

E.S.A.B.

INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA

HORTOFRUTICULTURA Y JARDINERÍA



“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, FÍSICO-
QUÍMICAS Y DE LA FITOTOXICIDAD DE COMPOSTS
COMERCIALES PARA SU USO EN LA FORMULACIÓN DE
SISTRATOS DE CULTIVO”

AUTOR:

Andrés Sebastián Domínguez

TUTOR:

F. Xavier Martínez i Farré

- JULIO DE 2010 -

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS Y DE LA FITOTOXICIDAD DE COMPOSTS COMERCIALES PARA SU USO EN LA FORMULACIÓN DE SUSTRATOS DE CULTIVO”

AUTOR: Andrés Sebastián Domínguez

TUTOR: F. Xavier Martínez i Farré

RESÚMEN:

El objetivo general de este Trabajo de Final de Carrera es determinar la viabilidad para el uso como sustrato ó componentes de sustrato de 12 composts comerciales procedentes de diferentes materias primas: 3 de restos vegetales procedentes de poda urbana (CVEG), 2 de cortezas de árboles (CCORT), 2 de fracción orgánica de residuos municipales procedentes de recogida selectiva en origen (CFORM), 2 de fangos de estación depuradora de aguas residuales (CEDAR), 2 de estiércol (CESTIER) y 1 vermicompost de estiércol (CVER). Para ello se evalúan las siguientes propiedades: densidad real (DR), densidad aparente seca (DAS), densidad aparente húmeda (DAH), volumen de contracción (VC), porosidad, capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua disponible (AD), agua difícilmente disponible (ADD), distribución del tamaño de partículas, porcentaje de materia orgánica (MO), porcentaje de humedad, pH, conductividad eléctrica (CE) y la fitotoxicidad.

Los resultados obtenidos indican que la mayoría de los composts analizados presentan densidades bajas ó medias, CA elevadas, AFD y AD bajas, CE altas ó muy altas y pH superior a 8. El contenido en MO es variable, aunque cumplen los requisitos legales según tipo, y la humedad, en muchos casos está fuera del campo legal establecido, sea por defecto ó por exceso. En general los compost presentan un contenido elevado en fracción gruesa (>1mm) que condicionan su elevada CA y su baja retención de AD.

Los compost de corteza, el CVEG3 y el CVER presentan propiedades estimuladoras a la germinación de lechuga, mientras que los composts de FORM, CEDAR2 y CESTIER2 son altamente fitotóxicos con índices de germinación igual a “0”. También se observa severa fitotoxicidad en los composts CESTIER1 y en los de restos vegetales CVEG1 y CVEG2, con índices de germinación cercanos al 20%.

Salvo el compost CCORT1, los demás composts analizados no pueden ser utilizados como componente único de sustrato de cultivo. No obstante mezclados con materiales de baja CE, bajo pH y alta AD permiten su uso como componente de sustrato mezcla.

Existen correlaciones lineales positivas excelentes entre los parámetros: DAH y agua a 1 kPa de tensión, MO y porosidad. También excelentes correlaciones lineales negativas entre: DR y MO, DAH y MO, porosidad y DAS, porosidad y DAH, MO y DAS, CA y agua a 1 kPa de tensión.

Palabras claves: evaluación, compost, propiedades físicas y físico-químicas, fitotoxicidad, sustrato de cultivo, viabilidad.

“AVALUACIÓ DE LES PROPIETATS FÍSQUES, FÍSICO-QUÍMIQUES I DE LA FITOTOXICITAT DE COMPOSTS COMERCIALS PER EL SEU ÚS EN LA FORMULACIÓ DE SUBSTRAT DE CULTIU”

AUTOR: Andrés Sebastián Domínguez

TUTOR: F. Xavier Martínez i Farré

RESUM:

L'objectiu general d'aquest Treball de Final de Carrera és determinar la viabilitat per a l'ús com a substrat o components de substrat de 12 composts comercials procedents de diferents matèries primeres: 3 de restes vegetals procedents de poda urbana (CVEG), 2 d'escorces d'arbres (CCORT), 2 de fracció orgànica de residus municipals procedents de recollida selectiva en origen (CFORM), 2 de fangs d'estació depuradora d'aigües residuals (CEDAR), 2 de fems (CESTIER) i 1 vermicompost de fems (CVER). Per a això s'avaluen les següents propietats: densitat real (DR), densitat aparent seca (DAS), densitat aparent humida (DAH), volum de contracció (VC), porositat, capacitat d'aireig (CA), aigua fàcilment disponible (AFD), aigua de reserva (AR), aigua disponible (AD), aigua difícilment disponible (ADD), distribució de la mida de partícules, percentatge de matèria orgànica (MO), percentatge d'humitat, pH, conductivitat elèctrica (CE) i la fitotoxicitat.

Els resultats obtinguts indiquen que la majoria dels composts analitzats presenten densitats baixes o mitjanes, CA elevades, AFD i AD baixes, CE altes o molt altes i pH superior a 8. El contingut en MO és variable, encara que compleixen els requisits legals segons tipus, i la humitat, en molts casos està fora del camp legal establert, sigui per defecte o per excés. En general els composts presenten un contingut elevat en fracció gruixuda (> 1mm) que condicionen la seva elevada CA i la seva baixa retenció d'AD.

Els composts d'escorça, el CVEG3 i el CVER presenten propietats estimuladores a la germinació d'enciam, mentre que els composts de FORM, CEDAR2 i CESTIER2 són altament fitotòxics amb índexs de germinació igual a "0". També s'observa severa fitotoxicitat en els composts CESTIER1 i en els de restes vegetals CVEG1 i CVEG2, amb índexs de germinació propers al 20%.

Excepte el compost CCORT1, els altres composts analitzats no poden ser utilitzats com a component únic de substrat de cultiu. No obstant això barrejat amb materials de baixa CE, sota pH i alta AD permeten el seu ús com a component de substrat barreja.

Hi ha correlacions lineals positives excel·lents entre els paràmetres: DAH i aigua a 1 kPa de tensió, MO i porositat. També excel·lents correlacions lineals negatives entre: DR i MO, DAH i MO, porositat i DAS, porositat i DAH, MO i DAS, CA i aigua a 1 kPa de tensió.

Paraules clau: avaluació, compost, propietats físiques i fisicoquímiques, fitotoxicitat, substrat de cultiu, viabilitat.

**“EVALUATION OF THE PHYSICAL, PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES AND TRADE
COMPOSTS PHYTOTOXICITY FOR USE IN THE FORMULATION OF GROWING
SUBSTRATES”**

AUTHOR: Andrés Sebastián Domínguez

TUTOR: F. Xavier Martínez i Farré

ABSTRACT:

The overall objective of this Final Thesis Work is to determine the feasibility for use as a substrate or substrate components of commercial compost from 12 different raw materials: 3 of plant remains from urban pruning (CVEG), 2 bark (CCORT), 2 organic fraction from municipal waste collection at source (CFORM), 2 sludge wastewater treatment plant (CEDAR), two of manure (CESTIER) and a manure vermicompost (CVER). We evaluated the following properties: particle density (DR), dry bulk density (DAS), wet bulk density (DHA), volume contraction (VC), porosity, aeration capacity (AC), available water (AFD), available water (AD), easily available water (ADD), particle size distribution, percentage of organic matter (OM), moisture, pH, electrical conductivity (EC) and phytotoxicity.

The results indicate that most of the composts analyzed included low or medium density, high CA, AFD and AD low, CE high or very high and above pH 8. The OM content varies, but meeting the legal requirements according to type, and moisture, in many cases is outside the established legal field, whether by default or by excess. In general, the compost contains a high level in coarse fraction (> 1 mm) on which their high CA and low retention of AD.

The bark compost, CVER and CVEG3 have stimulating properties for the germination of lettuce, while composts FORM, CEDAR2 and CESTIER2 are highly phytotoxic with germination rates equal to "0." It is also noted severe phytotoxicity in composts CESTIER1, CVEG2 and CVEG1 with germination rates close to 20%.

Except CCORT1 compost, the other composts tested can not be used as a unique component of growing media. But mixed with materials of low EC, low pH and high AD permit its use as a component of substrate mix.

Excellent positive linear correlations between the parameters: DHA and water to 1 kPa of tension, MO and porosity. Also excellent negative linear correlations between: DR and OM, DHA and OM, DAS and porosity, porosity and DHA, DAS and OM, CA and water to 1 kPa of tension.

Keywords: evaluation, compost, physical properties and physical-chemical, toxicity, growing medium, viability.

AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar, en primer lugar, mi más profundo agradecimiento al Dr. Xavier Martínez i Farré, por haberme dedicado tanto de su valioso tiempo en la formación y en la posterior realización de este trabajo.

Al dr. Jordi Valero y a la dra. Montserrat Gallart por el interés manifestado y por la ayuda en los tratamientos estadísticos.

A Olga Gener por su colaboración en las tareas de laboratorio.

A mi compañera de vida, Mirna, por apoyarme en todo mis proyectos y estar a mi lado siempre.

A mi hijo Elián, que se ha gestado paralelamente a este trabajo y que me ha dado las fuerzas para terminar con esta etapa de mi vida.

A mi mamá y mi tía, por todas las buenas energías que dejaron cuando estuvieron de visita y a mi familia en general que desde la distancia envían su apoyo.

A mis amigos, Caro, Pipo, familia Borrelli, por estar y hacer fuerza para que este trabajo de final de carrera se pueda lograr.



ÍNDICE

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCION | 8 |
| 1.1. COMPOSTAJE Y COMPOST..... | 8 |
| 1.1.1. GENERALIDADES..... | 8 |
| 1.1.2. PROCESO DE COMPOSTAJE..... | 10 |
| 1.1.2.1. Tamaño y forma de la pila..... | 10 |
| 1.1.2.2. Homogeneidad de la mezcla..... | 11 |
| 1.1.2.3. Tamaño de partículas..... | 11 |
| 1.1.2.4. Aireación..... | 11 |
| 1.1.2.5. Humedad..... | 12 |
| 1.1.2.6. Temperatura..... | 13 |
| 1.1.2.7. Contenido de nutrientes..... | 13 |
| 1.1.2.8. Relación C/N..... | 13 |
| 1.1.2.9. Ph..... | 15 |
| 1.1.2.10. Adición de microorganismos..... | 15 |
| 1.1.3. FASES DEL COMPOSTAJE..... | 16 |
| 1.1.4. MADUREZ DEL COMPOST..... | 17 |
| 1.1.5. LEGISLACIÓN..... | 19 |
| 1.2. SUSTRATOS..... | 19 |
| 1.2.1. GENERALIDADES..... | 19 |
| 1.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUSTRATOS..... | 21 |
| 1.2.2.1. Generalidades..... | 21 |
| 1.2.2.2. Densidad real..... | 22 |
| 1.2.2.3. Densidad aparente seca..... | 23 |
| 1.2.2.4. Densidad aparente húmeda..... | 23 |
| 1.2.2.5. Espacio poroso total..... | 23 |
| 1.2.2.6. Volúmen de contracción..... | 24 |
| 1.2.2.7. Tamaño de partículas..... | 24 |
| 1.2.2.8. Relaciones aire –agua..... | 25 |
| 1.2.3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SUSTRATOS..... | 27 |

