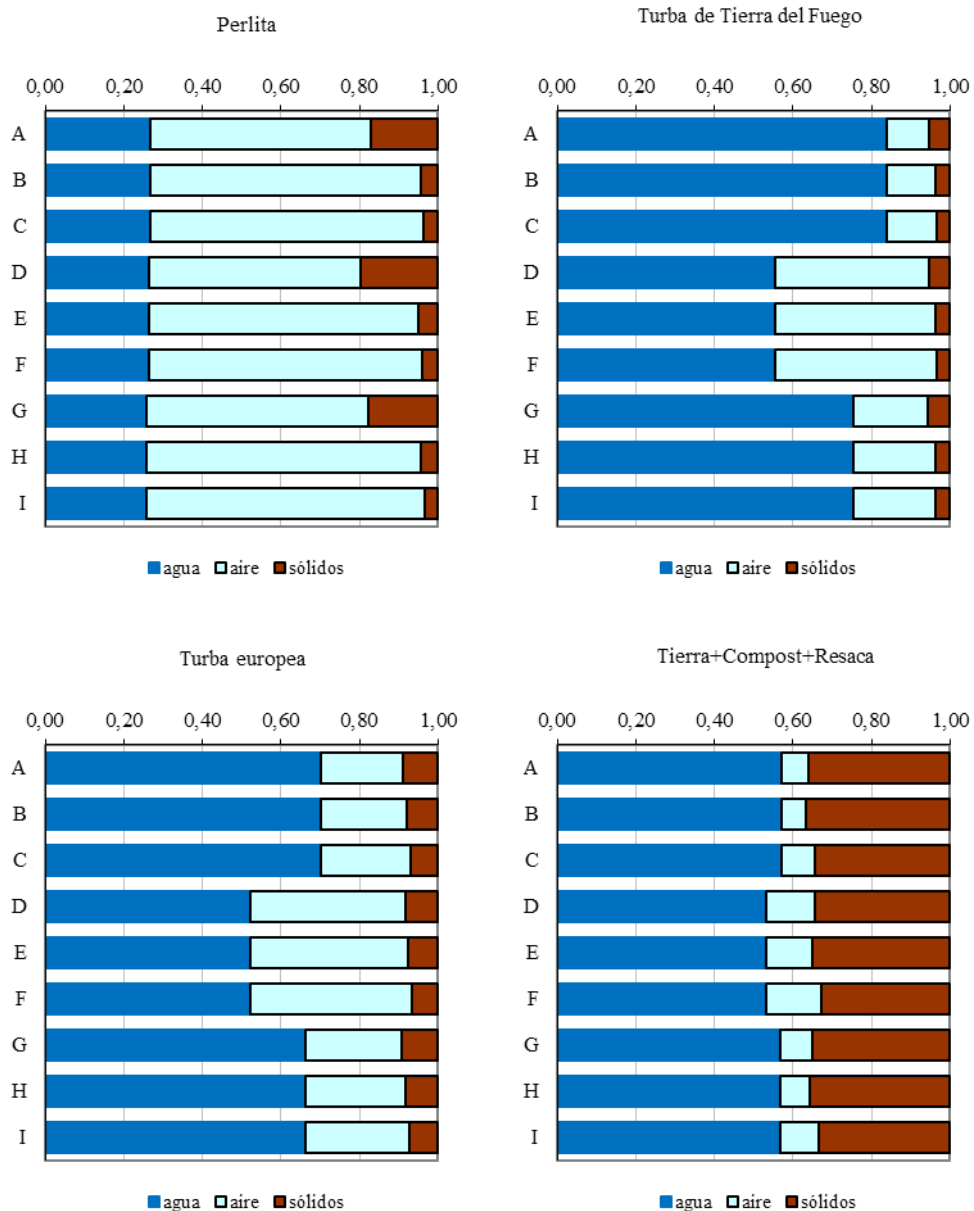


**Fig. 1.3.:** Distribución de fases en volumen: sólida, líquida y gaseosa en 4 materiales según 6 métodos

Por definición la PT es un parámetro relativo al volumen total de poros pero no da información referente a la relación agua-aire. Por ejemplo, en los métodos DBOT y

el EMBDBOT tienen la misma fórmula de cálculo de la PT y los mismos valores, por lo tanto numéricamente son iguales, sin embargo, presentan distinta relación agua-aire con valores diferentes de CRA y CA entre métodos en las dos turbas.

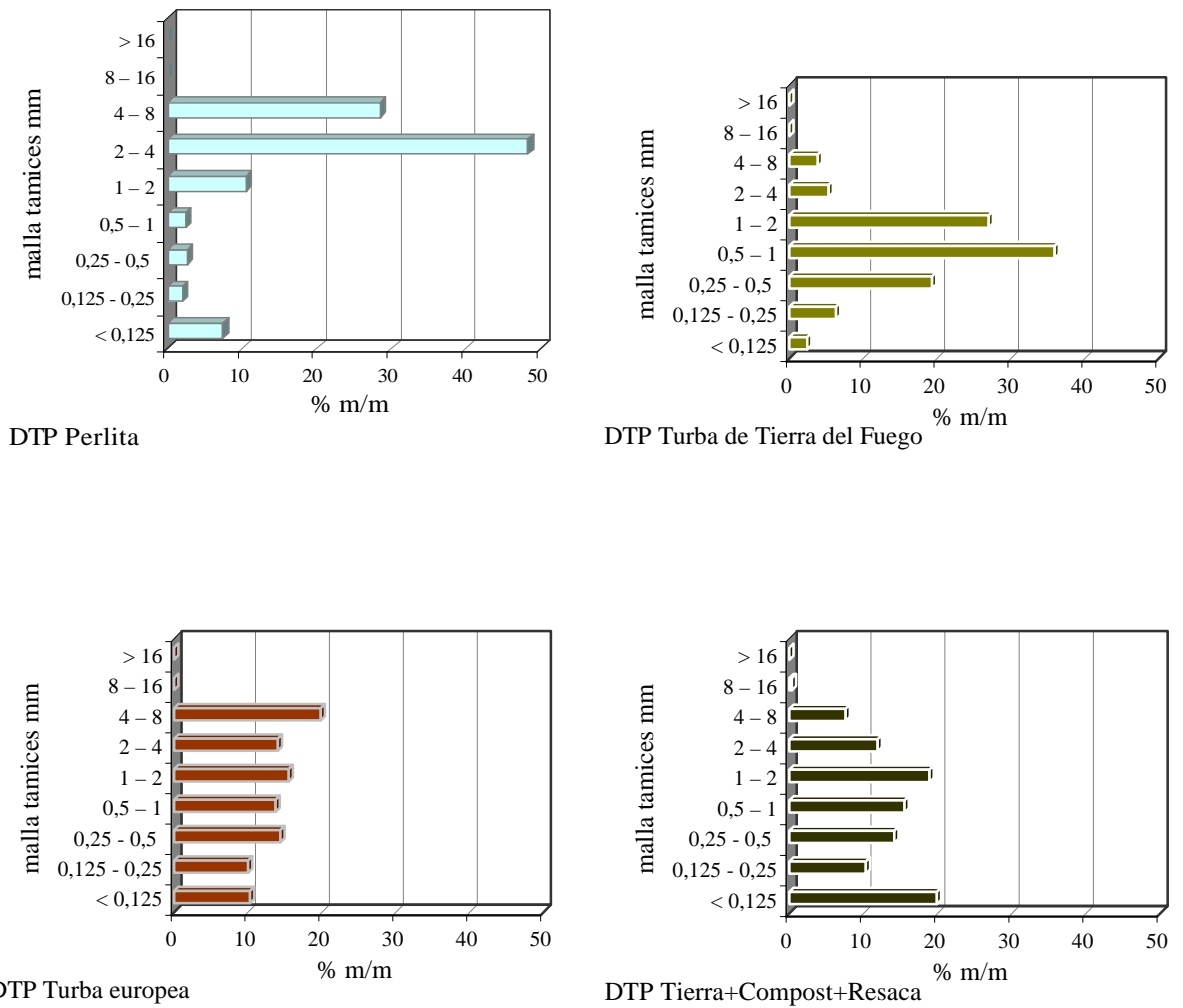
En la fig 1.4 se grafican los resultados en la PT por fórmula, mostrando la incidencia cuando se reemplaza la DP por los valores obtenidos según los métodos del matraz aforado con muestra entera y húmeda, muestra triturada y seca y por fórmula con muestra calcinada según los procedimientos del cuadro 1.11. Se observa que en el único material afectado en forma destacada fue P en los procedimientos donde se trató la muestra entera.



**Fig.1.4.:** Porosidad total calculada por fórmula y distribución de fases, en 4 materiales con los procedimientos: A , B y C : considerando la densidad de sustrato seca DS según EN13041 y la DP según métodos de matraz aforado con: A: muestra entera y húmeda (EH); en B: muestra triturada (T) y en C: cálculo por fórmula; D, E y F con DSs según DBOT y la DP según métodos de matraz aforado en D: con EH; en E: con T y en F: cálculo por fórmula; y G, H, I con DSs según EMBYESO y la DP según métodos de matraz aforado G: con EH; H: con T y I: cálculo por fórmula

### 1.3.8. Granulometría

Los resultados del análisis granulométrico, expresado como distribución de tamaño de partícula (DTP) y su variabilidad, se muestran en el cuadro 1.19 y en la fig 1.5 se grafican los correspondientes histogramas de frecuencias. En el cuadro 1.20. se muestran: el IG y los parámetros  $d_g$  y  $\sigma_g$ .



**Fig.1.5.:** Distribución de tamaño de partícula (DTP) según el método del tamizado de 4 materiales

**Cuadro 1.19.:** Valores medios de los porcentajes en peso relativos ( $P\% \text{ g g}^{-1}$ ) del material retenido en cada tamiz y su coeficiente de variación ( $CV\%$ ) en 4 materiales

Tamices intervalo mm	Perlita		Turba Tierra del Fuego		Turba europea		Tierra Compost Resaca	
	$P\% \text{ g g}^{-1}$	$CV\%$	$P\% \text{ g g}^{-1}$	$CV\%$	$P\% \text{ g g}^{-1}$	$CV\%$	$P\% \text{ g g}^{-1}$	$CV\%$
< 0,125	7	21	2	46	10	6	20	10
0,125 - 0,25	2	31	6	46	10	6	10	6
0,25 - 0,5	3	8	19	9	14	7	14	6
0,5 - 1	2	8	36	12	14	6	16	4
1 - 2	10	45	27	11	15	5	19	3
2 - 4	48	3	5	11	14	4	12	3
4 - 8	28	26	4	60	20	12	8	22
8 - 16	0	0	0	0	0	0	0,4	58
> 16	0	0	0	0	0	0	0	0

**Cuadro 1.20.:** Distribución de tamaño de partícula de 4 materiales expresada mediante el índice de grosor (IG), el diámetro medio geométrico (dg) y la desviación estándar geométrica ( $\sigma_g$ )

Material	IG %	dg mm	$\sigma_g$ %	Límite inferior mm	Límite superior mm
Perlita	87	2,769	2,40	1,15	6,65
Turba de Tierra del Fuego	51	0,851	1,82	0,47	1,55
Turba europea	49	1,251	3,35	0,37	4,20
Tierra+Compost+Resaca	38	0,997	2,41	0,41	2,40

El IG permitió en un solo indicador expresar el % en peso de las partículas iguales o mayores a 1 mm, valor que está relacionado con el tamaño que influye en una parte de la relación agua-aire a 10 hPa. Los resultados indican que P fue el material con alto porcentaje de partículas gruesas, que se relaciona con alta CA. En contraste, TCR material con mayor cantidad de partículas finas, se relaciona con baja CA.

Los indicadores dg y  $\sigma_g$  agregan información sobre la probabilidad de encontrar un diámetro determinado entre dos límites, lo que facilita indicar la mezcla más homogénea, que en este caso es TTF con la mayor cantidad de partículas en un rango 0,47-1,55 mm y por el contrario la más heterogénea, la P en el rango 1,15-6,65 mm.

Para verificar el efecto de la DTP en los materiales con la relación agua-aire, según cada uno de los métodos analizados, se hizo una regresión que correlaciona los IG de cada material con los valores de la CRA y CA. Las regresiones lineales dieron

coeficientes de correlación no aceptables, encontrándose alta correlación con una función polinómica de segundo grado (cuadro 1.21. A y B)

**Cuadro 1.21.:** Ecuaciones de la relación entre la distribución de tamaño de partícula del material expresada a través del índice de grosor y los parámetros A) capacidad de retención de agua (CRA) y B) capacidad de aireación (CA), según 6 métodos en perlita, turba de tierra del fuego, turba europea y tierra+compost+resaca. x= Índice de grosor en m/m; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación

A	Ecuaciones para 4 materiales	R <sup>2</sup>
y <sub>1</sub> = CRA EN13041	$y_1 = -6,3551x^2 + 7,3402x - 1,3073$	0,960
y <sub>2</sub> = CRA DBOT	$y_2 = -1,6405x^2 + 1,5086x + 0,1953$	0,989
y <sub>3</sub> = CRA EMBDBOT	$y_3 = -4,925x^2 + 5,5995x - 0,8879$	0,917
y <sub>4</sub> = CRA EMBYESO	$y_4 = -5,0248x^2 + 5,6606x - 0,8619$	0,978
y <sub>5</sub> = CRA LEGBRAS	$y_5 = -4,7448x^2 + 5,363x - 0,8326$	0,993
y <sub>6</sub> = CRA NCSU	$y_6 = -5,668x^2 + 6,6932x - 1,157$	0,997

B	Ecuaciones para 4 materiales	R <sup>2</sup>
y <sub>1</sub> = CA EN13041	$y_1 = 1,4594x^2 - 0,6164x + 0,1182$	0,967
y <sub>2</sub> = CA DBOT	$y_2 = -3,0163x^2 + 4,9025x - 1,2869$	0,996
y <sub>3</sub> = CA EMBDBOT	$y_3 = 0,2559x^2 + 0,817x - 0,2021$	0,940
y <sub>4</sub> = CA EMBYESO	$y_4 = 0,2906x^2 + 0,8658x - 0,2681$	0,983
y <sub>5</sub> = CA LEGBRAS	$y_5 = -1,6114x^2 + 2,3125x - 0,5521$	0,808
y <sub>6</sub> = CA NCSU	$y_6 = -0,8108x^2 + 1,7137x - 0,4934$	0,999

#### 1.4. DISCUSIÓN

En Argentina los grupos que están trabajando con sustratos han llegado al consenso de la importancia de la determinación de propiedades físicas de los materiales tanto para su elección, formulación y manejo. Sin embargo, no hay suficientes trabajos sobre las metodologías más apropiadas para la medición de las variables de interés en distintos materiales. Tampoco se encontró suficiente bibliografía internacional acerca sobre medidas de variabilidad en las determinaciones de los parámetros siendo escasas las posibles comparaciones.

Los resultados obtenidos en este trabajo aportan a un proceso incipiente en el país en el estudio de las metodologías. Los protocolos seguidos, los criterios de evaluación de los métodos, sus limitaciones, la interpretación comercial o agronómica de los resultados, un lenguaje de términos técnicos, contribuyen al conocimiento en esta disciplina. Sin embargo dada la diversidad de materiales que pueden ser usados para la formulación de sustratos, se deberán probar los métodos en mayor número de materiales en futuros estudios.

La DS es uno de los parámetros más usados en la caracterización del sustrato ya que además de estar relacionado en la mayoría de los materiales de manera inversa con la PT, sus valores reflejan la aplicación que pueda tener ese material respecto al tamaño del contenedor.

En una primera instancia se compararon el IN 17 y EN 40 que permiten determinar la DSh. Los valores mayores en IN 17 que en EN 40 y la alta equivalencia entre los métodos para TTF, TKL y TCR concuerdan con los obtenidos por Baumgarten (2002; 2004). Baumgarten (2004) analizó la DSh en 20 sustratos diferentes según el método VDLUFA (en el cual se basa el IN 17) y el EN 40 para estudiar su efecto en la expresión de los resultados del contenido de nutrientes. Obtuvo una alta correlación entre los métodos, y los valores obtenidos con el VDLUFA (IN 17) fueron un 25% mayores que los obtenidos con EN 40, resultados similares a los que se encontraron en este trabajo.

La mayor variabilidad en el IN 17 para P, pudo deberse a la baja DS del material sumado al alto porcentaje de partículas mayores a 4 mm (28%), que dificultó el enrase y la lectura en la probeta graduada, coincidiendo con Fermino (1996) que resalta que el método IN 17 dificulta la determinación de la DSh en materiales muy leves compuestos de macro partículas, como el residuo de algodón de la industria del hilo, viruta de pino sin compostar y residuos domiciliarios de cáscara de ananá.

La humedad inicial de la muestra es uno de los factores que afecta los resultados de la DS porque incide en el empaquetamiento de las partículas y por lo tanto en el volumen que ocupan en el recipiente. Este factor afecta la medida dependiendo del método aplicado (Verdonck et al. 1978, Fermino 2003, Fonteno y Harden 2003). En este trabajo se comparó sólo la DSh y DSs con distintas humedades según IN 17, ya que cuantificar el efecto en todos los demás métodos sería tema para una futura investigación. Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de estandarizar la humedad inicial de la muestra en la determinación de la DSh y de la DSs ya que ambas fueron afectadas. En ese sentido, se destaca el procedimiento de pretensionado a 50 hPa y doble saturación del EN13041, como forma de estandarizar la humedad de las submuestras.

En el texto de la legislación brasilera IN 17 para la determinación de DSs, se refiere a realizar el análisis con humedad de la muestra como es recibida en el laboratorio. En ese sentido Spier et al. (2008) determinaron la DSh y DSs con muestra inicial con la humedad recibida y la compararon con las densidades obtenidas con la humedad corregida al 50 % v/v en cáscara de arroz carbonizada, sustrato comercial a base de corteza de pino y en sustrato comercial a base de turba, resultando más altos los valores de DSh con mayores contenidos de humedad inicial en las muestras y con la humedad corregida al 50% v/v dieron menor variabilidad entre distintos operadores. De los datos se deduce una relación inversa entre la DSs y la humedad inicial. Estos resultados coinciden con los encontrados en el presente trabajo.

Fermino (2003) recomienda una humedad inicial de 50% y considera que en la práctica, en los sustratos que estudió a base de turbas y cortezas de pino, se puede reconocer visualmente este valor aproximadamente cuando al comprimir la muestra entre los dedos se mantiene aglutinada sin formar terrón ni tampoco liberar agua. Sin embargo, TTF y TKL presentaban una humedad gravimétrica inicial de 75 % y 58 % respectivamente, pero ambas cumplían con la recomendación visual de Fermino (2003). El TCR se analizó con una humedad inicial del 12% m/m, ya que con mayor humedad tomó aspecto y consistencia de lodo. Esto sugeriría para la estandarización, una humedad inicial en las muestras que depende del tipo de material.

El efecto de la humedad en DSh que se traslada a la determinación de la DSs, afecta la compactación del material ya que modifica la cantidad de sólidos en la muestra y por

lo tanto su masa seca en el mismo volumen. La diferencia encontrada en un menor CV cuando aumenta la humedad inicial puede explicarse considerando que la humedad de las partículas tiene un doble efecto por un lado ejercen un peso mayor unas sobre otras y además el agua que las rodea aumenta la adhesión entre las mismas provocando cierta agregación e impidiendo que las partículas reboten durante la caída de la probeta disminuyendo la variabilidad coincidiendo con resultados de Fermino (2003).

Verdonck et al. (1978) estudiaron la influencia de la humedad inicial de la muestra de turbas, pinocha y vermiculita en la DSs aplicando el método DBOT, recomendando la estandarización en 50-60% v/v.

Los dos factores, la humedad inicial y la compactación interactúan en su efecto. Los valores más adecuados para la estandarización parecerían ser los que se acercan a las condiciones óptimas de enmacetado para minimizar el cambio de volumen en el sustrato durante el cultivo, cuestión que debería profundizarse en otros ensayos.

Los resultados en la correlación entre métodos para DSs evidencian la importancia del factor compactación ejercida sobre la muestra. Sin embargo, estos resultados sólo marcarían tendencias dado el bajo número de materiales analizados.

Los valores más bajos de la DSs según EN 40 en TTF, TKL y TCR se asocian a su procedimiento de aplicar una compactación leve sin saturación en el material. En ese sentido, Fermino y Kämpf (2005) compararon el efecto en la densidad de empaquetamiento de tres compactaciones para el llenado del portamuestra en una turba procedente de Brasil, con humedad gravimétrica de 62, 69 y 73%. Midieron la DSs y otras variables relacionadas con la acomodación de las partículas: sin compactación, según el EN 40 y según el IN 17. Se encontró para una misma compactación (método) una relación inversa entre la DSs y la humedad gravimétrica inicial, y una DSs en IN 17 > que en EN 40 para un mismo valor de la humedad, coincidente con los resultados para turbas del presente trabajo. Las autoras interpretaron agrónomicamente las DSs según EN 40 con 73% como valores apropiados para el llenado de bandejas multiceldas y cajoneras, teniendo en cuenta la baja compactación del procedimiento y la DSs con menor humedad inicial según el IN 17, para contenedores de mayor altura.

Los valores más altos de DSs en TTF, TKL y TRC según EN13041 y EMBYESO secundados por DBOT, responderían a una mayor acomodación de las partículas debido al procedimiento de saturación. Durante la inmersión las partículas se van acomodando modificando su empaquetamiento. En un primer momento las más leves, con densidad mucho menor que del agua, tienen tendencia a flotar por acción del empuje del agua de abajo hacia arriba, efecto acentuado en materiales que presentan algún nivel de hidrofobicidad. Luego que las partículas adsorben y absorben agua, se produce un asentamiento que reduce el espacio poroso y aumenta la masa sólida en el cilindro inferior portamuestras.

Sin embargo P parece no cumplir ninguna de estas consideraciones. El efecto de la saturación que produce una compactación natural, tuvo mayor incidencia en materiales orgánicos fibrosos puros y compresibles como TTF y TKL o con mezclas como TCR, que en el material inorgánico granular P, a través del empaquetamiento de las partículas. Los valores de la variabilidad en DSs según EN13041 se mantuvieron inferiores a los informados por Wever y Winkel (2004) en interlaboratorios del CEN en los años 1995, 2000 y 2001 para materiales similares y por de Kreij y Wever (2005) para turbas.

El CV más elevado que en general presentaron EN13041, DBOT y EMBYESO se puede asociar con la utilización de placas porosas para el tensionado. En cada método se utilizó un dispositivo para medir cada repetición. En el caso de los lechos de arena hubo una variabilidad entre ellos, por la inevitable naturaleza heterogénea de la arena y diferencias propias de la construcción. A pesar de usarse arenas calibradas, pequeñas



variaciones en la granulometría del material influyen en su empaquetamiento dentro de los recipientes. La posible formación de burbujas de aire atrapado modifican la resistencia al paso del agua afectando la conductividad hidráulica a flujo saturado ( $K_s$ ), que afecta la homogeneidad de la superficie de tensionado y el tiempo de llegada al equilibrio para cada dispositivo. En EMBYESO, las placas de yeso se renovaron constantemente ya que se mantienen con óptimas condiciones de tensionado durante 4 ó 5 análisis completos, dependiendo del material, por lo que su confección artesanal se consideró como fuente de variabilidad entre las repeticiones. Sin embargo, se verificó la ventaja de que durante la puesta a punto, calibración y mantenimiento el espacio poroso no se modifica dado la rigidez del yeso. En los lechos arena, la modificación continua del acomodamiento de las partículas en el espacio poroso y la posibilidad de formación de burbujas de aire, se puede considerar una desventaja, por las dificultades y demoras que presenta la puesta a punto, calibración y mantenimiento y la mayor incidencia en la variabilidad entre repeticiones tensionadas en distintos lechos.

La arena calibrada con una granulometría más fina del EN13041 hizo que este método fuera más demorado en llegar al equilibrio de tensión en 10 hPa que en DBOT, que utiliza arena más gruesa. Para determinar cual sería la calibración de la arena más recomendable, se tuvo en cuenta que por tratarse de un sistema saturado a tensiones negativas la granulometría debe ser tal que la presión de entrada de aire sea mayor que la succión aplicada, para garantizar que no entre aire al sistema. Sin embargo, se debió llegar a una solución de compromiso ya este requerimiento es contrario a la necesidad de la corta duración de los análisis. Cuando se optó por una excesiva reducción en el tamaño de partícula de la arena para obtener una alta presión de entrada de aire, disminuyó mucho la conductividad hidráulica del medio y por lo tanto los tiempos de espera para llegar al equilibrio fueron muy demorados, siendo esta una limitación del método.

Por lo tanto, la calibración y estandarización de la granulometría del material utilizado como placa porosa debe ser respetado por los distintos laboratorios que armen artesanalmente sus propios dispositivos, para poder comparar resultados.

Los parámetros relacionados con contenidos hídricos correspondientes a todas las tensiones aplicadas, fueron afectados también por los factores enumerados precedentemente, como el efecto de la saturación-compactación en los materiales y los dispositivos de tensión, pero además se agregan otras diferencias en los procedimientos que afectan en mayor medida al parámetro CRA, como ser el punto de referencia a partir del cual se considera el tensionado, la presencia o no del cilindro superpuesto y el volumen de muestra.

Los resultados muestran una alta variación de CRA entre métodos en las turbas TTF y TKL. Los menores valores se presentaron en el método DBOT, cuya altura de tensionado (10 cm) se toma desde la base del cilindro, en contraste con los demás métodos en que se toma desde la mitad del cilindro inferior, excepto NCSU. En este último, no hay dispositivo de tensión sino drenaje libre a 7,6 hPa (7,6 cm) por lo tanto, la superficie de la muestra está tensionada a 7,5 hPa, mientras que en DBOT la superficie de la muestra resulta a 14 hPa, diferencia que se evidencia en los valores de CRA. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos publicados por Fonteno y Harden (2003) para materiales similares. En EN13041 los mayores contenidos de agua pueden deberse al efecto de la doble saturación y el pretensionado a 50 hPa, que causa una  $H$  inicial alta en estos materiales retenedores de agua.

En estos materiales, TTF y TKL, que además presentaron una importante pérdida de volumen por subsidencia, el método LEGBRAS subestima los valores de los contenidos hídricos, tanto en la CRA como en AFD. Al no utilizar un cilindro superpuesto, el

volumen de material se reduce durante el procedimiento y se introduce un error en el cálculo de las variables al referir los volúmenes de agua al volumen total del cilindro. Esta sería una limitación del método para ese tipo de material. Una posibilidad de corrección sería medir la reducción del volumen del material e introducirlo en el cálculo. En ese sentido, el NCSU, que tampoco trabaja con material superpuesto, resuelve el problema llevando la muestra a una humedad inicial tal, que no produzca reducción de volumen por subsidencia durante el procedimiento, aunque este paso aumenta el tiempo de duración del análisis. Este efecto no se produjo en P y en TCR, materiales que presentaron una subsidencia despreciable.

Todos estos factores tuvieron distintos efectos en P y TCR. Los resultados reflejan en P, un bajo efecto de los distintos procedimientos sobre la muestra inicial y además al ser un material macroporoso y con valores bajos de CRA, la variabilidad entre métodos se puede explicar por el escaso volumen de agua retenida en la perlita. Los valores muy bajos de AFD, AR y ADD en la P fueron coincidentes con los hallados por Abad et al. (2005) para fibras de coco gruesas. Los autores explican que en materiales macroporosos, los métodos que tensionan la muestra con una columna de agua, subestiman los resultados por la falta de contacto que se produce entre el agua y el sustrato debido a la alta presencia de aire en los poros. En TCR, las tensiones aplicadas no fueron suficientes, en ninguno de los métodos, para remover el agua retenida debido a la gran cantidad de microporos, siendo los valores de la CRA muy próximos a los de saturación y por lo tanto con muy baja CA.

La variabilidad encontrada en CRA, AFD, AR y ADD según EMBDBOT son similares a las informadas por Noguera (1999) en dos tipos de fibra de coco. Los valores de la variabilidad en CRA y CA según EN13041 resultaron similares a los informados por Wever y Winkel (2004) en interlaboratorios del CEN en los años 1995, 2000 y 2001 para materiales similares y por de Kreij y Wever (2005) para turbas.

El parámetro PT es quizás el más controvertido en su determinación, porque depende del tamaño y del tipo de poro que presente el material. Los métodos indirectos por fórmula relacionan la DSs según cada método, con la DP calculada con el valor de la MO por incineración y por lo tanto el material pierde su estructura original. Los resultados de PT con valores muy cercanos entre métodos, se deben a la similitud en el cálculo, comparados con los métodos directos que se basan en el concepto de definir la PT como el volumen de agua que ocupa los poros cuando un determinado volumen de material está saturado (Fonteno 1993) y realizando una medición directa de los volúmenes de agua.

Las distintas formas de calcular la DP pueden explicar en parte estas diferencias. Los distintos tratamientos de la muestra inicial indican la existencia de dos grupos de métodos de medida: por un lado, los métodos de desplazamiento de fluido con tratamiento de partícula entera y por otro el método de incineración y el de matraz aforado con tratamiento de muestra triturada. Se puede considerar que los dos grupos de métodos miden variables distintas. En el caso de muestra entera, los valores están referido al volumen accesible al intercambio aire-agua. En el caso de incineración y tratamiento con muestra triturada el valor de la DP está referido al volumen ocupado, en sentido estricto, por el material sólido.

Las diferencias de la DP en P con muestra entera (Vence et al. 2010a) coinciden con los encontrados por Martínez et al. (2006) en perlita. Terés (2002) encontró valores mayores de la DP por MO que con métodos picnométricos con muestra entera en cortezas de pino compostadas clasificadas con tamaños de 1 a 6 mm, siendo mayor la diferencia a medida que aumentaba el tamaño de la corteza. Valenzuela (2009) analizó cáscara de arroz, sustrato a base de turba, corteza de pino y arena con los métodos de

matraz aforado con muestra entera y por fórmula, obteniendo valores mayores por fórmula que por picnometría en los materiales orgánicos y no detectó diferencias en la arena, material inorgánico sin poros internos y de alta DSs. Estas diferencias, coincidentes con las del presente trabajo, sugieren la existencia de poros ocluidos en los materiales, que se manifiestan en las muestras enteras como sólidos pero que son destruidos en las muestras calcinadas.

En el caso de TTF y TKL los resultados reflejan que la energía entregada al sistema mediante la ebullición en el método del matraz aforado, consigue resolver parte de la hidrofobicidad que presentan estos materiales secos, aún en TTF que no posee agregados de agentes humectantes. No obstante, la diferencia entre los valores con muestras de partículas enteras y trituradas podría indicar aún la presencia de poros inaccesibles al agua en las turbas. En el sustrato TCR a base de tierra, los valores muy cercanos en la DP medida por los 4 métodos se podrían explicar por el tipo de poros que presenta la muestra con partícula entera, con muy baja proporción de poros inaccesibles al agua.

Respecto a la variabilidad en la DP entre métodos, el estudio de reproducibilidad indica una tendencia inversa entre los CV y la DSs, correspondiendo los CV más bajos a los materiales que tiene DSs más alta y cercana a la densidad del agua. Esto se relaciona a que uno de los factores de alta variación en las medidas de los métodos de desplazamiento de fluidos es la flotabilidad de los sustratos livianos que dificultaron la lectura en el aforo del matraz, coincidente con Terés (2002). Si es necesario aumentar el número de repeticiones para alcanzar mayor precisión, esto podría considerarse una limitación como método de rutina.

Los métodos picnométricos para calcular la DP y su reemplazo en la fórmula de la PT, sería una opción para acercar los valores a los resultados empíricos, teniendo en cuenta los poros que efectivamente participan de la relación agua-aire. Sin embargo, al ser la PT calculada por fórmula resulta poco sensible a la variación de la DP (Terés 2002), encontrándose diferencia sólo en la P que tiene alto contenido de poros ocluidos. Los mismos resultados fueron obtenidos por Martínez Farré (1992) y Terés (2002). Esta porosidad se puede considerar como la porosidad total efectiva (PTE). Si se sospecha la existencia de poros cerrados, se recomienda realizar el análisis de la DP con las 2 variantes de preparación de la muestra entera y triturada, obteniéndose así la PT con la muestra triturada y una PT con muestra entera que resultará con un valor menor y es considerada la porosidad total efectiva (PTE) o sea el volumen de poros donde realmente entra el agua cuando se satura, acercarse a una interpretación agronómica del parámetro. Si se calcula la diferencia entre  $PT - PTE$  se obtendrá el parámetro porosidad ocluida, que relaciona el volumen de poros ocluidos con el volumen total.

En los métodos directos para la determinación de PT, se tiene en cuenta el agua que interviene en la saturación completa del material. En ese sentido, los resultados en PT obtenidos según el NCSU, coinciden con los publicados por Drzal et al. (1999) de los que se desprende una PT menor en la forma directa que por fórmula, en sustratos basados en perlita y corteza de pino y sin diferencia para un sustrato a base de tierra. Sin embargo, cuando la muestra se satura y la tensión se aproxima a cero, el volumen de agua a menudo puede ser menor que la PTE principalmente debido a la presencia de aire atrapado (Klute y Dirkesen 1986) y algunos autores han encontrado una humectación equivalente al 80-90% de la PTE (Klute 1986, Wallach et al. 1992a y b). En el presente trabajo sólo se han encontrado diferencias en P y TKL. En LEGBRAS, el procedimiento de medir el volumen de agua en saturación resultó delicado y requiere mucha práctica. Esta dificultad se acentuó en la P que es un material con alto drenaje rápido, explicando las variabilidades más altas.

Un factor a considerar es la incidencia de la heterogeneidad del material en los resultados obtenidos cualquiera sea el método utilizado. Sin embargo los métodos no permiten cuantificar la parte de variabilidad debida a esta característica del material de la debida a los errores experimentales y de procedimientos. El aumento en el número de repeticiones disminuye la incidencia de los errores experimentales aleatorios, pero la variabilidad producida por la heterogeneidad sólo se puede reducir en parte en el procedimiento de preparación de la muestra. En ese sentido, los procedimientos deben tener en cuenta reducir al máximo los errores experimentales, ya que en la rutina de un laboratorio, la solución de aumentar el número de repeticiones para mejorar la precisión debe usarse en casos límites o en métodos simples ya que resulta en la necesidad de más recursos, tiempo, materiales y mano de obra.

Se podrían discriminar las componentes del error en caso que se disponga de un sustrato que se pueda considerar uniforme usado como material patrón. Verdonck et al. (1995) propusieron el uso de tres sustratos como patrón para control de calidad y calibración en mediciones de laboratorio. La elección priorizó la estabilidad en las propiedades biológicas y físicas en el tiempo y la distinta relación agua-aire a 10 hPa. Por ello, los materiales eran inertes y con distintos tamaños de partícula. Esto contradice en parte, los resultados obtenidos en este trabajo en CRA, CA y DTP, ya que se observó que, la parte del efecto método que depende del material, está relacionada en mayor medida con el origen orgánico u inorgánico y con el tipo de poro, que con el tamaño de partícula. Por lo tanto, si el material patrón fuera un sustrato inorgánico inerte sin porosidad interna, puede no ser sensible a los efectos del procedimiento y no detectar los errores experimentales que sí afectarían a otros materiales. Por el contrario, si el patrón fuera orgánico tendría corta validez debido a su posible inestabilidad de sus propiedades en el tiempo. No cabe duda de la utilidad de los patrones en el control de calidad, por lo que se deberían investigar posibles soluciones al respecto.

Las funciones polinómicas de segundo grado obtenidas según EMBDBOT, al comparar las relaciones entre CRA y CA con el IG en los 4 materiales, no coincidieron con los valores encontrados por Abad et al. (2005) que obtuvieron una alta correlación lineal entre CRA, CA y el IG en diferentes tamaño de partícula de fibras de coco. Esto podría deberse a que los resultados de los ensayos granulométricos ayudan a explicar la parte originada por el tamaño de partícula, pero no así diferencias en las formas de partícula, características de los poros y comportamientos en la interfase sólido-agua-aire propios de cada material, limitación que se acentúa en sustratos formulados con mezclas de materiales. Sin embargo, se encontraron resultados similares en Marfà et al. (1993) y Orozco (1995) para perlita de granulometría similar a la de P, en relación a la alta CA.

La variabilidad en los resultados es un factor que incide en la puesta en valor del método ya que el número de repeticiones aumenta el trabajo y por lo tanto el costo y en algunos casos, la duración del ensayo. La amplitud en los resultados disminuye la precisión y la probabilidad de que el valor se encuentre dentro de un intervalo considerado aceptable. En este sentido, los estudios de reproducibilidad realizados sobre la DSs, DP y CRA ayudaron a la toma de decisiones para la estimación de las repeticiones, sin embargo, las recomendaciones son sólo orientativas, ya que podrían no cumplirse en otros materiales. El ajuste en la elección del número de repeticiones como rutina de laboratorio dependerá de cada método y de cada material.

Los tiempos requeridos por los distintos métodos variaron según la complejidad de los procedimientos y del número de parámetros que determinan. En el IN 17 y el EN 40 se obtuvo la DSh en menos de una hora más el tiempo de secado para la DSs. Mientras que las mediciones en EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS la DSs y CRA demoraron una semana que se extendió a dos para la medición de la

retención de agua en varias tensiones. Sin embargo mientras que en IN 17 y EN 40 se determina sólo los parámetros DSh y DSs en los segundos se obtuvo una información más completa de los parámetros físicos de caracterización del material. Aplicando los métodos DBOT y NCSU se obtuvieron la DSs y CRA que proveen una información útil tanto para decidir su aplicación en el tamaño de contenedor como para la formulación de las mezclas. El NCSU tuvo la ventaja de obtener los resultados en 24 horas, mientras que el DBOT demoró 1 semana. Sin embargo, este último presenta la ventaja del bajo costo de la construcción artesanal del dispositivo de tensión, mientras que el NCSU utiliza un equipamiento estandarizado importado de mayor costo.

Ninguno de los métodos necesitó personal especializado, ya que con un entrenamiento básico se consiguieron buenos resultados. Sin embargo algunos pasos dentro de los procedimientos resultaron con más variabilidad, como la lectura de enrase del material en la probeta y en el matraz aforado y la manipulación de las muestras en los cilindros para medir volumen de agua en saturación. Por ello los métodos IN 17, LEGBRAS y del matraz aforado presentaron mayor variabilidad entre operadores, aunque estas diferencias observadas no fueron cuantificadas en el presente trabajo. Los métodos que utilizan lechos de arena como dispositivos de tensión tuvieron la desventaja de requerir un mantenimiento y puesta a punto más engorrosos y demorados debido a la formación de burbujas de aire en su interior.

Todos los métodos analizados, que ya son métodos de referencia en otros países, tuvieron resultados acorde a los usos para los que fueron diseñados y los objetivos considerados en su desarrollo. Se analizaron sus ventajas y limitaciones como contribución a la toma de decisiones que se deberán realizar en Argentina.

## 1.5. CONCLUSIONES

La hipótesis uno se acepta, en parte, ya que los resultados de los parámetros físicos determinados con distintos métodos, presentaron diferencias que dependieron de la variable medida y del tipo de material. No se pudo establecer una equivalencia entre los métodos para todos los materiales ensayados. Los procedimientos con la muestra inicial no afectaron del mismo modo a todos los materiales, ya que dependió de sus características, como tipo y tamaño de poro, además de tamaño y compresibilidad de las partículas. Se puede concluir que:

- El método EN13041, donde la submuestra resulta con una humedad inicial mayor, por el procedimiento de tensionado inicial y doble saturación, afectó de manera distinta a los materiales y los parámetros: en las turbas y en la tierra la DSs y la CRA fueron las más altas y en la perlita la DSs fue la más baja y la CRA similar a los demás métodos
- La compactación tuvo un efecto lineal para la DSh, donde el método con mayor compactación externa IN17 dio mayores valores que el EN40.
- En las turbas, los métodos con procedimiento de saturación de la muestra durante 48 h, sumado al doble cilindro tuvo mayor efecto en el aumento de la DSs que la compactación mecánica externa.
- La predicción de una relación directa: más DSs daría mayor CRA, sólo se cumplió parcialmente, ya que DBOT dió altas DSs y los CRA más bajos en todos los materiales.

- La medición de la CRA es más compleja que la DSs y entre los distintos métodos hay mayor número de factores que afectan los resultados como los dispositivos de tensión y la altura desde la cual es ejercida la tensión aplicada.
- En los parámetros AFD, AR y ADD no se pudo establecer una relación lógica entre los tratamientos.
- Los métodos para determinar PT por fórmula, dan resultados muy precisos, el cálculo es simple y por lo tanto tiene ventajas para una interpretación comercial de los resultados, sin embargo se realiza sobre una muestra que no mantiene las propiedades que caracterizan a los materiales. En el caso de la perlita hay una sobrevaloración de la PT, respecto a lo que ocurre con el material intacto.
- Los métodos directos para medir PT, tienen menos precisión pero son más exactos ya que consideran el volumen de agua que efectivamente penetra en los poros y el dato tiene una interpretación agronómica.
- El análisis granulométrico dado por la DTP, con tablas o histogramas, se complementa con la información brindada por los indicadores IG, dg y  $\sigma_g$ , que con un solo número y de una manera rápida dan una información orientativa valiosa aunque no muy precisa sobre los tamaños de partículas. Es un buen comienzo a la hora de decidir que posibles combinaciones analizar para la formulación de sustratos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se puede decir que se pudo probar la segunda hipótesis, con las siguientes recomendaciones para los materiales ensayados:

- El método recomendado para la medición de la DS<sub>h</sub> es el IN 17, por su simplicidad, rapidez, bajo costo del equipo y puede ser usado tanto en el laboratorio como a campo por cualquier operador. Sin embargo, cuando se utiliza para la medición de la DSs el resultado presenta marcada influencia de la humedad inicial de la muestra. Los resultados pueden ser usados como información agronómica
- En el caso de que, como rutina de laboratorio, sólo se determine un par  $\theta$ - $\psi$ , se recomienda el método NCSU. Determina la DSs, la CC, la PTE, la PA, siendo las 2 últimas medidas en forma directa. Este método tiene la fortaleza de poder realizarse en el día, y puede usarse también a campo. La desventaja es, que para materiales no analizados habitualmente, es demorado encontrar la humedad inicial requerida en el procedimiento. Los parámetros que estima son útiles para la elección del tamaño de contenedor recomendado para ese material.
- El método europeo EN13041, contempla la medición de múltiples pares  $\theta$ - $\psi$ , además de obtener la caracterización física clásica completa del sustrato. Se recomienda este método para la determinación de ADF, AR y ADD, y todos los pares  $\theta$ - $\psi$  necesarios para trazar las curvas de

retención de agua. Su fortaleza radica en que estandariza la preparación de la muestra y así minimiza el efecto operador y el del tipo de material y que los resultados se pueden comparar con los de gran parte de la bibliografía europea. Sin embargo, su duración es prolongada y la puesta a punto y el mantenimiento para garantizar la ausencia de burbujas de aire en los lechos de arena calibrada para 100 hPa, es dificultosa y tediosa. Se recomienda utilizar en el cálculo de la PT por fórmula, la DP por picnometría con partícula entera para determinar la PTE , para una mejor interpretación agronómica

En cuanto a la variabilidad todos los métodos tuvieron una precisión apropiada, siendo los estudios de reproducibilidad una buena herramienta para la estimación del número de repeticiones de rutina.

## CAPITULO 2

Parámetros estáticos y dinámicos de sustratos según cuatro métodos de laboratorio:  
respuesta de la planta a riegos basados en los resultados y comparación con los  
obtenidos *in situ*



## 2.1. INTRODUCCIÓN

### 2.1.1. Disponibilidad de agua: Concepto y parámetros que la definen

Diferentes autores coinciden en considerar que el contenido hídrico de los sustratos debe mantenerse en el intervalo de potencial mátrico o tensión  $\psi$ , entre 10 y 50 hPa para obtener una aceptable respuesta de la planta (De Boodt et al. 1974a, Verdonck et al. 1981). Sin embargo no siempre la productividad vegetal depende de  $\psi$  y parece que  $\psi$  no es la única variable y a menudo no es la más determinante (Orozco 1995). Se han encontrado descensos en la producción vegetal al aumentar la tensión en el sustrato (De Boodt y Verdonck 1972, Marfà et al. 1984, Rivière et al. 1997) sin embargo, Karlovich y Fonteno (1986) y Marfà et al. (1993) hallaron que el contenido de agua disponible antes del riego en contenedores menores a 12 cm de altura, es más determinante de la producción vegetal que el  $\psi$ . Más aún, Orozco (1995) encontró reducción en la productividad de lechuga en perlitas gruesas cuando el riego se basó en un umbral calculado en función de  $\theta - \psi$  de cada sustrato, explicando que una de las causas podría ser el incremento de la resistencia del sustrato al flujo de agua. Puesto que la superficie de contacto entre el sustrato y la superficie de la raíz es proporcional al  $\theta$ , la resistencia radial que sufre el agua en su movimiento desde el sustrato hacia la interfase sustrato-raíz, aumentaría en las perlitas más gruesas y además explica su comportamiento hidráulico a partir de su distribución de tamaño de partícula, de los poros y de sus morfología interna, asociándolo al manejo del riego (Orozco et al. 1995). Estos resultados sugieren que no se trata de considerar sólo condiciones estáticas del agua en términos de  $\psi$  ó  $\theta$  y de los parámetros relacionados, sino que parece necesario considerar la escala temporal y por lo tanto emplear parámetros dinámicos para razonar en términos de flujos.

Según Fonteno (1993), la estimación del agua disponible se hace difícil por la falta de consenso en la definición. Analizando el término “agua disponible”, Fonteno considera que hay dos componentes, “capacidad de agua disponible” y “disponibilidad de agua”. Desde la física de suelos, se consideraría “capacidad de agua disponible” a la cantidad de agua retenida en la reserva del sustrato, que puede ser absorbida por las plantas (Cassel y Nielsen 1986). Está definida por la diferencia entre capacidad de contenedor y punto de marchitez permanente y es una medida de la cantidad máxima de agua disponible para la planta en condiciones de baja demanda evaporativa. En sustratos se utilizan los parámetros agua fácilmente disponible y agua disponible definidos por De Boodt y Verdonck (1972) y Martínez Farré (1992) respectivamente, sin embargo el término “disponibilidad de agua” incluye la integración del tipo de planta (especie, cultivar, condición física, estado y distribución de raíces), condiciones de la rizósfera (gradiente de potencial agua en la interfase raíz-sustrato) y transporte hidráulico del sustrato (conductividad hidráulica no saturada cercana a la porción de raíces que absorben el agua) (Fonteno 1993). El análisis de estos términos contribuye a poner de manifiesto un concepto de la disponibilidad de agua en equilibrio dinámico, en contraposición al equilibrio estático habitualmente empleado, además de considerar el efecto del tramado de las raíces con el sustrato.