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.3.1. Humedad..... | 28 |
| 1.2.3.2. Materia orgánica..... | 28 |
| 1.2.3.3. pH..... | 28 |
| 1.2.3.4. Conductividad eléctrica..... | 30 |
| 1.2.4. FITOTOXICIDAD..... | 30 |
| 1.2.4.1. Bioensayo de germinación..... | 31 |
| 2. OBJETIVOS..... | 35 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 37 |
| 3.1. MATERIALES..... | 37 |
| 3.1.1. CCORT1..... | 38 |
| 3.1.2. CCORT2..... | 39 |
| 3.1.3. CEDAR1..... | 40 |
| 3.1.4. CEDAR2..... | 41 |
| 3.1.5. CESTIER1..... | 42 |
| 3.1.6. CESTIER2..... | 43 |
| 3.1.7. CFORM1..... | 44 |
| 3.1.8. CFORM2..... | 45 |
| 3.1.9. CVEG1..... | 46 |
| 3.1.10. CVEG2..... | 47 |
| 3.1.11. CVEG3..... | 48 |
| 3.1.12. CVER..... | 49 |
| 3.1.13. REC..... | 50 |
| 3.1.14. SUST..... | 51 |
| 3.2. MÉTODOS..... | 52 |
| 3.2.1. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS..... | 52 |
| 3.2.1.1. Toma de muestras..... | 52 |
| 3.2.1.1.1. <i>Toma de muestras a campo</i> | 52 |
| 3.2.1.1.2. <i>Toma de muestras en el laboratorio</i> | 53 |

| | |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1.2. Determinación de la Humedad y Materia seca..... | 53 |
| 3.2.1.3. Determinación de la Densidad real..... | 54 |
| 3.2.1.4. Determinación de la Densidad Aparente..... | 55 |
| 3.2.1.4.a. Densidad Aparente seca..... | 55 |
| 3.2.1.4.b. Densidad Aparente Húmeda..... | 57 |
| 3.2.1.5. Determinación del Volúmen de Contracción..... | 58 |
| 3.2.1.6. Determinación del Espacio Poroso Total..... | 58 |
| 3.2.1.7. Determinación del material sólido..... | 59 |
| 3.2.1.8. Análisis Granulométrico..... | 59 |
| 3.2.1.9. Determinación de las relaciones Aire-Agua..... | 61 |
| 3.2.1.9.a. Capacidad de Aire..... | 64 |
| 3.2.1.9.b. Agua Fácilmente Disponible..... | 64 |
| 3.2.1.9.c. Agua de Reserva..... | 65 |
| 3.2.1.9.d. Agua Disponible..... | 65 |
| 3.2.1.9.e. Agua Difícilmente Disponible..... | 65 |
| 3.2.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS..... | 66 |
| 3.2.2.1. Determinación de cenizas y materia orgánica..... | 66 |
| 3.2.2.2. Determinación del pH..... | 67 |
| 3.2.2.3. Determinación de la conductividad eléctrica..... | 68 |
| 3.2.3. BIOENSAYO DE GERMINACIÓN..... | 69 |
| 3.2.4. TRATAMIENTO DE DATOS Y GRAFIZACIÓN..... | 70 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 72 |
| 4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO..... | 72 |
| 4.1.1. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES..... | 72 |
| 4.1.2. D_{50} , D_{90}/D_{10} y D_{80}/D_{20} | 76 |
| 4.1.3. CURVAS ACUMULADAS..... | 78 |
| 4.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS..... | 84 |
| 4.2.1. Densidad Real..... | 84 |
| 4.2.2. Densidad Aparente..... | 85 |

| | |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.3. Densidad Aparente Húmeda..... | 87 |
| 4.2.4. Volúmen de Contracción..... | 89 |
| 4.2.5. Porosidad..... | 90 |
| 4.2.6. Relaciones Aire-Agua..... | 92 |
| 4.2.6.1. Capacidad de aire..... | 92 |
| 4.2.6.2. Agua a 1 kPa de tensión..... | 94 |
| 4.2.6.3. Agua a 5 kPa de tensión..... | 96 |
| 4.2.6.4. Agua Fácilmente Disponible..... | 97 |
| 4.2.6.5. Agua de reserva..... | 99 |
| 4.2.6.6. Agua disponible..... | 100 |
| 4.2.6.7. Agua difícilmente disponible..... | 101 |
| 4.2.6.8. Curvas de liberación de agua..... | 102 |
| 4.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS..... | 109 |
| 4.3.1. HUMEDAD..... | 109 |
| 4.3.2. MATERIA ORGÁNICA..... | 110 |
| 4.3.3. pH..... | 112 |
| 4.3.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA..... | 114 |
| 4.4. BIOENSAYO DE GERMINACIÓN..... | 117 |
| 4.4.1. % DE GERMINACIÓN..... | 117 |
| 4.4.2. LONGITUD RADICULAR..... | 118 |
| 4.4.3. ÍNDICE DE GERMINACIÓN..... | 120 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 122 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 125 |
| 7. ANEJOS..... | 127 |

ANEJO Nº 1: Determinación de la humedad y de la materia seca

ANEJO Nº 2: Determinación del volúmen de retención de agua a diferentes tensiones

ANEJO Nº 3: Determinación de materia mineral, materia orgánica y densidad real.

ANEJO Nº 4: Determinación de pH y CE

ANEJO Nº 5: Determinación del % germinación, long. rad.(%) e I. germinación

ANEJO Nº 6: Determinación de la masa de material en las diferentes cribas

ANEJO Nº 7: Determinación de la masa acumulada de las diferentes fracciones granulométricas

ANEJO Nº 8: Determinación de valores D_x e índices de gradación D_{90}/D_{10} y D_{80}/D_{20}



INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de compostaje es conocido y usado por el hombre desde que cambió de ser cazador a recolector. Cuando nuestros ancestros empezaron a cultivar, observaron que el cultivo crecía mejor cerca de pilas de vegetación y estiércol en descomposición. De hecho, el compostaje es una técnica antigua, presente en la agricultura tradicional.

Durante las últimas décadas, se ha dado cada vez más importancia a los diferentes materiales provenientes de residuos orgánicos, tales como corteza de árboles, residuos sólidos urbanos, fangos de depuradoras, residuos de cosecha, etc., porque se están convirtiendo en uno de los recursos más importantes, para reemplazar a la turba en la formulación de sustratos para los cultivos en contenedor.

Dado que frecuentemente provocan efectos negativos, en muchos casos los residuos orgánicos no puede aplicarse en el suelo como tales. El concepto de residuo se aplica a todo material que se genera como consecuencia no deseada de cualquier actividad humana, teniendo el generador ó poseedor del mismo la intención u obligación de desprenderse de él (Soliva, 2010). Estos residuos cuando se aplican directamente al suelo presentan algunos efectos indeseables, tales como fitotoxicidad, inmovilización de nitrógeno, salinidad, estructura, etc. Por todo eso, el compostaje es una solución para solventar esas desventajas y formulado con una buena mezcla de los mismos con otros materiales se pueden obtener excelentes sustratos para cultivos (Verdonck, 1984).

Se han obtenido buenos resultados con el compost de corteza, de residuos orgánicos municipales estabilizados, lodos procedentes de depuradoras mezclados con corteza, restos de soja mezclados con corteza, residuos de lúpulo mezclados con diferente corteza, etc., como medios de cultivo (Verdonck, 1984).

Existen ventajas y desventajas para estos nuevos sustratos, ventajas como la capacidad de supresión biológica de patógenos y desventajas como el hecho que se siguen descomponiendo despues de colocarlos en contenedores de cultivo (Hoitink y Kuter, 1986).

1.1. COMPOSTAJE Y COMPOST

1.1.1. GENERALIDADES

En la bibliografía se pueden encontrar muchas definiciones de compostaje, desde las más simples a las más complicadas. Una de las definiciones más completas es la de Haug (1993), quién define al compostaje como un proceso de descomposición biológica y estabilización de materiales orgánicos en condiciones controladas y aeróbicas, que permiten el desarrollo de temperaturas termofílicas como resultado del calor producido biológicamente, para producir un producto final que es estable, libre de patógenos y semillas, que puede ser aplicado al suelo de forma beneficiosa. Complementariamente Golueke y Tchobanoglous, definen al compostaje como un proceso aeróbico y termófilo de descomposición biológica de la fracción orgánica de un residuo sólido orgánico bajo condiciones controladas, hasta un

estado suficientemente estable, que permite una manipulación y almacenamiento sin problemas y un uso seguro en las aplicaciones al suelo.

En definitiva, el compostaje es una técnica de tratamiento de materiales orgánicos, un proceso de fabricación de los productos útiles al suelo y un método de reciclaje de materia orgánica y de nutrientes. Complementariamente es un método para pasteurizar medios infectados de patógenos y una estrategia de eliminación de materiales problemáticos. El compostaje sirve a todos estos fines, y muchos más, porque es simple, flexible y aplicable a una amplia gama de escalas. En resumen, hay muchas razones para producir compost y muchas maneras de lograrlo.

El compost según Haug (1993), se define como la materia orgánica que se ha estabilizado hasta transformarse en un producto parecido a las sustancias húmicas del suelo, que está libre de patógenos y de semillas de malas hierbas, que no atrae insectos ó vectores, que puede ser manejada y almacenada sin ocasionar molestias y que es beneficioso para el suelo y el crecimiento de las plantas.

La utilidad de compostaje se debe a dos funciones básicas: (1) cambia con frecuencia las características no deseadas de los materiales difíciles, produciendo un producto que es, como mínimo, más fácilmente manipulable y utilizable, y (2) crea el compost, un producto que tiene mejores usos y más valor que la materia prima de la que se hace.

Las finalidades del compostaje son:

- Evitar la deficiencia de nitrógeno. Los microorganismos que descomponen la materia orgánica consumen nitrógeno en su metabolismo, por lo que compiten por este elemento con las plantas.
- Evitar la falta de oxígeno. Un compost inmaduro da lugar a una elevada actividad microbiana pudiendo causar deficiencias de oxígeno en el cultivo.
- Eliminar malos olores.
- Estabilizar la materia orgánica y reducir la relación C/N.
- Humificar parcialmente el residuo orgánico.
- Eliminar agentes patógenos, tanto vegetales (semillas y propágulos de malas hierbas) como animales. Las temperaturas que se alcanzan durante el compostaje suelen ser suficientes para eliminar la mayoría de los patógenos y propágulos.
- Favorecer la supresividad. Algunos materiales como la corteza una vez compostados presentan características supresoras de algunos hongos y nemátodos fitopatógenos.
- Degradar las sustancias fitotóxicas, como ácidos grasos, orgánicos y compuestos fenólicos presentes en los materiales orgánicos frescos.
- Mejorar de las propiedades físicas, químicas y biológicas de las materias primas.

1.1.2. PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es un conjunto de procesos biológicos interdependientes llevada a cabo por una miríada de microorganismos esenciales para la descomposición de la materia orgánica. Es un proceso aeróbico (requiere Oxígeno) (Stoffella, 2001).

La ecuación bioquímica resumen del compostaje es la siguiente:

Materia Orgánica + O₂ + Bacteria aeróbica => CO₂ + NH₃ + Productos + Energía

Para conseguir que la transformación sea biológica y en condiciones controladas (aeróbicas y termófilas) se necesita mantener unas condiciones favorables para el desarrollo de los actores principales, es decir microorganismos que en su gran mayoría son bacterias, hongos y actinomicetes (Soliva, 2001).

Cuando los materiales orgánicos se acumulan en pilas, comienza inmediatamente un proceso de descomposición a una velocidad que dependerá del tipo de material. La descomposición empieza con la autólisis de los tejidos vivos, a continuación se desarrollará una población microbiana, siendo los hongos la población dominante.

Las bacterias (*Thiobacillus*, *Myxococcus*, etc), hongos filamentosos (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *trchoderma*, *Mucor*, etc.), levaduras (*Sacchhromyces*, etc.) y actinimicetes (*Micromonospora*, *Nocardia*, *Streptomyces*, etc) actúan transformando los residuos orgánicos en formas más estables. Este proceso puede tener lugar de dos maneras diferentes según la presencia de Oxígeno: aeróbica (compostaje) ó anaeróticamente (digestión anaeróbica) (Burés. 1997).

Los microorganismos utilizan primero los compuestos simples, como los azúcares solubles y proteínas, como fuente de energía y de carbono. Muchos de ellos son capaces de descomponer los polímeros de celulosa. La descomposición de la lignina es lenta, formando esta, conjuntamente con las sustancias sintetizadas por los microorganismos, la mayor parte del compost final. De este proceso resultan, además del compost, agua, dióxido de carbono y materia mineral, liberando energía en forma de calor (Burés, 1997).

El compostaje es un proceso controlado, en el que la descomposición depende y está regulada por una serie de parámetros, el control de los cuáles permite efectuar el compostaje de una manera eficaz (Burés, 1997).

1.1.2.1. Tamaño y forma de la pila.

La pérdida de calor en las pilas de compostaje es proporcional a su superficie, mientras que la generación de calor es proporcional a su volumen. Así, las pilas grandes, con relación superficie/volumen más baja, pierden menos cantidad de calor. El tamaño y la forma de la pila dependen del material considerado. Algunos investigadores aconsejan unos 2 metros de ancho y 1.5 de altura, mientras que otros aconsejan hasta 6 metros de ancho y 3 de altura, con la longitud que se desee. Las pilas más largas facilitan el proceso de mecanización. Cuando la pila está al aire libre la forma de la pila será plana si se desea aprovechar el agua de lluvia ó bien redondeada si no se desea aprovechar.

Durante la descomposición las pilas disminuyen de tamaño, lo que provoca un aumento de la densidad aparente del material.

1.1.2.2. Homogeneidad de la mezcla

Si el material a compostar consiste en una mezcla de diferentes materiales, esta debe ser homogénea, para que el proceso se realice por igual en todo el material y pueda ser controlado. Este aspecto es especialmente importante cuando se utilizan pilas estáticas, ya que en las pilas móviles el material es mezclado durante el volteo.

1.1.2.3. Tamaño de partículas

Los materiales triturados pueden reducir la difusión de oxígeno, aunque la descomposición acostumbra a ser más rápida en ellos, ya que aumenta el área superficial de las partículas y facilitando la invasión microbiana.

1.1.2.4. Aireación

El compostaje es un proceso aeróbico, por tanto la difusión de oxígeno debe ser elevada. Para que la degradación sea máxima es conveniente mantener concentraciones de oxígeno superiores al 10 %. Una concentración inferior al 5 % puede ser limitante y provocar la indeseable descomposición anaerobia, por lo que la aireación es crucial en el proceso de compostaje (Kuter, 1995).

Existen diversos métodos de compostaje en función del sistema de aireación. El más frecuente en sustratos basados en materiales de origen vegetal es el volteo con pilas móviles, que se puede efectuar girando las pilas mediante palas cargadoras ó mediante una máquina volteadora que va depositando el material en una pila paralela a medida que avanza. Otros métodos de compostaje aeróbico se basan en aplicar ventilación forzada bajo las pilas durante la primera fase del compostaje (descomposición), que se utiliza principalmente para fangos de depuradora y otros materiales que producen malos olores; en este caso el material puede estar en pilas ó en contenedores cerrados que son desodorizados, generalmente filtrando el aire que sale del contenedor ó recinto a través de un biofiltro de descomposición.

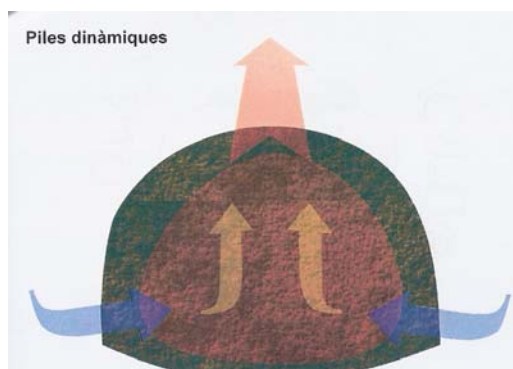


Figura Nº 1. Pilas dinámicas

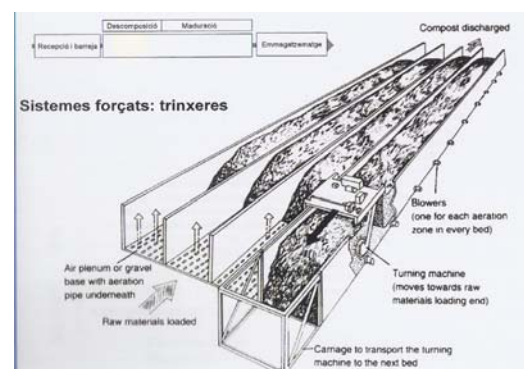


Figura Nº 2. Sistemas de ventilación forzada

La periodicidad de los volteos ó de la ventilación se debe realizar en función de la concentración de oxígeno y de la temperatura, aunque en la práctica generalmente se hace en función de la temperatura.

Aunque el compostaje exige condiciones aeróbicas en toda la matriz compostable hasta en los sistemas mejor aireados se produce metabolismo anaeróbico en microhábitats, durante el proceso. Los productos finales del metabolismo anaeróbico son metano, dióxido de carbono y otros, como ácidos orgánicos de bajo peso molecular y distintos alcoholes. Este proceso libera mucha menos energía por unidad de materia orgánica descompuesta que el proceso aeróbico. Los compuestos producidos anaeróbicamente pueden desprender un fuerte olor y su toxicidad puede mantenerse durante meses ó años. Por lo tanto, en la producción de compost destinados a utilizarse como medio de cultivo se debe vigilar especialmente el mantenimiento de condiciones aeróbicas en toda la matriz compostable durante todo el proceso (Hoitink y Kuter, 1986).

El ritmo de aireación requerido para evitar el metabolismo anaeróbico varía según el producto a compostar. Por ejemplo, muchas cortezas de pino son altamente resistentes a la descomposición y, generalmente, no son sometidas a ventilaciones forzadas durante el proceso de compostaje. Por otro lado, otras cortezas, como la de picea, con altos contenidos de celulosa, han de ser aireadas con frecuencia durante el compostaje (Hoitink y Kuter, 1986).

Para que no se produzca metabolismo anaeróbico se puede poner el compost en pilas grandes durante la fase de maduración (6 metros de alto), aunque una desventaja de hacer pilas grandes es la excesiva temperatura que se acumula (>80°C), que puede matar a los microorganismos beneficiosos.

1.1.2.5. Humedad

El contenido óptimo de humedad para el compostaje varía según el producto a ser compostado y la humedad inicial puede variar entre el 60-70%. El mínimo contenido de humedad para la actividad de los microorganismos es del 15% (Miller, 1989), aunque cuando es menor al 20% ya decae la actividad.

Los microorganismos requieren la presencia de agua para llevar a cabo su actividad metabólica. La actividad biológica se reduce considerablemente cuando la humedad baja del 30 % en peso. Una humedad por encima del 60% puede provocar falta de aireación y dar lugar a fermentaciones anaeróbicas. Humedades inferiores al 50% reducen la tasa de descomposición. En general, se consideran óptimos valores de humedad entre el 50 y el 60%.

Los residuos de madera muy porosos, que presentan dificultad para humedecerlos, pueden secarse frecuentemente durante el compostaje y necesitan ser rehumedecidos. Toda la rehumectación es necesaria a lo largo del proceso de compostaje, especialmente en la fase de descomposición, dado que al aumentar la temperatura se produce evaporación de agua de la matriz compostable.

1.1.2.6. Temperatura

En la bibliografía se citan diversas temperaturas óptimas para la fase de descomposición, en general situadas alrededor de 60-70°C, y se aconseja que no sobrepasen los 70°C para evitar la muerte térmica de los microorganismos. La temperatura depende del material, existiendo materiales que tienen temperaturas óptimas más bajas. Durante la aireación la temperatura suele bajar, a veces, hasta la temperatura ambiente. El tiempo que tarda en recalentarse el material depende de las condiciones del mismo y de la temperatura inicial, alcanzándose hasta temperaturas más altas después de la aireación.

Aunque la temperatura ha sido tradicionalmente el factor para controlar el compostaje, el proceso es más fácilmente controlado por la regulación del calor perdido a través del flujo de aire (Hoitink y Kuter, 1986).

1.1.2.7. Contenido de nutrientes

El nitrógeno es el elemento más determinante de la tasa de descomposición. El contenido de nitrógeno orgánico de distintos residuos es variable, siendo entre 0.2 y 0.7% sobre el peso seco en cortezas y maderas, y entre 0.5 y 1.5% en pajas y plantas herbáceas.

Los microorganismos metabolizan el nitrógeno inorgánico disponible, preferentemente en forma de amonio. El nitrógeno orgánico soluble ha de desaparecer prácticamente a lo largo del compostaje, formándose nitratos a partir de éste; el nitrógeno amoniacal soluble disminuye a lo largo del compostaje y el nitrógeno nítrico soluble aumenta. El nitrógeno no hidrolizable, o sea difícilmente mineralizable, ha de aumentar durante el compostaje.

La aportación de nitrógeno inorgánico en cantidades adecuadas acelera la descomposición del material, al dar a los microorganismos el nitrógeno necesario para aumentar la actividad. Se han realizado diversos estudios sobre las dosis óptimas de nitrógeno y la forma de aplicación. Parece ser que es preferible aplicar hidróxido amónico ó úrea en lugar de otras formas de nitrógeno, como los nitratos. La úrea pasa a amonio por acción de la enzima ureasa. Se aconseja aplicar entre 1 y 3 Kg/m³ de úrea para materiales como la corteza de pino. Es preferible repartir esta dosis a lo largo del compostaje.

El fósforo es también un elemento importante en la descomposición y algunos investigadores recomiendan añadir fósforo, por ejemplo, en forma de superfosfato durante el compostaje. En otros casos se recomienda la adición de calcio, magnesio, azufre ó potasio, aunque la aplicación de estos elementos resulta controvertida.

1.1.2.8. Relación C/N

La relación C/N ha servido tradicionalmente como un indicador de madurez y estabilidad, así como de la evolución del proceso de compostaje. Las principales causas de las lesiones y disminuciones de producción observadas en cultivos desarrollados sobre sustratos orgánicos inmaduros son la deficiencia de nitrógeno derivada de la inmovilización del nitrógeno excedente en el sustrato por los microorganismos y la baja disponibilidad de oxígeno para las raíces derivada del consumo de este por los microorganismos. Éstos requieren

carbono para su crecimiento y nitrógeno para la síntesis de proteínas. El oxígeno y el nitrógeno disponibles son consumidos por la actividad microbiana. La relación C/N de los composts varía, generalmente de 5 a 30, según las materias primas que se compostan.

Cuando se inicia el compostaje es conveniente que la relación C/N de la matriz a compostar (material único ó mezcla de materiales) sea próxima a 30. Relaciones iniciales más bajas (menor de 20) conducen a una pérdida de Nitrógeno en forma de amoníaco, y valores más altos alargan el tiempo de compostaje. Para preparar sustratos de materiales orgánicos como cortezas, serrines ó paja, con una C/N inicial alta (>100), el Nitrógeno puede ser suministrado en forma de úrea (Raviv et al, 1986).

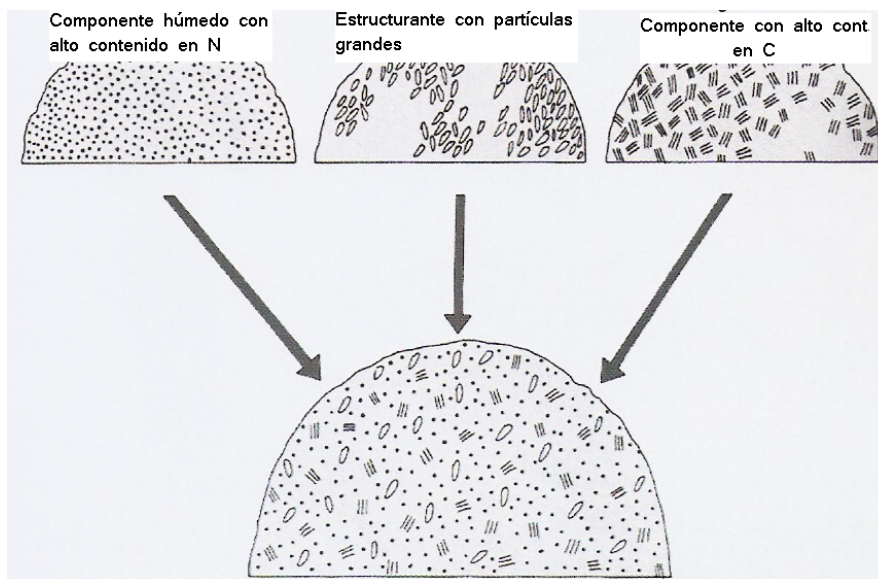


Figura N° 3. Mezcla de materiales para obtener una relación C/N óptima

En general se considera válidas relaciones iniciales entre 15 y 50, aunque la relación óptima es en función de la disponibilidad de carbono por los microorganismos y depende del tipo de material. Materiales que tienen Carbono formando parte de compuestos resistentes como las ligninas, permiten relaciones C/N más elevadas.