Según Teres (2002), en el planteo energético se asume el concepto de equilibrio estático que implica el supuesto que el agua no se acumula ni se agota en las diferentes secciones del continuo sustrato-planta-atmósfera, de manera que el flujo transpiratorio puede calcularse dividiendo el gradiente de potencial agua entre el sustrato y la atmósfera por las resistencias en cada una de las secciones del continuo. En este marco teórico, dentro del contenedor se considera que en cada par  $\theta - \psi$  se alcanza el equilibrio y el potencial agua ( $\psi_a$ ) es constante en todos los puntos y, por lo tanto, no hay

movimiento de agua. En estas condiciones, la relación agua-aire en el perfil del sustrato viene dada en cada punto por el par  $\theta$ - $\psi$ , donde  $\psi$  se obtiene como diferencia entre el  $\psi_a$  (constante) y el  $\psi_g$  que depende de la altura a la base del contenedor (plano de referencia).

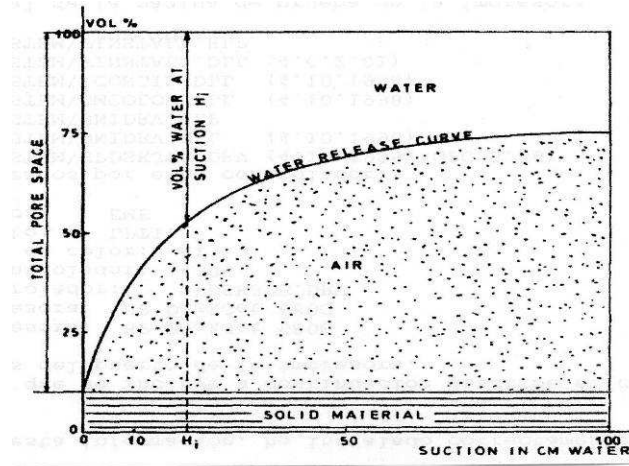
Sin embargo, las raíces absorben el agua del entorno provocando un gradiente local de  $\psi_a$ . Cada una de las raíces absorbentes actúa como un sumidero y, por lo tanto, la distribución de estos gradientes depende de la distribución del sistema radical. Si el  $\psi_{raiz}$  es menor que el  $\psi$  del sustrato, se crea un gradiente en la interfase sustrato-raíz y un flujo de absorción de agua por la planta. Esto provoca un descenso del  $\theta$  en las proximidades de la interfase raíz-sustrato y por lo tanto un nuevo gradiente de  $\psi$  en el sustrato que a su vez provoca un flujo de agua que tiende a equilibrarlo. 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 es mayor que el flujo de agua el equilibrio se rompe y se produce una disminución local del  $\theta$ , provocando un aumento de gradiente de potencial y un aumento del flujo, alcanzándose de nuevo el equilibrio. Si por el contrario en la situación de equilibrio la absorción disminuye, el flujo de agua es mayor que la absorción, disminuyendo el gradiente de potencial que provoca una disminución del flujo, alcanzándose de nuevo el equilibrio cuando el flujo de agua iguala a la cantidad de agua absorbida por la raíz. Este mecanismo 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  $\theta$  del sustrato y una disminución de  $\psi_a$ . Si se mantiene el  $\psi_{raiz}$  y por tanto un determinado nivel energético, se produce un descenso del  $\psi_a$  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 volumen de agua absorbida, enlazando con el planteo energético sobre la disponibilidad de agua. En este planteo, 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. Fonteno (1993) enuncia que la disponibilidad del agua depende de esta capacidad de suministro de agua por parte del sustrato y que está relacionada con: la distancia entre la reserva y la raíz, el  $\psi$  con que el agua está retenida por las partículas del sustrato, y la conductividad hidráulica que actúa como la resistencia en el sustrato al flujo de agua.

Los métodos de laboratorio no consideran la densidad y la distribución de raíces por lo que la información obtenida es incompleta. En este sentido Michel (2009a) plantea como desafío de futuras investigaciones integrar el efecto de la raíz en la dinámica del aire y del agua en el sustrato y sus consecuencias en el manejo del riego.

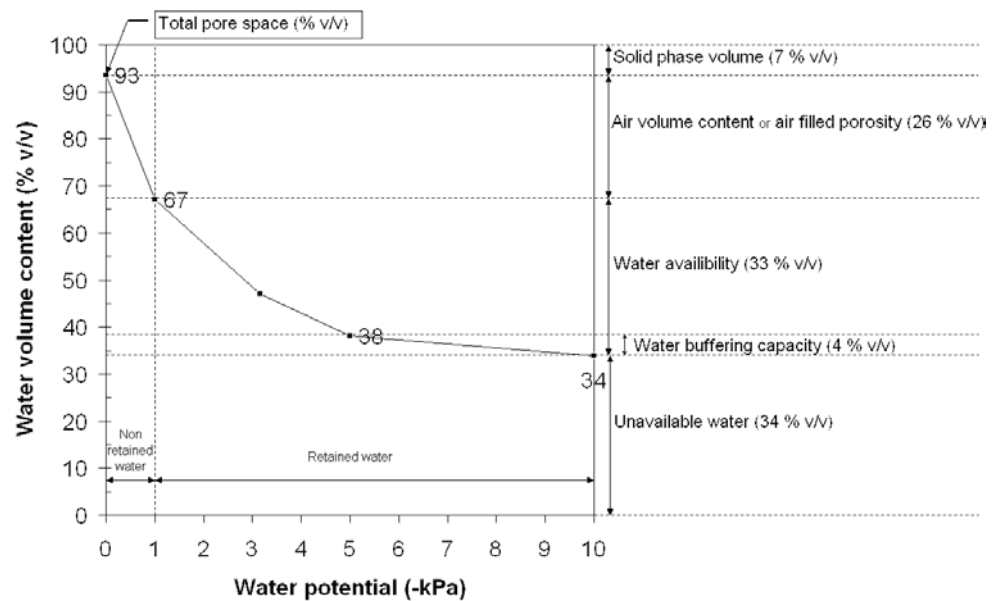
La relación entre  $\theta$  y  $\psi$  del sustrato que expresa la evolución del proceso de desorción del agua en condiciones de equilibrio, es conocida con diversos nombres tales como función de retención de humedad, curva característica de liberación de agua o curva de retención de agua (CR). En algunos materiales esta relación no es única, este fenómeno se conoce como histéresis y plantea la existencia de nuevas condiciones de equilibrio cuando se rehidrata el material. Por ello, para un mismo  $\psi$  se obtienen distintos valores de  $\theta$  frecuentemente menores y luego de la total rehidratación ( $\psi=0$ ), un nuevo valor de  $\theta$  de saturación que demuestra menor porosidad total debido a la presencia de aire entrampado (Wallach 2008). La CR que comienza con la completa saturación se denomina curva principal de desorción y los resultados pueden exponerse con distintos criterios como se muestra en la fig 2.1.A y B. Inicialmente De Boodt y

Verdonck (1972) gráficaron los pares  $\theta - \psi$  representando en las ordenadas el volumen relativo liberado de agua adoptando la denominación de curvas de liberación de agua (A). Sin embargo, posteriormente otros autores representaron la variable respuesta  $\theta$  como el volumen relativo retenido de agua y se la denominó curvas de retención de agua (B).

A



B



**Fig. 2.1.:** A) Figura esquemática de curva de liberación de agua. Fuente: De Boodt et al. (1978) y B) Curva de retención de agua sin ajustar de una turba. Fuente: Michel (2010).

Las CR se obtienen midiendo valores de los pares  $\theta - \psi$  fragmentados en el rango de interés que se modelizan para análisis, caracterización y comparación de los diferentes materiales (Wallach 2008) y es esencial representar la curva en forma paramétrica y continua. Una expresión paramétrica no-lineal del modelo de la CR debería contener la menor cantidad de parámetros posible para simplificar la estimación y describir su comportamiento en los límites de la curva y con un mejor ajuste en la parte menos lineal (Raviv et al. 2002, Wallach 2008). Las CR son funciones altamente no-lineales por lo que presentan dificultad para ser ajustadas con precisión (van

Genuchten y Nielsen 1985) y su determinación es una parte fundamental en la caracterización hidráulica de un sustrato (Fonteno 1993). Se han probado diferentes funciones para ajustar los datos medidos de  $\theta = f(\psi)$  (logarítmicos, potenciales, exponenciales, polinomios de segundo grado, de la raíz cuadrada, de tercer grado de la raíz cúbica) alcanzándose ajustes muy altos con muchos de ellos (Burés et al. 1991, Martínez et al. 1991; 1993). Algunos de los modelos consideran el parámetro de potencial de entrada de aire ( $\psi_e$ ) definido como el valor del  $\psi$  a partir del cual se inicia la liberación de agua de un medio saturado y comienzan a drenar los macroporos llenos de agua. En el caso de materiales usados como sustratos en los que frecuentemente la porosidad total es muy elevada y con granulometrías predominantes de fracciones gruesas, el  $\psi_e$  estimado es muchas veces próximo a cero aunque se han encontrado valores experimentales de hasta 20 hPa (Bunt 1988, Milks et al. 1989a). Este parámetro puede dar información sobre la aireación del sustrato en contenedores de poca altura (Orozco y Marfà 1995) y se encontró una relación directa entre estos valores de  $\psi_e$  y la presencia de fracciones finas (<0,5 mm) (Marfà et al. 1993).

En general los sustratos poseen contenidos hídricos muy altos en condiciones de saturación, sin embargo la forma en que liberan esa agua es muy variable, llegando a perder en algunos casos 50% de agua en el rango 0-20hPa (Fonteno et al. 1981, Milks et al. 1989a, b, c). Otros presentan una meseta inicial en la CR que indicaría presencia de material fino o saltos bruscos entre el valor estimado de tensión (calculado por fórmula de la porosidad total) y dicha meseta, probablemente asociado a la dificultad de alcanzar una saturación completa o por presencia de poros ocluidos o semiocluidos (Martínez et al. 1993).

El modelo de van Genuchten (1980) (VG) es el más ampliamente utilizado para el ajuste de la CR en sustratos (van Genuchten y Nielsen 1985; Karlovich y Fonteno 1986; Fonteno 1989; Wallach et al. 1992a y b; Marfà y Orozco 1995; Raviv et al. 2001; Wallach 2008). Milks et al. (1989a, b y c) encontraron mejor ajuste con VG que con la función polinómica de tercer grado, mientras que Orozco (1995), concluye que el modelo de VG ha mostrado su adecuación para modelizar la CR de varios sustratos, sin embargo recomienda determinar experimentalmente el valor máximo de saturación en vez de asumir el valor de la porosidad total calculado por fórmula. A su vez, Wallach et al. (1992a) recomiendan que el valor del contenido hídrico residual sea determinado experimentalmente a pesar de que el modelo lo estima. Carmona et al. (2003) encontraron mejor ajuste con VG que con los modelos propuestos por Martínez et al. (1993) y Karlovich y Fonteno (1986) para sustratos a base de compost de corcho.

El modelo VG muestra además la ventaja de que a partir de la CR y del valor de la conductividad hidráulica a flujo saturado ( $K_s$ ) se puede predecir la conductividad hidráulica a flujo no saturado ( $K_{ns}$ ). Sería deseable determinar  $K_{ns}(\theta)$  o  $K_{ns}(\psi)$  basada en medidas directas, sin embargo la medición experimental de  $K_{ns}$  es muy compleja y laboriosa (Wallach et al. 1992a; Burés et al. 1997; Caron y Elrick 2005; Naasz et al. 2005) ya que los valores pueden variar en varios órdenes de magnitud en el rango de interés del  $\theta$ . Dichos investigadores han encontrado medidas confiables sólo en un rango cercano a la saturación sin poder cubrir todo el rango de interés. Por estas razones, se determina la  $K_{ns}$  por modelización basándose en las CR y en la  $K_s$  y se requiere de una expresión analítica que describa en forma ajustada todo el rango de interés como prerrequisito esencial para predecir la  $K_{ns}$ . La bondad del ajuste depende también de la teoría y los supuestos en que la ecuación está finalmente basada (van Genuchten 1980, van Genuchten y Nielsen 1985, Raviv et al. 2002, Wallach 2008).

En sustratos, las restricciones al flujo de agua no son sólo por potenciales mátricos, sino que la limitación en la disponibilidad de agua se produce por las

resistencias al flujo de agua, al producirse una brusca caída de la  $K_{ns}$  (Raviv et al. 2002). Según los datos de Wallach et al. (1992b) hay cambios significativos en los valores de  $K_{ns}$  aún cuando el  $\theta$  está dentro del rango de AFD (10-50 hPa). Por lo tanto el contenido de agua es importante, pero también lo es la capacidad para transmitirla, es decir su  $K$ , la cual depende de las características del poro como forma, tamaño, bifurcaciones, uniones, tortuosidad, de las características hidrófilas o hidrófobas de las partículas y del contenido de agua en el sustrato.

Por todo lo expuesto, parece recomendable la determinación de  $K_s$  como parte de las metodologías de rutina de caracterización de sustratos. A partir de este parámetro y de la CR es posible predecir las relaciones  $K_{ns}(\theta)$  o  $K_{ns}(\psi)$  mediante modelos como el propuesto por VG (Orozco 1995). Sin embargo, las CR dependerán del método de medida aplicado para obtener los distintos valores de los pares  $\theta - \psi$  y por lo tanto la estimación de los parámetros hidráulicos también pueden presentar diferencias.

### 2.1.2. Medición del potencial mátrico en el sustrato en tiempo real

En contenedores hay una elevada liberación de agua desde el sustrato hacia las raíces a tensiones menores a 100 hPa y un limitado volumen de agua disponible respecto al consumo por unidad de tiempo, por lo tanto es recomendable contar con medidas a escala continua para la determinación de la dosis y para decidir el momento del riego. Los parámetros hidráulicos son útiles para la etapa de planificación del riego. Sin embargo, la necesidad del uso racional del agua y restricciones en los efectos contaminantes de los cultivos sin suelo hace necesario un mejor ajuste en la economía del agua. En ese sentido, los avances en la electrónica contribuyeron a la intensificación de los estudios con monitoreo *in situ* de los pares  $\theta - \psi$ . Existe una gran diversidad de sensores que pueden usarse para medición del estado hídrico en suelos, sin embargo no todos son apropiados para las mediciones en sustratos (Testezlaf et al. 1999, Casadesús 2002). El uso de tensiómetros con porcelanas de flujo elevado para tener una respuesta rápida, sumado a los transductores de presión, permiten obtener registros en tiempo real del potencial agua *in situ* con precisión, sin ser afectados por la salinidad. Numerosos autores han investigado sobre el uso de minitensiómetros para el manejo del riego a partir de cierto umbral de potencial agua, específico para cada sustrato: Heiskanen (1995), Rivière et al. (1997), Raviv et al. (1999), Cáceres (2002), Wallach y Raviv (2005), Cáceres et al. (2004; 2008), encontrando resultados satisfactorios y reducción en los lixiviados contaminantes.

### 2.1.3. Relación entre la disponibilidad de agua en el sustrato y la planta

El estado hídrico de la planta depende de la transpiración y absorción de agua por parte de las raíces, que varía con el cultivo, estadio de crecimiento, condiciones del ambiente, hora del día, lugar geográfico (van Os et al. 2002). El primer síntoma que tiene una planta con estrés hídrico, caracterizado por la disminución de potencial agua dentro de la célula del mesófilo, es la disminución de la turgencia al disminuir el componente potencial de presión positiva  $\psi_p$ . Si este estado se prolonga afecta el crecimiento, lo que no es percibido visualmente en las primeras etapas del estrés (Taiz y Zeiger 2006).

Potenciales agua bajos o valores altos de tensión en el sustrato afectan rápidamente procesos fisiológicos. Antes que ocurra la reducción de la conductancia estomática y la fotosíntesis en la hoja, se afecta el crecimiento, debido a la inhibición de procesos más sensibles como son la elongación de la célula. El crecimiento de la parte aérea de la planta responde más enérgicamente que las raíces a esta disminución en los

potenciales agua del sustrato, debido quizás a un efecto mucho mayor del estrés en el crecimiento de las hojas comparado con las raíces (Lambers et al. 1998).

El flujo de absorción es regulado por las resistencias del sustrato, que depende de su  $K_{ns}$  y de la resistencia en la raíz a nivel membrana, que se ve afectada por factores ambientales y hace que se retarde la absorción respecto a la transpiración. Las situaciones de estrés hídrico están generadas por un desbalance entre la transpiración en la parte aérea y la absorción de las raíces produciendo una baja presión hidrostática negativa en el xilema, baja el potencial agua en hoja y los estomas comienzan a cerrarse, mediado por la acción del ácido abscísico (ABA). Nemali y van Iersel (2008) investigaron la respuesta fisiológica de *Salvia splendens*, *Vinca*, *Petunia* e *Impatiens*, con cuatro regimenes de riego en un sustrato a base de 60% turba y 40% perlita, encontrando disminución en el potencial agua en hoja y la fotosíntesis, sólo con el tratamiento de riego mínimo ( $\theta=0,09 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) en todas las especies, sin embargo la conductancia estomática presentó diferencia sólo con el tratamiento de riego máximo ( $\theta=32 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) y sin diferencias en los otros tratamientos de riego.

Numerosos trabajos relacionan el contenido de agua en el sustrato bajo diferentes tratamientos de riego, con cambios fisiológicos en la planta: Bergeron et al. (2004), Gomez del Campo (2007), Nemali y van Iersel (2008), Niu y Rodriguez (2009), Kim et al. (2011) pero hay pocos investigadores que los vinculen con la  $K_{ns}$  del sustrato. Existe una relación entre la  $K_{ns}$ , las condiciones ambientales, el potencial agua en la planta y la conductancia estomática, que dependerá de la especie considerada (Orozco y Marfâ 1995, Raviv et al. 2004, Naasz et al. 2009, Wallach y Raviv 2008)

Los contenidos hídricos en los sustratos directamente influyen en su contenido de aire. Por lo tanto un alto contenido hídrico puede producir bajos rendimientos debido a un estrés por falta de oxígeno. Bergeron et al. (2004) encontraron aumento en la transpiración cuticular cuando el régimen de riego paso de 45% del volumen de agua a 60% en plantines de pino spruce, sin embargo la biomasa total fue menor debido a la falta de oxígeno. El crecimiento puede verse afectado aún cuando sea solo una parte de la raíz que sufre el estrés. Además, las plantas utilizan oxígeno en sus procesos metabólicos. Mediante la función vital de la respiración las raíces toman el oxígeno del aire y liberan  $\text{CO}_2$  modificando la composición del aire que rodea las raíces. El intercambio gaseoso difunde más rápidamente en un medio a través de los macroporos (Handreck y Black 2002). Un déficit temporal de oxígeno puede reducir el crecimiento de raíces y parte aérea y condiciones de hipoxia y/o anoxia durante varios días pueden provocar muerte de raíces. Por ello, un buen diseño del riego debe tener en cuenta la mayor cantidad de información que se pueda tener de los parámetros estáticos y dinámicos, para proveer suficiente agua y aire en todo momento durante el cultivo.

#### 2.1.4. Objetivos específicos e hipótesis

##### Objetivos

1) Obtener los parámetros de caracterización física asociados a la disponibilidad de agua en dos sustratos, determinados en laboratorio con cuatro métodos, trazar las CR correspondientes y en base a estos datos y a la  $K_s$ , estimar la  $K_{ns}$ .

2) Comprobar los efectos del manejo del riego, basados en la modelización de la  $K_{ns}$ , a través de la respuesta a las relaciones hídricas: conductancia estomática y potencial agua en hoja de un cultivo de *Primula polyantha*.

3) Comparar las CR obtenidas según los cuatro métodos de laboratorio con la medición de las CR *in situ* en un cultivo de *Primula polyantha*

### **Hipótesis**

1) Las CR obtenidas en laboratorio según los cuatro métodos y las Kns estimadas, presentarán resultados diferentes.

Predicción: los métodos tendrán distinta sensibilidad según el sustrato medido y el efecto del tratamiento inicial sobre la muestra

2) Los riegos basados en los parámetros dinámicos: Ks y Kns estimada con los datos de las CR, según los distintos métodos, tendrán una respuesta en las relaciones hídricas, diferente en las plantas

Predicción: Las plantas tendrán mayor conductancia estómatomica y potencial agua en hoja en los tratamientos que reciban los riegos más abundantes.

3) Las CR calculadas en laboratorio difieren de las CR calculadas *in situ*.

Predicción: las CR *in situ* presentarán mayor contenido hídrico para una misma tensión que las CR de laboratorio por efecto de las raíces y del manejo.

## **2.2. MATERIALES Y METODOS**

### **PARTE A: Parámetros hidráulicos de sustratos por distintos métodos y su influencia en el manejo de riego**

Del análisis de la relación entre el volumen de agua y el volumen de aire en la matriz porosa con las tensiones aplicadas, surgió el posterior trazado de las CR que grafican la función  $\theta = f(\psi)$  en el rango de 0-100 hPa.

Se realizó la caracterización hidráulica de dos sustratos considerando el movimiento de flujo de agua en la matriz porosa. Se aplicó una modelización de la conductividad hidráulica a flujo no saturado, tomando como datos los resultados de los pares  $\theta - \psi$  que se obtuvieron de aplicar los 4 métodos: EN13041, EMDBOT, EMBYESO y LEGBRAS (1.2.3.4.2.) pero ampliando los puntos de tensión que requiere la bondad del ajuste.

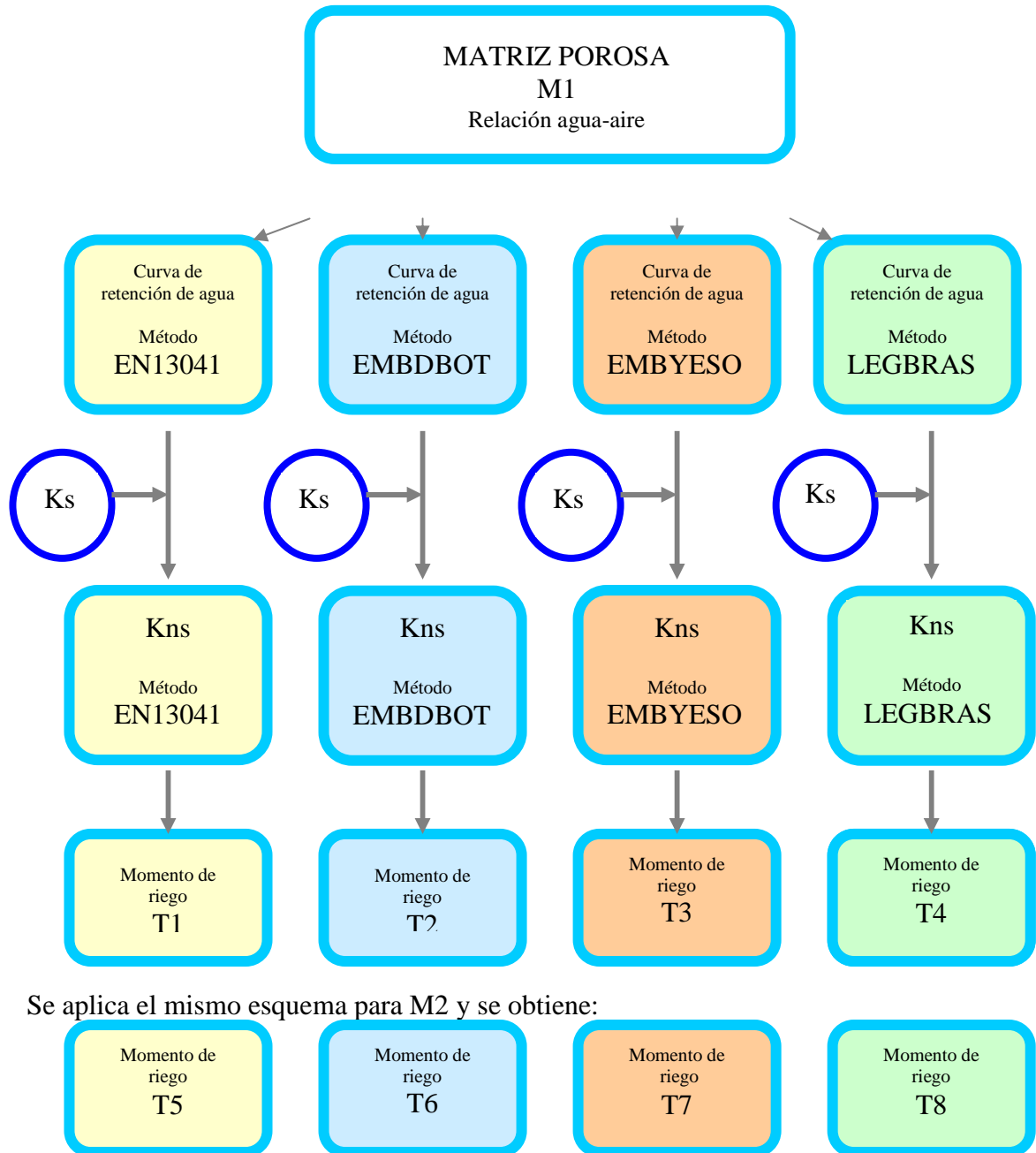
Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Sustratos de las Cátedras de Jardinería y Floricultura de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires y en el Laboratorio de Sustratos del IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries en Cabrils, Barcelona, España.

#### **2.2.1. Selección de materiales**

Los materiales analizados en laboratorio en esta etapa fueron dos sustratos compuestos: M1 formulado con: 80% de perlita comercial + 20 % de turba nacional de Tierra del Fuego y M2 formulado con 80% de turba nacional de Tierra del Fuego + 20 % de perlita comercial. Los componentes fueron la perlita y la turba nacional de Tierra del Fuego que se caracterizaron en el capítulo 1. Para su elección, se realizó una caracterización física preliminar de mezclas de perlita (P): turba de Tierra del Fuego (T) en proporciones expresadas en porcentajes en volumen 80 P: 20T; 60P:40T; 40P:60T; 20P:80T aplicando el método EN13041. El criterio de elección fue que tuvieran valores extremos en los parámetros que los caracterizan física e hidráulicamente, para comparar distintas disponibilidades de agua-aire para las raíces de las plantas y por su potencialidad como sustratos más aptos para el crecimiento de la planta en producción. De acuerdo a esto, se seleccionaron las mezclas 80P:20T (M1) y 20P:80 T (M2)

### 2.2.2. Mediciones de laboratorio

La caracterización hidráulica de los sustratos M1 y M2 se realizó en base a un esquema metodológico, cuyo último paso es el cálculo del momento de riego (fig 2.1 para M1). Mediante un diseño factorial de 4 métodos y 2 sustratos, según este esquema se calcularon los tratamientos T1 a T4 para M1 y T5 a T8 para M2 (2.2.2.5).



**Fig. 2.2.:** esquema metodológico de medición de variables, determinación de parámetros y diseño de los momentos de riego basados en la  $\psi$  correspondiente al par  $\theta$ -  $\psi$  y a  $K_{ns}(\theta)$  para M1.  $K_s$ : conductividad hidráulica saturada;  $K_{ns}$ : conductividad hidráulica no saturada, T1: tratamiento en M1 con momento de riego según EN13041; T2: tratamiento en M1 según EMBDBOT; T3: tratamiento en M1 según EMBYESO y T4: tratamiento en M1 según LEGBRAS; M1 (80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego); T5: tratamiento en M2 con momento de riego según EN13041; T6: tratamiento



en M2 según EMBDBOT; T7: tratamiento en M2 según EMBYESO y T8: tratamiento en M2 según LEGBRAS; M2 (20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego)

### **2.2.2.1. Curvas de retención de agua (CR): pares $\theta - \psi$ de la función $\theta = f(\psi)$ por distintos métodos**

El primer paso para caracterizar las relaciones agua-aire en M1 y M2, fue obtener los pares  $\theta - \psi$  según las 4 metodologías (1.2.3.4.2) aplicándose entre 9 y 12 puntos de tensión según el método. Se realizaron 3 repeticiones en todos los casos.

#### **2.2.2.1.1. Método utilizando lecho de arena (EN13041)**

En este método se aplicaron las tensiones 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 hPa. El equipamiento efectúa la liberación de agua por un tubo plástico que corre libremente sobre un soporte graduado. Por ello, el sistema de tensionado permitió variar el valor de la succión aplicada en el intervalo deseado y con precisión del cm. El cero de tensión en se calculó mediante fórmula (protocolo n° 114 en el Apéndice).

#### **2.2.2.1.2. Método utilizando embudos de tensión (EMBDBOT)**

Estos análisis fueron realizados con el equipamiento del Laboratorio de Sustratos del IRTA, Cabriels, Barcelona. El equipamiento posee una modificación en el sistema original de drenaje que permite aplicar valores de tensión con intervalos de cm. Las tensiones aplicadas fueron las de rutina de dicho laboratorio: 3, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 80 y 100 hPa. (protocolo n° 116 en el Apéndice).

#### **2.2.2.1.3. Método utilizando placas de yeso (EMBYESO)**

Los valores de tensión aplicados fueron 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 hPa. Con los dispositivos de tensión usados los valores de tensión pudieron ser variados con intervalos y precisión del cm. El cero de tensión en se calculó mediante fórmula (protocolo n° 117 en el Apéndice).

#### **2.2.2.1.4. Método utilizando papel de filtro (LEGBRAS)**

Los valores de tensión aplicados fueron 0, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 hPa. El cero de tensión es medido en forma directa. El sistema de drenaje consta de un distribuidor de vidrio con salidas fijas, por lo que los puntos de tensión fueron preestablecidos a intervalos de 10 cm. Mediante un sistema que varía la altura del distribuidor se pudieron registrar valores de tensión intercaladas cada 5 cm.

### **2.2.2.2. Curvas de retención de agua: Ajuste matemático de $\theta = f(\psi)$**

De las mediciones hechas con los 4 métodos se obtuvieron 4 conjuntos de pares  $\theta - \psi$ . Los datos de  $\theta$ , fueron promediados y posteriormente se realizó un ajuste siguiendo la metodología aplicada por Wallach et al. (1992b) y propuesta por Milks et al. (1989a) según el modelo paramétrico no-lineal de Mualem-van Genuchten desarrollado por Van Genuchten (1980) (VG) para suelos:

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + (\alpha\psi)^n \right]^{-m} \quad (1) \quad \text{donde:}$$

$\theta(\psi)$ : es el contenido hídrico volumétrico v/v correspondiente a la tensión  $\psi$  aplicada

$\theta_s$ : es el contenido hídrico volumétrico v/v a saturación, de acuerdo a cada método

$\theta_r$ : es el contenido hídrico volumétrico residual v/v experimental a la tensión 100 hPa

$\alpha$  y  $n$  son parámetros relacionados respectivamente con la inversa de la presión de entrada de aire y la distribución de tamaño del poro y son calculados por el modelo de acuerdo al mejor ajuste. Se adoptó como restricción  $n > 1$ , ya que con valores menores

se obtuvieron resultados sin sentido físico, y  $m$  es un parámetro relacionado con  $n$ ,

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

adoptándose la relación  $\frac{1}{n}$  que proporcionó el mejor ajuste para materiales con baja presión de entrada de aire (van Genuchten y Nielsen 1985). Para estimar los parámetros se utilizó el programa GraphPad Prisma versión 4.0.

### 2.2.2.3. Determinación de la conductividad hidráulica a flujo saturado

Se determinó la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) de M1 y M2, en el Laboratorio de Sustratos del IRTA, Cabrils mediante un permeámetro de laboratorio de carga constante utilizado por Orozco (1995), construido siguiendo el procedimiento descrito por Klute y Dirksen (1986) modificado. Se asumieron los valores restrictivos del gradiente hidráulico ( $dH/dx$ ) con respecto al rango de validez de la ley de Darcy para flujo laminar, determinados por da Silva et al. (1993) en tobas volcánicas y aplicados también por Orozco (1995) para perlitas expandidas, ya que M1 y M2 presentaron una similitud en la DTP que las perlitas analizadas por Orozco (1995).

Los sustratos se dispusieron en columnas de 22 cm de altura y 9,2 cm de diámetro interno. Se los saturó lentamente con aplicación de flujo vertical ascendente para evacuar al máximo el aire de la muestra. Una vez saturados, se mantuvo el flujo de agua a través de la columna hasta alcanzar caudales de salida constante. La pérdida de carga fue medida por medio de tubos piezométricos en puntos que distan entre sí 15 cm (fig 2.3). La conductividad hidráulica a flujo saturado ( $K_s$ ) se calculó por la fórmula:

$$K_s = \frac{Q}{At} \times \frac{\Delta z}{\Delta h}$$

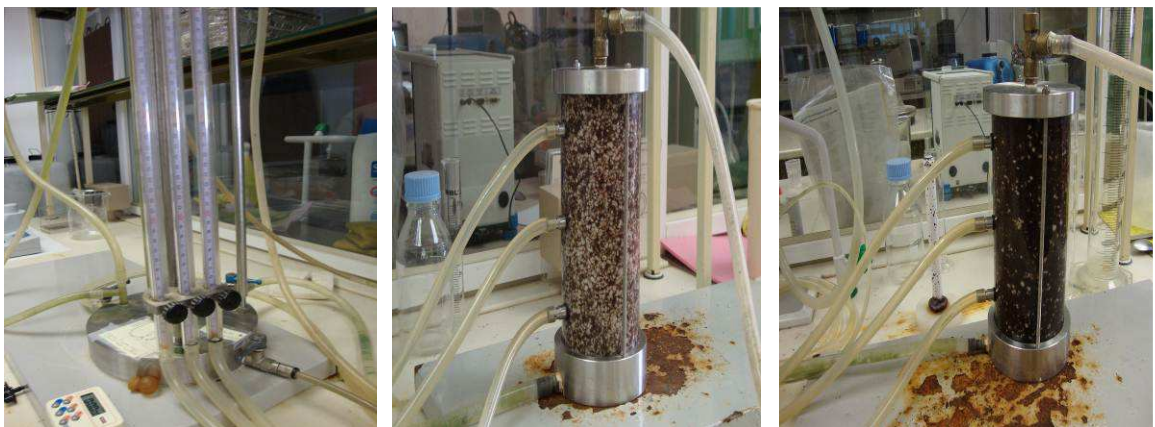
donde  $K_s$  = conductividad hidráulica de la muestra saturada ( $\text{cm min}^{-1}$ )

$Q$  = es el volumen de agua que sale de la columna de sustrato saturado ( $\text{cm}^3$ )

$A$  = área de la sección transversal de la columna ( $\text{cm}^2$ )

$t$ : tiempo (min) ;  $\Delta z$  : distancia entre los piezómetros (cm)

$\Delta h$  : diferencia de carga medida como altura de las columnas de agua de los piezómetros (fig 2.3 foto derecha)



**Fig. 2.3.:** Cilindro de acrílico utilizado para contener las muestras durante las mediciones de la conductividad hidráulica saturada en los sustrato M1 (foto centro) M2 (foto izquierda). La foto de la derecha muestra las columnas graduadas con agua donde se midieron las diferencias de pérdidas de carga ( $\Delta h$ ).

Se realizaron 2 repeticiones con muestra fresca para cada material y se realizaron 6 mediciones del caudal, con 6 intervalos de tiempo diferentes, para cada sustrato promediando los resultados.

#### 2.2.2.4. Determinación de la conductividad hidráulica a flujo no saturado.

Según las expresiones de Mualem-van Genuchten la conductividad relativa  $K = K_{ns}/K_s$  se puede predecir a partir del ajuste de la CR según:

$$K(\psi) = \frac{\left\{ 1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}}$$

$$K(\Theta) = \Theta^{1/2} \left[ 1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2$$

donde  $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$  es la saturación efectiva en función de  $\theta$

y  $\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$  es la saturación efectiva en función de la tensión aplicada  $\psi$

$K(\psi)$  es la conductividad relativa en función de  $\psi$ ;  $K(\Theta)$  es la conductividad relativa en función de la saturación efectiva, y los parámetros  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  tienen el mismo significado que en la expresión (1) del apartado 2.2.2.2.

En el presente trabajo se consideró la  $K(\theta)$ , ya que según Mualem (1986) y Londra (2010) cuando se predice la  $K_{ns}$  a partir de los datos únicos de la curva principal de desorción, CR, sin tener en cuenta la histéresis, es más apropiado el uso de esta función, poco afectada por la histéresis.

#### 2.2.2.5. Determinación del punto de umbral de riego en base a $K_{ns}$

A partir del momento en que la tensión  $\psi$  es mayor que la presión de entrada de aire en el sustrato, la conductividad hidráulica será a flujo no saturado. Se graficaron las funciones  $K_{ns}(\theta)$  para M1 y M2 con los 4 métodos de medición de los pares  $\theta - \psi$ . Los resultados obtenidos en los sucesivos valores de la función  $K_{ns}(\theta)$  muestran que a bajas tensiones los pares  $K_{ns}-\theta$  mantienen una regresión lineal con un buen ajuste hasta un punto en que la curva  $K_{ns}(\theta)$  se aparta de esta linealidad y se produce una brusca caída de la  $K_{ns}$ . Se tomó como coeficiente de correlación  $R^2 = 0,97$  como el límite admitido para considerar un buen ajuste de la regresión y se determinó que a partir de ese punto la  $K_{ns}$  comienza a tomar valores no deseados por el comienzo de la brusca caída del flujo de agua en el sustrato hacia las raíces (Marfà y Orozco 1995, Cáceres 2002). Por lo tanto se determinó este valor de  $K_{ns}(\theta)$  y su correspondiente par de  $\theta-\psi$  como el momento donde es necesario regar para permitir que se restablezca el flujo de agua disponible en ese sustrato. A partir de los valores que toma la variable  $\psi$  en correspondencia ese  $K_{ns}(\theta)$  se planificaron los tratamientos de riego (T1 a T8) que se aplicaron en el ensayo I.

#### 2.2.2.6. Análisis estadístico de los datos

El diseño del experimento fue un factorial de 2 sustratos con 4 métodos de medida de las variables con un total de 8 tratamientos. Se realizaron 3 repeticiones y los datos fueron sometidos a análisis de la varianza verificándose en todos los casos que se cumplan los supuestos de independencia de datos, distribución normal de las poblaciones y homocedasticidad de sus varianzas. Se realizaron análisis de estadística descriptiva y test de comparaciones múltiples de medias mediante LSD Fischer y test

de Tukey, con el software estadístico InfoStat 1.1. de la Cátedra de Estadística y Biometría y de Diseño de Experimentos de la Universidad Nacional de Córdoba.

**PARTE B: Respuesta vegetal en función del riego diseñado con la  $Kns$  ( $\theta$ ) obtenida por los diferentes métodos. Medidas de  $\theta$ - $\psi$  *in situ*.**

**2.2.3. Medición del potencial mátrico en el sustrato *in situ* en tiempo real**

La medición directa del potencial mátrico se realizó con tensiómetros con porcelanas de flujo elevado para tener una respuesta rápida (Orozco 1995). El tiempo de respuesta de los tensiómetros en condiciones cercanas a la saturación del sustrato está en función de la conductividad hidráulica de la porcelana y a partir de cierto umbral de potencial mátrico, específico para cada sustrato, el tiempo que tarda en estabilizarse el flujo de agua a través del sistema sustrato-tensiómetro es función de la  $Kns$  del sustrato (Selker et al. 1992). Los tensiómetros clásicos con vacuómetro no son adecuados para su uso en sustratos, debido a la poca precisión y a la escala de medida que se emplea para los mismos (0 a 1000 hPa). El desarrollo de transductores de presión ha permitido obtener una señal de medición en miliampers (mA) que representa el potencial mátrico en forma continua con precisión (Marfà et al. 1992). La respuesta potencial mátrico-potencial eléctrico es lineal. Normalmente se presentan compensados frente a las variaciones de temperatura y no sufren de histéresis o bien esta es muy baja. La bibliografía muestra que estos minitensiómetros son precisos en el intervalo de tensiones de 7 a 200 hPa valores que normalmente ocurren en los sustratos (Raviv et al. 1992)

En los experimentos se utilizaron tensiómetros marca Irrometer modelo MLT para bajas tensiones, calibrados por el fabricante para un rango de 0-160 hPa con un equipo de servicio ES-MLT. Constan de una caña recambiable equipada con una cápsula cerámica azul de alta sensibilidad. Los tensiómetros fueron conectados a un equipo PLC nacional, marca Fermi, programado para el almacenamiento de datos en tiempo real y su posterior registro en una computadora. Cada dato emitido por el equipo en mA fue el promedio de 10 mediciones consecutivas. El equipo almacenaba datos durante un máximo de 9 días si el registro se tomaba cada 5 minutos.

**2.2.3.1. Mediciones preliminares *in situ* con tensiómetros**

Se realizaron medidas preliminares en los sustratos sin plantas con el doble objetivo de cuantificar la variabilidad que presentaba  $\psi$  con los tensiómetros *in situ* y de analizar en primera aproximación, la respuesta y significación de las evoluciones de  $\psi$  durante la saturación en agua y a capacidad de contenedor (CC). Los ensayos registraron las  $\psi$  a saturación y a CC para M1 y M2 con un tensiómetro por maceta (n=6) (fig 2.4). Los tensiómetros se colocaron en la misma posición y en las mismas macetas que en los experimentos con planta (2.2.4.1.3). Se dejaron las macetas sumergidas en agua durante 48 h. Luego se procedió a retirarlas del baño de saturación y colocarlas a drenar sobre una rejilla. Las variaciones de  $\psi$  se registraron cada 5 min. Se consideró alcanzada la CC luego de 1h, verificándose que los registros de  $\psi$  se mantuvieran constantes después de ese período de tiempo.



**Fig 2.4.:** Tensiómetros colocados en M2: 20% de perlita + 80% Turba de Tierra del Fuego, drenando libremente luego de la saturación

#### **2.2.4. Experimentos con plantas**

Se realizaron 3 experimentos que fueron conducidos durante 2010 en un invernadero de la Cátedra de Floricultura (34° 37' LS y 58° 27' LO), sede Devoto de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, formado por dos baterías de 6m x 25 m x 4,5 m de altura máxima cubierto de polietileno LDT de 200 µm, con techado parabólico, ventilación frontal, lateral y zenital y media sombra de 30 %.

##### **2.2.4.1. Procedimientos comunes a los tres experimentos**

###### **2.2.4.1.1. Elección de la planta:**

Se utilizó la especie *Prímula polyantha* serie Daewood 48 Mix, adquiridas en la empresa Ball en febrero 2010, en la etapa 4 de propagación (Styer y Koranski 1997) en bandejas multiceldas de 200 alvéolos provenientes de semillas F1 importadas. El criterio para la elección de la planta fue que presentara sensibilidad al estrés hídrico, y que fuera una especie herbácea OIP (otoño-invierno-primavera) que completara su ciclo de cultivo en pocos meses (Karlsson 2001). Se tuvo en cuenta las características del pecíolo de la hoja para facilitar las mediciones de las variables fisiológicas.

###### **2.2.4.1.2. Elección de los sustratos**

Los sustratos utilizados fueron: M1 y M2 con 1 g/L de Basacote plus 3 M (3 meses) 16-8-12. M2 requirió una corrección de pH con 1,5 g de dolomita/L de sustrato para elevarlo a 5,5 según recomendaciones de cultivo (Styer y Koranski 1997). Los sustratos quedaron con la siguiente composición:

M1 : 80% de perlita + 20 % Turba de Tierra del Fuego + Basacote 3M ;

M2 : 20% de perlita + 80% Turba de Tierra del Fuego + Basacote 3 M + dolomita

###### **2.2.4.1.3. Cultivo**

Elección del contenedor: se usaron envases preformados semirígidos N° 14 de 11 cm de altura y 14 cm de diámetro, para facilitar la manipulación durante las pesadas.

**Enmacetado:** los sustratos se humedecieron y homogeneizaron y se procedió al enmacetado manual con  $800 \text{ cm}^3$  por maceta con humedad gravimétrica 60 %. Se colocó un plug por maceta regando a saturación.

**Cultivo:** Se cultivaron 350 macetas con cada sustrato con el manejo de producción: control semanal de pH y conductividad eléctrica CE, manteniendo al comienzo la  $CE < 1 \text{ dS m}^{-1}$  por ser plantas sensibles a la salinidad. Se regó con manguera de flor fina con agua de red con valores de  $\text{pH} = 7$  y  $CE = 0,15 \text{ dS.m}^{-1}$  y se complementó la fertilización con un fertilizante 20-20-20 de la línea Peters en dosis en aumento hasta mantener la  $CE = 1,5 \text{ dS m}^{-1}$ .

La condición necesaria para el comienzo del experimento era que las raíces ocuparan la totalidad del contenedor, que ocurrió a fines de julio. Cuando comenzó la floración, se despimpolló para que continuase el crecimiento vegetativo y se procedió a elegir visualmente las más homogéneas.

**Tensiómetros:** Los tensiómetros fueron colocados de forma vertical de manera que la placa porosa quedara a 3 cm por encima del fondo de la maceta y en la sección transversal equidistantes entre el cuello de la planta y el borde del contenedor



**Fig 2.5:** *Primulas* en floración (foto izquierda) y sin flores listas para comenzar el experimento (foto derecha)

#### 2.2.4.2. Experimento I

##### **Evaluación de la variable Kns estimada por distintos métodos como indicador de la disponibilidad de agua en M1 y M2 a través de la respuesta hídrica de la planta**

El diseño fue completamente aleatorizado con un factorial de 2 sustratos por 4 momentos de riego. La cantidad de plantas por tratamiento fue determinada por la limitación del tiempo necesario para medir variables fisiológicas dentro de condiciones ambientales similares. Los 8 tratamientos de riego fueron diseñados según se explicó en el apartado 2.2.2.5. Uno de los tratamientos de riego se suprimió ya que  $\psi$  del momento de riego coincidía con otro tratamiento. Por lo tanto se aplicaron 7 tratamientos con un total de 224 plantas. Se realizaron 4 repeticiones por tratamiento con 8 plantas en cada unidad experimental. Se colocó un tensiómetro por tratamiento en una maceta elegida al azar. Se colocaron plantas borde alrededor de cada sector.