Un cálculo adecuado de requerimiento óptimo de nitrógeno y relación C/N durante el compostaje de la materia orgánica es difícil de establecer a causa de:

- Parte de la matriz compostable está en forma de lignina y otros compuestos resistentes a la descomposición microbiana. Este tipo de componentes se descompone ligeramente después de largos períodos.
- Parte del nitrógeno está en forma no disponible durante la mayor parte del proceso de compostaje en forma de proteínas fibrosas insolubles tipo querina.
- La cantidad de nitrógeno en el medio puede modificarse por procesos de fijación de N_2 , realizados por la bacteria *Azotobacter*, especialmente en medios ricos en fosfatos.

Cuando se mezclan materiales diferentes en el compostaje (co-compostaje) se debe controlar el equilibrio entre el Carbono y el Nitrógeno, de manera que, a un material rico en Carbono como la corteza de pino, se le puede añadir un material rico en Nitrógeno, como son los fangos de depuradora para poder obtener una adecuada relación C/N.

El proceso de compostaje conlleva una disminución en la relación C/N desde el principio y final del proceso según la naturaleza del material a compostar. Las cortezas tiene inicialmente una relación C/N superior a 100 y al final es de 30-40, mientras en el fango de depuradoras la tasa inicial es de 8.7 y al final se llega a un 11.2.

1.1.2.9. pH

Los materiales orgánicos frescos suelen tener un pH ligeramente ácido, el cual se acidificará más durante las primeras fases del compostaje por la formación de ácidos orgánicos. A lo largo del proceso de compostaje el pH acostumbra a aumentar.

Valores de pH muy bajos pueden indicar la presencia de procesos anaerobios, mientras que valores muy elevados pueden ser debidos a la formación de Nitrógeno amoniacal y a pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco (gas).

El pH de la corteza (4.5-5.2) es inferior al intervalo óptimo (6.5-8.5) para el proceso de compostaje. La adición de nitrógeno amoniacal y/o estiércol de aves eleva el pH y, generalmente, se obtienen tasas de descomposición más altas que las obtenidas cuando se utiliza el nitrato amónico como única fuente de nitrógeno. La úrea, el estiércol y otros residuos con elevado contenido de nitrógeno (como fangos de depuradora) son la fuente de nitrógeno preferible. De todas formas el pH del compost ha de permanecer por debajo de 7.4 en sistemas de compostaje de aireación forzada para que no se produzcan pérdidas excesivas de amoníaco. Para evitar este problema se han de utilizar mezclas de úrea y nitrato amónico ó úrea y otras fuentes de nitrógeno orgánico. La respuesta de las plantas en composts producidos con estiércol de aves, frecuentemente, es mejor que en composts producidos con fuentes de nitrógeno sintético. También se ha utilizado con éxito estiércol de cerdo (Hoitink y Kuter, 1986).

1.1.2.10. Adición de microorganismos

Diversos autores recomiendan la adición de microorganismos para favorecer la descomposición. Estos microorganismos acostumbran a incorporarse en las primeras fases del compostaje y se denominan generalmente starters (iniciadores) por su capacidad de iniciar el proceso de compostaje. Aunque se han realizado numerosos ensayos, los resultados no han sido siempre concluyentes. La principal dificultad es que se deberían incorporar microorganismos específicos para cada material y no preparados genéricos que no pueden adaptarse a las condiciones concretas del material a compostar. Por esta razón muchas veces resulta más efectivo incorporar cantidades bajas del material a compostar en estado semicompostado, dado que posee los microorganismos adecuados para el material en cuestión.

Algunos materiales frescos tienen sólo unas pocas sustancias que son las causantes de la fitotoxicidad. El compostaje en algunos casos se muestra poco eficiente para la eliminación

de la fitotoxicidad, dado que estas sustancias pueden degradarse por la acción de unos escasos microorganismos concretos que se encuentran de forma minoritaria ó bien que actúan muy lentamente. Si se es capaz de identificar las sustancias orgánicas que producen la fitotoxicidad es posible desarrollar cepas específicas de microorganismos, a veces mediante ingeniería genética, que degraden estas sustancias y puedan ser aplicadas en el compostaje.

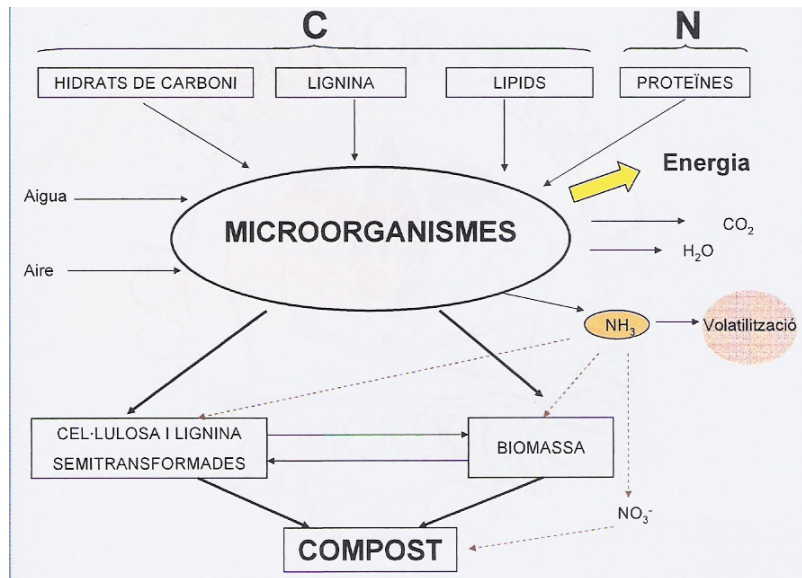


Figura Nº 4. Proceso biológico de microorganismos

1.1.3. FASES DE COMPOSTAJE

El proceso de compostaje se puede dividir en cuatro fases (Burés, 1997):

- **FASE INICIAL Ó MESOFÍLICA:** tiene una duración de 1-3 días. En esta fase la temperatura aumenta rápidamente a medida que los microorganismos se multiplican, alcanzando los 40º C. Una parte del calor procede de la actividad respiratoria de los tejidos frescos. En este período se descomponen las sustancias fácilmente degradables y la descomposición se efectúa principalmente por levaduras.
- **FASE TERMOFÍLICA:** puede tener una duración de semanas a varios meses. Se alcanzan temperaturas entre 40 y 80º C y se degrada básicamente la celulosa. Actúan los actinomicetes y hongos termófilos. Algunos patógenos mueren por efecto de las altas temperaturas. Cuando la temperatura se estabiliza se considera finalizada esta fase.
- **FASE DE ESTABILIZACIÓN:** en este período disminuye la velocidad de descomposición y descienden gradualmente la temperatura hasta la ambiente. Los microorganismos mesofílicos recolonizan el compost.
- **FASE DE MADURACIÓN:** tiene una duración de 2 a 7 semanas. Una vez enfriado el compost a temperatura ambiente se producen reacciones de polimerización que originan ácidos húmicos.

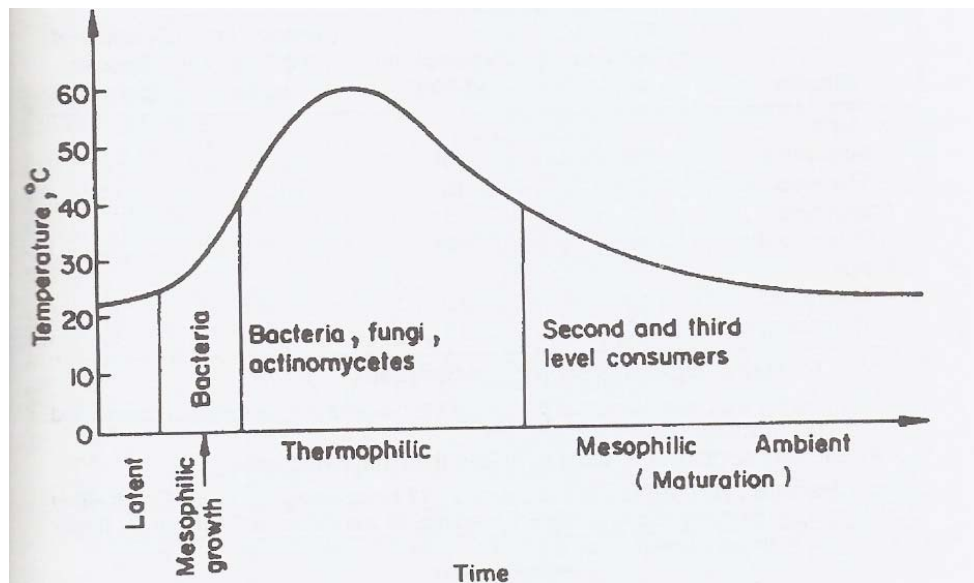


Figura Nº 5. Fases del compostaje.

1.1.4. MADUREZ DEL COMPOST

La estabilización supone la oxidación ó conversión de materiales orgánicos a una forma más estable. Los componentes más estables que quedan después del compostaje aún son degradables, pero a niveles muy inferiores respecto al material fresco. El grado de estabilidad que requiere un compost para utilizarlo como medio de cultivo depende del volumen porcentual del compost en el contenedor y de la tasa de consumo de oxígeno del compost. Todos los compost utilizados como medio de cultivo han de proporcionar unos niveles adecuados de O_2 al entorno del sistema radicular. Por tanto, la tasa de consumo de O_2 no ha de exceder la suma del O_2 necesario para continuar la descomposición aeróbica del compost y el O_2 extraído por el sistema radicular (Hoitink y Kuter, 1986).

El tiempo de compostaje depende del material y de los objetivos a conseguir (reducción de la fitotoxicidad, de los patógenos, etc). En todos los casos existen una serie de parámetros indicadores de la finalización del proceso de compostaje.

Algunos parámetros físicos, como pueden ser el olor a tierra, color oscuro, estructura esponjosa, tamaño de las partículas, relación agua-aire adecuada ó enfriamiento de las pilas, se toman muy a menudo como indicadores del final del compostaje. Así mismo, estas valoraciones pueden ser engañosas, ya que pueden venir determinadas por otros factores. Por ejemplo, una disminución de la temperatura puede ser debida a la falta de oxígeno, de nitrógeno, ó de la misma muerte térmica de los microorganismos. En este caso es aconsejable voltear de nuevo la pila ó efectuar un nuevo aporte de nitrógeno para comprobar si se produce un nuevo calentamiento (Burés, 1997). A veces la disminución de la temperatura viene condicionada por la humedad demasiado baja que frena la actividad microbiana. En este caso hay que rehumedecer la matriz compostable, generalmente mediante riego en el volteo.

A parte de estos parámetros generales también existen diversos ensayos ó test para comprobar la madurez del compost, algunos de ellos son el contenido de almidón, contenido

en celulosa, la capacidad de intercambio catiónica, la relación de C/N, grado de descomposición, consumo de oxígeno (respirometría), bioensayo de germinación, etc.

Dentro de los análisis químicos se puede utilizar la relación C/N como indicadora del final del compostaje. Este valor, cuando se estabiliza alrededor de 10 ó 12 significa en general que ha finalizado el proceso de descomposición. Muchos materiales finalizan su compostaje con relaciones C/N más altas; por ejemplo, si contienen gran proporción de carbono resistente.

El grado de descomposición es otro parámetro que puede indicar la evolución del compostaje, para dar una idea sobre la estabilidad de la materia orgánica. El grado de descomposición es el porcentaje de la materia orgánica resistente a la doble hidrólisis ácida respecto a la materia orgánica total. A medida que el compostaje progresa se generan compuestos estables (ligninas, sustancias húmicas) formados por cadenas carbonadas resistentes a la hidrólisis; así, el grado de descomposición aumenta a lo largo del compostaje (Burés, 1997).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) aumenta a lo largo del proceso de compostaje, ya que se forman sustancias húmicas con una CIC elevada. Así, a medida que se estabiliza la materia orgánica aumenta la CIC, siendo éste un buen parámetro de la evolución del compostaje.

El contenido de materia orgánica soluble, de ácidos húmicos ó la relación entre ácidos húmicos y fúlvicos pueden ser también indicativos de la madurez del compost.

Aunque la conductividad eléctrica (CE) no es un parámetro fundamental para el control del proceso de compostaje, es indicativo de posibles problemas que pueden presentarse en el posterior uso de los sustratos. Generalmente, la CE aumenta durante el compostaje, y este aumento es mayor durante la fase de maduración, ya que en esta fase actúan las bacterias nitrificantes y aparecen iones nitrato, calcio y magnesio.

Algunos ensayos biológicos pueden ser también válidos, como la determinación del consumo de oxígeno, del desprendimiento del dióxido de carbono, recuentos de microorganismos indicadores, supresividad del compost, ensayos de germinación ó de crecimiento vegetal.

El bioensayo de germinación es uno de los más utilizados para establecer la madurez del compost. En general el compost inmaduro inhibe el crecimiento de las plantas y el maduro da lugar a un crecimiento satisfactorio de las mismas.

Muchos de estos parámetros por si solos no tienen una relación consistente con el grado de madurez de algunos materiales, por lo cual es preferible utilizar distintos parámetros al mismo tiempo para indicar la madurez de un compost. Tanto el tiempo como el coste son una desventaja en las mayorías de estos tests ó ensayos.

Otras técnicas de evaluación de la madurez del compost son las de espectrometría y se basan en el estudio de la materia orgánica, por ejemplo, mediante la resonancia magnética nuclear que determina el espectro de algunos grupos funcionales, ó la espectroscopia de

infrarojos. Pero una prueba eficaz y barata es la incubación de compost en condiciones estándar y determinar el desprendimiento de CO₂ (respirometría).

En muchas ocasiones, los composts obtenidos a partir de residuos de la industria de la madera no son adecuadamente estabilizados antes de su utilización, por lo que aún inmovilizan nitrógeno en condiciones de cultivo. En cambio, los composts obtenidos a partir de fangos de depuradora liberan niveles importantes de Nitrógeno durante el cultivo. La fertilidad en N influye en la severidad de distintas enfermedades del suelo, como las causadas por *Phytophthora* y *Fusarium sp.* (Hoitink y Kuter. 1986).

1.1.5. LEGISLACIÓN

La Legislación española, mediante el REAL DECRETO 824/2005, de 8 de Julio, sobre productos fertilizantes, establece las siguientes características para la clasificación de los diferentes tipos de compost.

Tabla N°1 .Parámetros establecidos por la legislación española para los compost.

| Parámetros | Compost gral | Compost vegetal | Compost estiércol | Vermi- compost |
|-----------------------|-----------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| HUMEDAD (%) | 30-50 | 30-40 | 30-40 | 30-40 |
| M.O. (%) | ≥ 35 | 40 | 35 | 40 |
| Malla de 25 mm (%) | 90 | | | 90 |

1.2. SUSTRATOS

1.2.1. GENERALIDADES

El sustrato es cualquier material natural ó artificial, puro ó mezclado, utilizado sólo ó enriquecido, que puesto en un contenedor da soporte a la planta, permitiéndole un anclaje, así como un buen desarrollo del sistema radicular. Para que esto sea posible, el sustrato ha de proporcionar agua y oxígeno a las raíces, pudiendo actuar como reserva de nutrientes (Soliva, 2009).

La diferencia básica entre un suelo natural y un sustrato radica en la diferente composición de la matriz sólida, la cuál genera también una configuración diferente de poros.

Cuando la plantas crecen en contenedores, el aporte de agua y nutrientes es limitado y menor que en el cultivo en suelo, dado el menor volúmen de sustrato a explorar. En estas condiciones hay que garantizar un alto suministro de agua en el sustrato que permita satisfacer las necesidades de transpiración. Cuando la disponibilidad hídrica del sustrato es muy alta pueden aparecer fácilmente problemas de falta de aireación. Para facilitar este equilibrio de agua disponible y aire, los sustratos de cultivo presentan elevada porosidad, diámetro medio de los poros elevado y son homogéneos en el perfil. Por el contrario, muchos

suelos son poco porosos y su perfil poco heterogéneo, por eso debe haber un control tanto sobre el agua como el aire, pero este doble control, es difícil de conseguir (Raviv et al. 1986).

Tradicionalmente se han clasificado los sustratos en orgánicos e inorgánicos. La materia orgánica fresca es susceptible a descomponerse dando como productos finales ácidos húmicos, fúlvicos y huminas. La materia orgánica también aporta una serie de propiedades al sustrato, como son la actividad enzimática, actividad reguladora del crecimiento y actividad supresora ante patógenos (Burés, 1997).

En la caracterización de los sustratos se acostumbra a distinguir tres tipos de propiedades: físicas, químicas y biológicas. La importancia del conocimiento de estas propiedades se basa en que de ellas dependerá el manejo adecuado de la fertilización y del riego, y por tanto, el éxito del cultivo.

La estructura física de un sustrato está formada básicamente por un esqueleto sólido que forma un espacio poroso, pudiendo estar lleno de agua ó de aire, y que corresponden a espacios interparticulares ó intraparticulares. Los poros internos de las partículas del sustrato pueden estar abiertos al exterior, permitiendo así el intercambio de agua y aire con éste, como sucede en muchos sustratos orgánicos, ó pueden poseer poros internos que no son susceptibles al intercambio con el exterior, como algunos materiales de síntesis como el poliestireno expandido, la perlita y las cortezas compostadas.

La porosidad total de un sustrato es la suma de toda la porosidad existente: porosidad interparticular más la porosidad intraparticular. Como porosidad efectiva de un sustrato se define a la fracción de la porosidad total que permite el intercambio de agua y de aire en un sustrato determinado.

La estructura interna de los materiales, definida por su tamaño de poros y la conexión entre sí, afecta a sus propiedades.

El esqueleto sólido y el espacio poroso de los sustratos vienen definidos por la naturaleza del material y por el tipo de empaquetamiento. El esqueleto sólido depende del tipo de material y de su distribución granulométrica (ó tamaño de las partículas), y también de la mezcla, la isotropía (igualdad de las propiedades físicas de un sólido en todas sus direcciones) y del empaquetamiento o configuración espacial de las partículas. Un mismo material tendrá diferentes propiedades en función de la granulometría y del estado de empaquetamiento de las partículas (Burés, 1997).

Las características de un material que proporcionan propiedades específicas son: la composición, la masa, la densidad, la compresibilidad, la rugosidad, la estructura interna, la forma, las características superficiales, la isotropía y el tamaño. La combinación de la estructura generada por las partículas del sustrato en el espacio y las características del material (naturaleza, composición elemental y estructura interna), determinarán las propiedades físicas y químicas del sustrato (Burés, 1997).

La estructura interna de las partículas del material determina la porosidad interna y la densidad real, mientras que la granulometría y el tipo de empaquetamiento determinan la distribución del tamaño de poros interparticular. La densidad aparente es función de la

distribución en el espacio y de la estructura interna del material. La porosidad es la suma de los poros internos y externos, y de ella dependen las propiedades hídricas del sustrato, como la retención de agua y la permeabilidad.

La composición elemental y la manera de estar los elementos fijados a la matriz de un material determinan el contenido de nutrientes, el contenido de elementos fitotóxicos y la actividad de intercambio de iones. También el pH, la capacidad tampón y el contenido de sales del sustrato derivan de la actividad química del material.

No se puede crear un medio de cultivo ideal, ya que el mejor medio dependerá de numerosos factores tales como el material vegetal, especie, clima, régimen de aire y agua, tamaño de los contenedores y el factor económico. La planta puede vivir y crecer en muchos tipos de materiales si la raíz puede penetrar en el sustrato y extraer el agua y los nutrientes necesarios para sobrevivir.

1.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUSTRATOS

1.2.2.1. Generalidades

Se entiende por propiedades físicas a aquellas que se pueden ver y sentir. Por el contrario las propiedades químicas influyen en el suministro de nutrientes y no las podemos apreciar con nuestros sentidos (Ansorena, 1994).

Físicamente los sustratos están formados por una matriz sólida, que es el esqueleto formado por las partículas, y una matriz porosa, que representa el volumen de poros existentes ó la porosidad total. Estas matrices tienen por funcionalidad permitir el anclaje del aparato radicular de la planta y propiciar el suministro de agua, aire y nutrientes a la misma.

La más importante de las propiedades físicas son la adecuada porosidad y la distribución del tamaño de poro que facilitan unas relaciones aire-agua (Hoitink, 1993).

Los sustratos orgánicos son físicamente y químicamente activos. Las propiedades físicas de los sustratos, según la mayoría de autores, deben de considerarse más importantes que las químicas, porque no existen métodos prácticos que permitan su modificación una vez instalado el cultivo, que debe tener garantizado unas buenas condiciones para su desarrollo y que se mantengan a lo largo de todo su ciclo. A diferencia de la composición química, que puede ser modificada durante el desarrollo de la planta mediante el riego y el abonado.

Todo sustrato considerado bueno debe de tener las siguientes características físicas (Raviv et al. 1986):

- Alta retención de agua fácilmente disponible.
- Aporte adecuado de aire.
- Distribución del tamaño de partículas que mantenga las dos condiciones anteriormente expuestas.
- Baja densidad aparente para que el sustrato sea ligero, pero lo suficientemente alta para que la planta pueda anclarse.

- Alta porosidad.
- Estructura estable para que el sustrato no se contraiga ni se hinche a lo largo del tiempo de cultivo.

A continuación se describen las propiedades físicas que han sido objeto de estudio en este TFC:

1. Densidad real, Densidad aparente y Densidad Aparente húmeda.
2. Porosidad total.
3. Volúmen de contracción.
4. Tamaño de partículas.
5. Relaciones aire-agua.
 - Capacidad de aireación (CA)
 - Agua fácilmente disponible (AFD)
 - Agua de reserva (AR)
 - Agua difícilmente disponible (ADD)

1.2.2.2. Densidad real.

La densidad real, o densidad de las partículas que componen un sustrato, es la relación entre la masa o peso de las partículas y el volúmen real que ocupan, siendo el volúmen real el ocupado por el material sólido del sustrato, incluídos los poros cerrados (Burés 1997). No se consideran los poros intraparticulares abiertos ni los interparticulares. Su valor es el propio del material y no depende del grupo de compactación ni del tamaño de la partícula, como sucede en la densidad aparente.

La densidad real de un material se puede determinar utilizando el método picnométrico ó el método indirecto a partir del contenido de cenizas. El método picnométrico se utiliza poco en sustratos, pero es obligado para los materiales inorgánicos y para aquellos que presentan porosidad cerrada. En cambio el método indirecto es el más utilizado ya que es apto para los materiales orgánicos ó con alto contenido en MO, sin porosidad cerrada. Si el sustrato presenta porosidad cerrada hay que utilizar el método picnométrico con muestras no pulverizadas. Si existe porosidad cerrada, se determina con muestras pulverizadas o se estima con el método indirecto, la densidad real obtenida estará sobrestimada (Martínez, 1992).

Se define un intervalo óptimo de la densidad real de un sustrato que va entre 1.45 g/cm³ y 2.65 g/cm³, coincidiendo estos valores con la densidad definida por los componentes orgánicos y minerales de este (Abad et al, 1992).