Se midieron en tiempo real las tensiones  $\psi$  del sustrato durante todo el experimento. Cuando el tensiómetro indicaba la  $\psi$  correspondiente al tratamiento, se regaba con manguera con flor fina, a capacidad de contenedor, dejando drenar libremente. Un poco antes de que la medida de la  $\psi$  umbral fuera alcanzada se pesaban

todas las macetas correspondientes a ese tratamiento, excepto la que contenía el tensiómetro.

Las mediciones de las variables fisiológicas en hoja fueron: 1)  $\psi_a$  en la hoja mediante una cámara de presión Bio-Control; 2) conductancia estomática, con un podómetro de difusión Delta T, 3) irradiancia PAR y temperatura. Se eligió para la medición por cada repetición una hoja joven, completamente desarrollada siempre proveniente de la misma planta. Se realizaron 3 mediciones durante el experimento.



**Fig 2.6.:** medición del potencial agua en hoja con la cámara de presión (foto izquierda) y medición de la conductancia estomática con el podómetro de difusión (foto derecha)

El experimento comenzó el 16/8/10 cuando los tensiómetros ya llevaban 10 días de colocados en las macetas, tiempo que se consideró suficiente para establecer un buen contacto entre la placa porosa y el sustrato. Se realizaron mediciones en hoja el 25/08/10, 6/09/10 y 9/09/10 al mediodía. Se dio por finalizado el experimento cuando se consiguieron medir las variables fisiológicas habiéndose alcanzado o sobrepasado las  $\psi$  umbral.

### 2.2.4.3. Experimento II

#### Estados energéticos del agua en los sustratos.

En este experimento se relacionaron los pares  $\theta - \psi$  de los tratamientos M1 y M2 en sucesivos ciclos de riego y secado aplicando sequía parcial. Se realizó con las mismas plantas del experimento I manteniendo el diseño completamente aleatorizado. Se comenzó el experimento el 2/10/10 y se realizaron 5 riegos a capacidad de contenedor el 4-8-12-18 y 21/10/10. Se pesaron durante el experimento 30 plantas de cada tratamiento entre riegos y se obtuvieron por gravimetría los valores de  $\theta$  /CC (n=11). Se registraron los valores de  $\psi$  en tiempo real (n=3), cada vez que se pesaba. El 8/10/10 se midieron las variables fisiológicas en hoja en 12 plantas para cada tratamiento. El día 25/10 se dio por finalizado el experimento cuando varias plantas presentaban marchitez permanente. Se consideró la evaporación en la superficie del sustrato despreciable ya que el follaje cubría totalmente el diámetro de la maceta.

A medida que avanzaba el experimento y aumentaba los síntomas de estrés hídrico en las plantas, se observó visualmente un comportamiento diferencial en dicha respuesta, y con los datos obtenidos se armó el cuadro 2.8 en la sección Resultados, que se copió en esta sección para verificar los altos CV del  $\psi$  agua hoja

**Cuadro 2.8.:** Valores medios de las variables (n=12): Cond.: conductancia; temp: temperatura;  $\psi$  agua: potencial agua en hoja;  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada en la mitad de la duración de las mediciones (n=3); CV%: coeficientes de variación.

Sustrato	Cond. Estomática		Temp hoja	Irradiancia		$\psi$ agua hoja		$\psi$ sustrato	
	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	CV%	°C		CV%	Mpa	CV%	hPa	CV%
M1	145	20	23,9	368,3	27	-0,23	52	100	11
M2	140	25	24	324	28	-0,24	28	70	5

Se realizó entonces, un tercer experimento teniendo la variable tipo de planta como un factor de los tratamientos.

#### 2.2.4.4. Experimento III

##### Curva de retención de agua *in situ*: efecto de la planta

Durante el experimento II se distinguieron 2 grupos de *Prímulas polyantha*, clasificándolas en: grupo T: las más tolerantes al estrés y grupo S: las más sensibles. Por lo tanto, el diseño de experimento fue completamente aleatorizado con un factorial de 2 sustratos y 2 tipos de plantas T y S con 12 macetas cada tratamiento.

Se determinaron los pares  $\theta - \psi$  en M1 y M2 en condiciones de cultivo y se evaluó el efecto de del tipo de planta en la CR *in situ*. La  $\psi$  fue registrada por 8 tensiómetros en total, dos por tratamiento. El experimento comenzó el 8/11/10 partiendo de un  $\theta$  máximo a CC se sometieron las plantas a tratamiento de sequía registrándose la tensión  $\psi$  en tiempo real y el contenido hídrico mediante pesadas dos veces por día y se dió por finalizado el 12/11/10 cuando uno de los tratamientos llegó a una  $\psi$  que sobrepasó el limite superior de medida de los tensiómetros y algunas plantas presentaban síntomas de marchitez permanente. Al mediodía del día 12 se realizaron las mediciones fisiológicas.

Se calculó el volumen de agua que contenía cada maceta en cada pesada, restándole los pesos de la maceta vacía, el sustrato seco 24 h en estufa a 105 °C, el peso fresco aéreo y el peso fresco de raíz de cada planta (n=12). Se utilizó una balanza electrónica con precisión 0,01g. Se calculó el volumen total del sustrato midiendo el cepellón por la fórmula de un paralelepípedo tronco-cónico con las medias obtenidas de 5 diámetros en varias direcciones de la base superior e inferior y 5 medidas de altura del sustrato en distintos puntos de la maceta (n=24). Se calculó el  $\theta$  como el volumen de agua relativo al volumen total del sustrato. La  $\psi$  (n=2) se calculó como la media de los registros durante el tiempo en que transcurrieron las pesadas.

Los valores  $\theta - \psi$  se ajustaron con el modelo VG (2.2.2.2) y se graficaron las CR *in situ* para cada sustrato con cada tipo de planta. Los parámetros  $\theta_s$  y  $\theta_r$  fueron calculados por la función de ajuste ya que no se disponía de los valores empíricos. Se aplicaron las siguientes restricciones:  $\theta_s < 0,95 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  por considerar un valor límite superior posible y  $\theta_r > 0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en el caso de M1S y  $\theta_r > 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en los demás, hasta obtener el mejor  $R^2$  posible. Estas restricciones fueron necesarias para que los parámetros tomaran valores positivos dentro de los rangos que tuvieran un sentido físico válido.



### 2.2.4.5. Análisis estadístico de los datos

Los datos fueron sometidos a análisis de la varianza verificándose en todos los casos que se cumplan los supuestos de independencia de datos, distribución normalidad de las poblaciones y homocedasticidad de sus varianzas. Se realizaron análisis de test de comparaciones múltiples de medias con el software estadístico InfoStat 1.1. de la Cátedra de Estadística y Biometría y de Diseño de Experimentos de la Universidad Nacional de Córdoba

## 2.3. RESULTADOS

### 2.3.1. Caracterización física de los sustratos

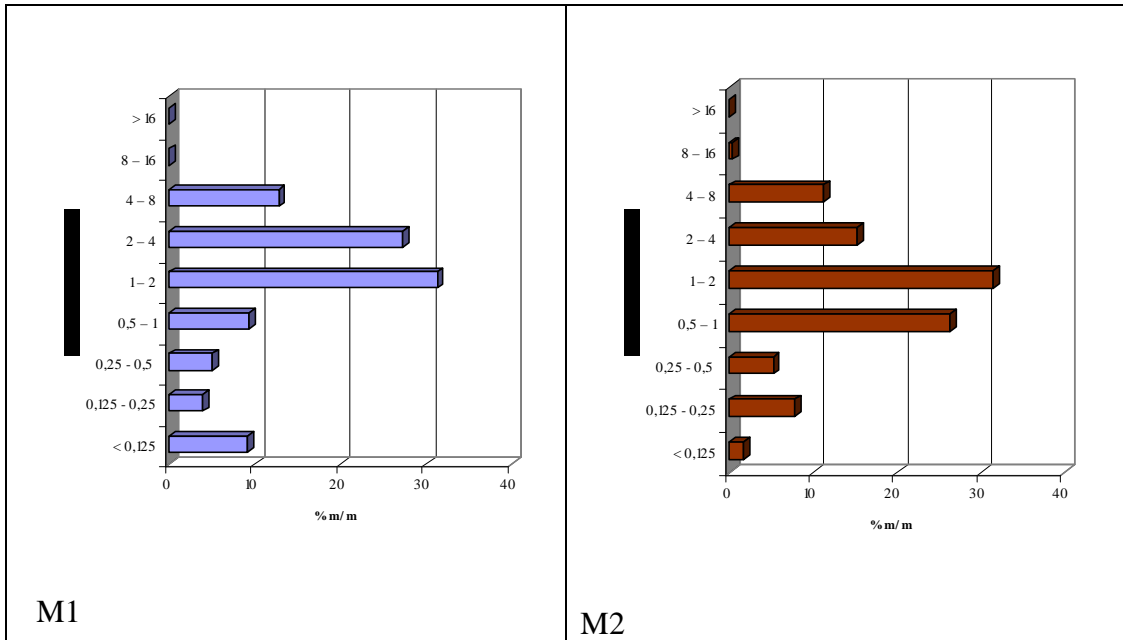
Los sustratos M1 y M2 fueron caracterizados físicamente según los 4 métodos que miden contenido hídrico entre 0-100 hPa (1.2.3.4.2). Según los resultados (cuadro 2.1 y figura 2.7) se distinguen diferencias para un mismo método en la relación agua-aire justificando el criterio seguido para su elección.

**Cuadro 2.1.:** Caracterización física de los sustratos M1 y M2 según 4 métodos. DS: densidad de sustrato; PT porosidad total; CRA capacidad de retención de agua; CA capacidad de aireación; AFD agua fácilmente disponible; AR agua de reserva; ADD agua difícilmente disponible. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.

	DS	PT	CRA	CA	AFD	AR	ADD
Método	kg m <sup>-3</sup>	.....cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>-3</sup>	.....	.....	.....
M1							
EN13041	89 a	0,97 a	0,35 b	0,62 b	0,15 a	0,04 b	0,16 b
EMBDBOT	84 b	0,97 a	0,29 c	0,68 a	0,12 b	0,06 a	0,11 c
EMBYESO	77 c	0,96 a	0,37 a	0,59 c	0,16 a	0,03 b	0,19 a
LEGBRAS	76 c	0,74 b	0,37 a	0,38 d	0,15 a	0,04 b	0,17 ab
prueba F	***	***	***	***	*	*	***
M2							
EN13041	76 a	0,96 a	0,73 a	0,23 b	0,28 ab	0,07 a	0,38 a
EMBDBOT	67 b	0,97 a	0,61 b	0,36 a	0,31 a	0,06 a	0,24 c
EMBYESO	78 a	0,96 a	0,58 b	0,38 a	0,27 ab	0,05 b	0,26 b
LEGBRAS	66 b	0,89 b	0,50 c	0,38 a	0,22 b	0,04 b	0,24 c
prueba F	***	***	**	***	***	**	***

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas con el test de LSD Fischer al 5%; \*\*\*, \*\*, \*, p≤0,0001; p≤0,001; p≤0,01 respectivamente

Las diferencias significativas encontradas entre métodos coinciden y confirman las discutidas en el capítulo 1 para materiales similares.



**Fig. 2.7.:** Distribución de tamaño de partícula de M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

### 2.3.2. Curvas de retención de agua

Los tiempos de duración de los ensayos fueron: 20 días para EN13041 y EMBDBOT midiendo 11 pares  $\theta$ - $\psi$  ; 17 días EMBYESO con 9 pares y 17 días LEGBRAS. En M1 se llegó más rápido al punto de equilibrio por su mayor macroporosidad. En LEGBRAS, la modificación de la altura del distribuidor de salidas de drenaje con intervalos de 5cm resultó engorrosa y delicada durante la marcha del procedimiento.

#### 2.3.2.1. Pares $\theta$ - $\psi$ de la función $\theta = f(\psi)$ por distintos métodos

Debido a los diferentes dispositivos de medida, se aplicaron distintas tensiones y los pares  $\theta$  -  $\psi$  obtenidos según: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS se muestran en el cuadro 2.2. Se hicieron comparación de medias de  $\theta$  en los valores de tensión medidas en los 4 métodos.

**Cuadro 2.2.:** Valores medios del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en función de la tensión  $\psi$  aplicada según 4 métodos en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego (n=3).

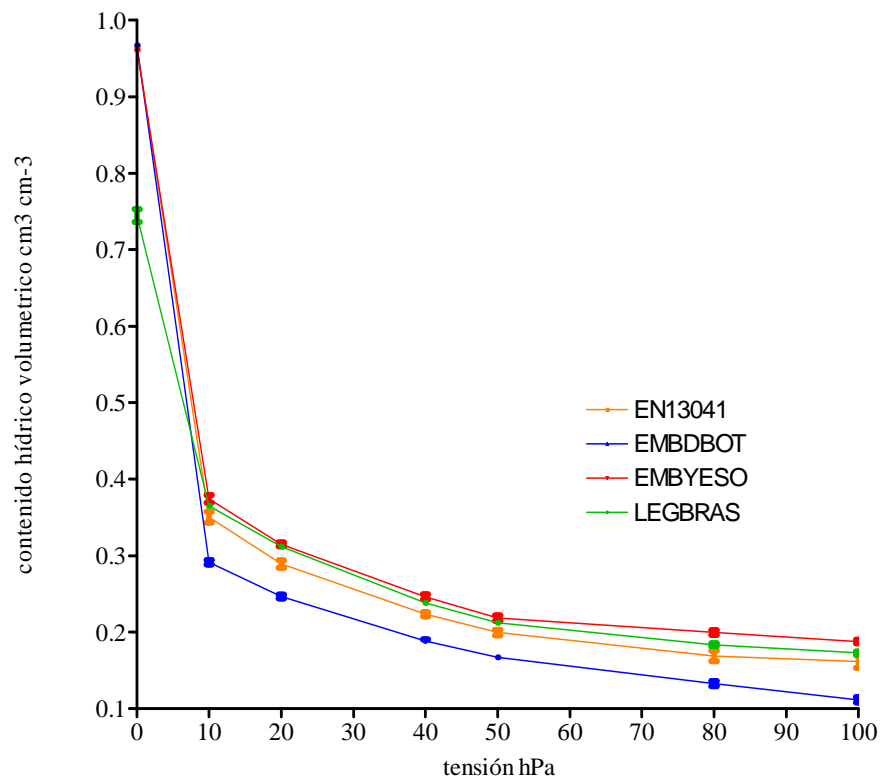
		contenido hídrico volumétrico $\theta$ .....cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> .....			
Sustrato	tensión $\psi$ hPa	METODOS			
		EN13041	EMBDBOT	EMBYESO	LEGBRAS
M1	0	0,965 a	0,967 a	0,962 a	0,745 b
	3		0,370		
	5	0,455	0,330		0,511
	8		0,301		
	10	0,350 b	0,292 c	0,374 b	0,365 a
	15	0,316	0,268		0,332
	20	0,289 b	0,247 c	0,315 a	0,312 a
	25	0,272	0,221	0,288	
	30	0,251		0,267	0,268
	40	0,223 c	0,188 d	0,246 a	0,238 b
	50	0,200 b	0,167 c	0,218 a	0,212 a
	60	0,185		0,203	0,199
	80	0,169 c	0,133 d	0,200 a	0,184 b
100	0,162 b	0,112 c	0,188 a	0,173 ab	
M2	0	0,971 a	0,967 a	0,962 a	0,887 b
	3		0,869		
	5	0,877	0,807		0,704
	8		0,647		
	10	0,730 a	0,599 b	0,576 b	0,504 c
	15	0,632	0,508		0,420
	20	0,551 a	0,437 b	0,427 b	0,383 c
	25	0,504	0,376	0,387	
	30	0,451		0,362	0,331
	40	0,402 a	0,326 b	0,331 b	0,304 c
	50	0,374 a	0,300 b	0,311 b	0,283 c
	60	0,358		0,294	0,274
	80	0,321 a	0,261 c	0,280 b	0,252 c
100	0,305 a	0,238 c	0,262 b	0,245 c	

Letras distintas por fila indican diferencias significativas ( $p \leq 0,0001$ ) con test de Fischer al 5%. Los casilleros sombreados corresponden a pares  $\theta - \psi$  no medidos en ese método según los protocolos.

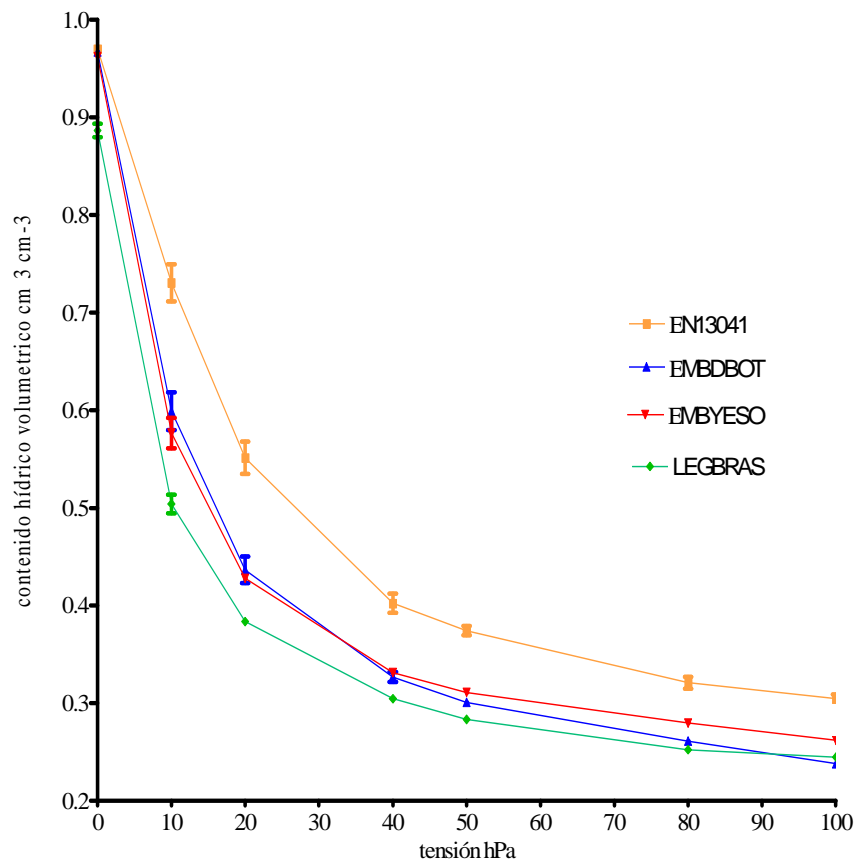
En la tensión 0 hPa no se encontraron diferencias en EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y si en LEGBRAS tanto en M1 como en M2. Para el sustrato M2 los valores más altos en  $\theta$  para idénticas tensiones están dados en todos los puntos por el método EN13041.

La variabilidad (error estándar) se muestra en la fig 2.1 (A y B) mientras que en M1 el CV<8% y en M2 CV<9% obteniéndose datos confiables en todos los casos. En A) se observa que para M1, con bajos valores de retención de agua, las diferencias entre los métodos se mantienen aproximadamente constante a lo largo de las sucesivas tensiones. Por el contrario en B) M2 que presenta valores altos de retención de agua, las diferencias entre los métodos son mayores en las tensiones más bajas disminuyendo a medida que el sustrato se seca y EN13041 y EMBDBOT presentan mayor variabilidad en casi todas las tensiones.

A



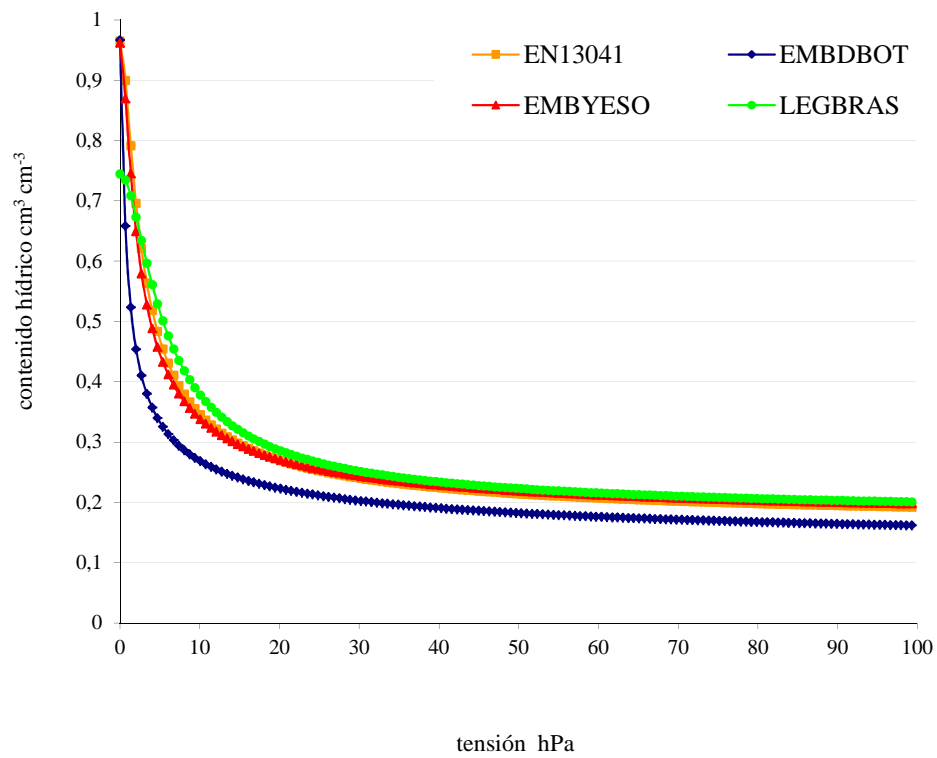
B



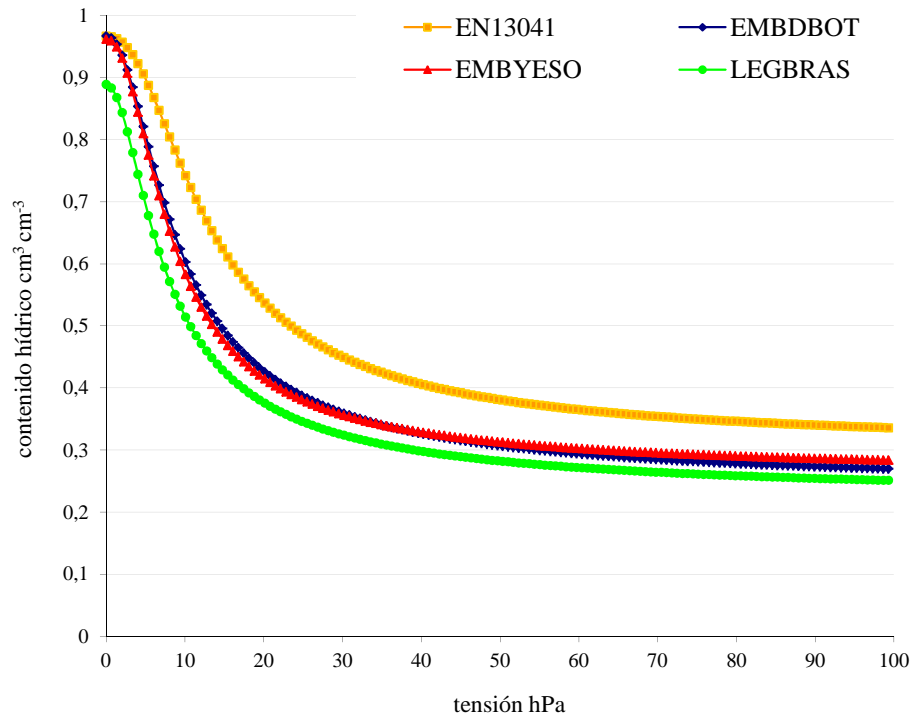
**Fig. 2.8.:** Valores medios unidos por líneas continuas y error estándar del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en función de la tensión  $\psi$  aplicada según los métodos: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS en: A) M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; B) M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

### 2.3.2.2. Ajuste matemático de las curvas de retención de agua

Los resultados del cuadro 2.2 fueron ajustados siguiendo el modelo VG. A partir de dicho ajuste se han graficado las CR que se presentan en la fig 2.9 y 2.10..

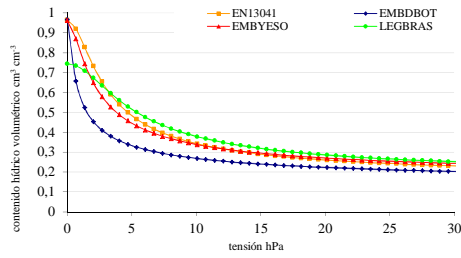


**Fig. 2.9.:** Curvas de retención de agua trazadas con los datos provenientes de los valores del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en función de la tensión  $\psi$  aplicada por cuatro métodos de medida: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS y ajustados según el modelo de van Genuchten en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego

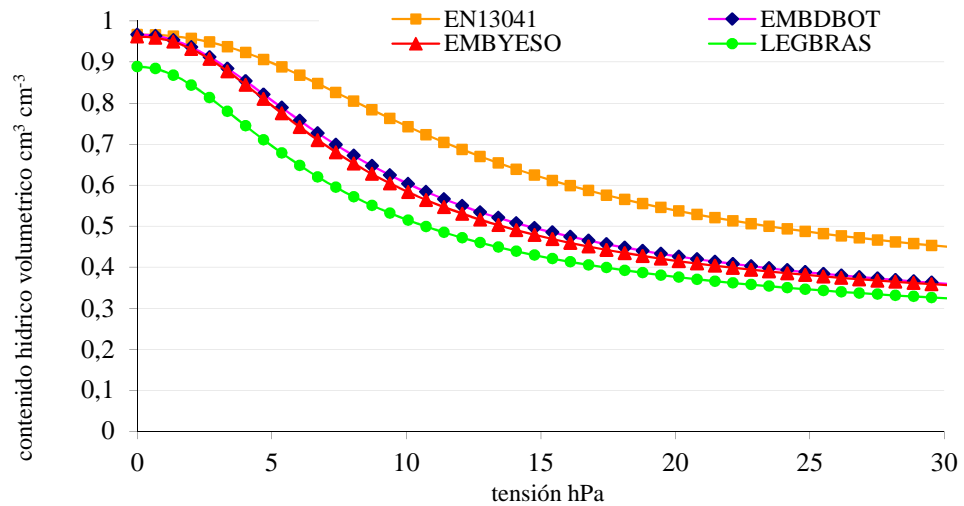


**Fig. 2.10.:** Curvas de retención de agua trazadas con los datos provenientes de los valores del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en función de la tensión  $\psi$  aplicada por cuatro métodos de medida: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS y ajustados según el modelo de van Genuchten en M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Se observa que al ajustar los valores por VG, las curvas resultantes mantuvieron las diferencias de las no ajustadas salvo en el método LEGBRAS para M1 donde después del ajuste, los  $\theta$  resultaron mas altos. En la fig. 2.11 A y B se muestran con mayor detalle, las CR en el rango 0 - 30 hPa donde las pendientes resultaron más pronunciadas, que corresponde a la zona de drenaje libre y primera porción de agua fácilmente disponible donde se obtuvieron mayores variaciones en la relación agua-aire. Se observa la zona de bajas tensiones cercana de la tensión de entrada de aire al sustrato representada por una meseta.



A



B

**Fig 2.11.:** Curvas de retención de agua en el rango 0-30 hPa de medidas con 4 métodos: EN13041, EMBDBOT, EMBYESO, LEGBRAS y ajustadas según el modelo de van Genuchten en A) M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y B) M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Los parámetros experimentales y los calculados por VG (2.2.2.2) se presentan en el cuadro 2.3.



**Cuadro 2.3.:** Valores de los parámetros  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico en saturación;  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$  es el coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Sustrato	Método	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$R^2$
M1	EN13041	0,965	0,162	0,4335	1,792	0,9926
	EMBDBOT	0,9671	0,1116	5,169	1,498	0,988
	EMBYESO	0,9616	0,1877	0,2648	2	0,9804
	LEGBRAS	0,7445	0,1768	0,08032	1,955	0,9904
M2	EN13041	0,9669	0,3047	0,005146	2,313	0,9944
	EMBDBOT	0,9669	0,2381	0,0189	2,142	0,9958
	EMBYESO	0,962	0,262	0,01728	2,245	0,9977
	LEGBRAS	0,8889	0,2214	0,03508	2,05	0,9989

Se observa que los valores de los parámetros  $\alpha$ , se mantienen mayores en M1 que en M2 en todos los métodos, e inversamente para los valores del parámetro  $n$ . Cabe destacar el alto valor de  $\alpha$  en M1 según EMBDBOT. Los  $R^2$  altos en todos los casos evidencian un ajuste elevado cuando se adopta el modelo matemático VG para el trazado de las CR en sustratos.

### 2.3.3. Conductividad hidráulica saturada

Los valores medios de la conductividad hidráulica saturada fueron:

sustrato M1       $K_s = 13,743 \text{ cm min}^{-1}$        $CV\% = 1,20$

sustrato M2       $K_s = 6,068 \text{ cm min}^{-1}$        $CV\% = 0,72$

donde M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego;  $K_s$ : conductividad hidráulica saturada y  $CV\%$ : coeficiente de variación.

### 2.3.4. Conductividad hidráulica no saturada y punto de umbral de riego

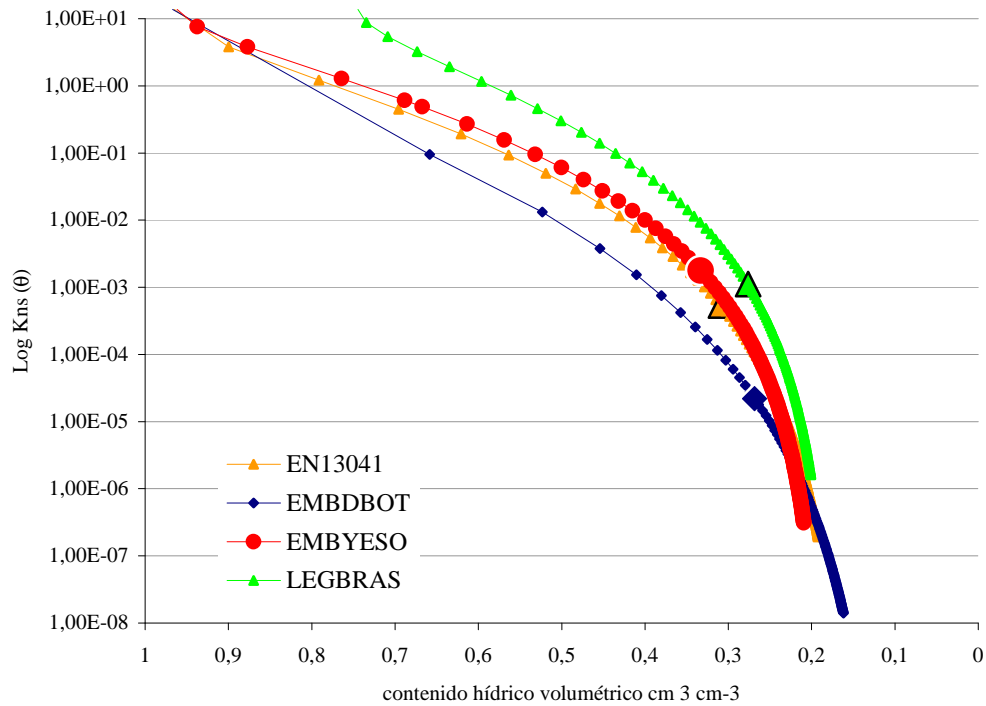
En el cuadro 2.4. se muestran los pares  $\theta-\psi$  donde se considera que comienza la brusca caída de la  $K_{ns}(\theta)$  calculada a partir de los datos según EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS ajustados por VG y que determinan los tratamientos de riego para el experimento I con plantas .

**Cuadro 2.4.:** Conductividad hidráulica no saturada (Kns) calculados según van Genuchten (1980) para M1 y M2 con datos  $\psi$ -  $\theta$  medidos por los diferentes métodos. Tr: tratamientos;  $R^2$ ; coeficiente de determinación adoptado para la regresión lineal entre  $\theta$  y el log Kns.  $\psi$ : tensión;  $\theta$ : contenido hídrico volumétrico; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

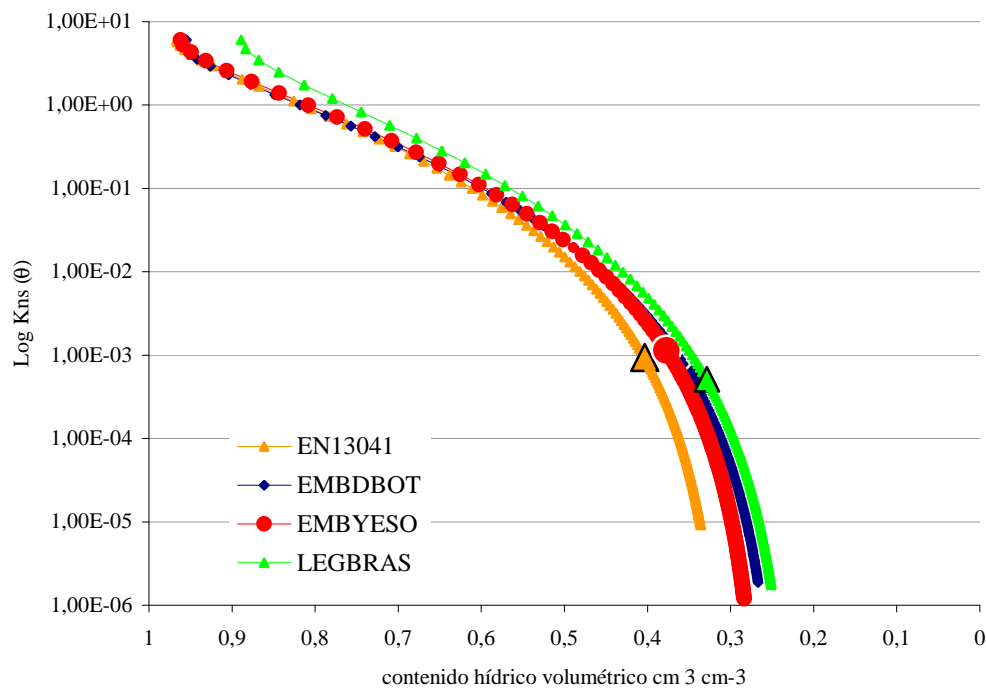
Sustrato	Método	Tr	$\psi$ hPa	$\theta$ $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	Kns( $\theta$ ) $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	Log Kns( $\theta$ ) $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	$R^2$
M1	EN13041	T1	13,42	0,31	5,36E-04	-4,409	0,97
	EMBDBOT	T2	10,60	0,27	2,75E-05	-4,560	0,97
	EMBYESO	T3	14,09	0,33	1,77E-03	-2,751	0,97
	LEGBRAS	T4	22,14	0,28	1,27E-03	-2,896	0,97
M2	EN13041	T5	40,94	0,40	9,40E-04	-3,027	0,97
	EMBDBOT	T6	32,21	0,35	6,47E-04	-3,189	0,97
	EMBYESO	T7	25,50	0,38	1,14E-03	-2,943	0,97
	LEGBRAS	T8	28,86	0,33	5,12E-04	-3,291	0,97

En todos los tratamientos los  $\psi$ , umbral de riego, se mantuvieron dentro del rango de tensión 10-50 hPa considerado como de AFD. Los tratamientos T1 y T3 presentaron valores  $\psi$  - $\theta$  muy similares teniendo en cuenta las posibilidades de control de  $\psi$  para el momento del riego. En la fig 2.12. A y B se muestran las curvas de Kns ( $\theta$ ) y los puntos obtenidos correspondientes a la tensión  $\psi$  umbral de riego. La mayor disminución de las Kns estimadas se observa en M1, material macroporoso con hasta 5 ordenes menor según el método EMBDBOT a 10 hPa.

A



B



**Fig. 2.12.:** Curvas de la conductividad hidráulica no saturada  $K_{ns}$  ( $\text{cm min}^{-1}$ ) en función del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) con datos provenientes de los métodos de medida de los pares  $\psi$ -  $\theta$ : EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS, A) en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, B) en M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego. Los puntos resaltados corresponden a los valores  $\psi$  umbral.

### 2.3.5. Medición de tensión en tiempo real en M1 y M2 sin planta.

Los resultados de los ensayos preliminares fueron para M1, una tensión a CC = 9,8 hPa con coeficiente de variación de 11,7 %, mientras que para M2 la tensión a CC fue de 9,3 hPa con coeficiente de variación de 8,9 % (n=6). Los valores de los registros de los tensiómetros en mA a saturación se utilizaron para la calibración del 0 tensión.

### 2.3.6. Experimento I

Los tratamientos T1 y T3 se consideraron como el mismo tratamiento (T1), por tener valores  $\theta$ - $\psi$  muy próximos (cuadro 2.5) entre si.

**Cuadro 2.5.:** Mediciones A) el 25/8 y B) 6/9; Trat: tratamientos; Cond.: conductancia; temp.: temperatura;  $\psi$  agua : potencial agua en hoja(n=4);  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada al comienzo de las mediciones, CV%: coeficientes de variación. Se indicaron en negrita los tratamientos donde se consideró que la  $\psi$  umbral era similar o cercana a la  $\psi$  del sustrato

A)Trat	$\psi$ umbral	Cond. Estomática		Temp hoja	Irradiancia		$\psi$ agua hoja	$\psi$ sustrato
	hPa	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	°C	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	Mpa	hPa
<b>T1</b>	<b>14</b>	<b>108,0 a</b>	<b>9,1</b>	<b>21,9</b>	<b>183,5 a</b>	<b>41</b>	<b>-0,1 a</b>	<b>14</b>
T2	11	115,0 a	52	21,6	165,0 a	79	-0,1 a	18
<b>T4</b>	<b>22</b>	<b>121,5 a</b>	<b>28</b>	<b>21,5</b>	<b>112,5 a</b>	<b>52</b>	<b>-0,1 a</b>	<b>20</b>
T5	41	80,2 a	35	22,0	238,7 a	68	-0,1 a	22
T6	32	109,2 a	35	21,3	205,0 a	55	-0,1 a	23
T7	26	89,0 a	8,7	21,5	110,0 a	35	-0,1 a	16
T8	29	107,2 a	6,1	21,1	198,5 a	40	-0,1 a	18
		ns (p=0,577)		ns (p=0,532)		ns		
B)Trat	$\psi$ umbral	Cond. Estomática		Temp hoja	Irradiancia		$\psi$ agua hoja	$\psi$ sustrato
	hPa	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	°C	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	Mpa	hPa
T1	14	88,3 a	14	21,1	198,5 a	23	-0,1 a	18
<b>T2</b>	<b>11</b>	<b>113,0 a</b>	<b>22</b>	<b>25,4</b>	<b>330,0 a</b>	<b>48</b>	<b>-0,1 a</b>	<b>13</b>
T4	22	129,8 a	16	26,3	427,5 a	20	-0,1 a	19
T5	41	128,0 a	19	26,4	292,3 a	40	-0,1 a	25
T6	32	109,2 a	37	21,3	205,0 a	32	-0,1 a	20
T7	26	130,0 a	35	26,2	248,8 a	35	-0,1 a	18
T8	29	129,3 a	32	26,7	292,5 a	31	-0,1 a	20
		ns (p=0,549)		ns (p=0,093)		ns		

ns: diferencias no significativas entre medias por test de Tukey al 5% .

No se encontraron diferencias significativas en la conductancia estomática y en el potencial agua en hoja, que tuvo desvío cero. Los valores de  $\psi$  del sustrato estaban por debajo o cercanos a las  $\psi$  umbrales de riego.

De acuerdo a estos resultados se procedió a sobrepasar el  $\psi$  umbral para detectar algún signo de estrés, ya que no se pudieron combinar en todos los tratamientos las  $\psi$  umbral en los horarios del mediodía cuando debían realizarse las mediciones de las variables en hoja (cuadro 2.6.)

**Cuadro 2.6.:** Variables fisiológicas medidas el día 9/9 (n=4). Trat: tratamientos; Cond.: conductancia; temp.: temperatura;  $\psi$  agua: potencial agua en hoja;  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada al comienzo de las mediciones; CV%: coeficiente de variación.

Trat	$\psi$ umbral	Cond. Estomática		Temp. hoja	Irradiancia		$\psi$ agua hoja		$\psi$ sustrato
	hPa	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	°C	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV %	Mpa	CV%	hPa
T1	14	144,3 a	10	26,8	295,0 a	17	-0,22 a	12	29
T2	11	176,3 a	25	26,8	465,0 a	46	-0,23 a	22	15
T4	22	178,8 a	29	27,2	500,0 a	20	-0,24 a	20	28
<b>T5</b>	<b>41</b>	<b>152,5 a</b>	<b>30</b>	<b>27,1</b>	<b>421,3 a</b>	<b>23</b>	<b>-0,25 a</b>	<b>23</b>	<b>39</b>
<b>T6</b>	<b>32</b>	<b>113,0 a</b>	<b>16</b>	<b>26,6</b>	<b>306,0 a</b>	<b>18</b>	<b>-0,28 a</b>	<b>18</b>	<b>38</b>
<b>T7</b>	<b>26</b>	<b>186,8 a</b>	<b>23</b>	<b>26,7</b>	<b>402,5 a</b>	<b>11</b>	<b>-0,21 a</b>	<b>11</b>	<b>37</b>
<b>T8</b>	<b>29</b>	<b>123,0 a</b>	<b>22</b>	<b>27,0</b>	<b>421,2 a</b>	<b>23</b>	<b>-0,25 a</b>	<b>23</b>	<b>29</b>
		ns		ns		ns			

ns: diferencias no significativas entre medias por test de Tukey al 5% . En negrita los tratamientos donde se consideró que la  $\psi$  umbral era similar o < que la  $\psi$  del sustrato

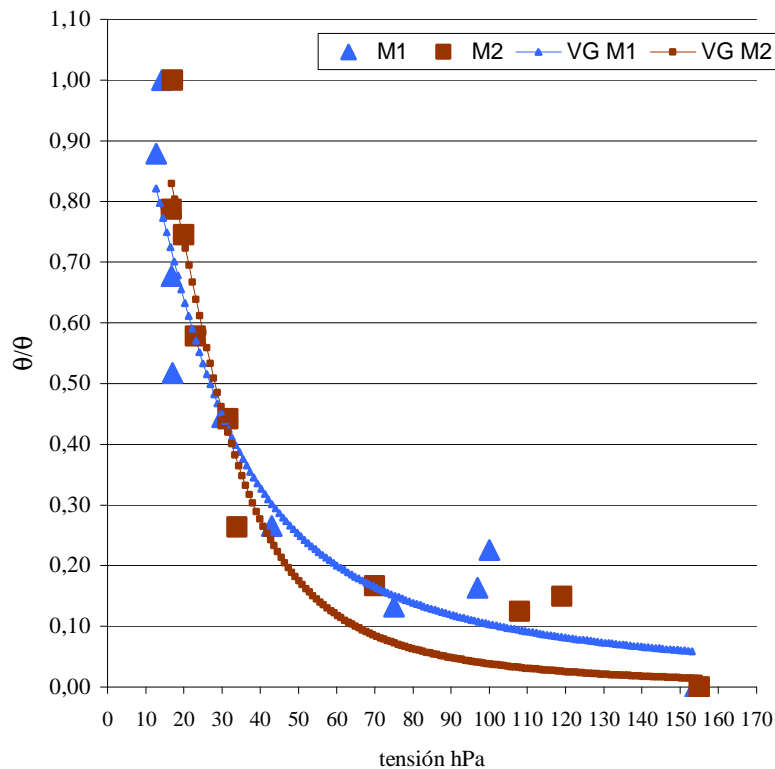
Los valores de  $\psi$  registrados son superiores o cercanos al umbral de riego de los tratamientos, sin embargo no se encontraron diferencias significativas en la respuesta de la planta a pesar de que el potencial agua en hoja presentó valores menores que en las mediciones anteriores. Sin embargo, hubo una leve disminución en el  $\psi$  agua en hoja en las plantas del sustrato M2 con los 4 tratamientos a  $\psi$  del sustrato más altas que en M1 pero dentro del AFD.

### 2.3.7. Experimento II

Los resultados de los contenidos hídricos relativos a la CC en función de las tensiones *in situ* y el ajuste mediante a función VG se muestran en la fig. 2.13. En el cuadro 2.7, se muestran los parámetros  $\alpha$  y  $n$  calculados por el modelo VG donde  $\theta_s$  y  $\theta_r$  fueron prefijados de acuerdo a las condiciones del experimento.