1.2.2.3. Densidad aparente seca

La Densidad aparente seca o masa volumétrica se define como la relación entre la masa de material sólido seco (a 105°C) y el volúmen que ocupa en unas condiciones determinadas, incluyendo el material sólido y el espacio poroso total (poros internos más los poros interparticulares), (Burés, 1992). La densidad aparente depende del grado de compactación y del tamaño de las partículas, cosa que no ocurra con la densidad real. Se expresa generalmente en g/cm^3 ó en g/l .

La densidad aparente y espacio poroso total están estrechamente relacionados, ya que la porosidad disminuye al aumentar la densidad aparente, y al comprimirse una muestra de sustrato se observa un incremento de la densidad aparente y un decremento de la porosidad. Existen dos fenómenos que contribuyen a provocar este efecto: si las partículas son compresibles pueden disminuir la porosidad intraparticular y, por otro lado, puede darse una redistribución de las partículas, formándose empaquetamientos más compactos, pudiendo disminuir arbitrariamente la porosidad. Si las partículas son compresibles o deformables, se puede llegar a un máximo de disminución de la porosidad, que correspondería a empaquetamientos ordenados (Burés, 1997).

Los valores adecuados para las densidades aparentes de un sustrato son los inferiores a 0.4 g/cm^3 (Abad et al, 1992)

1.2.2.4. Densidad aparente húmeda.

La densidad aparente húmeda se define como la relación entre la masa del material sólido húmedo, tensionado a 10 cm de columna de agua y el volúmen aparente que ocupa, incluyendo el espacio poroso entre partículas. Se expresa en g/cm^3 ó en g/l (Martínez,1992).

1.2.2.5. Espacio poroso total

El espacio poroso total o porosidad total de un sustrato es el porcentaje de su volúmen que no se encuentra ocupado por material sólido (material mineral y materia orgánica) y cuantifica el espacio ocupado por sus poros. El espacio poroso total es la relación entre el volúmen de poros y el volúmen aparente del sustrato, expresado como porcentaje en volúmen. Según Abad et al. (1992) el espacio poroso total óptimo para un sustrato debe ser superior al 85 %.

El espacio poroso total es la suma de la porosidad interparticular más la porosidad intraparticular, e informa sobre el volúmen de sustrato que podrá ser ocupado por agua y aire. Como porosidad efectiva de un sustrato se define a la fracción de la porosidad total que permite el intercambio de agua y aire en un sustrato determinado. La Porosidad efectiva estará constituida por todos los poros abiertos, es decir la porosidad interparticular y la porosidad intraparticular abierta.

Se ha de tener en cuenta que toda la porosidad de un sustrato puede no ser útil para el intercambio. Esta situación se observa en aquellos materiales que presentan porosidad intraparticular cerrada, dado que ésta no tiene capacidad de intercambiar aire ni agua con el sustrato ni la planta, ya que estos poros quedan cerrados.

El espacio poroso efectivo es el espacio total disponible donde se dispondrán la fase acuosa y gaseosa del sustrato. Aunque todo este espacio no sea disponible (debido a la porosidad ocluída), cuanto mayor sea, mayor capacidad de retención de agua y aire tendrá el sustrato.

La porosidad total, no obstante, es muy variable, desde un 30% en arenas compactadas hasta valores superiores al 95% en algunas turbas rubias. En general, los suelos buenos de campo contienen alrededor de un 50% de poros, mientras que en los cultivos en sustrato y contenedor, la porosidad total puede llegar a valores del 90% ó superiores, siendo el 85% el valor mínimo recomendado.

1.2.2.6. Volúmen de contracción.

El volúmen de contracción es la pérdida de volúmen que experimenta un sustrato que se encuentra en unas condiciones normalizadas de humedad cuando se somete a un proceso de desecación. Normalmente se expresa en % de pérdida de volúmen cuando el sustrato se seca a 105°C durante 24 horas, referido al volúmen aparente en unas condiciones de humedad determinadas (Martínez, 1992).

La contracción de volúmen de un sustrato informa sobre el grado de variación de su volúmen que puede producirse bajo condiciones de cultivo en ciclos de humectación-desecación, ya que expresa la tendencia que tiene un material a contraer su volúmen cuando se seca. Una contracción de volúmen inferior al 30 % es la apropiada para un sustrato (Abad et al, 1992).

1.2.2.7. Tamaño de partículas

El análisis granulométrico es la clasificación de las partículas según su tamaño. El tamaño de las partículas es muy importante, ya que condiciona el tamaño de los poros interparticulares, que actúan como almacén de aire y de agua para el cultivo.

El tamaño de las partículas se determina por tamizado, siendo los tamices más usados los de: 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 5, 6.3, 12.5 y 25 mm de apertura. El resultado se expresa como % de masa de cada fracción granulométrica en relación a la masa de la muestra inicial seca al aire (Martínez, 1992).

Existe una relación entre el diámetro del poro y el potencial matricial, lo que significa que a medida que el diámetro del poro es más pequeño el potencial de la matriz disminuye, lo que provoca una fuerza de retención de agua mayor.

Las partículas con un diámetro entre 0.25 y 2.5 mm de diámetro equivalen a un rango de tensión de -1 a -10 kPa, correspondiendo a un sustrato de fácil manejo con suficiente aire y agua disponible.

Las partículas de diámetro inferior a 0.25 mm provocan riesgo de asfixia radicular ya que a capacidad de contenedor el sustrato se encuentra saturado. Las partículas superiores a

0.9 mm de diámetro provocan una gran aireación y poca agua disponible en el sustrato lo que genera un riesgo de déficit hídrico.

1.2.2.8. Relaciones aire – agua

Las relaciones aire-agua indican la manera en que el sustrato retiene el agua, así como su aireación.

Para la caracterización de las relaciones aire-agua se determina la distribución de fases (material sólido, aire y agua), en función de la relación entre el potencial matricial y el contenido de agua del sustrato. Esta relación entre el contenido de agua y el potencial matricial no es lineal, depende del sustrato y nos permite representar la curva de liberación ó retención de agua de este (Martínez, 1992).

Las curvas de liberación de agua pueden presentar una zona plana en el origen, de mayor o menor longitud en función del material. Para los materiales que retienen agua a tensiones elevadas, esta zona será mayor. El punto de inflexión de la curva se llama Tensión de entrada de aire ó Tensión crítica que representa la tensión que se debe aplicar a un sustrato saturado de agua para que sus poros más grandes empiecen a vaciarse y su contenido en agua sea desplazado por aire. Es función del tamaño de las partículas y de los poros. Si la altura del sustrato no supera la tensión crítica a capacidad de contenedor el sustrato permanecerá saturado con riesgo de asfixia radicular. En la mayoría de sustratos, por ser gruesos, la Tensión crítica es muy cercana a 0; y en materiales finos como arenas y materiales orgánicos muy humificados la zona plana de la curva de retención de agua se ve prolongada. Este factor es importante, debido a que cuanto más grande sea la presión de entrada de aire (en valor absoluto) más altura tendrá la zona saturada de agua en el fondo del contenedor (Burés, 1997).

Basándose en las curvas de retención de agua de suelos minerales y en experiencias previas con sustratos de plantas ornamentales cultivadas en contenedor, De Boodt et al, (1972), propusieron el uso de la curva de liberación de agua en el intervalo de 0 a 100 cm de c.a de tensión, para calcular la distribución de agua y aire. Si en lugar de representar para cada succión el contenido en agua del sustrato, se toma la diferencia hasta 100 (es decir, la suma de los porcentajes de fase sólida y aire), con lo que se invierte la curva, se representará la curva de retención de agua del sustrato.

En este trabajo se aplican tensiones de succión de 10, 50 y 100 cm c.a. (1, 5 y 10 kPa) al sustrato y se determina su contenido en agua en cada tensión y se representa la curva que refleja la distribución de las fases sólida, líquida y gaseosa para cada tensión aplicada. La humedad correspondiente a succión cero será el contenido máximo de agua, que coincide con la porosidad total. La curva permite calcular la capacidad de aireación (CA) por diferencia entre la porosidad total y el contenido de agua de 10 cm de c.a. de succión.

El agua liberada por un sustrato entre succiones de 10 cm de c.a (considerada capacidad de contenedor) y 50 cm de c.a., se considera agua fácilmente disponible (AFD). El agua liberada entre succiones de 50 cm de c.a. y 100 cm de c.a. se denomina capacidad tampón ó agua de reserva (AR); la suma de ambas (agua retenida entre 10 y 100 cm de c.a. de succión) se considera agua disponible (AD). El agua retenida a tensiones superiores a 100 cm

de c.a. se llama agua difícilmente disponible (ADD). Esto no significa que en realidad la planta no pueda continuar extrayendo agua retenida a tensiones superiores a 100 cm de c.a., como lo hacen los suelos naturales a campo, lo que sucede es que, como más elevada sea la fuerza de succión que ha de ejercer la planta, mayor será el gasto energético del proceso. En consecuencia, disminuirá la energía disponible para la producción de materia seca, reduciéndose el rendimiento. Por eso, en las condiciones habituales de riego no se acostumbra a dejar que la planta llegue a un grado de sequedad tal que le implique una aplicación de succión superior a 100 cm de c.a. de succión (Ansorena, 1994).

De Boodt et al., aplicaron la curva de liberación de agua obtenida al estudio de diferentes componentes y mezclas de sustratos, centrando la atención en los valores de contenido de aire y en agua fácilmente disponible, como factores determinantes de la calidad del sustrato. Concluyeron que, en condiciones de crecimiento óptimo, es necesario que el sustrato posea simultáneamente entre un 20% y un 30% de aire y de agua fácilmente disponible, con sólo un 4 a 10% de agua de reserva.

La importancia de los valores de esta curva radica en el hecho de que la mayoría de los tiestos utilizados comercialmente acostumbran a tener una altura de contenedor de unos 10 cm. Por eso, los valores de esta curva para el aire y el agua corresponden a la capacidad de contenedor para tiestos de esta altura. El valor de 100 cm de c.a. se establece a partir de diferentes trabajos experimentales por De Boodt et al. (1971, 1972), donde se demuestra que el crecimiento de muchos cultivos ornamentales y hortícolas se ve restringido cuando el agua del sustrato está retenida a tensiones superiores a 100 cm de c.a. Es decir, a partir de esta tensión, el agua empieza a ser un factor limitante en la producción de plantas en sustrato y contenedor.

La mayor parte de autores están de acuerdo en definir el agua disponible del sustrato, para óptimo crecimiento, como el porcentaje volumétrico de agua liberada entre 10 y 100 cm de tensión de c.a. Este rango corresponde a poros de 300 a 30 μm . De diámetro (Martínez, 1992).

Según De Boodt, los parámetros considerados óptimos que debe poseer un sustrato son los siguientes:

- La Capacidad de aireación (CA) debe ser superior al 15%, ya que menor presentaría una aireación limitante lo que representaría riesgos de asfixia radicular y posible muerte de la planta.
- El agua fácilmente disponible (AFD) debe de estar entre un rango del 20 al 30% para un buen manejo del cultivo. Si el valor es inferior al 15%, se debe regar con más frecuencia.
- El agua de reserva (AR) debe de ser del 4 al 10% para no tener problemas de manejo.
- El agua difícilmente disponible (ADD) no debe de ser inferior al 10% porque habría un riesgo de déficit hídrico si no se riega a tiempo.
- El agua disponible (AD) debe de ser de un 25 a 40% para que un fácil manejo.

La porosidad total en la mayoría de materiales orgánicos es de más del 80% por volúmen. El espacio poroso se divide en poros llenos de aire y ocupados de agua. El aire que contiene un sustrato se define como la proporción de volúmen que contiene aire después de haber sido saturado con agua y dejado drenar, con una tensión, normalmente de 10 cm de columna de agua (Raviv et al, 1986).

El crecimiento de las plantas se inhibe y a veces hay putrefacción de raíces a consecuencia de una pobre aireación causada por compactación o excesivo riego, especialmente en sustratos con una inadecuada distribución del tamaño de los poros. La extracción de agua y nutrientes se inhibe fuertemente cuando los niveles de oxígeno son limitantes. El oxígeno se transfiere a la raíz por difusión a través de las capas de agua que rodean a la raíz. La proporción de oxígeno que se difunde en agua es de 10^4 veces menor que en el aire, por tanto la densidad de la capa de agua que rodea la zona radicular es de gran importancia. Si la estructura y textura del sustrato hace que la mayoría de los poros queden llenos de agua después del riego, el suministro de oxígeno se verá restringido, el CO_2 se acumulará y producirá etileno. Por todo ello el crecimiento de la planta se verá afectado e incluso se podrá marchitar.

La distribución del tamaño del poro es la clave para un adecuado nivel de agua-aire en el sustrato. El porcentaje de aireación que debe tener el sustrato varía según distintos autores, por ejemplo Bunt joiner y Conove dicen que debe ser del 10%, Puutsjurve del 45%, Poole del 5-30%, Verdrack del 20%. Por norma general el óptimo debe de estar entre el 10 y el 40%, dependiendo esto de la planta, del tamaño del contenedor y del sustrato. Los sustratos orgánicos tienden a descomponerse y requieren más oxígeno. La altura del contenedor tiene un importante efecto que se debe vigilar en el contenido de aire, cuanto más alto es el contenedor más alto es el contenido de aire y viceversa. Cuando se usa un contenedor pequeño o poco profundo es preferible usar sustratos gruesos para mantener una aireación adecuada. Contrariamente en contenedores altos se utilizan sustratos más finos para garantizar el contenido de agua.

1.2.3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SUSTRATOS

Las propiedades físico-químicas más importantes de los sustratos utilizados en cultivos en contenedor son los siguientes:

- Humedad
- Materia Orgánica (cantidad y calidad)
- pH
- Capacidad tampón de pH
- Capacidad de intercambio iónico y aniónico
- Conductividad eléctrica
- Composición de elementos totales (nutrientes y elementos potencialmente tóxicos)
- Contenido de elementos disponibles (nutrientes y EPT)

A continuación se describen aquellas propiedades de índole química que son objeto de estudio en el presente TFC.

1.2.3.1. Humedad.

La humedad es una propiedad de los materiales que se puede considerar tanto física como físico-química por su influencia en los cambios de propiedades físico químicas como son el pH y la C.E. Por este motivo se la incluye en este apartado y se discute conjuntamente en la discusión con los parámetros físico químicos.

La humedad o contenido hídrico de los sustratos es la medida del porcentaje de masa de agua perdida cuando la muestra se seca a $105^{\circ} \text{C} \pm 3^{\circ} \text{C}$, referida a la masa inicial. La materia seca se expresa como el porcentaje de residuo tras el secado de la muestra, referido asimismo a la masa inicial (Martínez, 1992).

Las propiedades de los sustratos orgánicos quedan alteradas cuando pierden mucha humedad. Una vez desecado el sustrato, tarda mucho tiempo en volverse a humedecer, por este motivo los materiales orgánicos a utilizar en la formulación de sustratos orgánicos deben presentar una humedad de alrededor del 40-50% que se considera óptimo. Si se encuentran más secos es conveniente añadir tensoactivos agrícolas, no fitotóxicos.

1.2.3.2. Materia orgánica

En los sustratos orgánicos la materia orgánica es un componente importante de la fase sólida del sustrato y aporta una serie de propiedades al mismo, como son la actividad enzimática, actividad reguladora del crecimiento y, en su caso, actividad supresora ante patógenos, además de otras propiedades físicas (retención de agua) y químicas, como la capacidad de intercambio catiónico.

La materia orgánica se determina a partir del contenido en cenizas del sustrato. El contenido en cenizas del sustrato se expresa como el porcentaje de residuo obtenido al calcinar (560°C) una muestra seca a 105°C de sustrato, referido a la masa seca inicial. El contenido en materia orgánica total será el porcentaje de pérdida de masa de la determinación anterior, referida así mismo a la masa seca inicial (Martínez, 1992).

Las determinaciones del porcentaje de materia orgánica y material mineral permiten calcular indirectamente la densidad real del material de naturaleza orgánica. Por eso se dice que la determinación de la densidad real a partir de estos valores (%M.M. y %M.O.) será una determinación indirecta, y susceptible de error si las determinaciones del porcentaje de materia mineral y orgánica han sido realizadas incorrectamente.

El óptimo de materia orgánica de un sustrato ha de ser superior al 80 %, según Abad et al. (1992).

1.2.3.3. pH

Junto a las propiedades físicas adecuadas, que aseguren el anclaje de la planta y el suministro de aire y agua, el sustrato debe proporcionar los nutrientes minerales a través de sus raíces, tomándolos de la solución del suelo. En general el medio de cultivo no es inerte, sino que interacciona con la solución nutritiva y actúa como reserva de nutrientes a través de la Capacidad de Intercambio Catiónico, que depende del pH del medio.

Se entiende como pH al logaritmo negativo de base 10 de la concentración de iones H^+ en solución acuosa. La escala de pH va desde 0, extremadamente ácido hasta 14, extremadamente alcalina. Siendo los valores, ácido $pH < 7$, neutro $pH = 7$ y básico $pH > 7$. Cuanto más ácida es una solución acuosa, menor es su pH y cuando más básica ó alcalina, mayor será el pH.

La mayoría de los nutrientes minerales necesarios para su crecimiento los toma la planta de la solución acuosa en que se hallan disueltos. Como la capacidad de absorción de agua de la planta no es ilimitada, una parte importante de los nutrientes aportados se perderían por lavado ó lixiviación, si no fuesen retenidos por el medio de cultivo.

No todos los nutrientes añadidos con el abono sólido pasan directamente a la solución del suelo, ya que una parte queda como reserva en forma sólida, sin disolverse; su proporción dependerá de la naturaleza del abono: si es muy soluble, se disolverá tan pronto como haya la suficiente cantidad de agua. Pero si es orgánico ó de lenta liberación, la solubilización requerirá más tiempo, y dependerá de otros factores externos como la temperatura, actividad microbiana, etc. A su vez una parte de la fracción disuelta podrá insolubilizarse al reaccionar con otros compuestos del suelo, formando un precipitado de sales insolubles.

El pH afecta a la disponibilidad de nutrientes del sustrato, la conductividad eléctrica y la actividad biológica. En condiciones de cultivo intenso es recomendable mantener un pH del sustrato dentro de un rango establecido.

Las plantas pueden crecer sin sufrir desórdenes fisiológicos en un intervalo de pH entre 4 y 8, siempre que las concentraciones de nutrientes disponibles se mantengan en niveles suficientes y la forma que se les suministre sea la adecuada. En condiciones de extrema acidez o alcalinidad la planta puede sufrir en su desarrollo. En sustratos orgánicos, el rango óptimo de pH para el crecimiento de las plantas es el comprendido entre 5 y 5.5 (Ansorena, 1994). Otros autores afirman que el rango es de 5 a 5.8 (Lucas y Davids), lo que no excluye que puedan crecer satisfactoriamente fuera de este intervalo. Un pH por encima de 6 puede suponer dificultades en disponer de Fe, P, Mn, B y Zn si por el contrario nos encontramos pH por debajo de 5 habrá deficiencias de P, K, Ca, N, Cu y Mo. Si el pH no se encuentra en el intervalo deseado se deberá ajustar. En el caso de sustratos ácidos, será mediante la adición de yeso ó cal, si es básico se le añadirá azufre. La cantidad de cal o azufre a añadir al sustrato dependerá del pH y la capacidad de intercambio catiónica.

La acidez ó pH es uno de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar un sustrato (Ansorena, 1994), ya que de su valor dependerán:

- La posible presencia de compuestos de aluminio ó manganeso, que son tóxicos para las raíces de las plantas y limitan el crecimiento.
- La asimilabilidad de nutrientes minerales, ya que su disponibilidad para las raíces de la planta dependerá en gran medida del pH.
- La cantidad de nutrientes retenidos como reserva en el complejo de cambio, ya que la capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica aumenta mucho con el pH.

1.2.3.4. Conductividad eléctrica

La salinidad de una solución acuosa se mide por su contenido de sales disueltas (mg/l ó ppm) ó, más comunmente, por su capacidad para conducir la corriente eléctrica ó conductividad (en miliSiemens por cm, mS/cm, ó microSiemens/cm, $\mu\text{S/cm}$). Cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad de la solución. Para controlar la salinidad de un medio de cultivo, se mide la conductividad de un extracto acuoso del mismo.

A consecuencia del reducido volúmen de medio de cultivo de que disponen las raíces de las plantas cultivadas en contenedor, la concentración de nutrientes en la solución acuosa suele ser elevada, muy superior a la que es habitual en cultivos de campo en suelos minerales. Con ello aumenta el riesgo de acumulación de niveles excesivos de sales disueltas, lo que llamamos salinidad.

Las razones para que exista una acumulación excesiva de sales en un sustrato de cultivo pueden ser debidas a diferentes causas:

- Presencia de concentraciones elevadas de sales en alguno de los componentes del sustrato.
- Aporte excesivo de nutrientes con los abonados ó el agua de riego.
- Mineralización incontrolada de determinados fertilizantes orgánicos ó de liberación lenta.

1.2.4. FITOTOXICIDAD

En la mayoría de los estudios llevados a cabo para determinar la viabilidad del uso de residuos orgánicos para la formulación de sustratos hortícolas, se ha demostrado que no se pueden utilizar como tal debido a un conjunto de efectos negativos sobre los cultivos tales como: fitotoxicidad, inmovilización del nitrógeno, salinidad, mala estructura, etc. Por lo tanto el compostaje es una posibilidad de resolver muchos de los inconvenientes y, junto con una mezcla exacta, podemos obtener un excelente medio de cultivo para plantas hortícolas.

El crecimiento en muchas de las especies vegetales y cultivares es inhibido por un compost altamente inestable (García et al., 1992). Las pruebas de germinación y crecimiento estiman directamente la inhibición del crecimiento de las plantas por el compost en determinadas condiciones ambientales.

La elección de las especies de plantas puede tener un gran efecto sobre el resultado de la prueba de germinación y crecimiento cuando el compuesto tiene un alto contenido de sales solubles. Un compost muy estable, con altas concentraciones de sal, puede inhibir la germinación de algunas especies de plantas (Iannotti et al., 1994).

Los ácidos orgánicos de cadena corta, producto de la descomposición de materia orgánica, pueden inhibir o reducir la germinación y crecimiento de las raíces. Los ácidos orgánicos responsables de la inhibición del crecimiento incluyen acético, butírico, propiónico y ácidos valérico (Brinton, 1998). Estos ácidos también producen el mal olor asociado con el

compost que ha sufrido descomposición anaeróbica. Se producen como subproducto natural de las primeras etapas de descomposición de la materia orgánica. En un compost maduro, los ácidos orgánicos de cadena corta se habrán eliminado a través de la descomposición. Estos compuestos pueden determinarse cuantitativamente mediante cromatografía de gases ó iónica (Brinton, 1998).

El compost puede tener uno o más problemas de calidad que imponen limitaciones en su uso. La mayoría de los problemas de calidad puede atribuirse a cualquiera de las materias primas del compost ó al proceso de compostaje. Para minimizar la mayoría de estos problemas de calidad (madurez del compost) hay dos vías de actuación: reducir la dosis de aplicación de compost hasta que el efecto indeseable no aparezca ó mejorando y/o alargando el proceso de compostaje con el fin de conseguir un compost más estable y maduro.

1.2.4.1. Bioensayo de germinación

El objetivo de los bioensayos es poner de manifiesto la presencia de compuestos tóxicos en el medio. Se puede definir como test que cumple los siguientes requisitos (Moreno et al, 1998):

- Rápido y reproducible.
- Escasos requerimientos.
- Utiliza especie sensible al posible factor tóxico.
- Estudia los estados iniciales de desarrollo vegetal.