**Cuadro 2.7.:** Valores de los parámetros  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico relativo a la capacidad de contenedor (CC);  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual relativo a CC;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$  es el coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

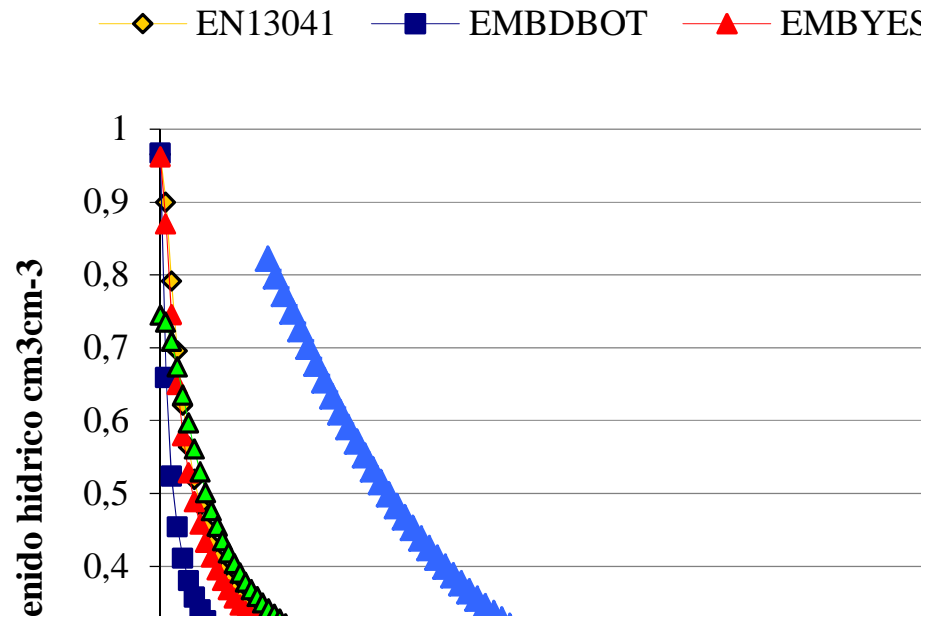
Sustrato	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$R^2$
M1	1	1,00E-06	0,001068	2,34	0,8892
M2	1	1,00E-06	3,05E-05	3,276	0,9217



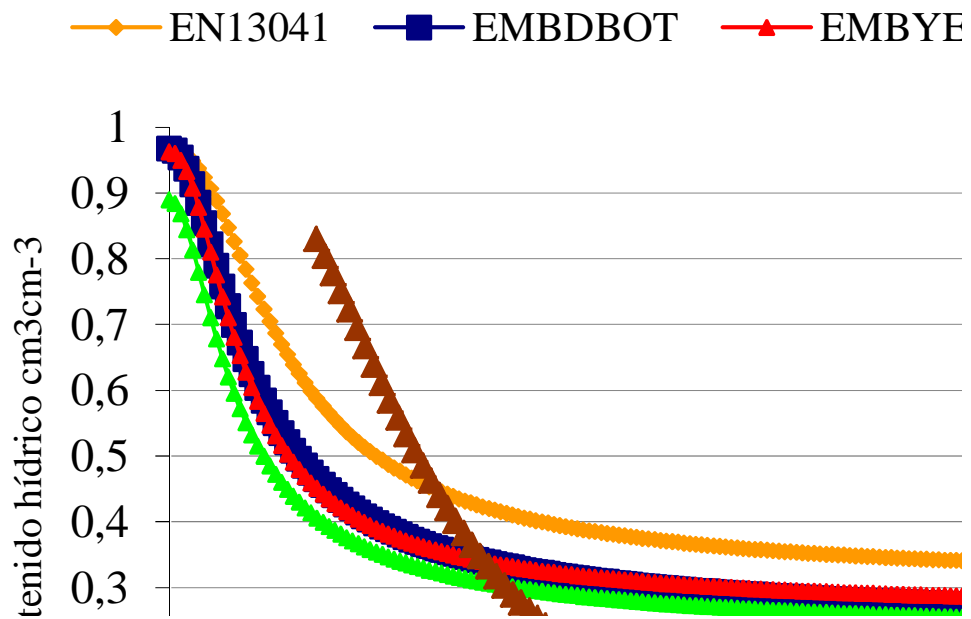
**Fig. 2.13.:** Valores medios de los contenidos hídricos  $\theta$  relativos a la capacidad de contenedor  $\theta_{CC}$  ( $n=12$ ) en función de las tensiones ( $n=3$ ) de M1 y M2. El ajuste corresponde a la función de van Genuchten: VG M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; VG M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Estos resultados se compararon con los valores obtenidos en las mediciones en laboratorio según EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS (fig. 2.1 A y B)

A



B



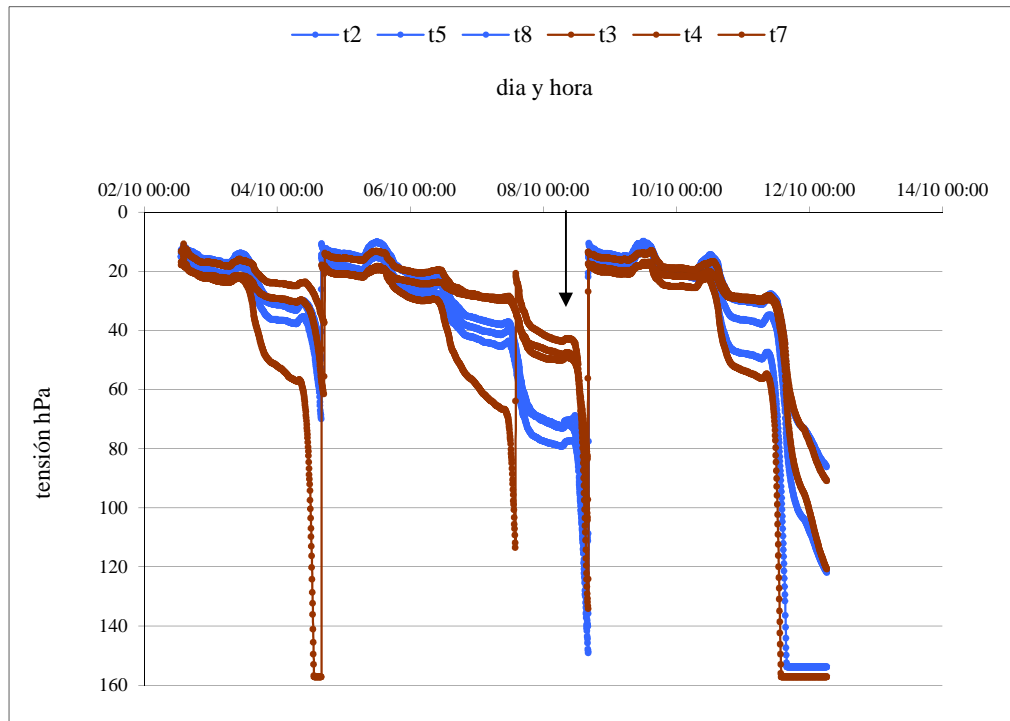
**Fig. 2.14.:** Curvas de retención de agua ajustadas con los pares  $\theta$ - $\psi$  según EN13041, EMBDBOT, EMBYESO y LEGBRAS comparados con los contenidos hídricos relativos a CC obtenidos *in situ*, en A) para M1 y en B) para M2

En las CR se observa que la forma de la curva dada por los parámetros de ajuste se mantiene similar a las CR de laboratorio en M2, mientras que en M1 la curva *in situ* presentó una pendiente más suavizada que las CR de laboratorio. Se observa un  $R^2 <$  al de las CR de laboratorio, con mayor variabilidad en el ajuste en la zona de altas tensiones.

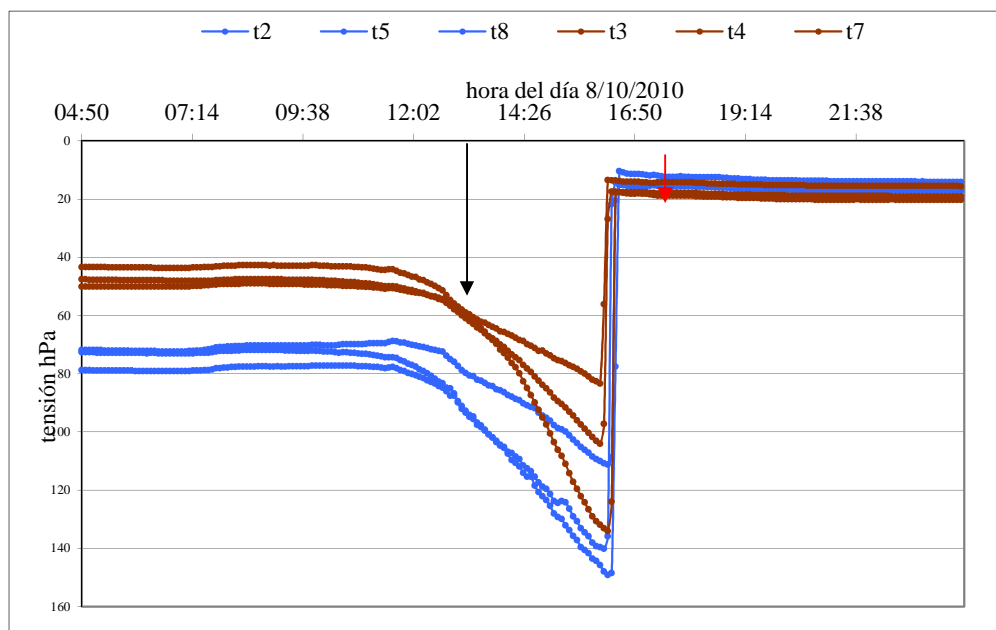
La fig 2.15, muestra la marcha de los tensiómetros t2-t5-t8 colocados en M1 (color azul) y t3-t4-t7 colocados en M2 (color marrón) en: A) desde el día 2/10/10 al

12/10/10, B) durante el día de las mediciones de variables fisiológicas 8/10/10 y C) el 8/10/10 durante el horario en que se realizaron estas mediciones

A

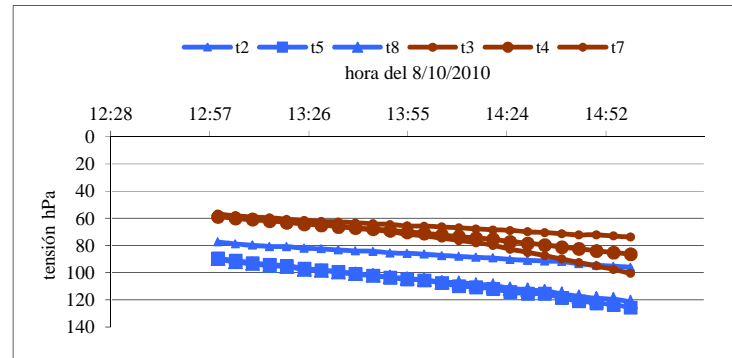


B





C



**Fig. 2.15.:** Registro de los tensiómetros t2-t5-t8 colocados en M1 (color azul) y t3-t4-t7 colocados en M2 (color marrón) en: A) desde el día 2/10 al 12/10, B) durante el día 8/10/2010 y C) el 8/10 durante el horario en que se midieron las variables fisiológicas. Las flechas negras indican el momento en que se realizaron las mediciones de las variables fisiológicas y la flecha roja el momento de riego.

Se observa en la fig 2.15 que la variabilidad en las mediciones de las  $\psi$  del sustrato es baja en el rango del AFD (10-50 hPa), aumentando a medida que el sustrato se secaba en el rango de AR (50-100 hPa) y que vuelve a disminuir luego de los riegos a CC. Además se evidencia que a partir de las horas del mediodía va aumentando la pendiente de la caída de la  $\psi$  del sustrato haciéndose más abrupta a medida que disminuyen  $\psi$  y  $\theta$ .

**Cuadro 2.8.:** Valores medios de las variables (n=12): Cond.: conductancia; temp: temperatura;  $\psi$  agua: potencial agua en hoja;  $\psi$  sustrato: tensión  $\psi$  registrada en la mitad de la duración de las mediciones (n=3); CV%: coeficientes de variación.

Sustrato	Cond. Estomática		Temp hoja	Irradiancia		$\psi$ agua hoja		$\psi$ sustrato	
	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	CV%	MPa	CV%	hPa	CV%
M1	145	20	23,9	368,3	27	-0,23	52	100	11
M2	140	25	24	324	28	-0,24	28	70	5

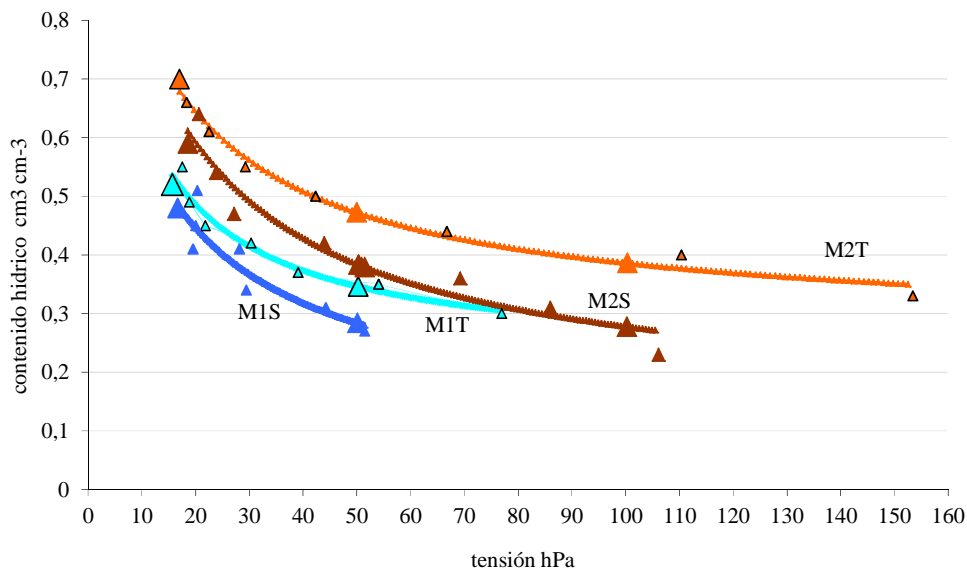
Los resultados muestran que las medias de los valores de los  $\psi_a$  en hoja presentaron CV altos, a valores altos de las  $\psi$  del sustrato. Se observaron distintas respuestas en las plantas dentro de los tratamientos, presentando algunas de ellas pérdida visible de turgencia y hasta marchitez permanente.

### 2.3.8. Experimento III

Los valores  $\theta - \psi$  medidos *in situ* en M1 y M2 se muestran en el cuadro 2.09. Las CR obtenidas por el modelo VG fueron graficados en la fig. 2.16 y los parámetros de ajuste se muestran en el cuadro 2.10. En el cuadro 2.11 figuran los pares  $\theta - \psi$  de CC medidos y los parámetros calculados según pares  $\theta - \psi$  del ajuste VG.

**Cuadro 2.9.:** Pares  $\theta$ - $\psi$  medidos *in situ*; coeficientes de variación (CV %),  $\theta$ : contenido hídrico volumétrico;  $\psi$ : tensión en el sustrato; M1 y M2 con planta: T: tolerantes y S: sensibles al estrés hídrico. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible; B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible.

Tratamiento	$\psi$ hPa	CV% n=2	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	CV% n=12	Tratamiento	$\psi$ hPa	CV% n=2	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	CV% n=12
M1T	16	14,6	0,55	7,4	M1S	16	15,0	0,51	4,8
	18	12,8	0,52	7,9		20	10,3	0,48	5,9
	19	13,4	0,49	8,7		20	5,9	0,45	7,0
	22	5,6	0,45	9,7		20	8,3	0,41	8,9
	30	1,8	0,42	10,5		28	5,5	0,38	10,5
	39	1,0	0,37	11,9		29	9,3	0,34	13,1
	54	2,4	0,35	13,1		44	6,3	0,31	15,3
	77	6,3	0,30	15,3		51	5,9	0,27	21,0
M2T	17	14,2	0,70	5,8	M2S	19	17,5	0,64	12,0
	18	15,3	0,66	6,0		21	15,3	0,59	14,0
	23	16,2	0,61	5,7		24	18,1	0,54	15,1
	29	10,5	0,55	6,1		27	38,9	0,47	17,9
	42	5,7	0,50	6,4		44	31,0	0,42	21,5
	67	7,1	0,44	7,8		69	57,0	0,36	25,7
	110	6,2	0,40	9,6		86	40,0	0,31	31,0
	153	4,2	0,33	14,6		106	5,9	0,23	41,6



**Fig 2.16.:** Puntos  $\theta$ - $\psi$  medidos *in situ* y curvas de retención de agua ajustadas por el modelo de van Genuchten de M1 y M2 con 2 tipos de planta: T: tolerantes y S: sensibles al estrés hídrico. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible (líneas azul y celeste); B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible (líneas marrón y naranja). Los marcadores

corresponden a los pares  $\theta$ - $\psi$  utilizados para el cálculo del agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible.

**Cuadro 2.10.:** Pares  $\theta$ - $\psi$  medidos *in situ* a capacidad de contenedor (CC) y parámetros: CC; agua fácilmente disponible (AFD); agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) calculados según pares  $\theta$ - $\psi$  obtenidos del ajuste. CV %: coeficiente de variación; n: número de repeticiones; M1 y M2 con planta: T: tolerantes y S: sensibles al estrés hídrico. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego); M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Tratamiento	CC medida				datos del ajuste				
	$\psi$ hPa	CV% n=2	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	CV% n=12	CC		ADF	AR	ADD
					$\psi$ hPa	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	.....cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> .....		
M1T	15,68 a	14,63	0,55 c	7,37	16	0,54	0,19		
M1S	16,09 a	15,01	0,51 c	4,83	15	0,49	0,21		
M2T	17,01 a	14,24	0,70 a	5,78	17	0,68	0,21	0,08	0,39
M2S	18,53 a	17,53	0,64 b	12,02	19	0,61	0,23	0,1	0,28

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) mediante test de Tukey

No se encontraron diferencias significativas ( $p=0,5662$ ) en la comparación de medias al 5%, de las  $\psi$  medidas a CC, en cambio si hubo diferencias altamente significativas ( $p < 0,0001$ ) entre los  $\theta$  a CC entre M1 y M2 y significativas entre plantas T y S en M2 ( $p=0,0027$ ). En ninguna de las 2 variables hubo interacción sustrato x planta.

Observando la fig 2.16 y los parámetros obtenidos en el cuadro 2.9 se hicieron las siguientes comparaciones de CR:

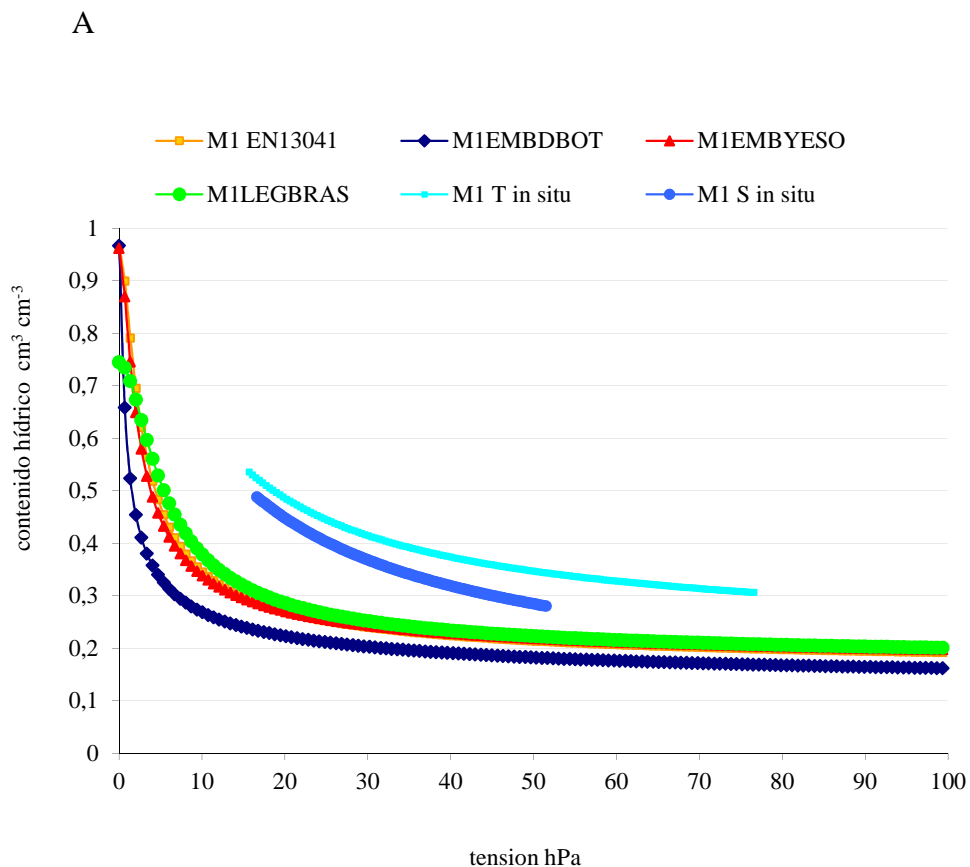
- efecto sustrato para el mismo tipo de planta: M1T-M2T; y M1S-M2S: las CR resultaron con una pendiente similar (casi paralelas) con  $\theta$  de  $M2T > M1T$  y de  $M2S > M1S$  confirmando la  $>$  retención de agua en M2 (cuadro 2.1)

- efecto planta en el mismo sustrato: M1T - M1S; y M2T -M2S, donde se encontró que los valores  $\theta$  de  $M1T > M1S$  y de  $M2T > M2S$ , diferencia que se acentúa a medida que los sustratos se van secando (disminuye  $\theta$ )

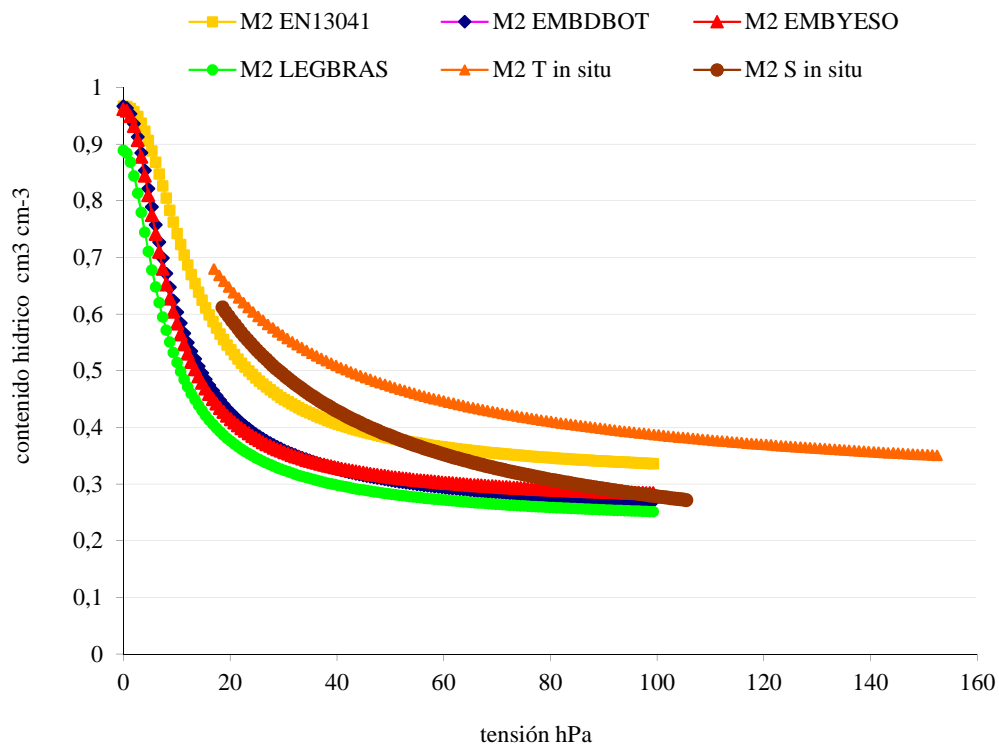
**Cuadro 2.11.:** Valores de los parámetros de ajuste matemático por van Genuchten de las curvas de retención de M1 y M2 *in situ*, con plantas tolerantes al estrés hídrico (T) y plantas sensibles (S).  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico en saturación;  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$ : coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Sustrato	Planta	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$R^2$
M1	T tolerante	0,9024	0,2013	0,03228	1,784	0,9562
	S sensible	0,9481	0,01	0,07427	1,546	0,8409
M2	T tolerante	0,95	0,2475	0,01657	1,723	0,985
	S sensible	0,95	0,1	0,01643	1,707	0,9393

Los valores  $\theta_s$  y  $\theta_r$  fueron calculados por la función de ajuste, fijando restricciones. La figura 2. 17 muestra las CR *in situ* y las obtenidas en laboratorio



B



**Fig. 2.17.:** Curvas de retención de agua CR trazadas con los datos medidos por 4 y las estimadas a partir de mediciones *in situ*, ajustadas según modelo de van Genuchten: A) para M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible; B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible.

Los gráficos muestran que para M1 con baja retención de agua, las CR de laboratorio están alejadas de las CR *in situ* en los valores de tensión próximos a CC y la diferencia es menor a medida que aumentan las tensiones y menor aún, para las plantas sensibles. En M2, la CR según EN13041 es la más cercana a las CR *in situ* en el rango 0-50 hPa del AFD, y siendo prácticamente similares para las plantas sensibles, mientras que las diferencias se minimizan entre todos los métodos a medida que aumentan las tensiones, en los valores del ADD (100 hPa)

**Cuadro 2.12.:** Conductancia estomática (Cond. Estom.); temperatura de hoja (T. hoja); irradiancia; potencial agua en hoja ( $\psi$  agua hoja); tensión en sustrato ( $\psi$  sustrato); contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ), medidos el día de finalización del ensayo en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego, M1T: con planta tolerante al estrés hídrico, M1S: con planta sensible; B) para M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, M2 T: con planta tolerante al estrés hídrico, M2 S con planta sensible.

Tratamiento	Cond. Estom. $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	T. hoja $^{\circ}\text{C}$	Irradiancia $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\psi$ agua hoja Mpa	$\psi$ sustrato hPa	$\theta$ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
M1T	128 a	28,2 a	401 a	-0,83 b	77 c	0,30 ab
M1S	154 a	28,12 a	380 a	-1,55 a	51 d	0,27 ab
M2T	145 a	28,2 a	380 a	-0,55 b	153 a	0,33 a
M2S	133 a	27,14 a	383 a	-1,525a	106 b	0,23 b
Prueba F	ns	ns	ns	***	**	*

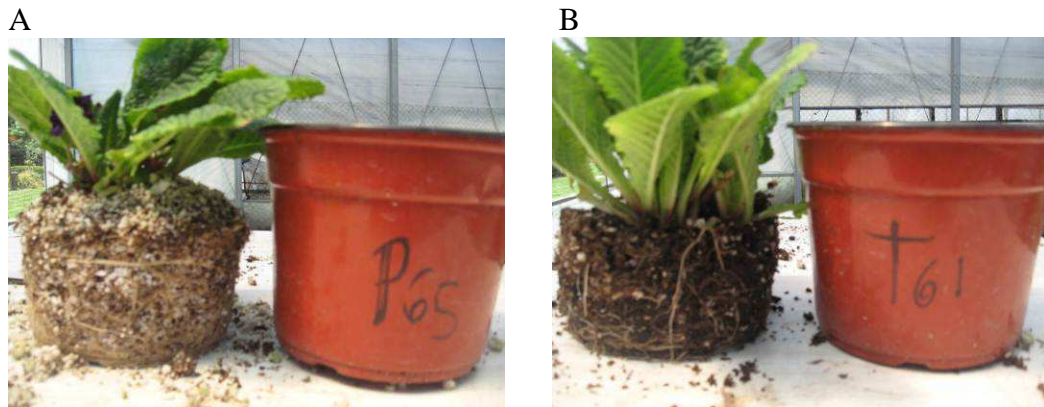
Letras distintas indican diferencias significativas con test de Tukey al 5%; ns: no significativa, \*, \*\*, \*\*\*; ( $p < 0,1$ ); ( $p < 0,001$ ) y ( $p < 0,0001$ ) respectivamente

### 2.3.8.1. Contracción de volumen

Luego de 7 meses de cultivo y sometidas las plantas a régimen de sequía, los sustratos sufrieron una contracción de volumen en las macetas al término de los ensayos (2.2.4.4). En la fig. 2.18 se muestra el nivel de los sustratos en las macetas en el comienzo del ensayo ocupando un volumen de  $800 \text{ cm}^3$ , después de algunos ciclos de regado y secado En las fig. 2.19 A, se muestra la contracción en M1 y en B la de M2.



**Fig 2.18.** Nivel de los sustratos M1 y M2 a una semana del enmacetado.



**Fig. 2.19.:** Contracción de volumen después de 7 meses de cultivo y sometido a régimen de sequía: A) en M1 y B) en M2; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego

Los resultados de la contracción de volumen IC (n=24) se muestran en el cuadro 2.13.

**Cuadro 2.13.:** Índice de contracción de volumen (IC) al finalizar los ensayos, en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego (n=24) CV %: coeficiente de variación

Sustrato	IC %	CV %
M1	5	2,55
M2	30	5

## 2.4. DISCUSION

Las propiedades físicas de un sustrato se relacionan con la respuesta vegetal ya que los sustratos son materiales formulados por la actividad humana, y su existencia a diferencia del suelo, sólo cobra importancia cuando constituyen el ambiente para el crecimiento de las raíces. Por lo tanto es necesario estudiarlos a partir de los requerimientos de las plantas.

Al requerirse una información más detallada de las características del sustrato, para la planificación del riego se midió el reparto de volúmenes agua y aire a valores de tensión intermedios a los considerados en un análisis de rutina. La medición de la CR *in situ* dio información suplementaria de la dependencia de la CR con la dinámica del agua en el sustrato incluyendo el efecto de las depresiones locales debido a la absorción de las raíces, y variación de las propiedades físicas con el transcurso del tiempo en cultivo.

Los resultados obtenidos en la caracterización física según los cuatro métodos muestran que las formulaciones de distintas proporciones de TTF y P poseen distantes valores de las relaciones agua-aire, de acuerdo al criterio de su elección, resultantes de la alta CRA que posee TTF y la alta CA de la P. Esta diferencia entre M1 y M2 se mantiene en los 4 métodos aplicados.

Los rangos de 0-10 hPa, 10-50 hPa y 50-100 hPa son los estudiados en la caracterización clásica a través de los parámetros CRA, AFD, AR y ADD. Sin embargo, se pierde información valiosa de los pares  $\theta$ - $\psi$  dentro de los rangos. En el trazado de las CR se obtuvo una estimación, según cada método, del comportamiento en el total del rango 0-100 hPa. En ese sentido, la medida de puntos en bajas  $\psi$  aporta datos útiles para un mejor ajuste en esta zona. El método EMBDBOT, midió pares en el rango 0-10 hPa. Si se realizan mediciones a 3, 5, 8 hPa en los métodos EMBYESO y EN13041 que miden en el mismo procedimiento la DSs a 10 hPa, se presenta el problema que, para poder pesar el sustrato húmedo en la medición del primer par  $\theta$ - $\psi$  (en este trabajo fue 5 hPa en EN13041), se debe retirar el cilindro superior y enrasar el material del inferior. El empaquetamiento de un sustrato es altamente sensible a cualquier disturbio, por lo tanto no se puede descartar una alteración del material cuando se llega a 10 hPa para el cálculo de la DSs. En ese sentido, Teres (2002) agrega que el punto crítico en la determinación de la DSs es la medida del volumen del sustrato inalterado. En el método LEGBRAS que utiliza sólo un cilindro inferior podrían realizarse estas mediciones si se cambiara el distribuidor de vidrio con salidas fijas por un sistema de drenaje con manguera. La información que brindan estos pares  $\theta$ - $\psi$  se puede utilizar para una interpretación agronómica para el uso de sustratos en bandejas multiceldas de baja altura, aún sin el ajuste de los datos.

Las distintas maneras de cuantificar el par  $\theta$ - $\psi$  para el valor cero de tensión se observan en los gráficos de las curvas ajustadas. En EN13041, EMBDBOT y EMBYESO donde se lo calculó según la fórmula de la PT, la forma de la CR para M1 reveló un potencial (o una tensión) de entrada de aire ( $\psi_e$ ) muy baja con una pendiente abrupta en la zona cercana al cero de tensión. Por el contrario, en LEGBRAS donde se lo midió en forma directa, la CR presentó una meseta que evidencia una mayor  $\psi_e$ , en parte por efecto del procedimiento de medida en un sustrato macroporoso como M1, con alto drenaje rápido, que produjo pérdida de parte del agua de saturación, que no llegó a ser pesada, subestimando el valor de  $\theta$  en el cero de tensión, mientras que en M2, al retener más agua, se facilitó la medición. Se observó en las CR en M2, en todos los métodos, una meseta inicial debido a los altos valores de  $\theta$ , siendo en EN13041 donde la  $\psi_e$  fue mayor debido al procedimiento de doble saturación del material que atenúa la característica hidrofóbica de la turba resultando en una mayor retención de agua. Estos resultados son similares a los encontrados por Carmona et al. (2003) en corcho, donde la  $\psi_e$  fue mayor con procedimientos en los que se saturaba mejor la muestra. La forma de las CR obtenidas en el rango 0-10 hPa ajustadas con VG coinciden con las publicadas por Savvas (2009) en perlita, fibra de coco y lana de roca, donde la meseta mayor (mayor  $\psi_e$ ) se presenta en la fibra de coco con mayor  $\theta$ . Los valores obtenidos del parámetro  $\alpha$  (la inversa de la  $\psi_e$ ), que resultaron del ajuste de las CR por VG, fueron en los 4 métodos mayores en M1 que en M2, correlacionándose de manera inversa con la aparición de las mesetas en los gráficos. La importancia de la información que brinda la  $\psi_e$ , tiene relación con la altura de la “tabla de agua” que se formará en la base del contenedor, con mayor efecto en contenedores de baja altura. A mayor  $\psi_e$ , menor  $\alpha$  y mayor altura de saturación en la base del contenedor (Noguera 1999).

La mayor variabilidad en la medición de las repeticiones de los pares  $\theta$ - $\psi$  en cada método de laboratorio, se encontró en M2, en el rango 0-50 hPa debido a los mayores volúmenes de agua. Estos datos coinciden con Terés (2002) que explica que a medida que nos alejamos de la saturación en el rango 0-100 hPa, van disminuyendo los valores absolutos de los volúmenes de agua, reduciéndose así la variabilidad de los resultados.

Los valores obtenidos en la  $K_s$ , fueron similares a los encontrados por otros autores: Wallach (1992a y b) en el rango de 0,52 a 7  $\text{cm min}^{-1}$  en diferentes sustratos; Orozco (1995) y Orozco y Marfà (1995) 0,3 a 0,8  $\text{cm min}^{-1}$  en perlitas finas. Otten et al. (1999) 6  $\text{cm min}^{-1}$  para sustrato a base de turba, sin embargo Orozco y Marfà (1995) encontraron valores hasta 181  $\text{cm min}^{-1}$  en perlitas gruesas y Landini et al. (2005) 53  $\text{cm min}^{-1}$  en perlita.

En los gráficos de las curvas de  $K_{ns}(\theta)$  estimadas para M1, se destaca la abrupta caída de pendiente en EMBDBOT, resultado de un alto valor del parámetro de ajuste  $\alpha$  en la CR. Los resultados obtenidos coinciden con Abad et al. (2005) en fibras y polvo de coco y en turba. Los autores explican que los métodos de laboratorio que tensionan desde la base, subestiman los parámetros relacionados con  $\theta$ , para sustratos macroporosos, relativos al volumen de agua que en la práctica, las plantas pueden absorber del sustrato. Esto ocurre por la pérdida de contacto entre el agua y las partículas gruesas a medida que el agua se remueve por la tensión aplicada. Estas condiciones producen valores artificialmente bajos para estos parámetros debido al alto contenido de aire de estos materiales, que presentan alta  $K_s$  que desciende rápidamente a medida que disminuye  $\theta$ . En el método EMBDBOT este efecto se ve maximizado por la poca altura de la muestra en los embudos de tensión, donde M1 presentó una  $K_{ns}(\theta)$  estimada, 5 ordenes menor en el par 10hPa-0,27  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ , valor muy cercano a la CC. En M2 los valores más altos de las  $\psi$  umbral de riego se debieron a la mayor capacidad



de retener agua en este sustrato. Resultados en rangos similares de las Kns, fueron hallados por otros autores en distintos materiales usados como sustratos (Raviv et al. 1999; Wallach et al. 1992a y b).

Los registros obtenidos en tiempo real en el sustrato sin planta y a CC, presentaron una variabilidad que se explica por el contacto ejercido o no, en las interfases sustrato-agua-placa porosa producidos por los distintos empaquetamientos de M1 y M2 asociados con las diferentes distribución de tamaño de partícula DTP, a mayor tamaño de partícula menor interfase sustrato-agua-raíz. Mientras que, en las mediciones *in situ* durante el experimento II, la variabilidad más baja entre tensiómetros en el rango de AFD (10-50 hPa) estaría asociada a un mejor contacto ejercido entre la interfase que en rango de AR (50-100 hPa) por tener mayor contenido de agua. A medida que aumenta la irradiancia, aumenta la absorción de agua, desfasada de la transpiración, y el máximo ocurre poco tiempo después de las horas de máxima irradiancia con máxima transpiración. En ese momento se presentó la mayor variabilidad entre los tensiómetros, producto de la absorción diferenciada entre plantas y posibles zonas de depresión que pueden formarse al azar alrededor de la placa porosa de los tensiómetros, por proximidad con un macroporo o con una zona de raíces más eficientes. Inclusive, al haber sido el riego realizado con manguera, la fuerza del agua podría provocar algún disturbio en el empaquetamiento de las partículas durante el riego. Testezlaf et al. (1999), evaluaron el uso de tensiómetros con transductores de presión para monitoreo de riego, en mezcla de corteza:turba:arena y obtuvieron un CV de hasta 55% en las mediciones, mientras Norrie et al. (1994) publicaron CV de alrededor de 25% en tensiómetros para control de riego en cultivo de tomate en 70%turba: 30%perlita, ambos con un n=4.

Estas tendencias en las variabilidades no se repitieron en el experimento III, donde los tratamientos se hicieron considerando los dos tipos de plantas. Sin embargo, en el tratamiento M2S, los altos CV% podrían explicarse por formación de alguna zona de depresión, alrededor de la placa porosa.

Las CR relativas a la CC, que se obtuvieron en el experimento II, como las CR *in situ* del experimento III, muestran un alejamiento de las CR de laboratorio según los 4 métodos, aún más en el rango 10-50 hPa, de interés para el manejo del riego. A ese respecto, si se compara el par  $\theta-\psi$  a CC obtenido en las CR *in situ*, con los obtenidos en laboratorio a esa  $\psi$ , la diferencia más pronunciada que en M1, se puede explicar en parte, por el efecto del método en el tensionado de sustratos macroporosos que subestiman  $\theta$ , con la mayor diferencia en EMBDBOT. Las menores diferencias en M2 se pueden deber al mayor volumen de agua y en particular el método EN13041 con valores muy similares a las CR *in situ*, cercanos al procedimiento de doble saturación de la muestra. También podría tener influencia el tipo de “tejido” de las raíces, que sin ser objeto de análisis en este trabajo, fue observado visualmente, presentando en M1 menor cantidad de raíces y más gruesas y en M2 un entramado más fino y abundante, lo que está relacionado con el tamaño de poro por donde crecen las raíces. Wallach y Raviv (2005) encontraron también diferencias similares entre las CR *in situ* y las de laboratorio, en un sustrato inorgánico macroporoso en un cultivo de rosa.

En el experimento I, no hubo respuesta diferenciada de las plantas a los tratamientos, a pesar de que algunas mediciones fisiológicas se tomaron cuando se sobrepasó la  $\psi$  umbral. No se encontraron diferencias significativas en la conductancia estomática, ni en el potencial agua en hoja para los tratamientos de riego en cada sustrato, por lo tanto se puede decir que cualquiera de los 4 métodos usados para la determinación de las CR, serían útiles en estos 2 sustratos para la estimación de la Kns( $\theta$ ) como base para el manejo del riego, en la especie y en las condiciones en las que

fue realizado el experimento. Sin embargo, en M2 donde se alcanzó tensiones mayores en el sustrato, los valores del potencial en hoja fueron levemente menores aunque sin modificarse la conductancia estómatomica, que está relacionada con la creación de biomasa. Por lo tanto esta información no es suficiente para saber si hay condiciones de estrés. En futuros experimentos se propone evaluar el crecimiento de la planta.

En el experimento II, las mediciones de las variables fisiológicas, se realizaron a una  $\psi$  del sustrato en el rango del AR, con 4 días sin riego y los valores medios del potencial agua en hoja no serían los esperados para plantas con altas necesidades hídricas ya que los valores de tensión en el sustrato se ubicaron en el rango de AR e inclusive en ADD para M1. Sin embargo, la variabilidad fue muy alta, comparada con la que se obtuvo en el experimento I cuando las plantas estaban bien hidratadas. Esta respuesta se explicaría por un comportamiento diferencial de las plantas frente al estrés hídrico, que se detectó visualmente en el cultivo, ya que dentro del mismo tratamiento (sustrato) algunas permanecían mucho más turgentes que otras.

En el experimento III, donde los tratamientos se realizaron según la tolerancia diferencial de los individuos a la sequía, se observó un paralelismo entre las CR pertenecientes al mismo tipo de planta: sensible o tolerante al estrés con contenidos mayores de  $\theta$  en M2. En este caso la planta resultó en una jerarquía superior al sustrato. Las pendientes de las CR, que indican como el sustrato va liberando el agua a medida que las raíces absorben, nos muestran ese comportamiento diferencial. Al comparar las curvas para un mismo sustrato y con predicción que tienen igual oferta de agua, se observa que las plantas tolerantes son las que absorbieron menor cantidad de agua, con una CR de pendiente más suave que las sensibles. Por lo tanto, la tolerancia está dada en la raíz, que tiene que ver con la absorción diferenciada y como afecta la forma de la CR. Esta diferencia podría estar relacionada con el momento de la floración, ya que las plantas que pertenecían al grupo de las sensibles fueron las que florecieron primero, disminuyendo en esa etapa la producción de raíces.

En el rango de AR (50-100 hPa) las plantas tolerantes consiguieron mantenerse con mayores potenciales en hoja tanto en M1 como en M2. Testezlaf et al. (1999) encontraron que plantas de *Chrysanthemum* absorbían más agua en el sustrato con más retención hídrica, lo que coincide con los mayores valores de  $\psi$  del sustrato registradas en M2, en el rango del AR (50-100 hPa). Se encontraron diferencias significativas entre los potenciales agua en hoja entre plantas tolerantes y plantas sensibles confirmando el comportamiento diferencial.

La subvaloración de los  $\theta$  que se registra en las CR de los métodos de laboratorio, se traslada a la estimación de la  $K_{ns}(\theta)$  con una relación inversa, y por lo tanto la planificación del riego en base a estos datos podría sobrevalorar la  $K_{ns}$  del sustrato en el cultivo, los riegos podrían estar sobredimensionados, y esto podría explicar que las plantas no registraron diferencias en las relaciones hídricas con cualquiera de los métodos. Esta información podría ser interesante visando un ajuste en el diseño del riego, para obtener economía de agua, evitar lixiviados y contaminación.

## 2.5. CONCLUSIONES

La primera hipótesis planteada se probó en parte, ya que las diferencias en los resultados dependieron del método, del sustrato y del rango de análisis. En el sustrato macroporoso M1, los cuatro métodos subestiman el contenido hídrico siendo EMBDBOT, donde este efecto se maximiza por la poca altura de la muestra. En M2 sustrato con mayor retención de agua, el método EN13041 es el que presenta mayor contenido hídrico por la doble saturación inicial de la muestra. Por lo tanto ambos

efectos se ven reflejados en la modelización de  $K_{ns}(\theta)$ . En el rango del AR (50-100 hPa) estas diferencias se minimizan a medida que disminuye el contenido hídrico y cae la  $K_{ns}(\theta)$ .

La segunda hipótesis no fue comprobada, ya que los tratamientos de riego planificados de acuerdo al parámetro  $K_{ns}$  según los cuatro métodos, no se encontraron diferencias significativas en la conductancia estomática y en el potencial agua en hoja de *Primulas polyantha*. Sin embargo en el sustrato M2 el potencial agua en hoja presentó valores ligeramente mayores que las plantas cultivadas en M1, sin presentar diferencias en la conductancia estomática, datos que no fueron suficientes para evaluar si hubo estrés hídrico.

La hipótesis tres fue probada ya que las CR de laboratorio presentaron una subestimación de los contenidos hídricos, sin embargo, se destaca el método EN13041 en M2, presentó valores muy cercanos a la CR *in situ* debido a la influencia procedimiento de doble saturación inicial de la muestra en este tipo de sustrato. El mayor contenido hídrico de las CR *in situ* se debió también al efecto del manejo del riego que produjo una contracción del volumen final del sustrato, más evidente en el sustrato con mayor proporción de turba.

En el transcurso del experimento II se percibió por observación visual una tolerancia diferencial de algunas plantas al estrés hídrico, con síntomas de pérdida de turgencia en hojas. Esto permitió plantear una nueva hipótesis para un nuevo experimento:

4) Las CR *in situ* serán diferentes según la respuesta a las relaciones hídricas en las plantas.

Predicción: Los contenidos hídricos en los sustratos con plantas tolerantes serán mayor que los de las plantas sensibles, en un mismo sustrato para una misma tensión.

La hipótesis cuatro fue aceptada ya que las CR de las plantas tolerantes, tanto para M1 como para M2, presentaron mayores contenidos hídricos. Las pendientes de las CR para un mismo sustrato fueron diferentes, siendo más suave en las tolerantes coincidiendo con una menor absorción. Se encontraron diferencias altamente significativas entre los potenciales hoja en las plantas tolerantes y sensibles.

## CAPITULO FINAL

## Conclusiones Generales

El motivo de la realización de la tesis fue el siguiente:

Los sustratos para plantas son materiales con un futuro promisorio considerando que su uso tiene amplias ventajas en la sustentabilidad del medio ambiente, siendo sus propiedades físicas las más importantes. En Argentina su estudio es aún incipiente y exige el uso de un lenguaje en común referido a definiciones de las propiedades físicas y términos técnicos, la elección de las metodologías analíticas de referencia y sobre todo una legislación actualizada y específica a los tipos de material. La gran cantidad de información sobre metodologías que se tiene de otros países es una ventaja, pero no se encontraron trabajos en la literatura donde se realice una comparación de los métodos más comúnmente usados en Europa, USA y Brasil, llevando a interpretaciones erróneas de los resultados.

En este marco, las preguntas que surgieron fueron:

- 1- ¿Cual de los métodos que están descriptos en los trabajos internacionales será el más apropiado a nuestras necesidades y materiales?
- 2- ¿Los resultados serán diferentes?, y si fueran ¿De que depende y que interpretación se le podrá dar a los mismos: comercial o agronómica?
- 3- ¿Si se planifica un riego con los resultados de los distintos métodos, la planta tendrá respuestas hídricas diferentes?
- 4- ¿Que diferencia existe entre los parámetros de laboratorio y los *in situ*?

Las respuestas encontradas fueron:

En relación a las preguntas 1 y 2-

- Los resultados obtenidos por los distintos métodos, fueron diferentes entre algunos métodos, dependiendo de la variable medida, del tipo de material y de la interpretación.
- Para la interpretación comercial se tuvo en cuenta la simplicidad, la precisión, el bajo costo para facilitar la difusión de los análisis y el control de calidad
- Para una interpretación agronómica se consideró que los procedimientos de los métodos simularan alguna de las diversas condiciones de cultivo,

De acuerdo a esos resultados y teniendo en cuenta criterios de evaluación, tanto en aspectos relacionados a las propiedades y parámetros definidos, como en cuanto a la precisión, exactitud, dificultades en la rutina, costos, entre los más significativos se realizan las siguientes recomendaciones:

- Para la densidad de sustrato húmeda el método recomendado fue el IN 17, de la legislación brasilera, por su sencillez tanto en el procedimiento como en el equipamiento, la precisión y con resultados para una interpretación como agronómica y para ser utilizada para el cálculo del volumen en los análisis químicos.
- Para una caracterización física básica de los materiales, el método recomendado fue el desarrollado por la NCSU, por la rapidez de los resultados, su versatilidad, su precisión y la interpretación agronómica de los mismos para la elección del tamaño del contenedor.
- Para una caracterización física completa de todos los parámetros hídricos se recomienda el método EN13041 de la norma europea CEN, por la estandarización de los factores que afectan los resultados, la precisión y una interpretación comercial en las variables DSs y CRA y agronómica en el total de las variables medidas.

En relación a la pregunta 3- se encontró que los riegos diseñados en base a las distintas maneras de obtener los parámetros estáticos y dinámicos: CR, Ks y Kns según

los 4 métodos aplicados, no afectaron la conductancia estómatomica ni el potencial agua en hoja de plantas de *Primula polyantha*, de lo que se deduce que cualquiera de los cuatro métodos sería apropiado como base para un diseño de manejo de riego. Esto resultados obtenidos en el experimento I se pueden relacionar con los obtenidos en el experimento III respondiendo a la pregunta 4: Se encontró que los parámetros obtenidos según 4 métodos de laboratorio, subestiman los contenidos hídricos respecto al cultivo *in situ* en la siguiente medida:

- El efecto es mayor en el sustrato con alta porosidad de aire y máximo en EMBDBOT
- El efecto es menor en el sustrato que retiene más agua y se minimiza en EN13041 con mejor saturación de la muestra
- Este efecto se traslada a la modelización de la Kns ( $\theta$ ) y por lo tanto los riegos están sobredimensionados, lo que explica la diferencia no encontrada en los tratamientos.
- Los mayores contenidos hídricos en CR *in situ* se deben al espacio ocupado por las raíces y posiblemente al efecto del riego con manguera desde arriba en los contenedores.
- Los sustratos con plantas tolerantes al estrés hídrico tuvieron las CR *in situ* con mayor contenido hídrico que el sustrato con planta sensible y se explica por la absorción diferencial que ocurrió entre individuos.

Teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones encontradas en los procedimientos empleados durante el trabajo, se podría plantear como futuro desafío el desarrollo de una metodología que considerara las mejores opciones en cuanto a : la determinación de varios parámetros simultáneamente, la representatividad de la submuestra analizada, la medición lo más directa posible de las magnitudes, la rapidez en la obtención de los resultados, la independencia en las repeticiones, sencillez de diseño y mantenimiento de los dispositivos de tensión, bajo efecto operador y control de las variables que afectan los resultados. Haciendo una revisión de algunas consideraciones, se tendría en cuenta las siguientes ventajas del uso de:

**Cilindros mayores:** Doble cilindro superpuesto de diámetro 10 cm y altura 5cm:

Mayor cantidad de muestra, mayor probabilidad de homogeneidad y muestra representativa.

**Doble saturación de la muestra con pretensionado o elevado contenido de humedad en la muestra inicial:** evita el fenómeno de subsidencia, imitando condiciones de varios ciclos de riego y secado.

**Dispositivos de tensión individuales:** Embudos de tensión con placas de yeso:

las muestras no son perturbadas por el drenaje de otras muestras de distintos materiales lo que ocurre en lechos grandes; fácil construcción artesanal de las placas, mantenimiento y reposición a bajo costo; posibilidad de medición directa del volumen del agua drenada para obtener resultados con interpretación agronómica.

**Aplicación de las tensiones en submuestras distintas:** la posibilidad de fabricar muchos embudos de tensión a bajo costo y en poco espacio, permite la aplicación de distintas tensiones (Ej: 10, 50 y 100 hPa) individualmente en distintas submuestras: Se evita la perturbación del sustrato y del contacto sustrato-yeso en las sucesivas pesadas y la separación del cilindro superior se realiza una vez llegada a la tensión deseada garantizando que el volumen del sustrato sea el volumen total del cilindro. Este procedimiento reduciría en varios días el tiempo del análisis.

Otra línea de estudio que se desprende de los resultados del trabajo es la utilidad en determinar un material patrón de referencia para la calibración de las metodologías. Si bien la preocupación con la exactitud y la precisión que se maneja en laboratorio no tienen que ver con un enfoque agronómico, estas consideraciones tendrían aplicación para control de calidad en transacciones comerciales.

Los resultados obtenidos en este trabajo con los diferentes métodos para la caracterización física de los sustratos para plantas y la difusión de los respectivos protocolos, aportan a una discusión amplia e interdisciplinaria pendiente en el país en el sector. Se debe abarcar tanto la necesidad de la elección de métodos de referencia a ser adoptadas en una futura legislación que regule la producción y comercialización de los sustratos y la creación de normas basadas en trabajos interlaboratorios, como las metodologías para la interpretación agronómica de los resultados para recomendaciones técnicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M., Noguera, V., Martínez-Herrero, M.D., Herrero, M.A., Fornes, F. y Martínez-Corts, J. 1990, Propiedades físicas y químicas de medios de cultivo a base de turba negra y su relación con el crecimiento de las plantas. I.N.I.A. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 5(2):246-258. Madrid.
- Abad, M., Martínez-Herrero, M.D., Martínez-García, P.F. y Martínez-Corts, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Acta de Horticultura*, 11:141-154, Madrid.
- Abad, M. y Noguera, P. 1997. Los sustratos en los cultivos sin suelo. Pp 101-150 en: Urrestarazu, M. (ed.). *Manual de cultivo sin suelo*, Universidad de Almería, Almería.
- Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, A. y Puchades, R. 2005. Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience* 40(7):2138-2144
- Aendereck, T. 1997. Decomposition of peat substrate in relation to physical properties and growth of *chamaecyparis*. *Acta Hort.* 450:191-198
- Allaire, S., Caron, J., Duchesne, I., Parent, L.E. y Rioux, J.A. 1996. Air-filled porosity, gas relative diffusivity, and tortuosity: indices of *Prunus x cisterna* sp. Growth in peat substrate. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121 (2):236-242
- Allaire, S., Caron, J., Menard, C. y Dorais, M. 2004. Growing media varying in particle size and shape for greenhouse tomato. *Acta Hort.* 644: 307-311
- Altland, J., Owen, J. y Fonteno, W. 2010. Developing moisture characteristic curves and their descriptive functions at low tensions for soilless substrates. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 135:563-567
- Ansorena Miner, J. 1994. *Sustratos, propiedades y caracterización*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Amha, Y., Bohne, h. Schmilewski, G., Picken, P. y Reinikainen. 2010. Physical, chemical and botanical characteristics of peats used in the horticultural industry. *Europ.J.Hort.Sci.*, (4):177-183
- Baumgarten, A. 2001. Statistical evaluation of the methods standardized by CEN. *Acta Hort.* 548:647-653
- Baumgarten, A. 2002. Methods of chemical and physical evaluation of substrates for plants. Pp 7-15 en: Furlani, A.M.C. (ed). *Caracterização, manejo e qualidade de sustratos para produção de plantas*. Instituto Agronômico, Campinas.
- Baumgarten, A. 2004. CEN- methods (European standard) for determining plant available nutrients- a comparison. *Acta Hort.* 644: 343-349



- Baumgarten, A. 2009. Advances in the standardisation of analytical techniques: the work of CEN TC 223, WG4. *Acta Hort.* 819: 59-64
- Bárbaro, L.A., Karlanianm, M., Gonzalez, J., Valenzuela, O., Gallardo, C., del Pardo, C., Balcaza, L., Mizuno, M., Fernandez, H., y Morisigue, D. 2008. Caracterización de sustratos de siembra utilizados en Escobar, Moreno y La Plata para el cultivo de especies ornamentales, XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis.
- Berenguer, J.J., García Lozano, M., Escobar, I. y Téllez, M.M. 2004. Evaluación del volumen, tiempo de uso y geometría del contenedor en cultivos en fibra de coco. *Acta VII jornadas de Sustratos de la SECH:*163-169. Madrid.
- Bergeron, O., Lamhamedi, S., Margolis, H., Bernier, P. y Stowe, D. 2004. Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air-sli containers. *Hort. Sci.* 39(3):599-605
- Bilderback, T.E. y Fonteno, W. 1987. Effects of Container Geometry and Media Physical Properties on Air and Water Volumes in Containers. *J. Environ. Hort.* 5(4): 180-182
- Bilderback, T.E. y Fonteno, W. 1993. Improving nutrient and moisture retention in pine bark substrates with rockwool and compost combinations. *Acta Hort.* 342:265-272
- Bilderback, T.E. 2001. Environmentally compatible container plant production practices. *Acta Hort.* 548:311-318
- Blok, C. 1999. Air/Water management in rockwool slabs. *Acta Hort.* 481: 79-87
- Blok, C., de Kreij, C., Baas, R., y Wever, G. 2008. Analytical methods used in soilless cultivation. Pp 245-289 en: Raviv, M. y Leith, J.H. (eds) *Soilless culture: theory and practice*, Elsevier, USA
- Blom, T. y Piott, B. 1992. Preplant moisture content and compaction of peatwool using two irrigation techniques on potted Chrysanthemums. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117 (2):220-223
- Bohne, H. y Günther, C. 1997. Physical properties of peat determined with different methods. *Acta Hort.* 450:271-276
- Bohnert, C., Starbuck, C. y Anderson, S. 2008. Amending a gravel based growing medium with calcined clay improves physical properties and seedling growth. *J. Environ. Hort.* 26(3):149-156
- Boyer, C., Fain, G., Gilliam, C., Gallagher, T., Torbert, H. y Sibley, J. 2008. Clean Chip Residual: A Substrate Component for Growing Annuals. *HortTechnology* 18 (3):423-432
- Buck, J. y Evans, M. 2010. Physical properties of ground parboiled fresh rice hulls used as a horticultural root substrate. *HortScience* 45: 643-649

- Bunt, A.C. 1983. Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particles size and bulk density for potting substrates. *Acta Hort.* 150:143-153
- Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hyman, London, UK, 309 pp
- Bunt, A.C. 1991. The relationship of oxygen difusión rate to the air-filled porosity of potting substrates. *Acta Hort.* 294:215-224
- Burés, S. y Pokorny, F. 1991. Equation for estimating shrinkage in binary mixtures of container media. *HortScience* 26(8):1087
- Burés, S., Martinez, F.X., y Perez, N. 1991. Physical properties of substrate mixtures according to the characteristics of the original materials. *Acta Hort.* 294 : 207-214
- Burés, S., Gago, C., Morales, O., Marfà, O. Martinez, F.X. 1997a. Water characterization in granular materials (refereed). *Acta Hort.* 450 : 389-396
- Burés, S., Marfà, O., Perez, T., Tébar, J. y Lloret. A. 1997b. Measure of Substrates Unsaturated Hydraulic Conductivity (Refereed). *Acta Hort.* 450: 297-303
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas. Madrid. 342 pp.
- Burger, D.W., Hartz, T.K. y Forister, G.W. 1997. Composted green waste as a container medium amendment for the production of ornamental plants. *HortScience*, Vol. 32(1): 57-60
- Bragg, N.C. y Chambers, B.J. 1988. Interpretation and advisory application of compost air-filled porosity (AFP) measurements. *Acta Hort.* 221:35-44
- Cáceres, R. 2002. Medida del potencial matricial de sustratos mediante electrotensiómetros. VI Jornadas de sustratos SECH, Barcelona 13 pp
- Cáceres, R., Casadesús y Marfà, O. 2004. Riego automático en ornamentales de exterior. *Horticultura* 180:14-18
- Cáceres, R., Casadesús y Marfà, O. 2008. Comparison of methods to automatically activate irrigation systems for shrub species grown outdoors in containers. *Acta Hort.* 779: 461-470
- Cadahia Lopez, C. 2005. Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales Mundi-Prensa Libros, SA (ed). España. 475 pp
- Campos Motta, L., Blok, C. y van Meeteren, U. 2009. Comparison of the physical properties of vermicompost from paper mill sludge and green compost as substitutes for peat base growing media. *Acta Hort.* 891: 227-234
- Carmona, E., Ordovás, J., Moreno, M.T., Avilés, M., Aguado, M.T. y Ortega, M.C. 2003. Hydrological propierties of cork container media. *HortScience* 38(6): 1235-1241.

- Caron, J. y Nkongolo, V.K.N. 1999. Aeration in growing media: recent developments. *Acta Hort.* 481: 545-551
- Caron, J., Morel, P. y Rivière, L.M. 2001. Aeration in growing media containing large particles size. *Acta Hort.* 548:229-234.
- Caron, J. y Elrick, D. 2005. Measuring the Unsaturated Hydraulic Conductivity of growing media with tension disc. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:783-793.
- Caron, J., Elrick, D., Beeson, R. y Boudreau, J. 2005. Defining critical capillary rise properties for growing media in nurseries. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:794-806.
- Casadesús, J. 2002. Medida del contenido de agua en sustratos mediante TDR. VI Jornadas de sustratos SECH-Barcelona, 7 pp
- Cassel, D.K., y Nielsen, D.R. 1986. Field capacity and available water methods of soil analysis. En Klute, A. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- CEN EN-13040. 1999. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Preparación de la muestra para análisis físicos y químicos y determinación de densidad compactada en laboratorio. Training course september 2003. Freising. Germany
- CEN EN-13041. 1999. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. Training course September 2003. Freising
- CEN EN-13039. 1999. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas. Training course September 2003. Freising
- Corá, J.E. y Fernandes, C. 2008. Curvas característica de retenção de agua para sustratos. VI ENSUB Encontro nacional de sustratos para plantas. Fortaleza, Brasil
- Chong, C. 1999. Two industrial water-derived wastes as potential potting amendments. *Acta Hort.* 481:165-172.
- Danielson, R. y Sutherland, R. 1986. Porosidad. Pp 443-461 in Klute, A (ed), *Methods of Soil Analysis, series 9*, 2nd Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin
- Dartiguès, A. 1982. The problem of the salinity for ornamental plants grown in pots and containers : determination and interpretation. *Acta Hort.* 126:203-212
- da Silva, F., Wallach, R. y Chen, Y. 1993. Hydraulic properties of *sphagnum* peat moss and tuff (scoria) and their potential effects on water availability. *Plant and Soil* 154:119-126

- da Silva, F., Wallach, R., Polak, A. y Chen, Y. 1998. Measuring water content of soil substitutes with time-domain reflectometry (TDR). *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123(4):734-737
- De Boodt, M. y 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. y Verdonck, O. 1971. Physical properties of peat and peat-moulds improved by perlite and foam-plastics in relation to ornamental plant-growth. *Acta Hort.* 18:9-25
- De Boodt, M. y Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* 26: 37-44
- De Boodt, M. y Verdonck, O. y Cappaert, J. 1974a. Determination and study of the water availability of substrates of ornamental plant growing. *Acta Hort.* 35:89-94.
- De Boodt, M. y Verdonck, O. y Cappaert, J. 1974b. Methods for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37:2054-2062
- Di Benedetto, A. 2007. Alternative substrates for potted ornamental plants based on argentinean peat and argentinean river waste: A review. *Floriculture and Ornamental Biotechnology* 1(2):90-101
- Drzal, M.S., Cassel, D. y Fonteno, W.C. 1999. Pore fraction Analysis: a new tool for substrate testing. *Acta Hort.* 481:43-54
- Elstein, J., Welbaum, G.E., Stewart, D.A. y Borys, D.R. 2008. Evaluating growing media for a shallow-rooted vegetable crop production system on a green roof. *Acta Hort.* 782:177-184
- Fernandes, C. y Corá, J.E. 2002. Efeito da altura do anel volumétrico na determinação da curva de retenção de água em sustratos. Pp 84 en: Furlani, A.M.C. (ed). *Caracterização, manejo e qualidade de sustratos para produção de plantas.* Instituto Agronômico, Campinas. 122 pp
- Fermino, M.H. 1996. Aproveitamento de resíduos industriais e agrícolas como alternativas de sustratos hortícolas. Tesis de maestrado en Fitotecnia. UFRGS Porto Alegre
- Fermino, M.H. 2003. Métodos de Análise para caracterização física de sustratos para plantas. Tesis doctoral en Fitotecnia. UFRGS Porto Alegre.
- Fermino, M.H. y Kämpf, A. 2005. Considerations about the packing density of growing media prepared under increasing levels of humidity. *Acta Hort.* 697:147-151
- Fonteno, W.C., Cassel, D.K. y Larson, R.A. 1981. Physical properties of three container media and their effect on poinsettia growth. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106(6): 736-741

- Fonteno, W. 1989. An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. *Acta Hort.* 238: 67-74
- Fonteno, W. 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta Hort.* 342:197-204
- Fonteno, W. y Bilderback, T. 1993. Impact of Hydrogel on physical properties of coarse-structured horticultural substrates. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118(2): 217-222
- Fonteno, W. 1996. Growing media: Types and physical/chemical properties (5) Pp.93-122 in Reed, D.W. (ed). *Water, Media and Nutrition*. Ball Publishing. Batavia, Illinois USA. 315pp.
- Fonteno, W.C. y Harden C T . 2003. Procedures for determining physical properties of horticultural substrates using the NCSU porometer. *NCSU Porometer Manual*. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. 28 pp
- Gabriëls, R. y Verdonck, O. 1991. Physical and chemical characterization of plant substrates: towards a European Standardization. *Acta Hort.* 294:249-259
- Gabriëls, R., van Keirsbulck, W. y Verdonck, O. 1991. Reference method for physical and chemical characterization of growing media: An international comparative study. *Acta Hort.* 294:147-160
- Gabriëls, R. 1995. Standardization of growing media analysis and evaluation: CEN/ISO/ISHS. *Acta Hort.* 401:555-557
- Gabriëls, R. 1998. Quality of compost and EC legislation. *Acta Hort.* 469: 187-193
- Gallardo, C.S. 2006. Seminario: Sustratos para plantas en contenedores Bases técnicas para elección de los sustratos: Problemas y soluciones más comunes. 29 de agosto a 1º septiembre. Corrientes, Argentina
- Gallardo, C., Valenzuela, O. y Routhier, M. 2006. Cultivo de mirtáceas nativas de Entre Ríos en sustratos regionales: resultados preliminares. *Acta III Congreso Argentino de Floricultura.* 244-247
- Gallardo, C., Gonzalez, J, Balcaza, L., Fernandez, H. Mizuno, M., Fernandez, R., Barbaro, L., Karlanian, M., Morisigue, D., Valenzuela, O., Martinez, L., Del Pardo, K. 2007. Calidad de los sustratos de siembra empleados en el área metropolitana de Buenos Aires [AMBA] para el cultivo de especies ornamentales en bandejas multiceldas. *Congreso Argentino de Horticultura.* 30. Simposio Internacional sobre Cultivos Protegidos. Septiembre de 2007. La Plata. Argentina.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Soc. Amer. Journal* 44:892-898.

- Givas, G. y Savvas, D. 2007. Particle size and hydraulic properties of punice effect growth and yield of greenhouse crops in soilless culture. *HortScience* 42: 1274-1280
- Goh, K.M. y Haynes, R.J. 1977. Evaluation of potting media for commercial nursery production of container-grown plants. *N.Z. Journal of Agricultural Research* 20: 363-70
- Goh, K.M. y Mass, E.F. 1980. A procedure for determining air and water capacity of soilless media and a method for presenting the results for easier interpretations. *Act. Hort.* 99:81-91
- Gomez, C. y Robbins, J. 2011. Pine bark substrates amended with parboiled rice hulls: physical properties and growth of container-grown spirea during long-term nursery production. *HortScience* 46: 784-790
- Gomez del Campo, M. 2007. Effect of water supply on leaf area development, stomatal activity, transpiration, and dry matter production and distribution in young olive trees. *Australian Journal of Agricultural Research* 58:385-391
- Handreck, K. y Black, N. 2002. *Growing media for ornamental plants and turf.* University of new South Wales press Ltd. Australia. 542 pp.
- Hanson, P.J., Dixon, R.K. y Dickson, R.E. 1987. Effect of container size and shape on the growth of northern red oak seedlings. *HortScience.* 22:1293-1295
- Hass, H.P y Röber, R. 1986. Wasserversorgung von Begonia-Elatior-Hydriden und Primula obconica. Wasserverbrauch. Institut für Zierpflanzenbau der Staatlichen Versuchsanstalt für Gartenbau, Weißenstephan, Freising
- Heiskanen, J. 1995. Water status of sphagnum peat and peat-perlite mixture in containers subjected to irrigations regimes. *HortScience* 30(2):281-284
- Heiskanen, J. 1997. Air filled porosity of eight growing media based on Sphagnum peat during drying from container capacity. *Acta Hort.* 450:277-286
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics.* Academic Press. San Diego, CA, USA. 771pp.
- Hoffmann, G. 1970. Verbindliche methoden zur untersuchung von TKS und gartnerischen erden. *Mitteilubngen der VDLUFA, Heft, 6:* 129-153
- Inbar, Y., Chen, Y. y Hadar, Y. 1985. The use of composted slurry produced by methanogenic fermentation of cow mature as a growth media. *Acta Hort.* 172:75-82
- Instrução Normativa nº 14. 15/12/2004: Cap II: das tolerancias. Ministério da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento (MAPA), Brasil

- Instrução Normativa nº 17. 21/05/2007. Anexo: Métodos para análise de substratos para plantas e condicionadores de solos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Brasil
- Instrução Normativa nº 31. 23/10/2008. Modificaciones de la IN 17. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Brasil
- Jackson, B., Wright, R. y Barnes, M. 2008. Pine tree substrate, nitrogen rate, particle size, and peat amendment affect poinsettia growth and substrate physical properties. *HortScience* 43(7):2155–2161
- Jackson, B., Wright, R. y Barnes, M. 2010. Methods of constructing a pine tree substrate from various wood particle sizes, organic amendments, and sand for desired physical properties and plant growth. *HortScience* 45: 103-112
- Kafkafi, U. 2008. Functions of the root system. (2) Pp 13-40 en *Soilless culture: theory and practice*. Raviv, M. y Leith, J. (eds) Elsevier. 587 pp
- Kämpf, A.N. y Jung, M. 1991. The use of carbonized rice hulls as an horticultural substrate. *Acta Hort.* 294:271-283
- Kämpf, A.N., Hammer, P.A. y Kirk, T. 1999a. Effect of the packing density on the mechanical impedance of root media. *Acta Hort.* 481 (2):689-694
- Kämpf, A.N., Hammer, P.A. y Kirk, T. 1999b. Impedância mecânica em substratos hortícolas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 34 (11):2157-2161
- Kämpf, A.N. . 2005. Produção comercial de plantas ornamentais. *Agrolivros*. Guaíba, RS, Brasil. 254pp.
- Kämpf, A.N., Magalhaes, R. y Maltz, R. 2005. Comparação de métodos na caracterização básica de substrato para plantas e condicionadores de solo. II Forum Latinoamericano de Plantas Ornamentais. 13-15 noviembre, RS. Brasil. 96-97
- Kämpf, A.N., Jun Takane, R. y Vital de Siqueira, P.T. 2006. Floricultura, Técnicas de preparo de substratos. LK editora, Brasília, 132pp.
- Karlovich, P.T. y Fonteno, W.C. 1986. Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(2):191-195
- Karlsson, M., 2001. Primula culture and production. *HortTechnology* 11(4):627-635
- Kim, J., van Iersel, M. y Burnett, S. 2011. Estimating daily water use of two petunia cultivars based on plant and environmental factors. *Hort. Sci.* 46(9):1287–1293
- Kipp, J.A., Wever, G. y de Kreij, C. 2000. *International substrate manual*. Elsevier International, The Netherlands, 94pp

- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. Pp. 597-618 en: Methods of soil analysis. part I physical and mineralogical methods. Klute, A. (ed.) Madison, Wisconsin, USA, ASSA, Inc, Publisher.
- Klute, A. y Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods, en Methods of Soil Analysis. Part I Physical and mineralogical methods Klute, A. (ed), Madison , Wisconsin, USA, ASSA, Inc, Publisher
- de Kreij, C. y de Bes, SS. 1989. Comparison of physical analysis of peat substrate. Acta Hort. 238:23-36
- de Kreij, C., van Elderen, C.W., Wever, G. y Duijvestijn, R. 2001. Extraction of growing media regarding its water holding capacity and bulk density. Acta Hort. 548:409-414
- de Kreij, C. y Wever, G. 2005. Proficiency testing of growing media, soli improvers, soils, and nutriente solutions. Soils Science and Plant Analysis, 36:81-88
- Landini, A., Bottini, L., Mascarini, L., Vilella, F. y Orden, S. 2005. Conductividad hidráulica saturada de perlita para distintos tiempos de uso en cultivo de rosas bajo cubierta. Rev. Facultad de Agronomía UBA. 25(3): 227:232
- Lambers, H., Stuart Chapin III, F. y Pons, T.L. 1998. Plant Physiological Ecology. Springer. 576 pp.
- Latimer, J.G. 1991. Container size and shape influence growth and landscape performance of marigold seedlings. HortScience. 26:124-126
- Lemaire, F., Dartiguès, A., Rivière, L.M. y Charpentier, S. 1989. Cultures en Pots et Conteneurs. INRA - PHM Revue Horticole, Paris -Limoges, 184 pp.
- Lemaire, F. 1997. The problem of the biostability in organic substrates. Acta Hort. 450:63-69
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Advances in Soil Science 1:277:294. New York
- Londra, P. 2010. Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method. HortScience 45: 1106-1112
- Lu, W., Yang, X., Sibley, J., Gilliam, C., Bannon, J. y Zhang, Y. 2008. Utilization of mixed municipal solid waste compost as a soilless potting component in greenhouse production of four floricultural crops. J. Environ. Hort. 26(2):75-79
- Maher, M.J., Prasad, M. y Raviv, M. 2008. Organic soilless media components.(11) Pp 459-504 en: Soilless culture: theory and practice. Raviv, M. y Leith, J.H. (eds) Elsevier. 587 pp



- Marfà, O., Savé, R., Rabella, R., Sabater, F., Pagés, M. y Tió, M. 1984. Effects of different substrate and irrigation regimes on crop and water-plant relationships of *asplenium nidus-avis hort.* and *cyclamen persicum mill.* *Acta Hort.* 150:337-348
- Marfà, O., Serrano, L. y Martinez, A. 1992. Uso de tensiómetros con transductor de presión en sustratos. *Actas de Horticultura SECH*, 11:87-96
- Marfà, O., Martinez, A., Orozco, R., Serrano, L. y Martinez, F.X. 1993. The use of fine-grade perlites in lettuce bag cultures. II. Physical properties, rheologic effects and productivity. *Acta Hort.* 342: 339-348
- Marfà, O. y Orozco, R. 1995. Non saturated hidraulic conductivity of perlites: some effect on pepper. *Acta Hort.* 401: 235-242
- Marfà, O. 1995. La física de sustratos. *Horticultura* 103:33-35. España
- Marfà, O., Savé, R., Biel, C., Cohen, M. y Lladó, R. 1998. Substrate hydraulic conductivity as a parameter for irrigation of carnation soilless culture. *Acta Hort.* 458:65-74
- Marfà, O. 2007. Cultivo de ornamentales en contenedor al exterior. Material del curso de Técnicas de cultivo sin suelo y sustratos. Maestría de cultivos intensivos, UNL Esperanza, Sta Fé, Argentina
- Martinez, D., Landini, A.M., Svartz, H., Vence, L., Bottini, L., Mascarini, L., Orden, S. y Villela, F. 2006. Propiedades físicas e hidráulicas de perlita en cultivo de rosas y sus variaciones temporales. *Ci. Suelo (Argentina)* 24 (2): 177-182
- Martinez, F.X., Burés, S., Blanca, F., Yuste, M. y Valero, J. 1991. Experimental and theoretical air/water ratios of different substrate mixtures at container capacity. *Acta Hort.* 294:241-248
- Martinez Farré, F.X. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de las I Jornadas de Sustratos, SECH:* 55-66
- Martinez, F.X., Cañameras, N., Fábregas, F. y Reis, M. 1993. Water exploitation in substrate profile during culture. *Acta Hort.* 342:279-286
- Martinez, P.F. 2002. Manejo de sustratos para horticultura Pp 53-76 en: Instituto Agronómico (ed). "Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas" Documentos IAC 70, Campinas, SP, Brasil. 122p
- Michel, J.C., Morel, P. y Rivière, L.M. 2004. The importance of hidric history on the physical properties and wettability of peat. *Acta Hort.* 644:275-280
- Michel, J.C. 2009a. Physical properties of growing media: State of the art and future challenges. *Acta Hort.* 891: 65:71

- Michel, J.C. 2009b. Influence of clay addition on physical properties and wettability of peat-growing media. *HortScience* 44: 1694-1697
- Michel, J.C. 2010. The physical properties of peat: a key factor for modern growing media. *Mires and Peat*, Volume 6, Article 02, 1–6
- Michiels, P., Hartmann, R. y Coussens, C. 1993. Physical properties of peat substrates in an ebb/flood irrigation system. *Acta Hort.* 342:205-219
- Milks, R., Fonteno, W., Larson, R. 1989a. Hydrology of horticultural substrates: I. Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 114(1): 48-52
- Milks, R., Fonteno, W., Larson, R. 1989b. Hydrology of horticultural substrates: II. Predicting physical properties of media in containers. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 114(1): 53-56
- Milks, R., Fonteno, W., Larson, R. 1989c. Hydrology of horticultural substrates: III. Predicting air and water content of limited-volume plug cells. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 114(1): 57-61
- Molitor, H.D., Faber, A., Marutzky, R. y Springer, S. 2004. Peat substitutes on the basis of recycled wood chipboard. *Acta Hort.* 644:123-130
- Morel, Ph. y Rivière, L.M. 2000. Measurement of representative volumes of substrates: which method, in which objective? *Acta Hort.* 517: 261-269
- Mualem, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. p. 799–823. En Klute, A. (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Naasz, R., Michel, J.C. y Charpentier, S. 2005. Measuring Hysteretic Hydraulic Properties of Peat and Pine Bark using a Transient Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:13–22
- Naasz, R., Michel, J.C. y Charpentier, S. 2009. Water repellency of organic growing media and its consequences on hysteretic behaviours of the water retention curve. *Act. Hort* 891: 287-295
- Nair, A., Ngouajio, M. y Biernbaum, J. 2011. Alfalfa-based organic amendment in peat-compost growing medium for organic tomato transplant production. *HortScience* 46: 253-259
- Nelson, P.V., Oh Y.M. y Cassel, D.K. 2004. Changes in physical properties of coir dust substrates during crop production. *Acta Hort.* 644:261-268
- Nemali, S. y van Iersel, M. 2008, Physiological responses to different substrate water contents: screening for high water-use efficiency in bedding plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 133(3):333-340

- Nemati, M.R., Fortin, J.P., Lussier, M.C. y Prince, M.J. 2009. Development of a rapid and accurate determination of particle size distribution in organic substrates. *Acta Hort.* 819: 297-301
- Niu, G, Rodriguez, D y Wang, Y. 2006. Impact of drought and temperature on growth and leaf gas exchange of six bedding plant species under greenhouse conditions. *Hort. Sci.* 41(6):1408-1411
- Niu, G. y Rodriguez, D. 2009. Growth and physiological responses of four rose rootstocks to drought stress. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 134: 202-209
- Nkongolo, N.V. y Caron, J. 1999. Bark particle sizes and the modification of the physical properties of peat substrates. *Can. J. Soil Sci.* 79:111-116
- Noguera, P. 1999. Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustratos. Tesis doctoral en Química. Universidad Politécnica de Valencia. 228 pp.
- Norrie, J., Graham, M.E.D. y Gosselin, A. 1994. Potential evapotranspiration as a means of predicting irrigation timing in greenhouse tomatoes grown in peat bags. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119: 163-168
- OAA. Organismo argentino de acreditación. 2008. Guía para validación de métodos de ensayo. Código DC-LE-05. ([www.oaa.org.ar](http://www.oaa.org.ar))
- Orozco, R. y Marfà, O. 1995. Granulometric alteration, air-entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. *Acta Hort.* 408:147-161
- 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. Universitat de Lleida, España
- Orozco, R., Marfà, O. y Burés, S. 1995. Water status of graded perlites. *Acta Hort.* 401:137-143
- Orozco, R., Gschwander, S. y Marfà, O. 1997. Substrate classification from particle size analysis. *Acta Hort.* 450:397-403
- Otten, W., Raats, P., Baas, R., Challa, H. y Kabat, P. 1999. Spatial and temporal dynamics of water in the root environment of potted plants on a flooded bench fertigation system. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 47 : 51-65
- Owen, J., Warren, S., Bilderback, T. y Albano, J. 2007. Industrial mineral aggregate amendment affects physical and chemical properties of pine bark substrates. *HortScience* 42(5):1287-1294
- Owen, J. y Altland, J. 2008. Container height and douglas fir bark texture affect substrate physical properties. *HortScience* 43(2):505-508

- Papadopoulos, A., Bar-Tal, A., Siver, A., Saha, U. y Raviv, M. 2008. Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes. (12)Pp 505-543 en: Raviv, M. y Leith, J. (eds). *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier.
- Paquet, J. M., Caron, J. y Banton, O. 1993. In situ determination of the water desorption characteristics of peat substrates. *Can. J. Soil Sci.* 73: 329-339
- Paul, J. y Lee, C. 1976. Relation between growth of chrysanthemums and aeration of various container media, *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101 (5):500-503
- Pérez Buenafuente, A., Regalado, C.M. y Cid Ballarín, M.C. 2004. Consecuencias hidrológicas de la compactación en fibra de coco. *Actas de las VII Jornadas de la SECH. Madrid.*:71-76
- Picken, P. y Reinikainen, O. 2009. Horticultural peat raw material and its physical characteristics in Finland, Sweden and Baltic States. *Acta Hort.* 891:337-343
- Postma, J., van Os, E. y Bonants, P. 2008. Pathogen detection and management strategies in soilless plant growing systems. (10)Pp 425-457 en: Raviv, M. y Leith, J. (eds). *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier. 587 pp.
- Pokorny, F.A. y Wetzstein, H.Y. 1984. Internal porosity, water availability, and root penetration of pine bark particles. *HortScience.* 19:447-449
- Puustjärvi, V. 1974. Physical properties of peat used in horticulture. *Acta Hort.* 37: 1922-1929
- Prasad, M. y Maher, M.J. 1993. Physical and chemical properties of fractionated peat. *Acta Hort.* 342:257-264
- Prasad, M. y Carlile, B. 2009. Practical experiences with the use of composted materials in growing media. *Acta Hort.* 891: 111-124
- Raviv, M., Krassnovsky, A. y Medina, S. 1997. Minimal water discharge growing system: characteristics at a steady-state situation. *Acta Hort.* 450:133-138
- Raviv, M., Krassnovsky, A., Medina, S. y Reuveni, R. 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. *The journal of Horticultural Science and biotechnology* 73:485-491
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., Medina, S. y Krassnovsky, A. 1999. The effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture. *J. Amer. Soc. Hort. Sci* 124: 205 - 209
- Raviv, M. y Blom, T.J. 2001. The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Scientia Horticulturae* 88 (4): 257-276

- Raviv, M., Lieth, J.H., Burger, D.W. y Wallach, R. 2001. Optimization of Transpiration and Potential Growth Rates of 'Kardinal' Rose with Respect to Root-zone Physical Properties. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126: 638 - 643
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A. y Bar-Tal, A. 2002. Substrates and their analysis (2) Pp. 25-101 en: D Savvas (ed.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Embryo publications. Atenas. 463 pp.
- Raviv, M., Wallach, R. y Blom, T.J. 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance - A review. *Acta Hort.* 644:251-259
- Raviv, M. y Wallach, R. 2007. Water availability to rose roots grown in soilless media, as a determinant factor of productivity. *Acta Hort.* 751:23-32
- Raviv, M. y Leith, J.H. 2008. *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier.
- Raviv, M., Leith, J.H., Bar-Tal, A. y Silber, A. 2008. Growing plants in soilless culture operational conclusions. (13) Pp.545-567 in *Soilless culture: theory and practice*. Raviv, M. y Leith, J.H. (eds) Elsevier.
- Raviv, M., Medina, S., Krassnovsky, A., Laor, Y. y Aviani, I. 2009. Composting olive mill waste and assessment of its horticultural value. *Acta Hort.* 891: 353-359
- Rivière, L.M., Sintès, G. y Madiot, S. 1995. Pilotage tensiométrique de l'irrigation des cultures en conteneurs sur substrats organiques. *Etude et gestion des sols* :135-144
- Rivière, L.M., Sintès, G. y Barthelmes, S. 1997. Monitoring container crop irrigation by means of tensiometers (refereed). *Act. Hort.* 450:305-311
- Rivière, L.M. y Caron, J. 2001. Research on substrate: state of the art and need for the coming 10 years. *Acta Hort.* 548:29-41
- Röber, R., Fischer, P. y Fritzsche, G. 1982. Wasserraufbereitung und Gießverfahren, einfließ auf das wachstum von Pelargonien und Primein. *Kulturtechnik*. Weihenstephan, Freising
- Röber, R. 2000. Gärtnerische Substrate: Möglichkeiten und grenzen ihrer herstellung und verwendung; beispiele aus forschung, industrie und anwendung. Pp 105-138 en *Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes*. Kämpf, AN & MH Fermino (eds). Genesis. Porto Alegre, 312 pp.
- Rowell, D.L. 1994. *Soil Science: Methods and Applications*. New York, Longman
- Salvador, E.D., Minami, K. y Jadoski, S. 2005. Evaluation of different substrates on african violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.) growth. *Acta Hort.* 697: 125-132
- Savvas, D. 2009. Modern development in the use of inorganic media in greenhouse vegetable and flower production. *Acta Hort.* 819: 73-86

- Shirazi, M. A. y Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:142-147
- Schinohara, Y., Hata, T., Maruo, T., Hohjo, M. y Ita, T. 1999. Chemical and physical properties of the coconut fiber substrates and the growth and productivity of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants. *Acta Hort.* 481:145-149
- Schmilewski, G. y Günther, J. 1988. An international comparative study on the physical and chemical analysis of horticultural substrates. *Acta Hort.* 221:425-441
- Schmilewski, G. 2009. Growing medium constituents used in the EU. *Acta Hort.* 891: 33-45
- Spier, M., Silva da Silva, D., Schäfer, G. y Dutra de Souza P.V. 2008. Determinação da densidade úmida do substrato: efeito da correção do teor de umidade inicial. VI Encontro Nacional sobre Substratos para plantas, Fortaleza, CE, Brasil
- Spomer, L. 1974. Two classroom exercises demonstrating the pattern of container soil water distribution. *Hort Science*. 9 (2):152-153
- Spomer, L. 1982. The effect of container soil volume on plant growth. *HortScience*, 17(4):680-681
- Steel, R.G.D. y Torrie J.H. 1988. *Bioestadística principios y procedimientos*. Mc Graw-Hill. México
- Styer, R.C. y Koranski, D.S. 1997. *Plug & transplant production: a grower guide*. Ball Publishing, Batavia, USA, 374 pp
- Taha, T.A. y De Boodt, M. 1985. Characterization of organic material from different origins. *Acta Hort.* 172 : 125-131
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. *Fisiología Vegetal*. Publicaciones Universitat Jaume I. España. 1338 pp.
- Terés, V., Beunza, A. y Artetxe, A. 1997. Substrate saturation by vacuum application.(refereed) . *Acta Hort.* 450:381-388
- Terés, V., Artetxe, A., Beunza, A., Sainz de la Maza, E. y Leuzaun, M. 2001. Physical properties of the substrates. *Acta Hort.* 559: 663-668
- Terés, V. 2002. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 483 p
- Testezlaf, R., Larsen, C., Yeager, T. y Zazueta, F. 1999. Tensiometric monitoring of container substrate moisture status. *HortTechnology* 9(1):105-109

- Tilt, K.M., Bilderback, T.E., y Fonteno, W.C. 1987. Particle size and container size effects on growth of three woody ornamental species. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112:981-984
- Urrestárazu, M., Guzmán, M., Sanchez, A., Salas, M.C., Quero, S y Carrasco, G. 1999. A comparison of qualitative and quantitative productivity parameters between a sweet pepper crop growing on “enarenado almeriense” and in rockwool. *Acta Hort.* 481: 63-69
- Valenzuela, O. R. y Gallardo, C.S. 2003. Los sustratos: un insumo clave en los sistemas de producción de plantines. *IDIA XXI Año III (4) : 25-29*
- Valenzuela, O., Nicolau, F., Rode, M., Schund, H. y Gallardo, C. 2003. Respuesta de *Tagetes patula* a sustratos formulados con compost y perlita. *Revista Científica Agropecuaría* 7(1):57-61
- Valenzuela, O.R. 2004. Protocolos en la Argentina, problemática actual y propuesta. Mesa debate "Protocolos e interpretaciones de los análisis de sustratos". II Congreso argentino de floricultura. Buenos Aires. conferencia
- Valenzuela, O.R., 2005. Los sustratos como medio de crecimiento para los cultivos sin suelo. I Seminario internacional de sustratos para plantas. Buenos Aires. conferencia
- Valenzuela, O., Gallardo, C. y Kämpf, A. 2008. Regional components used as growing media in Argentina. *Acta Hort* 779:643-648
- Valenzuela, O.R. 2009. Caracterización y evaluación agronómica de materiales regionales usados en la formulación de sustratos para plantas. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario. 153p.
- Valenzuela, O.R. 2010. “Sustratos”. Curso perteneciente a la Maestría en Floricultura. Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Buenos Aires. Argentina
- van Os, E.A. 1999. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for dutch greenhouse horticulture. *Water Sci.Techol.* 39:105-112
- van Os, E.A., Gieling, T.H. y Ruijs, M.N. 2002. Equipment for Hydroponic installations (3). Pp. 103-141 in: Savvas, D y Passam, H. (eds.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals.* Embryo publications. Atenas. 463 pp.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Soc. Amer. Journal* 44:892-898
- van Genuchten, M.T. y Nielsen D.R. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae* 3(5):615-28

- VDLUFA. Normas de la Federación de los Institutos de Investigación y Análisis Agrícolas de Alemania. Determinación de densidad húmeda. citado en : Fermino, M.H. 2003. Métodos de Análise para caracterizaçao física de substratos para plantas. Tesis de doutorado en Fitotenia. UFRGS Porto Alegre.
- Vence, L. 2008. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. Revista Ciencia del Suelo (Argentina), volumen 26 (2): 105:114
- Vence, L., Valenzuela, O., Svartz, H y Gandolfo, E. 2010a. Densidad de partícula en sustratos para plantas: métodos y su incidencia en el cálculo de la porosidad total. Pp 32 en: XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, ISBN: 978-987-24771-1-0, resumen expandido en versión electrónica ISBN 978-987-24771-3-4,
- Vence, L., Valenzuela, O. y Svartz, H. 2010b. Caracterización física de sustratos con fines comerciales: densidad y capacidad de retención de agua medidas por diferentes métodos. En actas "V ENSUB, Encontro Nacional de Substratos para Plantas", Goiania, GO, Brasil
- Vence, L B; Conti, M E ; Svartz, H A y Valenzuela, O R. 2012. Métodos de medición de densidad en sustratos para producción de plantas. XIX Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo, XXIII, Congreso argentino de la ciencia del suelo. Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012
- Verdonck, O., Cappaert, I.M. y De Boodt, M. 1978. Physical characterization of horticultural substrates. Acta Hort. 82:191-200
- Verdonck, O., de Vleeschauwer, D. y De Boodt, M. 1981. The influence of the substrate to plant growth. Actaa Hort. 126: 251-258
- Verdonck, O. 1983. New developments in the use of graded perlite in horticultural substrates. Acta Hort. 150: 575-581
- Verdonck, O., Penninck, R. y De Boodt, M. 1983. The physical properties of different horticultural substrates. Acta Hort. 150:155-160
- Verdonck, O. y Penninck, R. 1985. The composting of bark with soy scrap sludge. Acta Hort. 172:183-190
- Verdonck, O. y Gabriëls, R. 1988. Summary of discussion on "standardization of analytical methods". Acta Hort. 221:443-444
- Verdonck, O., Gabriëls, R. and Keirsbulck, W. 1995. Reference standard materials for the determination of physical characteristics of growing media. Acta Hort. 01:559-560
- Verdonck, O. y Demeyer, P. 2004. The influence of the particle size on the physical properties of growing media. Acta Hort. 644: 99-101
- Wallach, R., da Silva, F, y Chen, Y. 1992a . Unsaturated hydraulic characteristics of composted agricultural wastes, tuff and mixtures. Soil Sci. 153 (6): 434-441



- Wallach, R., da Silva, F, y Chen, Y. 1992b. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(3):415-421
- Wallach, R., y Raviv, M. 2005. The dependence of moisture-tension relationship and water availability on irrigation frequency in containerized growing media. *Acta Hort.* 697: 293-300
- Wallach, R . 2008. Physical characteristics of soilless media. (3)Pp 41-116.in *Soilless culture: theory and practice*. Raviv, M. y Leith, J.H. (eds) Elsevier. 587 pp
- Wallach, R., y Raviv, M. 2008. The hydraulic properties of growing media – From laboratory measurements to greenhouse management. *Acta Hort.* 779: 263-272
- Warncke, D.D. 1986. Analysing greenhouse growth media by the saturation extraction method. *HortScience* 2: 223-225
- Warren, S. y Fonteno, W.C. 1993. Changes in physical and chemical properties of a loamy sand soil when amended with composted poultry litter. *J. Environ. Hort.* 11(4): 186-190
- Wells, D.E. 2008. Evaluation of spent tea grinds as an alternative horticultural substrate component. Tesis para el grado de Master of Science. Auburn University, Alabama, USA
- Wever, G: 1995. Physical analysis of peat and peat-based growing media. *Acta Hort.* 401:561-567
- Wever, G. y van Winkel, A. 2004. Interlaboratory study CEN-Methods for the analysis of growing media and soil improvers. *Acta Hort.* 644: 597-601
- White, J.W. y Mastalerz, J.W. 1966. Soil moisture as related to “container capacity”. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 89: 758-765

## **APENDICE**

## INDICE

### Protocolo N°:

110-Preparación de la muestra para análisis físicos y químicos.....	125
111- Determinación de Humedad (H%) y Materia seca (MS%), Método basado en la norma CEN EN-13040:2007.....	130
112- (IN 17)- Determinación de Densidad de sustrato húmeda y seca Método basado en la metodología publicada por la legislación brasilera del Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento (MAPA).....	132
113- (EN 40)-Determinación de Densidad de sustrato húmeda y seca. Método basado en la norma CEN EN-13040: 2007 Anexo A.....	136
114-(EN13041)-Determinación de las propiedades físicas: Densidad de sustrato seca, Porosidad de aire, Contenidos hídricos volumétricos, Valor de contracción y Porosidad total. Método basado en la norma CEN EN-13041: 2007 .....	142
115-(DBOT)-Determinación de Densidad de sustrato seca, Capacidad de retención de agua, Porosidad total, Capacidad de aireación e Índice de contracción de volumen. Método basado en De Boodt et al. (1974).....	153
116-(EMBDBOT)-Determinación del contenidos hídricos volumétricos en el rango 0-100 hPa . Método basado en De Boodt et al. (1974).....	165
117-(EMBYESO)-Determinación de las propiedades físicas: Densidad de sustrato seca, Contenidos hídricos volumétricos y Porosidad total.....	170
118-(LEGBRAS)-Determinación de Contenidos hídricos volumétricos, Porosidad total y Capacidad de aireación. Método basado en la metodología de la legislación brasilera.....	178
119-(NCSU)-Determinación de Densidad de sustrato seca, Capacidad de Contenedor, Porosidad total y Porosidad de aire. Método basado en Fonteno y Harden (2003) del Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la North Carolina State University.....	186
120-Determinación de Densidad de partícula por picnometría. Método del matraz aforado basado en ROWELL (1994) .....	192
121-Determinación de contenido de Materia orgánica y cenizas y de la Densidad de partícula por fórmula. Método basado en la norma CEN EN-13039:1999.....	195
122-Determinación de Granulometría de las partículas. Método basado en la norma europea CEN -EN-15428:2007.....	197

## Protocolo n° 110

### Preparación de la muestra para análisis físicos y químicos

#### 1. OBJETO Y ALCANCE

Método de rutina para la preparación de las muestras de sustratos para plantas y mejoradores de suelos antes de realizar los análisis físicos y químicos. No es adecuado para materiales muy gruesos, o pegajosos, ni preformados como planchas de espuma o lana de roca.

#### 2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

**Muestra de laboratorio:** la que llega al laboratorio para ser analizada.

**Muestra de ensayo:** la muestra de laboratorio o porción de ella que se prepara para el análisis

**Submuestra de ensayo:** porción sobre la que se realiza efectivamente el análisis

#### 3. RECEPCION DE LA MUESTRA

Se debe solicitar una muestra de laboratorio de no menos 10 L de material para la rutina completa de análisis. Si el cliente solicita un solo análisis, se indicará el tamaño apropiado de cada muestra de acuerdo al protocolo del análisis correspondiente. Nota: Debe garantizarse que el tamaño de la muestra de laboratorio será suficiente para realizar todos los análisis solicitados, de no ser así, solicitar más muestra y formar una única muestra de laboratorio.

La muestra debe ser acompañada por:

- El nombre del cliente
- Lugar y fecha del muestreo
- Identificación y procedencia lo más completa posible del material
- El análisis solicitado

La muestra de laboratorio debe ser transportada y almacenada en condiciones que no altere sus características. Al recibirla se le asigna una identificación interna única, que se mantiene durante todo el proceso de análisis. Se la acondiciona en bolsas lo más herméticas posible en lugar adecuado.

Se debe tener en cuenta el tiempo de estabilidad de las muestras y realizar los análisis dentro de ese periodo.

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

- 4.1. Tamiz cuadrada de malla 25 mm x 25 mm
- 4.2. Estufa para mantener 105 °C
- 4.3. Molino o mortero

#### **5. PREPARACION DE LA MUESTRA CON PARTICULAS ENTERAS Y HUMEDAS.**

- 5.1. Mezclar cuidadosamente la muestra de laboratorio desmenuzando cualquier terrón que fuera producto del transporte. Separar, si fuera necesario, la muestra de ensayo utilizando un procedimiento reconocido como por ejemplo, cuarteo.
- 5.2. Determinar el contenido de humedad y materia seca “tal como se recibió” de acuerdo al protocolo correspondiente.
- 5.3. Pasar la muestra de laboratorio por un tamiz de malla cuadrada de 25 mm x 25 mm. El pasaje del material puede ayudarse efectuando un leve movimiento circular con la mano. El material retenido en el tamiz > 25 mm y fibras flexibles > 80 mm se desmenuzan o cortan, en partes iguales y en el menor número de veces posibles para que toda la muestra pase por el tamiz. (Fig. 1)
- 5.4. Si el protocolo del análisis solicitado indicara una humedad inicial de la muestra diferente a la de recibo, se procederá según el caso: secar la muestra de ensayo al aire o en estufa a 40 °C, o humedecer aplicando un volumen de agua según los cálculos descriptos en el Anexo de este protocolo (Fig. 2) . En este último caso dejar estacionar la muestra durante 12 h para que se equilibre el contenido de humedad.

Nota: Retirar elementos extraños como piedras, vidrios, plásticos, metal, palos, utilizando guantes y/o barbijo



Fig. 1: Procedimiento 5.3: pasaje de la muestra a través del tamiz y corte de las partículas que quedan retenidas en el tamiz



Fig. 2 : Humedecimiento de la muestra con agua mediante un rociador

## 6. PREPARACION DE LA MUESTRA CON PARTICULAS SECAS

### 6.1. Muestra seca y entera

6.1.1. Luego de realizar los pasos detallados en 5.1; 5.2 y 5.3 en la muestra de laboratorio, dejar secar la muestra de ensayo en contacto con el aire o llevar a estufa a 40 °C por aproximadamente 16 h.

## **6.2. Muestra seca y molida**

6.2.1. Realizar los pasos anteriores detallados en 5 y en 6.1 en la muestra de laboratorio. También se puede utilizar la submuestra seca en estufa a 105 °C que resulta del paso 5.2, siempre que el volumen sea suficiente.

6.2.2. La muestra seca se muele hasta el tamaño deseado. Se recomienda informar el tipo de molienda y el tiempo empleado o de lo contrario especificar la granulometría de la muestra ya seca y molida. En caso de no poseer un molino la muestra se puede triturar manualmente con un mortero y brazo de mortero.

## **7. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE SUSTRATO HÚMEDA Y SECA**

Se determina la densidad de sustrato húmeda ( $D_{sh}$ ) y/o seca ( $D_{ss}$ ) según el protocolo correspondiente basado en el método IN 17 según protocolo 112 en los siguientes casos:

7.1. Cuando el protocolo del análisis a realizar considere la muestra inicial en volumen, de modo que se pueda realizar el análisis sobre un peso conocido de submuestra.

7.2. Cuando las submuestras se analicen con magnitud masa y los resultados se expresen con referencia a la magnitud volumen.

## **BIBLIOGRAFIA**

-Norma UNE-EN-13040- 1999. Mejoradores de suelo y sustrato de cultivos. Preparación de muestras para análisis químicos y físicos, determinación del contenido de materia seca, contenido de humedad y densidad aparente compactada en laboratorio.

-Fonteno W.C. y C:T:Harden. 2003. Procedures for determining physical properties of horticultural substrates. en NCSU Porometer manual. Horticultural Substrate Laboratory, North Caroline State University. Raleigh, USA

## **ANEXO**

### **Cálculo del volumen de agua a agregar a un material para alcanzar una humedad determinada para la preparación de la muestra**

1.1. Determinar la humedad inicial de la muestra ( $H_i$ ) según el protocolo 112

1.2. Seleccionar el volumen total de la muestra a humedecer y pesarlo ( $P_{shi}$ ) en g.

1.3. Establecer la humedad a la que se quiere llegar, o sea humedad final ( $H_f$ ) en  $g\ g^{-1}$

1.4. El volumen de agua a agregar se calcula mediante la fórmula:

$$Vag_1 = Pshf - Pshi \quad (1)$$

donde

$Vag_1$  : al volumen de agua que es necesario agregar a un sustrato para alcanzar una humedad determinada.

$Pshf$  : es el peso final de un volumen de muestra determinado después que llegó a la humedad deseada.

$Pshi$  : es el peso inicial de un volumen sustrato con la humedad inicial, medido en 1.2

Para calcular el  $Pshf$ , primero se calcula la masa seca de sustrato mediante la fórmula:

$$Pss = \frac{Pshi}{(1 + Hi)}$$

luego aplicando la fórmula :

$$Vag_2 = Pss \times Hf$$

donde

$Vag_2$  : es el volumen de agua que habría que agregarle al sustrato si se partiera de una masa de sustrato seca

$Pss$  : es la masa de sustrato seca correspondiente a ese volumen de muestra

$Hf$  : es la humedad final requerida expresada como fracción  $g \ g^{-1}$

Considerando la densidad del agua como  $1 \ g \ cm^{-3}$ , el  $Vag_2$  será numéricamente igual al peso del agua a agregar al sustrato seco ( $Pag_2$ ) y por lo tanto

$$Pshf = Pss + Pag_2$$

donde

$Pshf$  : es el peso final de un volumen de muestra determinado después que llegó a la humedad deseada

$Pss$  : es la masa de sustrato seca correspondiente a ese volumen de muestra

$Pag_2$  : es el peso del agua a agregar al sustrato seco para alcanzar la humedad deseada

Reemplazando en (1) se obtiene  $Vag_1$ , el volumen necesario de agua a agregar a la muestra húmeda.



**Protocolo n° 111**  
**Determinación de Humedad (H%) y Materia seca (MS%)**  
**Método basado en la norma CEN EN-13040:2007**

### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método para el cálculo de humedad H (%) y materia seca MS (%) de una muestra. Las muestras recibidas serán almacenadas en bolsas lo más herméticamente posible y en local fresco para que no pierdan humedad.

La determinación consiste en conocer el contenido gravimétrico de agua de una muestra y relacionarlo con su masa húmeda.

### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario

### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

La muestra se prepara según el protocolo n° 110 de acuerdo al análisis a realizar.

### **4. EQUIPAMIENTOS**

- 4.1. Bandejas de un material que soporte 105 ° C (aluminio tipo descartable)
- 4.2. Estufa de secado, con ventilación, que mantenga una temperatura de 103 ° C  $\pm$  2 ° C
- 4.3. Balanza con precisión de 1 g (intervalo de 0,1g)

### **5. PROCEDIMIENTO**

- 5.1. Pesar la bandeja vacía ( $m_t$ ) cuidando que esté bien seca.
- 5.2. Añadir 50 g de la muestra y repartirla para que tenga un espesor uniforme no superior a 2 cm y pesar enseguida ( $m_h$ ).
- 5.3. Colocar la bandeja en la estufa y secar hasta que la diferencia entre 2 pesadas consecutivas no exceda 1 g. Registrar el peso ( $m_s$ ).

### **6. CÁLCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS**

La materia seca se calcula con la fórmula:

$$MS = \frac{m_s - m_t}{m_h - m_t} \times 100 \text{ donde:}$$

$MS$  : es el contenido de materia seca expresado como porcentaje en peso de la muestra húmeda;

$m_h$  : es la masa en gramos de la muestra húmeda y la bandeja ;

$m_s$  : es la masa en gramos de la muestra seca y la bandeja ;

$m_t$  : es la masa en gramos de la bandeja vacía seca.

La humedad se puede calcular como :

$$H = \frac{m_h - m_s}{m_h - m_t} \times 100 \text{ donde:}$$

$H$  : es el contenido de humedad expresado como porcentaje en peso de la muestra húmeda

También puede calcularse como :

$$H = 100 - MS$$

## **7. REPETICIONES Y PRECISIÓN**

Se realizan 3 repeticiones como rutina de laboratorio. Se recomienda un error máximo ( $\epsilon$  max.) del 10%. Si se superara este valor de error se recomienda realizar más repeticiones

## **BIBLIOGRAFIA**

Norma europea CEN EN-13040:1999 y su actualización EN-13040:2007 (vigente).

## **Protocolo n° 112 (IN 17)**

### **Determinación de Densidad de sustrato húmeda y seca**

#### **Método basado en la metodología publicada por la legislación brasilera del Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento (MAPA)**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de rutina para la determinación de la densidad de sustrato húmeda y seca. Este método está basado en el procedimiento que figura en la publicación de la legislación brasilera del Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento (MAPA), descrito en la Instrucción Normativa 17 del 21/05/2007 y modificada por la Instrucción Normativa 31 del 23/10/2008.

La determinación consiste en la medición de una determinada masa de sustrato húmeda y del volumen que ocupa el material cuando es sometido a una compactación estandarizada y luego secada en estufa. El método no es apto para materiales gruesos ni preformados como planchas de espuma o lana de roca.

#### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario.

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

Se solicitarán no menos de 2L de muestra para este análisis. La muestra debe pasarse por un tamiz de malla cuadrada de 19 mm x 19 mm. El pasaje del material puede ayudarse con un leve movimiento circular con la mano. En caso que el material retenido sea  $\leq 10\%$  (v/v) se debe proceder a la reducción física en partes iguales y tantas veces como fuera necesario para que todo el material pase a través del tamiz. Si el volumen retenido en el tamiz es  $> 10\%$  (v/v) el método no es válido para ese material.

Nota: Retirar elementos extraños como piedras, vidrios, plásticos, metal, palos, utilizando guantes y/o barbijo para realizar esta tarea.

Se determina la humedad y la materia seca de la muestra según la metodología explicada en el anexo de este protocolo.

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

4.1. Tamiz de malla cuadrada de 19 mm x 19 mm

4.2. Probeta plástica transparente y graduada de 500 ml (270 mm de altura x 50 mm de diámetro) (Fig. 1)

- 4.3. Pie de hierro con 2 anillos metálicos de 70 mm de diámetro
- 4.4. Balanza con precisión de 1 g (intervalo 0,1 g)
- 4.5. Estufa regulada a  $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 4.6. Bandejas de aluminio
- 4.7. Espátula
- 4.8. Paño de tela
- 4.9. Palita

## 5. PROCEDIMIENTO

- 5.1. Pesar la probeta y registrar el peso ( $m_1$ )
- 5.2. Llenar la probeta colocada en forma vertical con el sustrato húmedo mediante la palita hasta aproximadamente los 300 ml (Fig. 2)
- 5.3. Colocar la probeta dentro de los anillos fijados en el pie de hierro. El anillo inferior debe estar sujeto a una altura que permita dejar caer la probeta desde 10 cm de altura y el anillo superior a una altura tal que acompañe el movimiento de la probeta (Fig. 3)
- 5.4. Dejar caer la probeta sobre una superficie rígida, nivelada y cubierta con un paño de tela desde los 10 cm de altura por 10 veces consecutivas
- 5.5. Se nivela con la espátula la superficie del sustrato, suavemente sin compactar
- 5.6. Se lee el volumen obtenido y se registra ( $V_t$ )
- 5.7. Pesar la probeta con el material y registrar el peso ( $m_2$ )



Fig. 1: Equipamiento



Fig. 2: Llenado con la probeta vertical

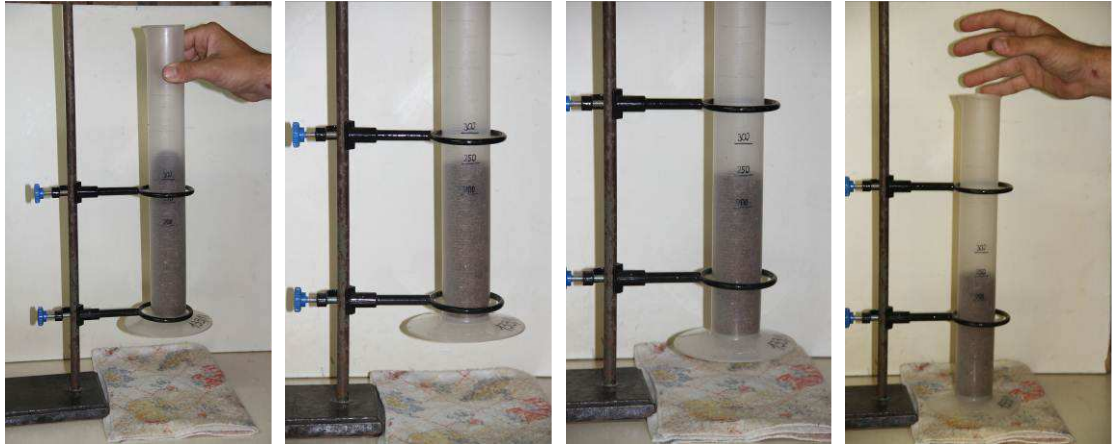


Fig. 3: Compactación estandarizada: 10 caídas consecutivas a 10 cm de altura.



Fig. 4: Enrasado con espátula



Fig. 5: Pesada del material compactado

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1 Densidad de sustrato húmeda

Se aplica la fórmula

$$DSh = \frac{msh}{Vt} \times 1000 \quad (1) \text{ donde:}$$

$DSh$  : densidad de sustrato húmeda en  $\text{kg m}^{-3}$

$msh$  : masa de sustrato húmeda en g

$Vt$  : volumen total del sustrato en  $\text{cm}^3$

La  $msh$  se obtiene mediante el cálculo:

$$msh = m_2 - m_1$$

Reemplazando en (1) se obtiene la  $DSh$  y se multiplica x1000 para expresarla en  $\text{kgm}^{-3}$

## 6.2. Densidad de sustrato seca

Se calcula con la fórmula :

$$DSs = DSh \times MS\% \div 100 \text{ donde:}$$

$DSs$  : densidad de sustrato seca en  $\text{kg m}^{-3}$

$DSh$  : densidad de sustrato húmeda en  $\text{kg m}^{-3}$

$MS\%$ : materia seca en porcentaje calculada según el anexo de este protocolo. Se divide por 100 para que quede expresada en fracción.

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realizan 3 repeticiones con submuestras frescas. Se recomienda un error máximo ( $\epsilon$  max.) del 10%. Si se superara este valor de error se recomienda realizar más repeticiones.

### ANEXO

#### Determinación de humedad y materia seca

Se lleva una submuestra de 100 g de material húmedo colocadas en bandejas de aluminio taradas ( $m_3$ ) a estufa a  $65 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  aproximadamente por 48 h hasta peso constante ( $m_4$ )

Se calcula como : 
$$H = \frac{100g - m_4 - m_3}{100g} \times 100$$

y  $MS = 100 - H$  donde:

$H(\%)$ : es la humedad en base húmeda en porcentaje m/m sobre la masa húmeda

$MS(\%)$ : es la materia seca en porcentaje m/m sobre la masa húmeda

### BIBLIOGRAFIA

- Instrucción Normativa nº 14 del 15/12/2004: Cap II: das tolerancias. MAPA (Brasil)
- Instrucción Normativa nº 17. 21/05/2007. Anexo: Métodos para análise de substratos para plantas e condicionadores de solos. MAPA (Brasil)
- Instrucción Normativa nº 31. 23/10/2008. Modificaciones de la IN 17. MAPA (Brasil)
- Fermino, M.H. 2003. Métodos de Análise para caracterização física de substratos para plantas. Tesis de doutorado en Fitotenia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

## **Protocolo n° 113 (EN 40)**

### **Determinación de Densidad de sustrato húmeda y seca.**

#### **Método basado en la norma CEN EN-13040: 2007 Anexo A**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de rutina para la determinación de la densidad de sustrato húmeda y seca de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método está basado en la norma CEN, EN-13040: 2007 anexo A y en la norma inglesa BS 4156 1990 (Ansorena Miner 1994).

La determinación consiste en la medición de una masa de sustrato húmeda y del volumen que ocupa luego de someterlo a una compactación estandarizada.

No es adecuado para materiales muy gruesos, pegajosos, muy compresibles, para biosólidos ni preformados como planchas de espuma o lana de roca.

#### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario.

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

Se toman 5 L, siempre de material fresco y se realiza la preparación de la muestra de ensayo según el protocolo n° 110. Si el tamaño del material retenido en el tamiz es mayor al 10% (v/v) se realiza el procedimiento sin considerar este paso.

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

4.1. Tamiz de malla cuadrada de 20 mm x 20 mm

4.2. Balanza con precisión 1 g (intervalo 0,1 g)

4.3. Cilindro rígido portamuestra con capacidad nominal de 1000 ml  $\pm$  30 ml y un diámetro (d) de 99 mm-105 mm. La capacidad del cilindro (Vt) se comprueba de la siguiente manera: pesar el cilindro vacío y una plancha rígida transparente mayor que el diámetro del cilindro. Se llena totalmente el cilindro con agua, se coloca la plancha encima, se secan todas las superficies externas y se pesa dos veces. La diferencia entre las 2 pesadas debería ser igual a 1000 g  $\pm$  30g. Repetir el ensayo y la diferencia no debería exceder  $\pm$  5g.

4.4. Collar desmontable, de 50 mm de altura y el mismo diámetro interno que el cilindro

4.5. Anillo sujetador del collar desmontable de diámetro mayor al del cilindro portamuestra

4.6. Embudo con una pendiente aproximada de  $45^\circ$  y un diámetro inferior para que encaje en el collar

4.7. Pistón de compactación con diámetro  $d_1 = (d-5\text{mm}) \pm 1\text{mm}$  y con un peso tal (cuadro 1) que mantenga una presión de  $9,17 \text{ g.cm}^{-2}$

Cuadro 1: relación entre diámetro y altura del cilindro y la masa del pistón a aplicar

Diámetro d mm	Altura h mm	Capacidad ml	Peso del pistón g
99	130	1000	634
100	127	997	650
101	125	1001	664
102	122	997	678
103	120	1000	692
104	118	1002	706

4.8. Controlador de flujo de caída con soporte: tamiz de chapa perforada o tela metálica con un diámetro aproximado de 200 mm, aberturas cuadradas de 20 mm o de 20 mm de tamaño de malla, sujetado en forma independiente a aproximadamente 5mm por encima del embudo y no conectado a este ni al cilindro.

4.9. Trípode para sujetar el controlador de flujo de caída

4.10. Espátula con borde recto

4.11. Palita

4.12. Estufa ventilada regulada a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$

En la figura 1 se muestra el conjunto del aparato con los elementos descritos en 4.3 a 4.6 y en la figura 3 se muestra el esquema total del equipamiento tal como aparece en la norma EN 13040 Anexo A (normativo) y en la norma inglesa BS 4156: 1990 (Ansorena Miner 1994).

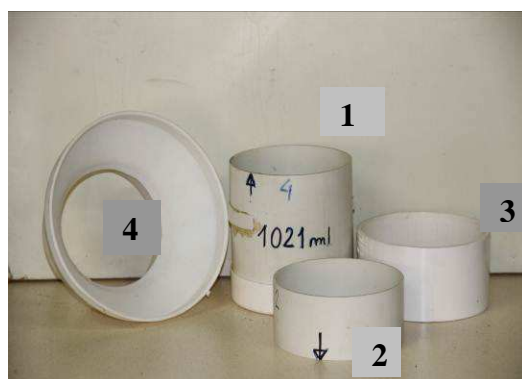






Fig 1: Sucesivos pasos para armar el conjunto de aparato compuesto de: cilindro portamuestra (1), collar desmontable (2), anillo sujetador (3) y embudo (4)

## 5. PROCEDIMIENTO

5.1. Se pesa el cilindro vacío con precisión de 1 g ( $m_1$ ). Se coloca el collar y el embudo en su posición, se sitúa el tamiz aproximadamente 5mm por encima del embudo. Se toman iguales cantidades de la muestra de ensayo con la pala y se reparten con suavidad por encima del tamiz-controlador de flujo, llenando el aparato en forma pareja. Se puede ayudar con suavidad con las yemas de los dedos si el material no pasa inmediatamente por el tamiz. (fig. 2).

Nota: Este paso debe realizarse, aunque ya se haya cumplido el paso 4 de preparación de la muestra, ya que el controlador de caída estandariza la altura de caída del material.

Nota: Sólo en el caso donde según el paso 3 el material retenido fuera  $> 10\%$  (v/v) no se coloca el controlador de caída.

5.2. Una vez llenado el aparato se retira el tamiz y el embudo. Se retira el exceso de material y se enrasa con la regla y suavemente se coloca el pistón de compactación durante  $180\text{ s} \pm 10\text{ s}$ , (fig. 2).

5.3. Se retira el pistón y el collar teniendo cuidado que el cilindro no vibre y con la espátula se nivela el material evitando compactaciones adicionales.

Nota: Si el material fuera muy compresible y quedara por debajo del borde del cilindro, la compactación no es adecuada para el material ensayado. Se repite el procedimiento sin aplicar el pistón y se informa en el informe (sería una medida de la densidad de sustrato húmeda no compactada).

Nota: La nivelación puede presentar dificultades cuando el material es áspero, fibroso, leñoso o heterogéneo. Cualquier depresión debería ser rellenada con resto de la muestra.

5.4. Se pesa el material y el cilindro con precisión de 1 g ( $m_2$ ). (fig 2).



Fig 2: Procedimiento: Foto superior izquierda, llenado del aparato con tamiz controlador de caída y el trípode. Foto superior derecha: aparato con el pistón compactador. Foto inferior izquierda: enrasado del material compactado. Foto inferior derecha: pesada del material

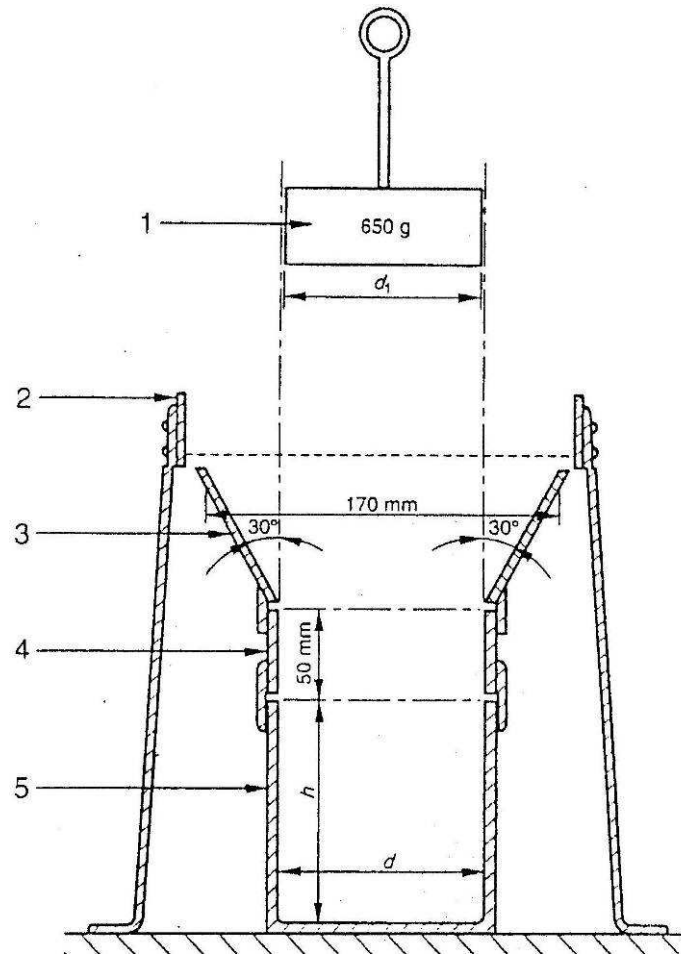


Fig 3: esquema del dispositivo completo según norma CEN EN 13040 Anexo A: 1) pistón; 2) tamiz controlador de flujo; 3) embudo; 4) collar; 5) cilindro de ensayo; d: diámetro interno; h: altura;  $d_1$  diámetro del pistón.

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1.: Densidad de sustrato húmeda

Se calcula la densidad de sustrato húmeda con la siguiente fórmula:

$$DSh = \frac{msh}{Vt} \times 1000 \quad (1)$$

donde

$DSh$ : densidad de sustrato húmeda en  $\text{kg m}^{-3}$

$msh$ : masa de sustrato húmeda en g

$Vt$ : volumen total del sustrato en  $\text{cm}^3$  = volumen del cilindro portamuestras

La  $msh$  se obtiene mediante el cálculo:

$$msh = m2 - m1$$

Reemplazando en (1) se obtiene la  $DSh$  y se multiplica x1000 para expresarla en  $\text{kg m}^{-3}$

## 6.2. Densidad de sustrato seca

Se calcula con la fórmula:

$$DSs = DSh \times MS\% \div 100$$

donde

*DSs* : densidad de sustrato seca en  $\text{kg m}^{-3}$

*DSh* : densidad de sustrato húmeda en  $\text{kg m}^{-3}$

*MS%*: materia seca en porcentaje calculada según el protocolo nº 111

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realizan 3 repeticiones con submuestras frescas de la misma muestra de ensayo. A modo de guía en la norma EN 13040 figuran los resultados del interlaboratorio de la CEN (1995) para ensayar los procedimientos descritos que informan, dependiendo del material, un límite de repetitividad entre 5,11 y 12,08  $\text{g L}^{-1}$  y un límite de reproducibilidad entre 27,28 y 75,53  $\text{g L}^{-1}$ .

## BIBLIOGRAFIA

- Ansorena Miner, J. 1994. Sustratos, propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Norma Europea EN 13040:1999, Anexo A y su actualización EN 13040:2007, Anexo A (vigente).

## **Protocolo nº 114 (EN13041)**

### **Determinación de las propiedades físicas: Densidad de sustrato seca, Porosidad de aire, Contenidos hídricos volumétricos, Valor de contracción y Porosidad total. Método basado en la norma CEN EN-13041: 2007**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de rutina para la determinación de la densidad de sustrato seca, porosidad de aire, contenido hídrico volumétrico, porosidad total, valor de contracción de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método está basado en el procedimiento descrito por la norma CEN, EN-13041: 1999 y su modificación del 2007

La muestra se satura de agua y se equilibra a una tensión de 50 hPa en un lecho de arena. Luego la muestra se transfiere a cilindros portamuestra formados por dos anillos, se resatura y equilibra a una tensión de 10 hPa. Una vez alcanzado el equilibrio, se calculan las propiedades físicas a partir de los pesos secos y húmedos de la muestra del anillo inferior.

Este método no es adecuado para materiales muy gruesos que no dan lugar al fenómeno de capilaridad, ni a los lodos de depuradora, ni para los que son preformados como la lana de roca y las planchas de espuma.. Es aplicable a los materiales que tienen partículas < 25mm y/o fibras flexibles < 80mm

#### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario, además de :

2.1. Agua desaireada: agua con bajo contenido de aire obtenida por ebullición durante 15-20 minutos.

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

Se solicitarán no menos de 5L de muestra para este análisis. La muestra debe prepararse de acuerdo al punto 5 del protocolo nº 110. Si el volumen retenido en el tamiz es > 10% (v/v) este método no es válido para ese material.

La muestra debe tener una humedad inicial tal que pueda ser manipulada adecuadamente. Se recomienda un valor no menor al 50% (m/m) con una evaluación organoléptica, excepto en sustratos compuestos que contengan tierra deben estar entre 10% -20 %, sin presentar consistencia de enlodado o pasta.

En el caso de tener que agregar agua para humedecer la muestra, calcular el agua a ser agregada según el protocolo de preparación de la muestra n° 110.

#### 4. EQUIPAMIENTOS

4.1. Tamiz de malla cuadrada de 25 mm x 25 mm

4.2. Tijeras

4.3. Balanza con precisión 1 g (intervalo 0,1 g)

4.4. Equipo de tubos de plásticos de aproximadamente 14 cm de diámetro y 14 cm de altura, para obtener un volumen aproximado de 2 litros (fig 1)

tela de voile 100% polyester de diámetro aproximado de 25 cm y elásticos para sujetar la tela a los tubos

4.5. Equipo de doble cilindros, fabricados en material que resista 120 °C sin deformarse: (fig 2) con cilindros de diámetro interno 10 cm y 5 cm de altura

tela de voile 100% polyester de diámetro aproximado de 15 cm

suncho plástico (tipo precintos)

faja de goma y bandas elásticas para sujetar los cilindros superpuestos

4.6. Baño de agua: batea con altura mínima aproximada de 18 cm con rejilla

4.7. Equipo tipo lecho de arena, 1 por cada repetición que se requiera ( ver anexo).

4.8. Papel de filtro liso de filtración extra rápida

4.9. Estufa ventilada regulada a  $103 \pm 2$  °C

4.10. Calibre

4.11. Cuchara o palita con capacidad aproximada de 50 ml



Fig 1: Tubos rígidos de 2 L



Fig 2: Cilindros portamuestras



Fig 3: Equipos tipo lecho de arena. Los 3 del estante superior se utilizan para tensionar hasta 100 hPa y el del estante inferior para tensionar los tubos a 50 hPa.

## 5. PROCEDIMIENTO

### 5.1. Humidificación, saturación y equilibrado a una tensión de 50 cm

5.1.1. Armar los tubos rígidos con el voile sujetado con una banda elástica como indica la figura 1.

5.1.2. Llenar como mínimo 2 tubos (4.5) con la muestra de ensayo cuidando para evitar la formación de huecos artificiales. Cubrir cada tubo con el voile fijándolo con la ayuda de una banda elástica. Colocar el tubo sobre la rejilla en la batea vacía

5.1.3. Manteniendo un flujo constante, llenar lentamente el baño de agua hasta que el nivel esté 1 cm debajo del borde superior del tubo. El llenado debería durar alrededor de 30 minutos.

5.1.4. Si el tubo comienza a flotar, colocar un disco pesado encima de este dejando salir el aire y asegurándose al mismo tiempo que no se produzca compactación de la muestra

5.1.5. Dejar reposar manteniendo el nivel del agua constante hasta la saturación completa de la muestra (hasta un máximo de 36 horas).

5.1.6. Retirar los tubos y transferirlos inmediatamente a la mesa de succión de lecho de arena, previa colocación de papel de filtro. El fondo del tubo debería estar completamente en contacto con el papel y este con la arena. Aplicar durante 48 horas

una tensión de 50 hPa (presión hidrostática de -50 cm), medida a partir del fondo del tubo (fig 4)



Fig 4: Tubos sometidos a 50 hPa



Fig 5: Llenado de cilindros portamuestras

## 5.2. Llenado de los cilindros portamuestras

5.2.1. Asegurar el voile con la ayuda de un o dos precintos, en la base del cilindro inferior. Pesarlo y registrar ( $m_0$ ) (fig 2 y 6)

5.2.2. Superponer el cilindro superior al inferior y sostenerlo por medio de la goma y las bandas elásticas.

5.2.3. Vaciar los tubos que contienen la muestra húmeda en equilibrio a 50 hPa sobre una superficie limpia y mezclar suavemente con cuidado de no provocar modificaciones físicas en la muestra.

5.2.3. Con la cuchara transferir en porciones de unos 50 ml de la muestra, previa mezcla, a los cilindros portamuestras llenándolos completamente, teniendo cuidado de evitar la compactación o los huecos de aire (fig 5).

5.2.4. Colocar la unidad sobre la rejilla en el baño de agua seco llenando lentamente el baño a flujo constante hasta que el nivel de agua se sitúe a 1 cm por debajo del borde superior del cilindro superior. El llenado debería durar alrededor de 30 minutos (fig 7)

5.2.5. Mantener el nivel de agua constante durante 24 horas.

Nota: Se pueden utilizar 2 baños diferentes uno para los 10 hPa de tensión y otro para los 50 hPa.





Fig 6: Pesada del cilindro inferior



Fig 7: Llenado del baño de saturación



Fig 8: Cilindros con sustrato saturado después de 24 h



Fig 9: Transferencia al lecho de arena

### 5.3. Tensionado

5.3.1. Retirar del baño las unidades portamuestras con cuidado (fig 9) y transferirlas inmediatamente al lecho de arena, previa colocación del papel de filtro humedecido. Asegurarse que se realiza un buen contacto entre parte inferior de la unidad, el papel de filtro y la arena. Cubrir el lecho de arena y aplicar una tensión de 10 hPa (presión hidrostática de -10 cm) medida a partir de la mitad del anillo inferior.

Es importante comprobar regularmente la ausencia de burbujas de aire en los tubos de regulación del nivel de tensión. Aplicar la tensión hasta que se alcance el equilibrio (cuando cesa el goteo). Es necesario un tiempo mínimo de 48 horas pudiendo llegar hasta 72 horas dependiendo del material.

### 5.4. Separación de los cilindros

5.4.1. Retirar los cilindros portamuestra del lecho de arena y colocarlos sobre una superficie plana y estable. Retirar el anillo superior con cuidado levantando verticalmente. Usando un cuchillo o paleta retirar el volumen correspondiente al cilindro superior y nivelar. En materiales fibrosos, cortar el exceso de material con unas tijeras evitando otras perturbaciones (fig 10). 5.4.2. Retirar todo el material adherido al

exterior del cilindro, pesar y registrar la masa ( $m_2$ ) con cuidado de no girar el cilindro (fig 11).



Fig 10: Separación del cilindro superior

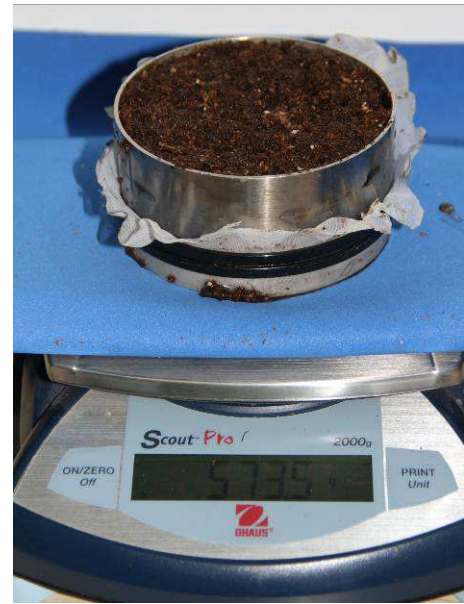


Fig 11: Pesada del cilindro inferior

5.4.3. Volver el cilindro al lecho de arena cuidando que se haga nuevamente un buen contacto. Aplicar una nueva tensión bajando la manguera de drenaje a la altura (cm) deseados y esperar que alcance nuevamente el equilibrio (24 o 48 h) (fig 12).

5.4.4. Retirar el cilindro del lecho de arena, pesar, registrar la masa ( $m_i$ ).

5.4.5. Repetir los pasos 5.4.3 y 5.4.4. tantas veces como puntos de tensión se deseen medir. El subíndice  $i$  toma los valores de 1 hasta el n° de puntos de tensión.

Nota: Si la superficie de la arena quedara muy seca entre mediciones, se puede humedecer aplicando agua con un pulverizador. Se aconseja cambiar el papel de filtro a medida que se ensucie o pierda porosidad.

5.4.6. Una vez que se llegó al último punto de tensión deseado, generalmente (100 hPa) luego de pesar el material húmedo, llevar a estufa y secar a  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  hasta masa constante ( $m_s$ ).



Fig 12: cilindros con tensión > 10 hPa      Fig 13: Peso de la masa seca ( $m_s$ )

Si se desea calcular el Índice de contracción de volumen (IC):

5.4.7. Retirar el cilindro y medir con el calibre la altura media ( $h_2$ ) (cuatro medidas) y el diámetro medio ( $d_2$ ) tres medidas: arriba, medio y abajo, de las muestras secas (fig. 14), Nota: Este procedimiento no se puede aplicar a materiales granulados porque no conservan la forma durante el secado. En este caso se recomienda medir la diferencia de altura entre el cilindro y la nueva superficie del sustrato en 4 puntos y luego se calcula  $h$  haciendo la diferencia y promediando.

5.5. Determinar el contenido de materia orgánica y cenizas según al protocolo nº 121



Fig 14: Medidas de las altura y diámetros para calcular el nuevo volumen obtenido

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Densidad de sustrato seca

Se aplica la fórmula  $DS_s = \frac{m_{ss}}{V_t} \times 1000$  (1) donde:

$DS_s$  : densidad de sustrato seca en  $\text{kg m}^{-3}$

$m_{ss}$  : masa de sustrato seca en g

$V_t$  : volumen total del sustrato en  $\text{cm}^3$

La  $m_{ss}$  se obtiene mediante el cálculo:  $m_{ss} = m_s - m_0$

El volumen total del sustrato se toma como el volumen del cilindro inferior ( $V_{cil}$ ) que se calcula mediante la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V_{cil} = \pi \times (d/2)^2 \times h$$

donde  $d$  y  $h$  son el diámetro interno y la altura respectivamente obtenidos como promedio de 4 mediciones.

Reemplazando en (1) se obtiene la  $DS_s$  multiplicada x1000 para expresarla en  $\text{kg m}^{-3}$

## 6.2. Capacidad de retención de agua

Se obtiene mediante la fórmula:

$$CRA = \frac{V_{ag}}{V_t} \quad (2) \quad \text{donde:}$$

$CRA$  : es la capacidad de retención de agua en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$V_{ag}$  : es el volumen de agua retenido a 10 hPa de tensión en  $\text{cm}^3$

$V_t$  : es el volumen total del sustrato calculado en 6.1

El volumen de agua se obtiene mediante el cálculo:

$$V_{ag} = (m_i - m_s) \times \delta_{ag} \quad \text{donde :}$$

$m_i$  es la masa del sustrato húmedo a la tensión  $i$  + masa del cilindro inferior en g

$m_s$  es la masa del sustrato seco + masa del cilindro inferior en g

$\delta_{ag}$  es la densidad del agua considerada como  $1 \text{ g cm}^{-3}$

Reemplazando en (2) se obtiene la CRA expresada como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

En el caso de tensiones distintas a 10 hPa, se calcula del mismo modo el contenido hídrico volumétrico a esa tensión.

## 6.3. Porosidad total

Se calcula mediante la fórmula

$$PT = 1 - \frac{DS_s}{DP} \quad \text{donde:}$$

$PT$  : es la porosidad total en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$DS_s$ : es la densidad de sustrato seca calculada en 6.1

$DP$ : es la densidad de partícula calculada según el método por fórmula de acuerdo al protocolo n°

## 6.4 Capacidad de aireación

Se calcula según la fórmula:

$$CA = PT - CRA \quad \text{donde :}$$

$CA$ : es la capacidad de aireación expresada en fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$PT$  : la porosidad total calculada en 7.3

$CRA$ : es la capacidad de retención de agua calculada en 7.2

## 6.5 Agua fácilmente disponible (AFD), Agua de reserva (AR) y Agua difícilmente disponible (ADD)

$AFD$  = Capacidad de retención de agua – Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa

$AR$  = Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa – Agua difícilmente disponible

$ADD$  = Contenido hídrico volumétrico a 100 hPa

### 6.5. Índice de contracción de volumen (IC)

Se calcula aplicando la fórmula:

$$IC = \frac{V_f}{V_i} \quad (3) \quad \text{donde:}$$

$IC$ : es el índice de contracción de volumen en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$V_f$ : es el volumen final que ocupa la masa de sustrato seca en estufa a  $105^\circ \text{C}$

$V_i$ : es el volumen inicial que corresponde al del cilindro inferior calculado en 7.1

Para el cálculo del  $V_f$ , se aplica la fórmula:

$$V_{cil} = \pi \times (d/2)^2 \times h$$

donde  $d$  y  $h$  son el diámetro interno y la altura respectivamente obtenidos como promedio en 5.4.7. Si el sustrato seco no se desprende de dentro del cilindro se toma la altura entre el borde del cilindro y la superficie del sustrato

Reemplazando en (3) se calcula el  $Ic$  y se expresa como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realizan 3 repeticiones como rutina de laboratorio. Se recomienda un error máximo ( $\epsilon$  max.) del 10%. Si se superara este valor de error se recomienda realizar más repeticiones.

### ANEXO : Construcción de la mesa de tensión tipo Lecho de arena (Fig 15)

Construir un sistema de drenaje a partir de tubos adaptandolos a la forma del fondo del recipiente, dejando 2 cm de margen respecto a las paredes. Encolar las uniones con adhesivo resistente al agua. Cortar ranuras de 1 cm de longitud en la cara inferior del tubo, a intervalos de 1 cm o 2 cm, envolverlo con 3 capas de tela de nylon. Fijar el tubo en la perforación del tapón del sistema de drenaje y pegar el tapón en el orificio de salida del recipiente. Comprobar que el sistema de drenaje tiene la pendiente hacia el punto situado encima de la salida. Unir la manguera del sistema de nivel y el tubo externo. Cerrar la válvula. Llenar de agua el sistema de drenaje para evacuar el aire. Llenar todos los tubos con agua deaireada y llenar el recipiente hasta la mitad. Conectar una botella de aspiración de 5 litros y una bomba de vacío al punto B. Verter dentro del recipiente una cantidad suficiente de arena gruesa limpia (mesh 30-80) , para cubrir el sistema de drenaje hasta aproximadamente 1 cm, comprobando que se conserve la pendiente en dirección a la evacuación después de añadir la arena.

Añadir alrededor de 3 cm de arena fina (mesh 200) saturada de agua. Abrir la válvula A, aplicar vacío para evacuar el agua pero manteniendo el nivel de agua claramente por encima de la superficie de la arena. Cuando no se ve a ninguna burbuja en la manguera por debajo de la salida del recipiente cerrar A y añadir una segunda capa de arena fina saturada de agua. Repetir la adición de arena fina y eliminar el aire atrapado hasta que la superficie de la arena esté alrededor de 7 cm por debajo del borde superior del recipiente, asegurándose siempre de que la superficie de la arena esté por debajo de la del agua.

Es conveniente continuar la desaireación frecuentemente durante algunos días después de completar el llenado hasta no ver burbujas en el sistema. Finalmente quitar el sistema de vacío de B, regular la tensión deseada ajustando la altura de salida de la botella del sistema del nivel, abrir la válvula A y evacuar el agua sobrante.

Para comprobar que la arena tiene un valor de entrada de aire superior a la tensión deseada, colocar el sistema de nivel a esa altura durante 2 días. Elevar el nivel 20 cm cada 10 min hasta que la superficie se inunde, volver a conectar el sistema de vacío y comprobar la ausencia de aire en los tubos de evacuación. Durante las últimas etapas del llenado del recipiente se puede acumular material fino en la superficie o en suspensión, si esto ocurre, dejar reposar hasta el día siguiente y eliminarlo antes de continuar con el llenado. Si se produce una entrada de aire en cualquier momento inundar de nuevo la mesa de succión con agua desaireada y dejar drenar hasta la succión prefijada. En el caso de que el lecho de arena tenga aire atrapado, aplicar succión por vacío en el punto B como se ha indicado anteriormente, pero solamente si la superficie esta cubierta de agua, porque de lo contrario, se producirá la entrada de aire en el sistema. Las arenas más apropiadas para la construcción de los lechos de arena son las arenas industriales lavadas y clasificadas, de rango granulométrico estrecho. Se pueden utilizar otros materiales de empaquetamiento como pequeñas bolas de vidrio o polvo de óxido de aluminio a condición de poder alcanzar los valores requeridos de entrada de aire. Nota: el diseño de la mesa de tensión se da a título de ejemplo.

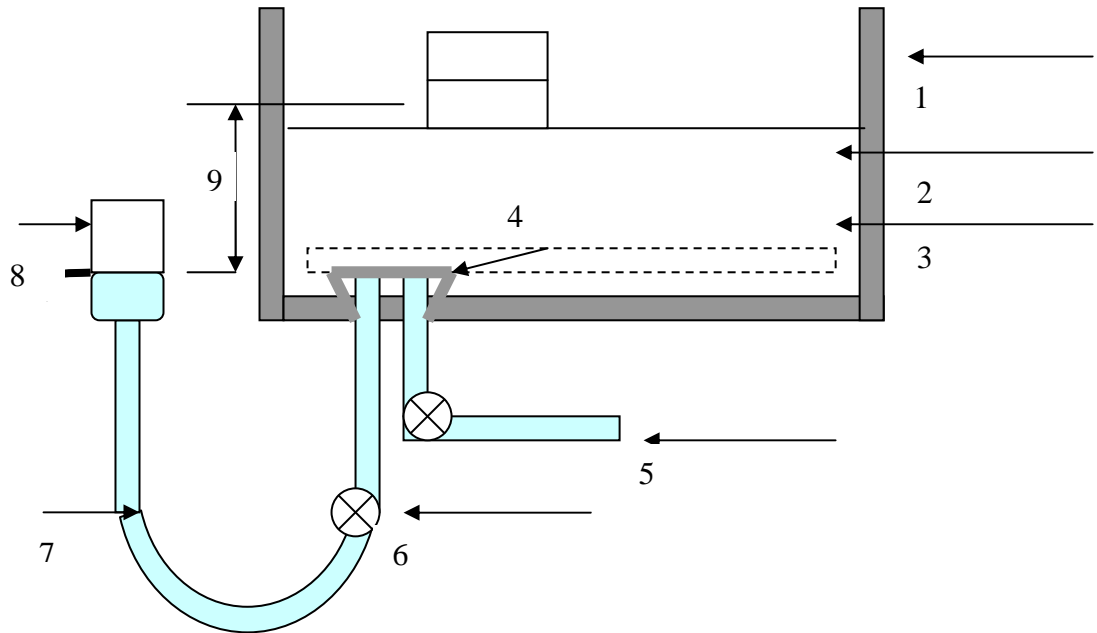


Fig. 15: Esquema de la mesa de tensión tipo lecho de arena

Referencias:

1. Recipiente rígido de aproximadamente 50 cm x 35 cm x 30 cm
2. Arena calibrada
3. Tubos de drenaje
4. Tapón del recipiente perforado por la salida del drenaje
5. Salida para el sistema de vacío, válvula punto B
6. Válvula punto A
7. Manguera flexible transparente del sistema de drenaje
8. Botella reguladora del nivel con pico de drenaje
9. Distancia entre la mitad del cilindro inferior y el nivel de la botella de drenaje: corresponde a la tensión aplicada

**BIBLIOGRAFIA**

- Norma UNE-EN-13041, 1999, Mejoradores de suelo y sustrato de cultivos. Determinación de las propiedades físicas densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total.
- Verdonk, O.F, Cappaert, I.M, y De Boodt M.F.. 1978. Physical Characterization of Horticultural Substractes. Acta Hort. 82:191-198

## **Protocolo n° 115 (DBOT)**

### **Determinación de Densidad de sustrato seca, Capacidad de retención de agua, Porosidad total, Capacidad de aireación e Índice de contracción de volumen.**

#### **Método basado en DE BOODT et al. (1974)**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de rutina para la determinación de la densidad de sustrato seca, capacidad de retención de agua, porosidad total, capacidad de aireación e índice de contracción de volumen de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método está basado en el procedimiento descrito por De Boodt et al. (1974) y modificado por Martínez Farré (1992).

Consiste en la medición de una determinada masa de sustrato seca y del volumen de agua que queda retenido en el material colocado en un cilindro portamuestras cuando es sometido a una tensión de 10 hPa.

El método es apto para materiales que de acuerdo al tamaño de partículas, constituyan una muestra de ensayo representativa en el volumen del cilindro portamuestras indicado en este protocolo. No es adecuado para materiales muy gruesos que no presenten capilaridad, para materiales pegajosos ni preformados como planchas de espuma o lana de roca.

#### **2. TERMINOS Y DEFINICIONES**

2.1. **Volumen total de la muestra:** es el volumen de la muestra con el contenido hídrico que retiene después de tensionarla a 10 hPa, que en este método se toma como el volumen del cilindro inferior.

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

Se solicitarán no menos de 3L de muestra para este análisis. La muestra debe prepararse de acuerdo al punto 5 del protocolo n° 110 de este apéndice. Si el volumen retenido en el tamiz es  $> 10\%$  (v/v) este protocolo no es válido para ese material.

La muestra debe tener una humedad inicial tal que pueda ser manipulada adecuadamente. En materiales orgánicos debe estar suelta, presentarse fría al tacto, pero sin formar grumos ni agregados. Se puede reconocer visualmente este estado cuando al comprimir la muestra entre los dedos se mantiene aglutinada sin formar terrón ni



tampoco liberar agua. Para turbas este punto estaría entre 50% y 70%, para compost en proceso 45%-60%, compost terminados 40%-50%. En general se podría establecer un valor alrededor del 50%-60% pero sin generalizar. Debe tenerse en cuenta el efecto de la hidrofobicidad que pueden presentar algunos materiales orgánicos con humedades por debajo del 40%. En sustratos inorgánicos se puede seguir recomendación similar para materiales libres de tierra por ejemplo perlita, vermiculita, pero los sustratos compuestos que contengan tierra deben estar entre 10% -20 %, sin presentar consistencia de pasta.

En el caso de tener que agregar agua para humedecer la muestra, calcular el agua a ser agregada según el protocolo n° 110 de preparación de la muestra. Se calcula el contenido de humedad con metodología según el protocolo ° 111 de este apéndice. ...

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

- 4.1.** Tamiz de malla cuadrada de 25 mm x 25 mm
- 4.2.** Tijeras
- 4.3.** Balanza con precisión 1 g ( intervalo 0,1 g)
- 4.4.** Equipo de doble cilindros, fabricados en material que resista 120 °C sin deformarse:
  - cilindro inferior de diámetro interno 7,5 cm y 4 cm de altura
  - cilindro superior de diámetro interno 7,5 cm y 3 cm de altura
  - tela de voile 100% polyester
  - suncho plástico (tipo precintos)
  - faja de goma y bandas elásticas para sujetar los cilindros superpuestos (fig 1)
- 4.5.** Baño de agua: batea con altura aproximada de 10-12 cm con rejilla en la base
- 4.6.** Equipo tipo lecho de arena, 1 por cada repetición que se requiera. Ver construcción en el anexo (fig 1)
- 4.7.** Papel de filtro liso de filtración extra rápida
- 4.8.** Estufa ventilada regulada a  $103 \pm 2$  °C
- 4.9.** Calibre

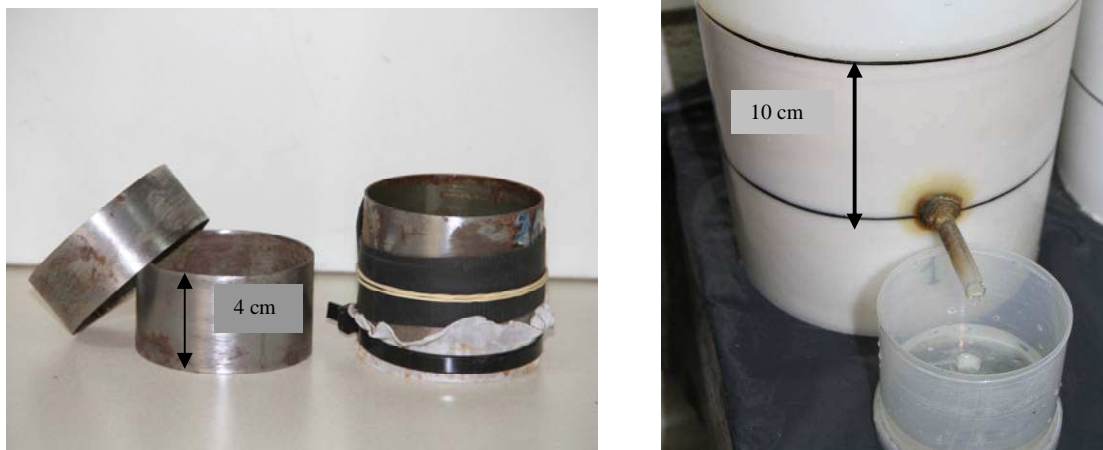


Fig 1: foto izquierda: Cilindro inferior de 7,5 cm de diámetro y 4 cm de altura y superior de 3 cm de altura. Conjunto armado con tela de voile, precinto, goma y bandas elásticas, foto derecha: lecho de arena con salida de drenaje a 10 cm

## 5. PROCEDIMIENTO

- 5.1. Armar el conjunto del cilindro inferior con la tela de voile colocada como base ajustada con el suncho plástico, de ser necesario, se pueden colocar 2 sunchos de modo que la tela quede bien tirante.
- 5.2. Pesar el conjunto, registrar el peso ( $m_1$ ) en gramos (fig 2).
- 5.3. Colocar el cilindro superior sobrepuesto al conjunto inferior ajustando la unión con una goma y sosteniéndola con bandas elásticas para que quede firme. Este paso se requiere para que durante el baño de agua, ésta no penetre por la unión de los 2 cilindros.
- 5.4. Con el material ya condicionado según el apartado 3, llenar cada cilindro colocando el material entre las palmas y vertiéndolo suave y homogéneamente en todo el volumen de los cilindros tratando de no dejar espacios vacíos. Dar tres golpecitos al conjunto sobre la mesada como para asentar el material y asegurarse que no quedan espacios sin llenar y completar con más material hasta el borde. Para materiales orgánicos que sufren disminución de volumen al saturarse, llenar de manera bien colmada. Limpiar todo resto de material que quede adherido en la parte externa del conjunto de cilindros (fig 3).
- 5.5. Colocar los cilindros llenos sobre la rejilla de la batea vacía para el baño de agua. Esta superficie debe estar bien nivelada. Se llena el baño con agua hasta 1 cm debajo del borde del cilindro superior permitiendo que agua penetre lentamente de abajo hacia arriba por vasos comunicantes. El tiempo requerido para este llenado es de mínimo 30

min. El último cm de sustrato se saturará por capilaridad. Si el material presentara partículas grandes con escasa capilaridad se puede aumentar el nivel del agua hasta ½ cm del borde superior del cilindro. Si algún material tuviera tendencia a flotar se puede colocar un peso sobre el cilindro cuidando de no adensar la muestra. Dejar en el baño por 24 horas reponiendo agua para mantener el nivel, si fuera necesario. En materiales con dificultad para hidratarse dejar 48 h hasta saturación completa (fig 4 y 5)

**5.6.** Se retiran los cilindros lentamente en forma vertical sin inclinar, hasta que el fondo sale del nivel del agua, entonces se le coloca rápidamente un platillo debajo para recoger el agua drenada (fig 6). Así se lo transfiere a los lechos de arena (ver preparación y puesta a punto en el anexo ), que se encuentran a una tensión de 10 hPa medida desde la base de los cilindros (fig 7). A las 24 h se verifica que haya llegado al equilibrio el agua drenante, lo que se visualiza porque no gotean las mangueras de salida. Verificar si realmente el sistema se encuentra en equilibrio ya que este es un punto clave del procedimiento y algunos materiales precisan más tiempo para equilibrar los potenciales agua. Si fuera así, dejar 24 h más o hasta llegar al equilibrio (fig 8).

**5.7.** Luego se retiran los cilindros uno a uno de los lechos de arena, se aflojan las bandas elásticas y se retira la goma de unión. Se separa el cilindro superior y con una espátula o cuchillo se nivela la superficie al ras del cilindro inferior cuidando de no alterar la muestra. En el caso de materiales fibrosos se procede a cortar las fibras con tijera si estas sobresalen del cilindro. Mientras se realizan estos pasos no deben girarse ni inclinarse los cilindros, ni realizar cualquier otro movimiento que produzca pérdida de agua (fig 9)

**5.8.** Se pesa el conjunto del cilindro inferior y el sustrato húmedo. Se registra el peso ( $m_2$ ) en gramos (fig 10).

Nota: Si se analizan materiales con alta capacidad de retención de agua y luego del tensionado la base de los cilindros moja las superficies de apoyo, se colocan los cilindros a partir a la salida de los lechos (paso 6.7) sobre planchas de aluminio individuales (tipo material descartable), previamente taradas, para no perder contenido hídrico.

**5.9.** Se llevan a estufa a  $103 \pm 2$  °C , 24 h o hasta peso constante.

**5.10.** Se retiran de la estufa, se dejan enfriar en un desecador, se pesan y se registra el peso ( $m_3$ ) en gramos.

**5.11.** Se procede a la medición de la altura del volumen del sustrato seco con un calibre en 4 puntos equidistantes y de los diámetros máximos y mínimos. Si el sustrato seco no

se desprende de dentro del cilindro se toma la altura entre el borde del cilindro y la superficie del sustrato y luego se hace la diferencia.



Fig 2: Pesada del cilindro inferior cilindros



Fig 3: Llenado del conjunto de cilindros



Fig 4: Llenado del baño de saturación

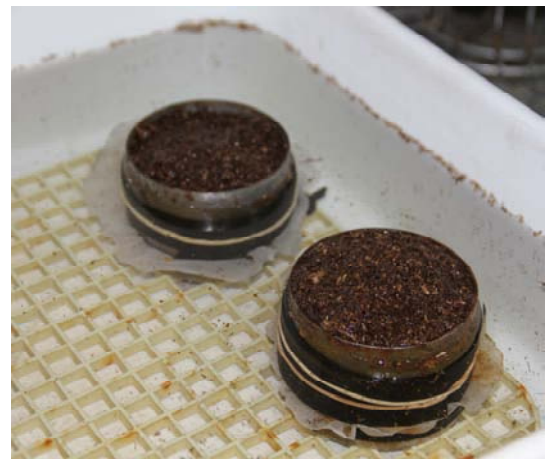


Fig 5: Saturación después de 48 h



Fig 6: Retirada del baño de saturación



Fig 7: Colocación sobre el lecho de arena



Fig 8 : Cilindros con sustrato a 10 hPa cuando cesa de gotear ( 24-48 h)



Fig 9: Retirada del cilindro superior



Fig 10: Pesada del cilindro inferior con sustrato a 10 hPa

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Densidad de sustrato seca

Se aplica la fórmula

$$DSs = \frac{mss}{Vt} \times 1000 \quad (1) \text{ donde:}$$

$DSs$  : densidad de sustrato seca en  $\text{kg m}^{-3}$

$mss$  : masa de sustrato seca en g

$V_t$  : volumen total del sustrato en  $\text{cm}^3$

La  $m_{ss}$  se obtiene mediante el cálculo:

$$m_{ss} = m_3 - m_1$$

El volumen total del sustrato se toma como el volumen del cilindro inferior ( $V_{cil}$ ) que se calcula mediante la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V_{cil} = \pi \times (d/2)^2 \times h$$

donde  $d$  y  $h$  son el diámetro interno y la altura respectivamente obtenidos como promedio de 4 mediciones.

Reemplazando en (1) y se obtiene la  $DSs$  y se multiplica x1000 para expresarla en  $\text{kg m}^{-3}$

## 7.2. Capacidad de retención de agua

Se obtiene mediante la fórmula:

$$CRA = \frac{V_{ag}}{V_t} \quad (2) \quad \text{donde:}$$

$CRA$  : es la capacidad de retención de agua en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$V_{ag}$  : es el volumen de agua retenido a 10 hPa de tensión en  $\text{cm}^3$

$V_t$  : es el volumen total del sustrato calculado en 6.1

El volumen de agua se obtiene mediante el cálculo:

$$V_{ag} = (m_2 - m_3) \times \delta_{ag} \quad \text{donde}$$

$m_2$  es la masa del sustrato húmedo + masa del conjunto del cilindro inferior en g

$m_3$  es la masa del sustrato seco + masa del conjunto del cilindro inferior en g

$\delta_{ag}$  es la densidad del agua considerada como  $1 \text{ g cm}^{-3}$

Reemplazando en (2) se obtiene la CRA expresada como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

## 6.3. Porosidad total

Se calcula mediante la fórmula

$$PT = 1 - \frac{DSs}{DP} \quad \text{donde:}$$

$PT$  : es la porosidad total en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$DSs$ : es la densidad de sustrato seca calculada en 6.1

$DP$ : es la densidad de partícula calculada según el método basado en la norma EN-13039

## 6.4 Capacidad de aireación

Se calcula según la fórmula:

$$CA = PT - CRA \quad \text{donde}$$

*CA*: es la capacidad de aireación expresada en fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

*PT*: la porosidad total calculada en 6.3

*CRA*: es la capacidad de retención de agua calculada en 6.2

### 6.5. Índice de contracción de volumen

Se calcula aplicando la fórmula:

$$IC = \frac{V_f}{V_i} \quad (3) \quad \text{donde}$$

*IC*: es el índice de contracción de volumen en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

*V<sub>f</sub>*: es el volumen final que ocupa la masa de sustrato seca en estufa a 105 °a

*V<sub>i</sub>*: es el volumen inicial que corresponde al del cilindro inferior calculado en 6.1

Para el cálculo del *V<sub>f</sub>*, se aplica la fórmula:

$$V_{cil} = \pi \times (d/2)^2 \times h$$

donde *d* y *h* son el diámetro interno y la altura respectivamente obtenidos como promedio de 4 mediciones de la altura del volumen del sustrato seco en 4 puntos equidistantes y de los diámetros máximos y mínimos. Si el sustrato seco no se desprende de dentro del cilindro se toma la altura entre el borde del cilindro y la superficie del sustrato en 4 puntos y luego se calcula *h* haciendo la diferencia y promediando.

Reemplazando en (3) se calcula el *I<sub>c</sub>* y se expresa como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se recomienda trabajar con un error máximo < 10% en todas las determinaciones.

Como rutina se trabaja con 3 repeticiones. En el cuadro 1 se presentan valores sólo orientativos de la variabilidad para cada parámetro, siguiendo el procedimiento metodológico descrito anteriormente y para los materiales ensayados, teniendo en cuenta que estos coeficientes serán influenciados por el tipo de material.

Cuadro 1: Valores orientativos de coeficiente de variación (cv%) para la reproducibilidad de los parámetros

Parámetro	cv%
Densidad de sustrato seca	< 5
Capacidad de retención de agua	<10
Porosidad total	< 5
Capacidad de aireación	< 15
Índice de contracción	< 20

Si los resultados arrojaran una variabilidad mayor de estos valores se recomienda realizar mayor número de repeticiones.

#### ANEXO ( informativo)

##### Construcción de los lechos de arena

**Recipientes:** Elegir recipientes cilíndricos con una altura mínima de 32 cm, de preferencia de plástico rígido algo traslúcido y con tapa. A los 12 cm medidos desde la base, se le hace una perforación lateral con un diámetro de alrededor de 1 cm. Los laterales de los recipientes deben ser perpendiculares al fondo.

**Drenaje:** Construir un sistema de drenaje con un tubo de manguera cristal de 9 mm de diámetro externo y un largo igual al diámetro del recipiente con perforaciones de 2mm hechas cada 1cm cuidando que no quede rebaba que obstaculice los orificios. El largo del drenaje perforado será igual al diámetro del recipiente + unos 10 cm sin perforar (esta última medida puede ser menor). Se debe taponar o sellar el extremo más cercano a la parte perforada. Se envuelve dicha manguera con una tira de tela tejido no tejido (e.g. tela antihelada) con 3 pasadas para no permitir el paso de la arena, cuidando que no queden repulgues que puedan favorecer la formación de burbujas de aire. Cualquier ajuste que se necesite hacer puede realizarse con tanza.

Nota: el sistema de drenaje también puede ser realizado con caño rígido para agua y se le puede agregar en la parte exterior una válvula para abrir o cerrar el paso de agua.

**Arena:** Se utilizan 2 tipos de arena calibrada, una gruesa para la parte inferior para garantizar la saturación sin presencia de aire y una más fina arriba cuya presión de entrada de aire sea mayor que la tensión de 10 hPa a la que estará sometida. Se utiliza como arena gruesa, un polvo de sílice de venta comercial, calibrado por el fabricante



como grueso de mesh 30-80. En la parte superior se utiliza un polvo de sílice de mesh 100 para garantizar la saturación de la arena sometida a 10 hPa.

**Armado:** Se va llenando el cilindro hasta 12 cm a partir del fondo con la arena gruesa previamente saturada en otro recipiente y introduciéndola de a poco dentro del cilindro, cuidando que no queden espacios vacíos. Una vez que se llega cerca de los 12 cm se nivela muy bien y por el orificio realizado en el lateral del recipiente se introduce el sistema de drenaje con la parte no perforada hacia afuera y los orificios hacia abajo. Se puede colocar previamente un anillo de goma “pasacable” dentro del orificio realizado en el lateral del recipiente para favorecer el ajuste de la manguera e impedir que pierda. Una vez que el drenaje está colocado y firme, se completa con la arena gruesa hasta justo debajo de la manguera. Se le agrega agua para que la arena sobrenade y asegurar que no quedan burbujas. Luego se comienza a llenar con la arena de mesh 100 hasta completar 10 cm desde la mitad del orificio de salida. Este paso es muy delicado y se debe colocar la arena ya saturada previamente con mucho cuidado de no formar burbujas. Al completar la altura se nivela muy bien la superficie. Se recomienda los laterales algo translúcidos del material del recipiente para hacer una marca alrededor con marcador indeleble para control de la altura y nivelación de la superficie de la arena. Si hubiera alguna pérdida de agua se rellenan las fisuras con pegamento tipo “parsec” epoxi apto para sumergirlo. Los 10 cm de manguera no perforada quedan hacia afuera, cuidando que la forma del desagote favorezca la caída de las gotas no ejerciendo ninguna resistencia a la salida del líquido. Si se notara presencia de burbujas se puede golpear el cilindro varias veces sobre una superficie firme. Se le hace pasar agua varias veces cuidando de no desnivelar la superficie.

**Puesta a punto para el análisis:** Durante el análisis, cuando se colocan los portamuestras en el baño de saturación ya se va preparando el lecho para recibir los cilindros (o sea 24h antes). Debe asegurarse que no queda ninguna burbuja de aire en el interior de la arena. Se puede dejar la arena sumergida en agua de un día para otro, o ir llenado el lecho desde el drenaje hacia la superficie lentamente (purgado). Si se produjera algún canal de aire se procede llenar el recipiente con agua hasta casi el borde y se remueve la arena con la mano o una espátula de manera que quede en suspensión hasta que desaparezca el vacío, luego se deja drenar libremente hasta que la arena se vuelva a acomodar y se realiza nuevamente el purgado. La superficie debe quedar perfectamente lisa y nivelada. Un momento antes de colocar los cilindros se debe verificar el punto de equilibrio de la arena pulverizando muy suavemente agua sobre la

superficie y verificando que inmediatamente el drenaje gotea. Cuando la arena está en estas condiciones se le coloca sobre la superficie un papel de filtro de filtrado extra rápido circular de diámetro algo mayor a la base del conjunto de los cilindros, mojado y asegurándose que no quede aire atrapado entre la arena y el papel. Debe verificarse que al apoyar el cilindro debe hacer buen contacto entre las interfases sustrato-tela-papel de filtro-arena para facilitar el flujo de agua en todos los puntos. Cada repetición de la muestra se coloca en un lecho diferente y se tapan (no herméticamente) los lechos para evitar evaporación.

Nota: Si se contara con recipientes que tienen alguna inclinación en los laterales (forma troncocónica) se utilizará para el tensionado la superficie de la arena que se corresponde con la base del recipiente dejando el borde sin utilizar, evitando así que la fuerza correspondiente al tensionado tenga una componente horizontal

**Mantenimiento:** Cuando los lechos no están en uso se recomienda mantenerlos saturados y colocarles unas gotas de agua lavandina para evitar la formación de microorganismos. Si la colonia biológica crece de forma importante produce un “biofilm” que modifica la conductividad hidráulica saturada del medio, prolongando el tiempo de equilibrio y con posible efecto en los resultados, (Wohanka 2006).

**Calibración:** Debe hacerse una calibración una vez por año o cada vez que se modifique algo de la construcción de los lechos. La calibración consiste en utilizar una muestra lo más homogénea posible tomada como patrón interno y proceder a una marcha de análisis colocando varios cilindros en cada lecho. De la variabilidad de los datos se calcula el error de trabajo y el coeficiente de variación dentro de los lechos y entre los lechos. Estos valores se toman como referencia del error propio del método, por lo que cualquier otra variabilidad en futuros análisis se pueda adjudicar al sustrato. Se recomienda en cada análisis, registrar la numeración del lecho utilizado para cada repetición para el control de los errores sistemáticos en el funcionamiento de cada lecho.

## **BIBLIOGRAFIA**

-Norma UNE-EN-13040. 2007. Mejoradores de suelo y sustrato de cultivos. Preparación de muestras para análisis químicos y físicos, determinación del contenido de materia seca, contenido de humedad y densidad aparente compactada en laboratorio.

- Norma UNE-EN-13041. 2001. Mejoradores de suelo y sustrato de cultivos. Determinación de las propiedades físicas densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total.
- Norma UNE- EN-13039.2001. Mejoradores de suelo y sustrato de cultivos. Determinación del contenido de materia orgánica y de las cenizas
- De Boodt, M; O Verdonck & J Cappaert. 1974. Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates (parte A) Acta Hort. 37:2054-2062.
- Martinez Farré, FX. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. Actas de Horticultura 11: 55-66, España
- IRTA.Institut de recerca i Tecnologia Agroalimentàries. 2001. Procediments de treball de laboratori. Determinació de la densitat aparent i porositat total. Cabrils, Barcelona
- Guia para validación de métodos de ensayo. 2003. OAA Organismo Argentino de Acreditación, versión 1.
- Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC) USA.[www.compostingcouncil.org/tmecc/](http://www.compostingcouncil.org/tmecc/)
- Wohanka, Walter. 2006. Slow Sand Filtration. Anais do V ENSUB, Encontro Nacional de Substratos para plantas, Ilheus, BA, Brazil. 53-61

## **Protocolo n ° 116 (EMBDBOT)**

### **Determinación del contenidos hídricos volumétricos en el rango 0-100 hPa**

#### **Método basado en De Boodt et al. (1974)**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método para la determinación de los contenidos hídricos volumétricos a distintas tensiones y los parámetros capacidad de retención de agua, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible en materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método está basado en el procedimiento descrito por De Boodt et al. (1974).

Consiste en la medición por gravimetría del agua que retiene una determinada masa de sustrato al ser sometida a tensiones en el rango de 0-100 hPa.

El método es apto para materiales que de acuerdo al tamaño de partículas, constituyan una muestra de ensayo representativa en el volumen ensayado. No es adecuado para materiales muy gruesos que no presenten capilaridad, para materiales pegajosos, ni preformados como planchas de espuma o lana de roca.

#### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario además de:

2.1. Vidrio fritado: vidrio molido que ha sido fundido y enfriado formando un material poroso que se utiliza para la preparación de filtros.

2.2. Agua desaireada: agua con reducido contenido de aire obtenida mediante ebullición durante 15-20 minutos

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

La metodología de laboratorio desarrollada por De Boodt et al. (1974) para el estudio la relación agua-aire incluye: la densidad de sustrato seca, la porosidad total y el contenido hídrico volumétrico a 10, 50 y 100 hPa de tensión. Los 2 primeros parámetros se determinaron en el protocolo n° 115 (DBOT) y por consiguiente el presente protocolo indica utilizar la misma muestra de laboratorio que el anterior.

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

4.1. Equipo de 6 embudos (ver anexo y fig 1)

- 4.2. Balanza con precisión de 1 g (intervalo 0,1 g)
- 4.3. Pie sujetador para pesar los embudos
- 4.4. Estufa ventilada regulada a  $103 \pm 2$  °C

## 5. PROCEDIMIENTO

- 5.1. Determinar la materia seca de la muestra de laboratorio según protocolo 111(*MS%*)
- 5.2. Pesar el embudo completo de agua en su parte inferior y registrar ( $m_A$ )
- 5.3. Colocar 2-3 cm de sustrato húmedo sobre la placa porosa del embudo, pesar y registrar el peso ( $m_B$ )
- 5.4. Saturar durante 24 o 48 h, hasta saturación completa elevando el balón con la salida de drenaje un poco por encima del nivel del sustrato
- 5.5. Luego se someten a la tensión prefijada durante 12-24 o 48 h
- 5.6. Una vez alcanzado el equilibrio (cesa de gotear) se separa el embudo del sistema cerrando la llave de tres vías, pesar y registrar el peso ( $m_i$ ) para la tensión  $i$ .
- 5.7. Colocar nuevamente el embudo en el sistema y aplicar la tensión siguiente
- 5.8. Repetir para las sucesivas tensiones desde el punto 5.5.

Nota: En todos los pasos la manipulación del embudo debe hacerse en forma vertical sin inclinar la muestra.

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

- 6.1. Se calcula la masa de sustrato seco ( $m_{ss}$ ), dentro del embudo con la fórmula:

$$m_{ss} = \frac{m_B - m_A}{100} \times MS\%$$

- 6.2. Se calcula el contenido hídrico volumétrico para la tensión  $i$  ( $\theta_i$ ) con la fórmula:

$$\theta_i = \frac{(m_i - m_A - m_{ss}) \times D_{ss}}{m_{ss} \times \delta_{ag}} \quad \text{donde:}$$

$D_{ss}$ : es la densidad de sustrato seca calculada según método DBOT, protocolo nº 115 expresada en  $\text{g cm}^{-3}$

$\delta_{ag}$  : es la densidad del agua con valor  $1 \text{ g cm}^{-3}$

El contenido hídrico volumétrico  $\theta$  queda expresado en fracción  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

**6.5 Agua fácilmente disponible (AFD), Agua de reserva (AR) y Agua difícilmente disponible (ADD)**, expresados en fracción  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$AFD = \text{Capacidad de retención de agua} - \text{Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa}$

*AR* = Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa – Agua difícilmente disponible

*ADD* = Contenido hídrico volumétrico a 100 hPa

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realizan 3 repeticiones como rutina de laboratorio. Se recomienda un error máximo ( $\epsilon$  max.) del 10%.

## BIBLIOGRAFIA

-De Boodt, M. y Verdonck, O. y Cappaert, J. 1974b. Methods for measuring the waterrelease curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37:2054-2062.

- Felipó Oriol, M., Verdonck, O., Cappaert, J. y De Boodt, M.1977. Estudio de las propiedades físicas de los sustratos hortícolas. *Anales de Edafología y Agrobiología* 38(3-4):604-11. Madrid

-Terés, V. 2002. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 483 p

### **Anexo: Equipo de tensión con embudos con placa porosa de vidrio fritado**

El equipo consta de 6 embudos que encajan en un distribuidor horizontal de vidrio que esta conectado mediante una manguera de 20 mm de diámetro interno a un balón que a su vez tiene una manguera de drenaje (fig. 1). El balón se puede desplazar a lo largo de una varilla milimetrada y su nivel de agua establece la tensión mediante la diferencia de altura con la placa porosa a través de un continuo de agua.

El embudo de vidrio tiene una válvula de tres vías que permite independizar cada embudo del resto del sistema, así como su posterior conexión, permitiendo 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 las dos partes tiene una placa porosa de vidrio fritado unida solidariamente a las paredes del embudo, sobre la que se coloca la muestra de sustrato. La parte inferior del embudo entre la placa porosa y la válvula se mantiene siempre llena de agua que estará a la tensión aplicada.

Antes de comenzar el ensayo la placa porosa se debe purgar y estar completamente saturada y no debe existir ninguna burbuja de aire en el sistema de drenaje. Se recomienda usar agua desaireada para llenar el sistema.

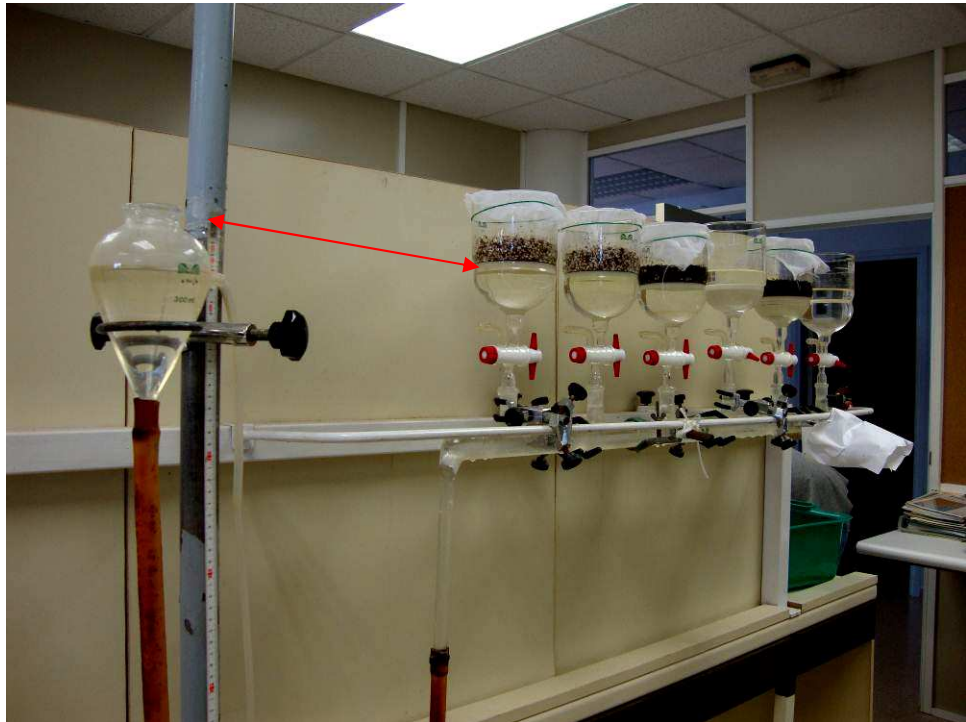


Fig 1: Equipo de 6 embudos. Se distingue el sistema de drenaje que finaliza en el balón con salida cuyo nivel de agua se mide con una cinta graduada y ejerce la tensión deseada. Las flechas rojas indican que el cero de la regla coincide con la altura de la placa porosa.



Fig 2: Segunda batería de 6 embudos usados para realizar las mediciones. Las flechas indican se está tensionando a 5 hPa (5 cm desde la base de la placa hasta el nivel del agua del balón)



Fig 3 : Embudos de tensión con parte superior cilíndrica donde va alojado el sustrato y parte inferior cóncava llena de agua . Se aprecia el detalle de la válvula de 3 vías.

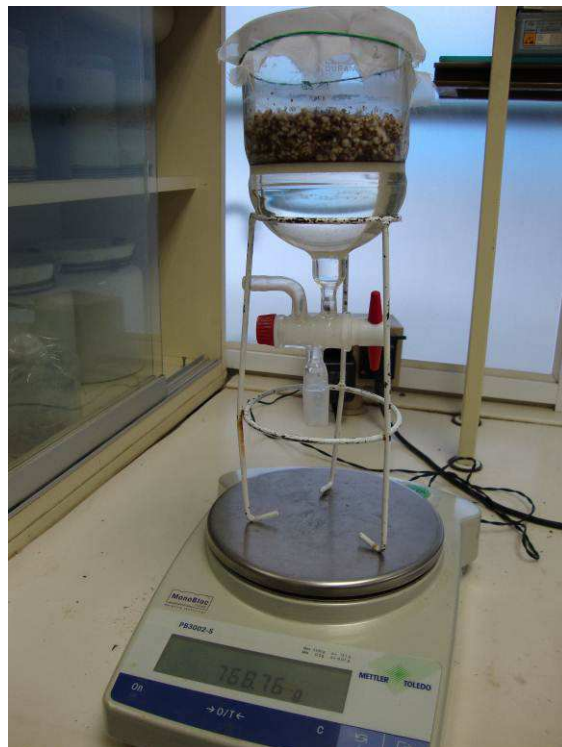


Fig 4: Embudo sobre un soporte para permitir pesarlo sin inclinar la muestra



## **Protocolo n° 117 (EMBYESO)**

### **Determinación de las propiedades físicas: Densidad de sustrato seca, Contenidos hídricos volumétricos y Porosidad total.**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método para la determinación de la densidad de sustrato seca, porosidad total, capacidad de retención de agua, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible en materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método utiliza un equipamiento similar al utilizado por Danielson y Sutherland (1986) para suelos y adaptado por Valenzuela (2009) para sustratos para plantas. .

La muestra se satura de agua y se equilibra a distintas en el rango 0-100 hPa. Una vez alcanzado el equilibrio, se calculan las propiedades físicas a partir de los pesos secos y húmedos de la muestra del cilindro inferior.

Este método no es adecuado para materiales muy gruesos que no dan lugar al fenómeno de capilaridad, ni para los que son preformados como la lana de roca y las planchas de espuma.. Es aplicable a los materiales que tienen partículas < 25mm y/o fibras flexibles < 80mm

#### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

Se solicitarán no menos de 5L de muestra para este análisis. La muestra debe prepararse de acuerdo al punto 5 del protocolo n° 110. Si el volumen retenido en el tamiz es > 10% (v/v) este método no es válido para ese material. Para determinar el contenido de humedad apropiado seguir recomendaciones del item 3 del protocolo 115, método DBOT.

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

4.1. Tamiz de malla cuadrada de 25 mm x 25 mm

4.2. Tijeras

4.3. Balanza con precisión 1 g (intervalo 0,1 g)

4.5. Equipo de doble cilindros, fabricados en material que resista 120 °C sin deformarse:  
(fig 2)

cilindros de diámetro interno 10 cm y 5 cm de altura

tela de voile 100% polyester de diámetro aproximado de 15 cm

suncho plástico (tipo precintos)

faja de goma y bandas elásticas para sujetar los cilindros superpuestos

4.6. Baño de agua: batea con altura mínima aproximada de 15 cm con rejilla en la base

4.7. Equipo de tensionado compuesto por embudos büchner de base plana con placa porosa de yeso, 1 por cada repetición que se requiera. (Ver descripción en el anexo) .

4.8. Papel de filtro liso de filtración extra rápida de diámetro de la placa de yeso

4.9. Estufa ventilada regulada a  $103 \pm 2$  °C

## 5. PROCEDIMIENTO

5.1. Armar el conjunto del cilindro inferior con la tela de voile colocada como base ajustada con el suncho plástico con la bien tirante.

5.2. Pesar el conjunto, registrar el peso ( $m_1$ ) en gramos (fig. 1).

5.3. Colocar el cilindro superior sobrepuesto al conjunto inferior ajustando la unión con una goma y sosteniéndola con bandas elásticas. Este paso se requiere para que en el baño de agua, ésta no penetre por la unión de los 2 cilindros (fig. 1).

5.4. Llenar cada conjunto de cilindros colocando el material entre las palmas y vertiéndolo suave y homogéneamente en todo el volumen tratando de no dejar espacios vacíos. Dar 3 golpecitos al conjunto sobre la mesada como para asentar el material y asegurarse que no quedan espacios sin llenar y completar con más material hasta el borde. Para materiales orgánicos que sufren subsidencia al saturarse, llenar de manera bien colmada. Limpiar todo resto de material que quede adherido en la parte externa del conjunto de cilindros (fig. 2).

5.5. Colocar los cilindros llenos sobre la rejilla de la batea vacía para el baño de agua. Esta superficie debe estar bien nivelada. Se llena el baño con agua hasta 1 cm debajo del borde del cilindro superior permitiendo que agua penetre lentamente de abajo hacia arriba por vasos comunicantes. El tiempo requerido para este llenado es de mínimo 30 min. El último cm de sustrato se saturará por capilaridad. Si el material presentara partículas grandes con escasa capilaridad se puede aumentar el nivel del agua hasta 0,5 cm del borde superior del cilindro. Dejar en el baño por 24 horas reponiendo agua para

mantener el nivel, si fuera necesario. En materiales con dificultad para hidratarse dejar 48 h hasta saturación completa (fig. 2).

5.6. Se retiran los cilindros lentamente en forma vertical sin inclinar, hasta que el fondo sale del nivel del agua, entonces se le coloca rápidamente un platillo debajo para recoger el agua drenada (fig. 3). Así se lo transfiere a los embudos de yeso, previa colocación del papel de filtro humedecido

5.7. Aplicar una tensión de 10 hPa (presión hidrostática de -10 cm) medida a partir de la mitad del anillo inferior. Es importante comprobar regularmente la ausencia de burbujas de aire en los tubos de regulación del nivel de tensión. Aplicar la tensión hasta que se alcance el equilibrio (cuando cesa el goteo). Es necesario un tiempo mínimo de 48 horas pudiendo llegar hasta 72 horas dependiendo del material. (fig. 4).

5.8. Luego se retiran los cilindros uno a uno, se aflojan las bandas elásticas y se retira la goma de unión. Se separa el cilindro superior y con una espátula o cuchillo se nivela la superficie al ras del cilindro inferior cuidando de no alterar la muestra. En el caso de materiales fibrosos se procede a cortar las fibras con tijera si estas sobresalen del cilindro. Mientras se realizan estos pasos no deben girarse ni inclinarse los cilindros, ni realizar cualquier otro movimiento que produzca pérdida de agua (fig. 4).

5.9. Pesa el conjunto del cilindro inferior y el sustrato húmedo. Se registra el peso ( $m_2$ ) en gramos.

5.10. Volver el cilindro al lecho de arena cuidando que se haga nuevamente un buen contacto. Aplicar una nueva tensión bajando la manguera de drenaje a la altura (cm) deseados y esperar que alcance nuevamente el equilibrio (24 o 48 h).

5.11. Retirar el cilindro del lecho de arena, pesar, registrar la masa ( $m_i$ ).

5.12. Repetir los pasos 5.4.3 y 5.4.4. tantas veces como puntos de tensión se deseen medir. Nota: Se aconseja cambiar el papel de filtro a medida que se ensucie o pierda porosidad.

5.13. Una vez que se llegó al último punto de tensión deseado, generalmente (100 hPa) luego de pesar el material húmedo, llevar a estufa y secar a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  hasta masa constante ( $m_s$ ).

5.14. Se llevan a estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , 24 h o hasta peso constante.

5.15. Se retiran de la estufa, se dejan enfriar en un desecador, se pesan y se registra el peso ( $m_3$ ) en gramos.



Fig. 1: Cilindros portamuestras, pesada del cilindro inferior armado y conjunto de los 2 cilindros superpuestos



Fig 2: Llenado de los cilindros con material suelto (foto izquierda) y cilindros durante el llenado del baño de saturación (foto derecha)



Fig 3: Cilindros en el baño de agua a 1 cm del borde superior después de 24-48 h con el material saturado (foto izquierda) y retiro del cilindro para colocarlo en el embudo de yeso

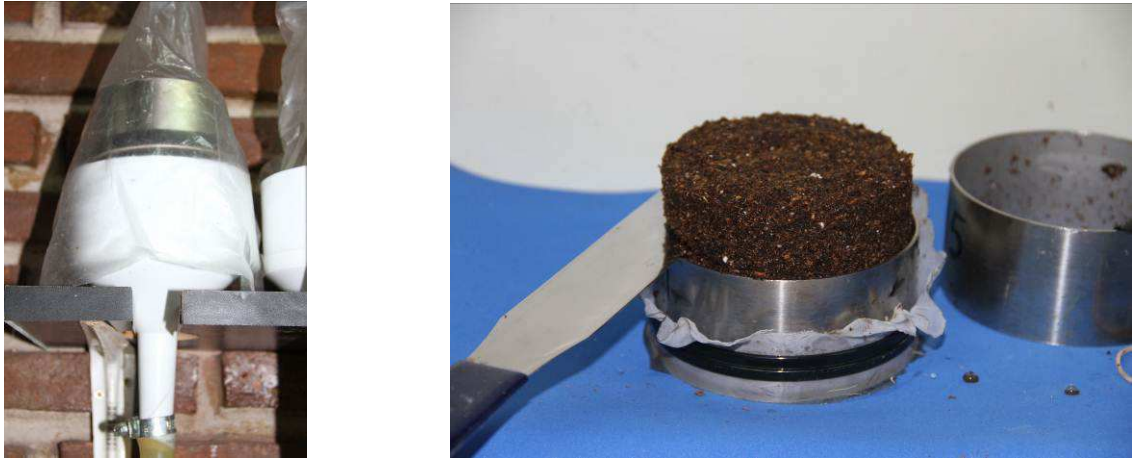


Fig 4: Cilindros colocados en los embudos de yeso durante el tensionado ( foto izquierda) y separación del cilindro superior con el posterior enrasado del material en el cilindro inferior (foto derecha)

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Densidad de sustrato seca (DSs)

Se aplica la fórmula

$$DSs = \frac{mss}{Vt} \times 1000 \quad (1) \text{ donde:}$$

$mss$  : masa de sustrato seca en g

$Vt$  : volumen total del sustrato en  $\text{cm}^3$

La  $mss$  se obtiene mediante el cálculo:

$$mss = m_s - m_0$$

El volumen total del sustrato se toma como el volumen del cilindro inferior ( $V_{cil}$ ) que se calcula mediante la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V_{cil} = \pi \times (d/2)^2 \times h$$

donde  $d$  y  $h$  son el diámetro interno y la altura respectivamente obtenidos como promedio de 4 mediciones.

Reemplazando en (1) se obtiene la  $DSs$  multiplicada x1000 para expresarla en  $\text{kg m}^{-3}$

### 7.3. Capacidad de retención de agua (CRA)

Se obtiene mediante la fórmula:

$$CRA = \frac{Vag}{Vt} \quad (2) \text{ donde:}$$

$Vag$  : es el volumen de agua retenido a 10 hPa de tensión en  $\text{cm}^3$

$Vt$  : es el volumen total del sustrato calculado en 6.1

El volumen de agua se obtiene mediante el cálculo:

$$Vag = (m_i - m_s) \times \delta_{ag} \quad \text{donde :}$$

$m_i$  es la masa del sustrato húmedo a la tensión  $i$  + masa del cilindro inferior en g

$m_3$  es la masa del sustrato seco + masa del cilindro inferior en g

$\delta_{ag}$  es la densidad del agua considerada como  $1 \text{ g cm}^{-3}$

Reemplazando en (2) se obtiene la CRA expresada como fracción en  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

En el caso de tensiones distintas a 10 hPa, se calcula del mismo modo el contenido hídrico volumétrico a esa tensión.

### 6.3. Porosidad total (PT)

Se calcula mediante la siguiente fórmula y se expresa en  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

$$PT = 1 - \frac{DSs}{DP} \quad \text{donde:}$$

$DSs$ : es la densidad de sustrato seca calculada en 6.1

$DP$ : es la densidad de partícula calculada según el método por fórmula de acuerdo al protocolo n° 121

### 6.4 Capacidad de aireación (CA)

Se calcula según la fórmula:

$$CA = PT - CRA \quad \text{donde :}$$

$CA$ : es la capacidad de aireación expresada en fracción en  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

$PT$ : la porosidad total calculada en 6.3

$CRA$ : es la capacidad de retención de agua calculada en 6.2

### 6.5 Agua fácilmente disponible (AFD), Agua de reserva (AR) y Agua difícilmente disponible (ADD) expresadas en $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

$AFD$  = Capacidad de retención de agua – Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa

$AR$  = Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa – Agua difícilmente disponible

$ADD$  = Contenido hídrico volumétrico a 100 hPa

## 8. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realizan 3 repeticiones independientes y se recomienda un error máximo  $< 10\%$

## BIBLIOGRAFIA

- Danielson, R. y Sutherland, R. 1986. Porosidad. Pp 443-461 in Klute, A (ed), Methods of Soil Analysis, series 9, 2nd Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin
- Valenzuela, O.R. 2009. Caracterización y evaluación agronómica de materiales regionales usados en la formulación de sustratos para plantas. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario. 153p.

**Anexo :** Equipo de embudos con placa porosa de yeso, descripción y armado.

El equipo fue construido en forma artesanal y consta de un embudo con una placa porosa de yeso que lo divide en una parte superior donde se coloca el conjunto de cilindros con el material y una parte inferior llena de agua se conecta al sistema de drenaje. Este sistema consta de una manguera transparente flexible de 16 mm de diámetro interno cuyo otro extremo se encaja en una botella con pico de drenaje que marca el nivel del agua. La botella corre a lo largo de una varilla con cinta métrica y se ajusta a distintas distancias de la placa (por ej. 10, 50 y 100 cm) de manera que la diferencia de altura de la columna de agua genera las tensiones sin que se discontinúe la columna de agua. Las tensiones se miden desde la mitad del cilindro inferior.

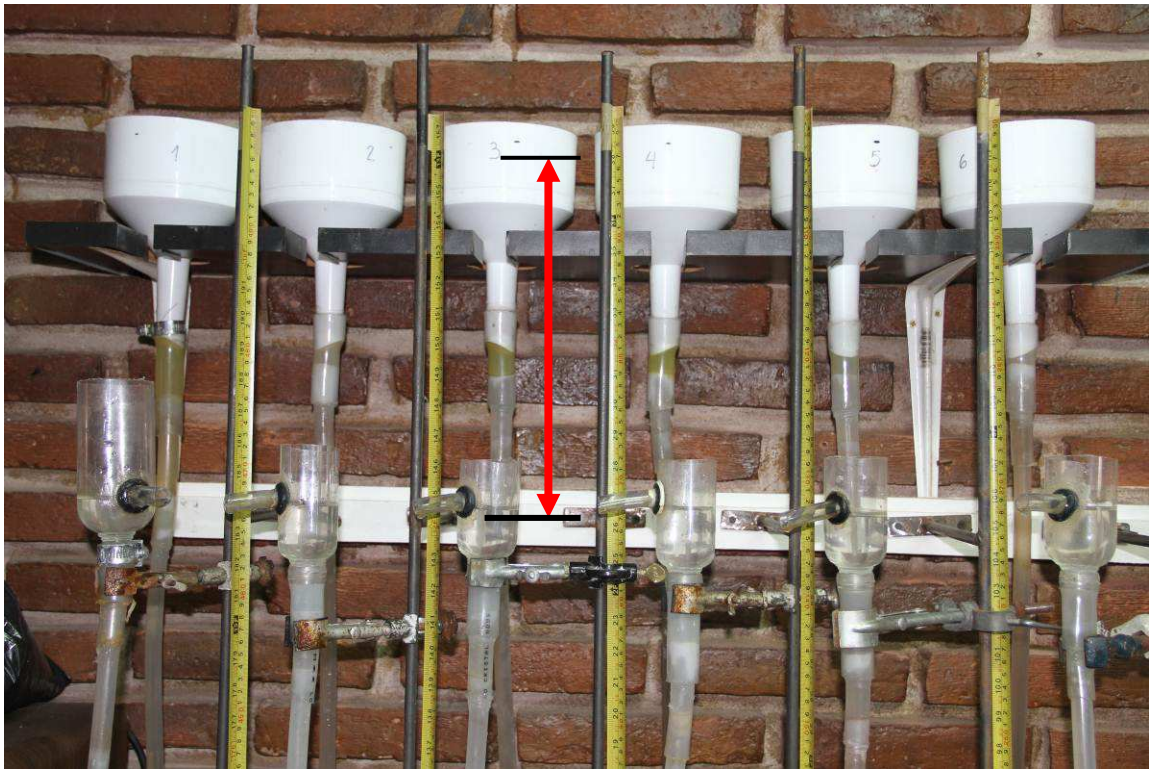


Fig 5: Equipo de embudos de tensión con placa porosa de yeso. Las flechas rojas indican la diferencia de altura en cm entre el nivel de agua en la botella de drenaje y la altura de la mitad del cilindro inferior.

Los embudos se arman artesanalmente. Constan de un embudo büchner de polipropileno de 110 mm de diámetro con base desmontable y una placa porosa de yeso de altura aproximada de 2 cm. La parte superior del embudo se apoya sobre una superficie bien nivelada y rígida. Se coloca en su interior un papel de filtro humedecido que haga buen contacto con la base. Se hace una marca en la pared interior con la altura deseada. Se prepara la mezcla de yeso e inmediatamente se vierte sobre el embudo

cuidando siempre de no producir burbujas. Se golpea la mesa con el puño alrededor del embudo para producir vibraciones que hagan escapar las burbujas (aparecerán sobre la superficie del yeso). Dejar secar alrededor de 5 días o en estufa a no más de 35 °C. Durante el fraguado el material se expande produciendo un buen sello con las paredes del embudo, no obstante se recomienda sellar la unión con algún producto tipo “fastic”.

Nota: El yeso debe ser de buena calidad, fino y puro, generalmente utilizado para artesanías (Ej.: moldes para piezas cerámicas) .No usar yeso para la construcción porque contiene impurezas. De preferencia comprarlo en el momento (no almacenarlo) en bolsas de kilo, bien cerradas, no suelto. El recipiente en que hace la mezcla debe estar bien limpio. Se coloca la cantidad de agua y se va vertiendo el yeso de a poco hasta que se formen “islas” de material. Ahí se mezcla despacio para no formar burbujas, con la mano en forma circular hasta que no queden grumos. No agitar, ni batir.

La duración de las placas de yeso en buen estado es corta, porque se ensucian y pierden porosidad. Generalmente después de 4-5 ensayos, dependiendo del material, se retiran (se desprenden con facilidad), se limpia bien el embudo y se arman nuevas. Este procedimiento tiene la desventaja de que al ser artesanal, la altura de la placa es variable y en cada armado hay que ajustar la altura desde donde se realiza la tensión. ( fig. 6)

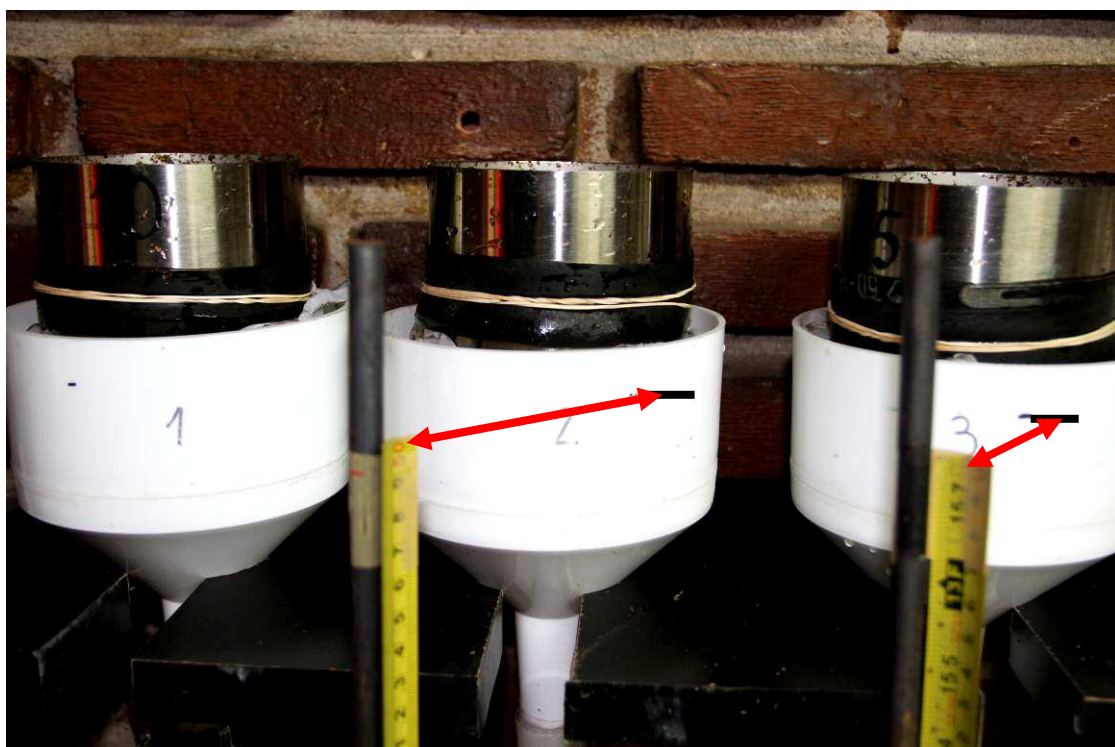


Fig 6: Detalle de la altura a la que se coloca el cero de la cinta métrica. Se miden 2,5 cm (mitad de la altura del cilindro) desde la superficie de la placa porosa hacia arriba, se hace una marca en el embudo y se ajusta la cinta métrica.



## **Protocolo n° 118 ( LEGBRAS)**

### **Determinación de Contenidos hídricos volumétricos, Porosidad total y Capacidad de aireación. Método basado en la metodología de la legislación brasilera (MAPA)**

#### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de rutina para la determinación de la capacidad de retención de agua, contenido hídrico volumétrico, porosidad de aire y porosidad total de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método está basado en el procedimiento de la legislación brasilera del Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento (MAPA), descrito en la Instrucción Normativa 17 del 21/05/2007 y modificada por la Instrucción Normativa 31 del 23/10/2008.

La muestra se coloca en cilindros conforme la densidad húmeda calculada según el protocolo n° 112 (IN 17) del presente trabajo. Luego se satura de agua y se equilibra a una tensión de 10 hPa para el cálculo de la capacidad de retención de agua, en una mesa de tensión con papel de filtro como placa porosa. Otros contenidos hídricos volumétricos se obtienen aplicando otras tensiones (Ej. 50 hPa y 100 hPa). Una vez alcanzado el equilibrio, se calculan las propiedades físicas a partir de los pesos secos y húmedos del cilindro portamuestra.

Este método no es adecuado para materiales muy gruesos que no dan lugar al fenómeno de capilaridad, ni para los que son preformados como la lana de roca y las planchas de espuma.

#### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario

#### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

La muestra se pasa por un tamiz de malla cuadrada de 19 mm x 19 mm (ASTM ¾"). La humedad inicial recomendada es de 50% para materiales orgánicos y de alrededor de 20-30% para inorgánicos, o según recomendaciones del fabricante para la humedad de enmacetado si el sustrato fuera comercial.

#### **4. EQUIPAMIENTOS**

4.1. Mesa de tensión de vidrio (ver anexo)

- 4.2. Papel de filtro cualitativo de  $250 \text{ g m}^{-2}$
- 4.3. Cilindros metálicos de 10 cm de diámetro interno y 5 cm de altura
- 4.4. Tela de voile cortada en círculos de 15 cm de diámetro
- 4.5. Bandas elásticas o sunchos tipo precintos
- 4.6. Cuchara metálica
- 4.7. Batea para baño de agua de aproximadamente 10 cm de altura con tapa con rejilla
- 4.8. Plato o recipiente similar
- 4.9. Balanza con precisión de 1g (intervalo 0,1 g)

## 5. PROCEDIMIENTO

- 5.1. Calcular la densidad de sustrato húmeda de acuerdo al método IN 17 según el protocolo n° 112.
- 5.2. Armar el conjunto del cilindro con la tela de voile y el precinto. Verificar que la tela quede bien tirante. Pesar y registrar ( $m_c$ )
- 5.3. Colocar en conjunto en la balanza, tarar e ir llenando el cilindro con la ayuda de la cuchara hasta que el peso que corresponda al volumen del cilindro considerando la densidad calculada en 5.1. Esta operación es delicada ya que el sustrato debe ser distribuido homogéneamente, de a capas y la superficie debe quedar bien a nivel del borde superior del cilindro. Repetir, si fuese necesario hasta acomodar la muestra en la forma adecuada (fig. 1)
- 5.4. Los cilindros llenos se colocan en la batea con rejilla en la base y se va agregando agua de a poco hasta que llegue a 0,5 cm del borde. Se deja en el baño de agua hasta saturación completa (24 o 48 h).
- 5.5. Se retiran los cilindros del baño, sosteniendo firmemente el voile, y se coloca rápida pero cuidadosamente sobre un plato o similar (previamente pesado  $m_p$ ) intentando no perder agua. Se pesan y se registra la masa ( $m_0$ )
- 5.6. La mesa de tensión se prepara según se explica en el anexo. Luego se colocan los cilindros acomodándolos sobre el papel de filtro de manera de dejar libre un círculo aproximado de 5 cm de diámetro alrededor del orificio.
- 5.7. Se abre de a poco la válvula correspondiente a 10 hPa (primer pico de salida a 10 cm) medidos desde la mitad de la altura del cilindro. Dejar hasta llegar al equilibrio (cuando la manguera de látex deja de drenar) alrededor de 48 h.
- 5.8. Se retiran los cilindros, se pesan y se registra la masa ( $m_i$ )

5.9. Se prepara la mesa nuevamente como figura en el anexo. Se colocan los cilindros y se abre lentamente la válvula correspondiente a la altura de la tensión deseada (Ej.: 50 y 100 hPa).

5.10. Repetir los pasos 5.6, 5.7 y 5.8 para todos los puntos de tensión deseados.

5.11. Por último llevar los cilindros a estufa a 65 °C hasta peso constante. Pesar y registrar la masa ( $m_s$ )



Fig 1: Llenado de los cilindros y distribución homogénea del sustrato por capas con la ayuda de una cuchara



Fig 2: Cilindros en el baño de saturación (foto izquierda) y retiro del baño apoyando el cilindro en un plato (foto derecha)



Fig 3: Pesada del cilindro saturado con el plato que retiene el agua de drenaje rápida



Fig 4: Colocación de los cilindros sobre el papel de filtro (foto izquierda) y aplicación de tensión de 10 hPa mediante la abertura de la primer válvula. La flecha indica los 10 cm desde la mitad del cilindro hasta la salida del drenaje (foto derecha).

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Capacidad de retención de agua (CRA)

Se obtiene mediante la fórmula:

$$CRA = \frac{V_{ag}}{V_t} \quad (2) \text{ donde:}$$

$CRA$  : es la capacidad de retención de agua en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$V_{ag}$  : es el volumen de agua retenido a 10 hPa de tensión en  $\text{cm}^3$

$V_t$  : es el volumen total del sustrato considerado como el volumen del cilindro

El volumen de agua se obtiene mediante el cálculo:

$$V_{ag} = (m_i - m_s) \times \delta_{ag} \quad \text{donde:}$$

$m_i$  es la masa del sustrato húmedo a la tensión  $i$  + masa del cilindro en g

$m_s$  es la masa del sustrato seco + masa del cilindro en g

$\delta_{ag}$  es la densidad del agua considerada como  $1 \text{ g cm}^{-3}$

Reemplazando en (2) se obtiene la CRA expresada como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

En el caso de tensiones distintas a 10 hPa, se calcula del mismo modo el contenido hídrico volumétrico a esa tensión.

### **6.2. Agua fácilmente disponible (AFD), Agua de reserva (AR) y Agua difícilmente disponible (ADD)**

$AFD$  = Capacidad de retención de agua – Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa

$AR$  = Contenido hídrico volumétrico a 50 hPa – Agua difícilmente disponible

$ADD$  = Contenido hídrico volumétrico a 100 hPa

todos expresados como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

### **6.3. Porosidad total (PT)**

Se considera como el total del volumen de agua que contiene el sustrato saturado a tensión 0, relativo al volumen total del sustrato. Se calcula de la siguiente forma:

$$PT = \frac{V_p}{V_t} = \frac{(m_o - m_p - m_s) \times \delta_{ag}}{V_t}$$

donde  $V_p$  es el volumen de poros = volumen de agua a tensión 0

$V_t$  es el volumen de cilindro en  $\text{cm}^3$

$m_o$  : es la masa del cilindro + masa del sustrato a tensión 0+ masa del plato

$m_p$  : es la masa del plato

$m_s$  : es la masa del cilindro + masa del sustrato seco

$\delta_{ag}$  es la densidad del agua considerada como  $1 \text{ g cm}^{-3}$

y se expresa en fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

### **6.4. Capacidad de aireación (CA)**

Se calcula según la fórmula:

$$CA = PT - CRA \quad \text{donde:}$$

$CA$ : es la capacidad de aireación expresada en fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$PT$  : la porosidad total calculada en 6.3

$CRA$ : es la capacidad de retención de agua calculada en 6.1

## **7. REPETICIONES Y PRECISIÓN**

Se realizan 3 repeticiones y se recomienda un error máximo < 10%

## **BIBLIOGRAFIA**

-Instrucción Normativa n° 14 del 15/12/2004: Cap II: das tolerancias. Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento , M APA (Brasil)

-Instrucción Normativa nº 17. 21/05/2007. Anexo: Métodos para análisis de sustratos para plantas e condicionadores de solos. MAPA (Brasil)

-Instrucción Normativa nº 31. 23/10/2008. Modificaciones de la IN 17. MAPA (Brasil)

-Fermino, M.H. 2003. Métodos de Análise para caracterização física de sustratos para plantas. Tesis de doctorado en Fitotenia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

-Fermino, M.H. 2007. Apuntes y protocolos obtenidos en adiestramiento metodológico en Análisis físicos y químicos de sustratos para plantas, realizado en el Laboratorio de Sustratos de Fepagro, Fundação Estadual de Pesquisa Agronomica, Porto Alegre, RG

## ANEXO

### Construcción de la mesa de tensión

La mesa de tensión se construye con una tapa de vidrio cuadrado que posee un orificio de aproximadamente 0,5 cm de diámetro en el centro de la base con un piquito de vidrio de 2-3 cm de largo para insertar la manguera. Posee cuatro bordes de vidrio de aproximadamente 4 cm de altura que son pegados a la base con productos con silicona a prueba de agua. Este “recipiente - mesa” puede estar sostenido sobre una base de 4 patas o con un soporte en la pared a una altura de 1,80 m aproximadamente (fig 5) El agujero central de la base de la mesa esta conectado a una manguera de drenaje transparente y flexible con un diámetro interno de 20 mm cuyo extremo opuesto se conecta en la parte inferior de un distribuidor de vidrio. Este sistema el sistema de drenaje tiene salidas mediante mangueras de látex produciendo así la tensión deseada por un sistema de vasos comunicantes abriendo o cerrando las válvulas correspondientes a las distintas alturas del distribuidor de vidrio (fig 6).

La placa porosa del sistema la constituye un papel de filtro cualitativo de 250 g m<sup>-2</sup> con una medida de 5mm mayor al lado interno del cuadrado de vidrio.

Nota: la medida del cuadrado de vidrio puede estar adaptada a la medida de un papel de filtro estándar para no tener desperdicios de papel. En el equipamiento que se muestra la mesa de vidrio tiene 44 cm x 44 cm.



Fig 5: Mesa de tensión de vidrio con papel de filtro y distribuidor de vidrio, colocados con soporte a 1,80 m de altura



Fig 6: Detalles del sistema de drenaje: Distribuidor de vidrio abierto en 30 hPa de tensión mediante abertura de la válvula correspondiente (foto izquierda) y unión de la manguera con en distribuidor de vidrio ( foto derecha)

### Preparación de la mesa para el tensionado

1. Limpiar la superficie de vidrio y las mangueras pasando agua varias veces con todas las válvulas abiertas
  2. Cerrar todas las válvulas de salida del distribuidor y purgar el sistema de drenaje vertiendo agua por la tolva hasta que salga por el orificio de la mesa. (fig 7 )
  3. Llenar la mesa de vidrio con alrededor de 0,8 a 1 cm de agua.
  4. Colocar el papel de filtro y aplanarlo con rodillo en todas las direcciones para asegurar la evacuación del aire entre el vidrio y el papel
- Nota: Si el papel tiende a flotar, retirar un poco de agua.
5. Verificar que el papel está colocado de manera que no entre aire por los bordes.
  6. Una vez que el papel hizo un muy buen contacto la superficie y se verificó que no haya quedado aire atrapado la mesa está preparada para recibir los cilindros. El nivel del agua en el distribuidor esta a la misma altura del agua de la mesa (tensión 0).



Fig 7: Purgado del sistema de drenaje con agua (foto izquierda) y compresión con rolo para retirar el aire entre el vidrio y el papel de filtro (foto derecha)



**Protocolo n° 119 (NCSU)**  
**Determinación de Densidad de sustrato seca, Capacidad de Contenedor,**  
**Porosidad total y Porosidad de aire. Método basado en Fonteno y Harden (2003)**  
**del Laboratorio de Sustratos Hortícolas de la North Carolina State University**

### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de rutina para la determinación de la densidad de sustrato seca, capacidad de contenedor, porosidad total y porosidad de aire de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. Este método está basado en el procedimiento descrito por Fonteno y Harden (2003) del Laboratorio de sustratos hortícolas de la North Carolina State university (NCSU)

La determinación consiste en la medición de una determinada masa de sustrato seca y del volumen de agua que queda retenido en el material colocado en un cilindro portamuestras llamado “porómetro” cuando es sometido a drenaje libre.

El método es apto para materiales que no modifican su estructura durante el análisis, por ello si el material sufre una expansión o una retracción de más de 3 mm en el porómetro durante el ensayo, los resultados no son válidos. No es adecuado para materiales muy gruesos, para materiales pegajosos, ni preformados como planchas de espuma o lana de roca.

### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario

### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

Para poder aplicar este método la humedad inicial de la muestra debe ser tal que no presente cambios en el volumen durante el análisis. Para ello debe hacerse una prueba previa al análisis definitivo. En el cuadro 1 se muestra las humedades correspondientes a materiales de uso común presentada como guía en el manual de procedimientos del método (Fonteno y Harden 2003).

En el caso de tener que agregar agua para humedecer la muestra, calcular el agua a ser agregada según el protocolo de preparación de la muestra y dejar reposar una noche para equilibrar el contenido de humedad. Para secado, se procede a airear el sustrato al aire extendido en bandejas mezclándolo de vez en cuando. Se calcula contenido de humedad según protocolo n° 111.

#### 4. EQUIPAMIENTO

4.1. Un set de 3 “Porómetros” de aluminio, conteniendo:

1 columna de 15 cm de altura y 7,5 cm de altura (fig1)

1 cilindro de 7,5 cm de diámetro con una tapa pegada en la base ( fig 1)

2 abrazaderas ; 1 espátula

3 embudos tipo büchner, 3 corchos de goma y 3 anillos de goma soportes

3 cilindros cuerpo del porómetros, 3 platos base y 3 tapas

4.2. 3 Pies de hierro

4.3. 3 cajas de petri irrompibles

4.4. 3 probetas u otro recipiente graduado

4.5. Balanza con precisión de 1 g

4.6. Estufa para 105° C u horno microondas



Fig 1: Columna de 15cm de altura y cilindro con tapa pegada en la base (foto izquierda) y cilindros, bases y tapas que forman el porómetro (foto derecha)



Fig 2 : Porómetros ya armados y tapas (foto izquierda) y detalle de los platos base con los 8 orificios en posición abierta o cerrada (foto derecha)

#### 5. PROCEDIMIENTO

5.1. Preparar la muestra con la humedad adecuada para que el volumen del material no varíe  $\pm 3$ mm desde el borde del porómetro durante el análisis.

5.2. Pesar cada cilindro del porómetro y su tapa. Registrar el peso ( $m_1$ ).

- 5.3. Colocar el plato petri y el cilindro del porómetro en la balanza y tarar.
  - 5.4. Formar la columna de compactación de la siguiente manera: En la base colocar el cilindro con la tapa pegada, luego ubicar el cilindro del porómetro correspondiente y luego superponer la columna de 15 cm. Sujetar las uniones con las abrazaderas (fig 3).
  - 5.5. Llenar este conjunto con el material hasta el borde superior y nivelar con la espátula.
  - 5.6. Dejar caer el conjunto desde una altura de 3 a 6 cm por 5 veces sobre una superficie rígida. La uniformidad en la fuerza de caída es más importante que la altura (fig 3).
  - 5.7. Retirar la abrazadera y la columna superior, nivelando el sustrato en el borde del porómetro y colocarle encima el plato petri correspondiente (fig 3).
  - 5.8. Dar vuelta el conjunto sosteniendo el plato petri con firmeza. Retirar el cilindro con tapa y nivelar el material ( fig 4).
  - 5.9. Pesar el porómetro con el plato petri y el material en la balanza tarada y registrar el peso del material húmedo ( $m_2$ ).
  - 5.10. Remover el plato petri y colocar el plato base del porómetro firmemente. Colocar el plato en la posición abierto (fig 4).
- Nota: Repetir todos los pasos anteriores con los otros porómetros. Una variabilidad del peso en 5% es generalmente aceptable en las 3 repeticiones.
- 5.11. Cerrar los embudos con el tapón de goma y colocar los porómetros dentro.
  - 5.12. Llenar lentamente los embudos con agua destilada en 3 etapas para evitar aire entrampado. El agua debe llegar al borde y estar nivelada. Dejar saturando 15 minutos
  - 5.14. Luego colocar el plato base en la posición cerrado cuidadosamente. Retirar los tapones de goma y descartar el agua drenante.
  - 5.15. Colocar las probetas debajo de los embudos y rotar los platos base en posición abierto. Luego de 60 minutos registrar el volumen del líquido drenante ( $V_d$ ) (fig 6).
  - 5.16. Colocar los platos base en posición cerrado. Colocar las tapas. Retirar los porómetros de los embudos, darlos vuelta y retirarles el plato base y pesarlos.
  - 5.17. Llevarlos a estufa a 105° C durante 24 h. Muestras con alta capacidad de retención de agua pueden requerir 48 h para secarse. Pesar y registrar el peso seco ( $m_3$ ).



Fig 3: Llenado del conjunto para compactación (foto izquierda), caída desde 6 cm de altura por 5 veces (foto centro) y retirada de la columna de 15 cm (foto derecha)



Fig 4: Cilindro dado vuelta sobre el petri (foto izquierda), retiro del cilindro con tapa pegada (foto centro) y ajuste del plato base del porómetro (foto derecha)

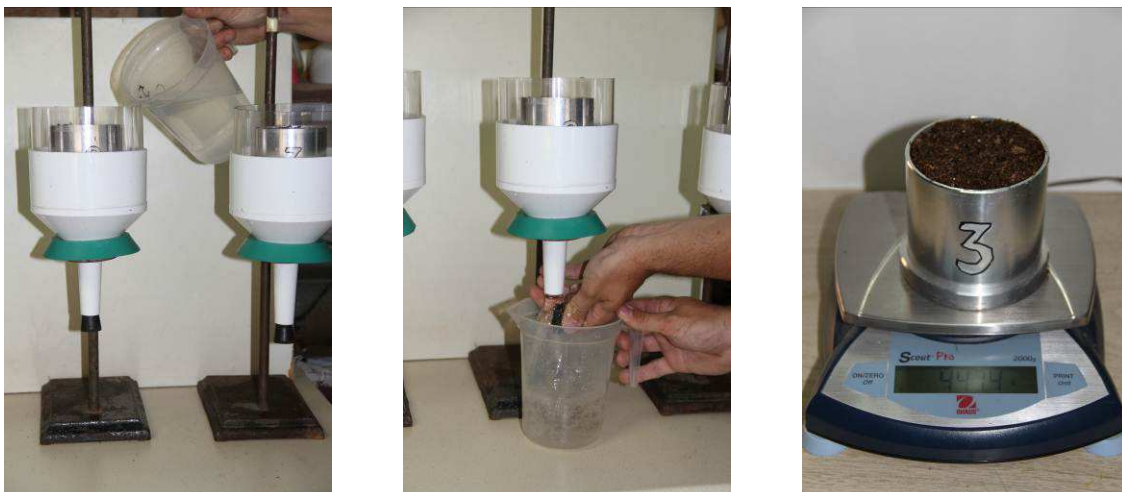


Fig 5: Llenado de los embudos con agua destilada (foto izquierda), luego de 15 min retiro del tapón (foto centro) y pesada del porómetro con la tapa (foto derecha)



Fig 6 : Drenaje libre (1 hora) y colecta del liquido drenado en las 3 repeticiones

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Densidad de sustrato seca (DSs)

Se aplica la fórmula

$$DSs = \frac{mss}{Vt} \times 1000 \quad (1) \text{ donde}$$

$mss$  : masa de sustrato seca en g

$Vt$  : volumen del sustrato en  $\text{cm}^3$

La  $mss$  se obtiene mediante el cálculo:  $mss = m_3 - m_1$

El volumen total del sustrato se toma como el volumen del porómetro:  $347,5 \text{ cm}^3$

Reemplazando en (1) y se obtiene la  $DSs$  y se multiplica  $\times 1000$  para expresarla en  $\text{kg m}^{-3}$

### 6.2. Capacidad de Contenedor (CC)

Se obtiene mediante la fórmula:

$$CC = \frac{Vag}{Vt} \quad (2) \text{ donde:}$$

$Vag$  : es el volumen de agua retenido después de saturar y drenar libremente en  $\text{cm}^3$

$Vt$  : es el volumen del porómetro

El volumen de agua se obtiene mediante el cálculo:

$$Vag = (m_2 - mss) \times \delta_{ag} \quad \text{donde}$$

$\delta_{ag}$  es la densidad del agua considerada como  $1 \text{ g cm}^{-3}$

Reemplazando en (2) se obtiene la CC expresada como fracción en  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

### 6.3. Porosidad total (PT) y Porosidad de aire (PA)

La PT se calcula sumando toda el agua contenida en la muestra saturada y se expresa como fracción en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$$PT = (V_{ag} + V_d)$$

y la PA según  $PA = \frac{V_d}{V_t}$  donde :

$V_{ag}$ : es el voluemn de agua calculado en 6.2

$V_d$ : es el volumen del líquido drenante

$V_t$  : volumen del sustrato en  $\text{cm}^3 =$  volumen del porómetro:  $347,5 \text{ cm}^{-3}$

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realizan 3 repeticiones y un error máximo  $< 10\%$ .

## BIBLIOGRAFIA

- Fonteno, W.C. y Bilderback T E . 1993. Impact of hydrogel on physical propierties of coarse-structured horticultural substrates. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 118(2): 217-222
- Fonteno, W.C. y Harden C T . 2003. Procedures for determining physical properties of horticultural substrates using the NCSU porometer. NCSU Porometer manual. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. 28 pp

**Protocolo n° 120**  
**Determinación de Densidad de partícula por picnometría**  
**Método del matraz aforado basado en ROWELL (1994)**

### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método picnométrico para la determinación de la densidad de partícula (DP) de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelos. La determinación puede realizarse con muestra entera y húmeda, entera y seca o seca y molida. Consiste en la medición del volumen de una masa conocida de partículas, para luego realizar el cálculo de la densidad de partícula.

Para determinaciones con muestra inicial partícula entera, el alcance es para materiales cuyo tamaño de partícula puede ser manipulado con el equipamiento utilizado. No es adecuado a materiales como planchas de espuma o lana de roca.

### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicados en el glosario. además de:

2.1. Agua deionizada o desmineralizada: agua sin contenido de iones pero puede contener algunas impurezas orgánicas. A los efectos de este protocolo puede ser reemplazada por agua destilada

### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

La determinación se puede realizar con las partículas intactas (húmedas o secas) o aplicando un tratamiento de trituración. La muestra se prepara de acuerdo al protocolo n° 110 realizando los pasos de acuerdo al tratamiento que se le da a la muestra inicial.

### **4. EQUIPAMIENTO**

4.1. Balanza con precisión de 1 g (intervalo de 0,1 g)

4.2. Mechero o calentador

4.3. Vaso de precipitado de 250 ml

4.4. Matraz aforado de 250 ml

4.5. Varillas de vidrio

4.6. Pizeta

4.7. Embudo

4.8. Cuchara pequeña

4.9. Estufa con ventilación para 105 °C

## 5. PROCEDIMIENTO

### 5.1. Muestra húmeda

5.1.1. Calcular la DSh según protocolo nº 112, método IN17

5.1.2. Calcular la materia seca (MS), según protocolo nº 111

5.1.3. Pesar la masa que corresponde a 50 cm<sup>3</sup> según la DSh y registrar ( $m_1$ )

5.1.4. A partir de este paso seguir el procedimiento a partir de 5.3

### 5.2. Muestra seca

5.2.1. Calcular la DSs según protocolo nº 112, método IN17

5.2.1. Pesar la masa que corresponde a 50 cm<sup>3</sup> según la DSs y registrar ( $m_1$ )

5.3. Colocar la muestra en un vaso de precipitado de 250 ml y agregarle 100 cm<sup>3</sup> de agua deionizada.

5.4. Llevar a ebullición por 30 min. El material no debe quedar adherido a las paredes del vaso, para removerlo se utilizan varillas de vidrio cuando sea necesario. Tomar especial cuidado de no modificar el contenido de material de cada vaso para lo cual se usará una varilla diferente para cada vaso

5.5. Enfriar la mezcla, puede ser al aire o bajando la temperatura con ayuda de agua corriente.

5.6. Pesar un matraz aforado de 250 ml ( $m_2$ ) bien seco.

5.7. Verter todo el contenido del vaso dentro del matraz cuidando de no perder muestra, usando el embudo, la cuchara y una pizeta para arrastrar todo el material. Completar con agua hasta el aforo del matraz. Usar agua deionizada. Pesar el conjunto del matraz, el sustrato y el agua ( $m_3$ ).

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Densidad de Partícula (DP)

Se calcula mediante la siguiente fórmula:  $DP = \frac{m_{SS}}{V_s} \times 1000$  (1) donde:

$m_{SS}$  : es la masa del sólido seco

$V_s$  : es el volumen de las partículas sólidas sin tener en cuenta los poros

#### 6.1.1. Cálculo de $m_{SS}$

6.1.1.1 En el caso de usar sustrato seco:  $m_{SS} = m_1$



6.1.1.2 En el caso de usar sustrato húmedo:  $m_{ss} = m_1 \times MS$

6.1.2. Cálculo de  $V_s$

$V_s = \text{Vol. del matraz hasta el aforo} - \text{Vol. de agua dentro del matraz}$

$$V_s = 250 - [(m_3 - m_2 - m_{ss}) / \delta_{ag}]$$

donde  $\delta_{ag}$  es la densidad del agua que se considera  $1 \text{ g.cm}^{-3}$

Reemplazando en la ecuación (1) se obtiene la densidad de partícula en  $\text{kg m}^{-3}$

## 7. REPETICIONES Y PRECISIÓN.

Repetir 3 veces y en caso de materiales que dificulten la lectura del aforo por su flotabilidad es conveniente hacer más repeticiones. Se recomienda un error máximo < al 10%.

## BIBLIOGRAFIA

- Rowell, D.L. 1994. Soil Science: Methods and Applications. New York, Longman, 350p
- Fermino, M.H. 2003 . Métodos de Análise para caracterização física de substratos para plantas. Tesis de doutorado en Fitotenia. UFRGS Porto Alegre
- Valenzuela, O.R. 2009. Caracterización y evaluación agronómica de materiales regionales usados en la formulación de sustratos para plantas. Tesis doctoral en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario. 153p.

## Protocolo N° 121

### Determinación de contenido de Materia orgánica y cenizas y de la Densidad de partícula por fórmula. Método basado en la norma CEN EN-13039:1999

#### 1. OBJETO Y ALCANCE

Método de rutina para la determinación del contenido de cenizas y materia orgánica de materiales usados como sustratos para plantas y mejoradores de suelo. La determinación consiste en la medición de una determinada masa de cenizas resultantes de la incineración de la submuestra. No es adecuado para materiales preformados como planchas de espuma o lana de roca.

#### 2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Se aplican los términos y definiciones indicadas en el glosario, además de:

**2.1. Materia orgánica:** a los efectos de este protocolo se considera que la materia orgánica es la masa que se pierde en el proceso de combustión por incineración.

**2.2. Cenizas:** materia mineral residual que permanece luego de someter la muestra al proceso de incineración.

#### 3. PREPARACION DE LA MUESTRA

La muestra de ensayo se debe preparar siguiendo el protocolo n° 110, para muestra molida y seca.

#### 4. EQUIPAMIENTOS

- 4.1. Estufa con capacidad para mantener una temperatura de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- 4.2. Balanza analítica con precisión de 0,01 g (intervalo 0,001 g)
- 4.3. Horno de mufla con capacidad para mantener una temperatura de hasta  $500^{\circ}\text{C}$ .
- 4.4. Crisoles de porcelana preferentemente de forma plana para muestras de hasta 5g.
- 4.5. Desecador.

#### 5. PROCEDIMIENTO

- 5.1. Se pesan los crisoles bien secos y se registra el peso ( $m_1$ )
- 5.2. Se colocan aproximadamente 5 g de muestra en el crisol y se llevan a estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  durante 24 h.

5.3. Luego se enfrían a temperatura ambiente en el desecador, se pesan y se registra el peso ( $m_2$ ).

5.4. Se llevan los crisoles al horno de mufla frío y se lo programa para que alcance una temperatura de  $450 \pm 10$  °C en una hora. Se mantiene esta temperatura durante 6 h.

5.5. Se apaga el horno de mufla y se lo deja enfriar completamente a temperatura ambiente antes de abrirlo.

5.6. Se retiran los crisoles, se pesan y se registra el peso ( $m_3$ ).

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

**6.1. Materia orgánica (MO) :** Se expresa como porcentaje y se calcula aplicando la

fórmula:

$$MO(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$$

**6.2. Cenizas (CZ):** Se calcula aplicando la fórmula :

$$CZ\% = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{donde:}$$

$MO(\%)$  : contenido de materia orgánica expresado en porcentaje m/m

$CZ(\%)$  : contenido de cenizas expresado en porcentaje m/m

### 6.3. Densidad de partícula (DP)

Se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$DP = \frac{1}{\frac{MO}{100 \times 1550 \text{ kg m}^{-3}} + \frac{CZ}{100 \times 2650 \text{ kg m}^{-3}}}$$

donde  $1550 \text{ kg m}^{-3}$  se considera como un promedio la DP de los materiales orgánicos y  $2650 \text{ kg m}^{-3}$  la DP para los materiales inorgánicos

## 8. REPETICIONES Y PRECISIÓN

Se realiza el análisis con 3 repeticiones y un error máximo  $< 10 \%$ .

## BIBLIOGRAFIA

- Martínez Farré, FX. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. Actas de las I Jornadas de Sustratos, SECH: 55-66--
- Norma europea CEN EN-13039:1999. Mejoradores de suelo y sustrato de cultivos. Determinación del contenido de materia orgánica y de las cenizas.

**Protocolo n° 122**  
**Determinación de Granulometría de las partículas**  
**Método basado en la norma europea CEN -EN-15428:2007**

### **1. OBJETO Y ALCANCE**

Método de determinación de distribución de tamaño de partícula en mejoradores de suelo y sustratos de cultivo basado en la norma europea CEN -EN-15428:2007. Aplicable a muestras suministradas en la forma en que se utilizan y no es adecuada a materiales que no fluyen cuando es usado o que es pegajoso.

### **2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Se aplican los términos y definiciones indicadas en el glosario

### **3. PREPARACION DE LA MUESTRA**

La muestra se prepara según el protocolo n° 110, preparación de la muestra

### **4. EQUIPAMIENTOS**

4.1. Tamiz mecánico vibrante, con ajuste de amplitud y temporizador de intervalos. Tiempo: 7 minutos en períodos de 30 s de agitado y 1 s de reposo.

4.2. Tamices de ensayo de 200 mm o 300 mm de diámetro, altura del borde 55 mm, tamaño de las aperturas como se incluye en la norma ISO 565, de cable tejido de acero inoxidable con aberturas cuadradas de 16,0 mm, 8,0 mm, 4,0 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,50 mm, 0,250 mm, 0,125 mm y con bandeja de recepción y tapa del tamiz.

4.3. Estufa a  $40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ .

4.4. Bandejas de secado: altura del borde de  $50\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$ , superficie mínima de la base  $400\text{ cm}^2$ , material apto para calentamiento hasta  $50\text{ °C}$ .

4.5. Balanza de 4 kg con precisión de 1 g (intervalo 0,1 g).

4.6. Aparato para la división de muestras: compuesto por cualquier equipo adecuado para combinar y reducir las muestras que preserve las características del producto. Dependiendo del tamaño de partícula, el material y la distribución del tamaño de partícula, la anchura de la apertura del paso debería ser de 2,5 veces a 3 veces mayor que el diámetro de la partícula mayor.

### **5. PROCEDIMIENTO**

### 5.1. Determinación del volumen de la submuestra

En primer lugar se determina el tamaño de la muestra a analizar. Para materiales finos se utiliza menor volumen que para materiales más gruesos, para reducir el riesgo de obstruir los tamices, según cuadro 1:

Diámetro del tamiz	Porción de submuestra	Porción de la submuestra
	Si la fracción de 0-8 mm $\leq$ 50 % m/m	Si la fracción de 0-8 mm $>$ 50 % m/m
200 mm	375 ml	125 ml
300 mm	750 ml	250 ml

Se coloca el tamiz de malla 8,0 mm sobre el tamiz mecánico con la bandeja de recepción bajo este. Se reduce la muestra al tamaño de la submuestra utilizando un aparato para la división de muestras. Se transfiere la submuestra adecuada (cuadro 1) al tamiz y se coloca la tapa. Se asegura la torre de tamizado y se pone en marcha durante 1 minuto el tamiz mecánico en el ajuste estándar. Para muestras en las que el grado de humedad es demasiado elevado, primero se seca con aire la muestra en estufa durante 16 h. Después del tamizado, se pesa el tamiz (c), la bandeja de recepción con la muestra (a) a continuación se limpia en seco el tamiz y la bandeja de recepción y se pesan vacíos (d y b respectivamente). Se calcula la fracción según 6.1.

### 5.2. Secado con Aire

Se toman 3 volúmenes aproximados representativos de la muestra tal como se recibe utilizando un aparato para la división de muestra y se colocan en 3 bandejas de secado separadas. Se extiende la muestra pareja sobre la superficie de la bandeja y se pesa. Se colocan las bandejas en la estufa a 40 °C durante al menos 16 h y se vuelve a pesar. Se calcula la pérdida de humedad. Después del secado, el contenido de humedad restante en las submuestras no deben exceder del 15 % del peso total.

### 5.3. Tamizado

Se determina la distribución de tamaño de partícula dentro de las 24 h posteriores del secado. Se almacenan las muestras en un ambiente seco hasta que pueda realizarse el tamizado. Nota: dado que las muestras absorben humedad, pueden producirse cambios de volumen

Se montan los tamices ordenadamente por tamaño de apertura, con la abertura mayor en la parte superior, en la bandeja de recepción sobre el tamiz mecánico. Se distribuye todas las submuestras secas uniformemente en el tamiz superior. Se coloca la tapa en el tamiz superior y se fijan los tamices. Se enciende el tamiz mecánico 7 minutos en períodos de 30 s de agitado y 1 s de reposo. Se determinan las fracciones de peso de cada tamiz y la bandeja de recepción. Se limpian en seco los tamices y la bandeja de recepción. Cuando las 3 submuestras han sido tamizadas y pesadas, se determinan los pesos en vacío de los tamices y la bandeja de recepción. Se calcula la distribución de la fracción según 6.2.

## 6. CALCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de la distribución de la fracción durante el pretratamiento de la muestra.

Cálculo de la distribución de la fracción durante el pretratamiento de la muestra.

$$\text{fracción de tamiz } > 8 \text{ mm ( \% en masa)} = \frac{c - d}{(c - d) + (a - b)} \cdot 100 \%$$

$$\text{fracción de tamiz } < 8 \text{ mm ( \% en masa)} = \frac{a - b}{(c - d) + (a - b)} \cdot 100 \%$$

a: peso de la bandeja de recepción + masa expresada en g

b: peso de la bandeja de recepción vacía

c. peso del tamiz de 8 mm + masa expresada en g

d: peso del tamiz de 8 mm vacío expresada en g

### 6.2. Cálculo de la distribución de la fracción de una muestra.

Las masas de las porciones se expresan sobre la masa total de la muestra.

$$\text{Masa de la fracción } Z_x = \left( \frac{A_x}{\sum A_x} \right) \cdot 100 \quad \% \text{ m/m}$$

$A_x$  = peso del tamiz con material – el peso del tamiz vacío

Donde  $x = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

1- Tamiz 16 mm

- 2- “ 8 mm
- 3- “ 4 mm
- 4- “ 2 mm
- 5- “ 1 mm
- 6- bandeja de recepción

Para cada fracción se determina la media y se redondea al % entero más cercano. A continuación se determina el coeficiente de variación de las 3 submuestras según el siguiente cálculo. Se hace para las porciones de  $x=2$  a  $x=6$  y sólo para las 3 fracciones mayores. Se descarta la porción de 16 mm.

## **7. REPETICIONES Y PRECISIÓN**

Se realizan 3 repeticiones. Si el coeficiente de variación de una porción es  $> 20\%$  la muestra debería considerarse como insuficientemente homogénea. El análisis debería repetirse en su totalidad.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Norma europea CEN-EN 15428: 2007. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de la granulometría de las partículas
- Norma europea CEN-EN 13040: 1999. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Preparación de muestras para análisis químicos y físicos, determinación de materia seca, contenido de humedad y densidad aparente compactada en laboratorio.
- Norma ISO 565 – Tamaño nominales de abertura