El origen de las fitotoxinas en los sustratos puede ser triple:

- I. Se encuentran en los materiales de partida. Los sustratos de corteza suelen presentar un alto contenido fenólico, mientras que los composts de basura pueden contener cantidades importantes de metales pesados.
- II. Aparecen durante los procesos de degradación microbiana del medio, si es un material orgánico insuficientemente estabilizado.
- III. Se generan por la descomposición de los restos de cultivo acumulados en el suelo.

El objetivo de los bioensayos es doble:

- I. Detectar la presencia de toxinas en los materiales de partida usados para elaborar sustratos.
- II. Debido a la estrecha relación que existe entre los conceptos de estabilidad de la materia orgánica y toxicidad, estos test también permiten evaluar el grado de madurez de los productos orgánicos sometidos a un proceso de compostaje.

La validez de la información aportada por estos tests depende críticamente de las condiciones en que se realizan, resultando limitante la elección de los parámetros a medir, la especie vegetal empleada y el material sobre el que se realiza el ensayo.

Los bioensayos rápidos, que evalúan los efectos tóxicos sobre los estados iniciales del desarrollo vegetal (germinación y elongación radicular), son más recomendables que los ensayos de larga duración. Estos últimos, además de tener mayores requerimientos de instalaciones y material, presentan otros inconvenientes:

- I. Los resultados pueden verse afectados por los procesos continuos de estabilización del compost y por la adaptabilidad de la planta usada como testigo.
- II. Cuando se opera con medios de alta relación C/N (como cortezas y serrines), pueden darse simultáneamente problemas de inmovilización de Nitrógeno y fitotoxicidad, siendo difícil distinguir entre ambos efectos.

Se usa una amplia gama de especies, para revelar la posible fitotoxicidad del sustrato. Aunque la sensibilidad debería ser el criterio seguido para efectuar su elección, no siempre es así.

El berro, rábano ó col china se seleccionan por su rápida respuesta. La cebada ó guisante se eligen por la facilidad de manejo de su raíz, aunque es considerada la lechuga como la más apta para ser usada como indicador. Esta especie ha permitido detectar efectos fitotóxicos en sustratos y enmiendas de distinto origen, viéndose afectadas su germinación, elongación radicular y posterior crecimiento y desarrollo. También ha permitido poner de manifiesto la existencia de compuestos alelopáticos (ácidos fenólicos) en los exudados radicales de varias especies y de inhibidores de la germinación en extractos obtenidos a partir de cubiertas de semillas.

La madurez del compost se puede valorar como el grado en que el material es libre de sustancias fitotóxicas que pueden causar retraso ó reducir la germinación, lesiones en las plantas ó muertes de éstas (FDACS 1994). Contrariamente el concepto de estabilidad se asocia con los composts que se utilizan Nitrógeno y Oxígeno en cantidades significativas para satisfacer la actividad biológica y generar calor, CO₂ y vapor de agua, y que por ello, pueden ocasionar la reducción en el crecimiento de la planta ó el amarilleamiento de las hojas. Zucconi (1981) demostró la reducción de germinación de berro con la presencia de fitotoxinas producidas durante las primeras fases del proceso de compostaje. Estos compuestos fitotóxicos son transitorios en la naturaleza y se asocian con microbios durante las primeras fases del compostaje. Hay un rápido decrecimiento de fitotoxinas después de los primeros estadios, pero los compuestos tienen varios grados de volatilidad y no desaparecen hasta después de ocho semanas de compostaje. (Ozores-Hampton et al. 1999)

El compost inmaduro fresco tiene una alta concentración de ácido acético, propiónico e isobutírico después de cinco meses de compostaje (De Vleeschauwer et al. 1981).

Los factores negativos de los bioensayos son:

- Sobreestiman el riesgo de fitotoxicidad. Los bioensayos se realizan en las condiciones más favorables para que se manifiesten los posibles efectos fitotóxicos, que pueden no evidenciarse ó al menos no de manera tan intensa, en condiciones reales de cultivo.
- Aunque permiten detectar la desaparición de fitotoxinas durante el compostaje, no son útiles de forma definitiva para determinar la madurez del compost.



OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El presente Trabajo de Final de Carrera tiene como objetivo general caracterizar y determinar la viabilidad de 12 diferentes composts comerciales, provenientes de plantas de compostaje industriales, para su utilización como sustratos de cultivo ó como componentes de sustratos de cultivo. Los composts evaluados proceden de distintas materias primas base: 3 de restos vegetales procedentes de poda urbana (CVEG), 2 de cortezas de árboles (CCORT), 2 de fracción orgánica de residuos municipales procedentes de recogida selectiva en origen (CFORM), 2 de fangos de estación depuradora de aguas residuales (CEDAR), 2 de estiércol (CESTIER) y 1 vermicompost de estiércol (CVER). También se incluyen dos materiales complementarios, que se ofrecen en el mercado como productos formulados comerciales a base de composts: sustrato de compost vegetal y turba rubia de sphagnum (SUST) y recebo para céspedes (REC) formulado con compost vegetal, compost de estiércol y arena.

Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar: densidad real (DR), densidad aparente seca (DAs), densidad aparente húmeda (DAh), volúmen de contracción (VC), porosidad (Por), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y la distribución del tamaño de partículas.
2. Determinar: % de humedad, % de materia orgánica (M.O), pH y conductividad eléctrica (CE).
3. Realizar bioensayos de germinación para determinar la existencia de posible fitotoxicidad, determinando germinación (%), la longitud radicular (%) y el índice de germinación.
4. Valorar la viabilidad de los compost analizados para su uso en la formulación de sustratos de cultivo.



MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

Para la elaboración del presente trabajo de final de carrera, que tiene como objetivo caracterizar las propiedades físicas, físicoquímicas y determinar la viabilidad de diferentes clases de composts para su utilización como sustratos de cultivo ó para su uso como componentes, se tomaron distintas muestras de composts comerciales producidos por diferentes empresas del sector agrícola.

Se utilizaron para los diferentes ensayos 12 compost que abarcan los siguientes tipos: 3 composts de restos vegetales procedentes de poda urbana (CVEG), 2 de cortezas de árboles (CCORT), 2 compost de fracción orgánica de residuos municipales procedentes de recogida selectiva en origen (CFORM), 2 composts de fangos de estación depuradora de aguas residuales (CEDAR), 2 compost de estiércol (CESTIER) y 1 vermicompost (CVER).

Para el contraste de estos composts se analizaron también 2 productos comerciales formulados a base de compost: Mezcla compost vegetal-turba rubia de esfagno (SUST) y recebo (REC) formado por compost vegetal+compost de estiércol+arena.

3.1.1. CCORT1



| | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 05/03/10 | |
| DENOMINACIÓN | ROLDÓ | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | 100% Corteza de pino + úrea al inicio del proceso | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Pino procedente de aserradero de la provincia de Lérida | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | 100% Corteza de pino | |
| LUZ TROMEL (ENTRADA) | 25-30mm | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Compostaje aerobio en pilas |
| | Tiempo (semanas) | 8 |
| | Frec. volteo | 2 volteos/ semana |
| | Frec. Riego | Semanal en ausencia de lluvias |
| | Tipo de agua | Recirculada a partir de balsa de recogida de pluviales y escorrentía. |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas |
| | Tiempo (semanas) | 2 semanas mínimo |
| | Frec. volteo | 0 |
| | Frec. Riego | 0 |
| | Tipo de agua | - |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | En función de la demanda |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 18-20mm | |
| DESTINO | Componente de sustratos de cultivo en horticultura, jardinería y viverismo. Mulch | |

3.1.2. CCORT2



| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 05/03/10 | |
| DENOMINACIÓN | ECOBOSC | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Corteza de pino, restos poda, marro de café de la ind. agroalimentaria | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | 35% Corteza de pino procedente de aserradero, 12% Viruta de aserradora, 35% Rechazo del propio proceso, 12% Restos de poda, 5 % Marro de café de ind. agroalimentaria | |
| LUZ TROMEL (ENTRADA) | 25 mm | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Compostaje aerobio en pilas |
| | Tiempo (semanas) | 8 |
| | Frec. volteo | 3 volteos/ semana |
| | Frec. Riego | Semanal en ausencia de lluvias |
| | Tipo de agua | Recirculada a partir de balsa de recogida de pluviales y escorrentía. |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas |
| | Tiempo (semanas) | 2 semanas mínimo |
| | Frec. volteo | 0 |
| | Frec. Riego | 0 |
| | Tipo de agua | - |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | En función de la demanda |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 18-20mm | |
| DESTINO | Componente de sustratos de cultivo en horticultura, jardinería y viverismo. Mulch. Enmienda orgánica. Estabilización de taludes y labores de restauración paisajística. | |

3.1.3. CEDAR1



| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 15/03/10 | |
| DENOMINACIÓN | COMPOST ARAZURI | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Lodos deshidratados y estabilizados de depuradora + Restos Verdes triturados + Madera triturada | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Lodo: Procedente del tratamiento de agua que llega a la depuradora + lodos urbanos de fosas sépticas de pequeñas poblaciones. | |
| | Restos Verdes: Procedente de la recogida selectiva de los contenedores de la Comarca de Pamplona y de jardineros | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | 8 Bulking: 2 Lodo | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Pilas al aire libre |
| | Tiempo (semanas) | Variable, en función de la estación. |
| | Frec. volteo | 2 veces por semana |
| | Frec. Riego | No se riegan las pilas |
| | Tipo de agua | Agua de lluvia |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas al aire libre |
| | Tiempo (semanas) | 8-10 semanas |
| | Frec. volteo | 1 vez por semana |
| | Frec. Riego | No se riegan las pilas |
| | Tipo de agua | Agua de lluvia |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | S/demanda |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 12 mm | |
| DESTINO | Grandes Jardinerías, Ayuntamientos, empresas constructoras, agricultores, jardineros y particulares. | |

3.1.4. CEDAR2



| | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 05/03/10 | |
| DENOMINACIÓN | ENERVIT | |
| COMPONENTES, ORIGEN Y PROPORCIÓN. (M. PRIMA) | 20% Fango de depuradora de EDAR e industria agroalimentaria 50% Rechazo del propio proceso productivo (estructurante) 10% Rechazo de compostaje vegetal (estructurante) 10% Fracción gruesa de restos de poda trituradas (estructurante) 10% Fango blanco procedente de papelera. | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Compostaje aerobio en pilas |
| | Tiempo (semanas) | 3 |
| | Frec. volteo | 5 volteos/ semana (diario) |
| | Frec. Riego | Excepcionalmente en verano |
| | Tipo de agua | Recirculada a partir de balsa de recogida de pluviales y escorrentía. |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas |
| | Tiempo (semanas) | 1 mes mínimo (usualmente entre 6-8 meses) |
| | Frec. volteo | 0 |
| | Frec. Riego | 0 |
| | Tipo de agua | - |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | En función de la demanda |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 10 mm | |
| DESTINO | Enmienda orgánica de uso agrícola | |

3.1.5. CESTIER1



| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 16/12/2009 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | ESTIERCOL | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Estiércol de caballo y estiércol vacuno semi-compostados, en cama de paja. | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Hípicas, establos | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | Según disponibilidad. Mayoritaria para el estiércol equino | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Aire libre |
| | Tiempo (semanas) | 04-jun |
| | Frec. volteo | 3 volteos por semana |
| | Frec. Riego | No se riega |
| | Tipo de agua | - |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | Según demanda de mercado |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 12 mm | |
| DESTINO | Enmienda orgánica de origen animal. Materia prima para elaboración de mezclas | |

3.1.6. CESTIER2



| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------|
| FECHA DE MUESTREO | 03/02/2010 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | COMPOST DE ESTIÉRCOL | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Estiércol sólido de porcino y bobino en cama de paja. | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Granjas locales | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | Estiércol bovino (50%), estiércol porcino (50%) | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Pilas |
| | Tiempo (meses) | 10-dic |
| | Frec. volteo | c/ 3-4 meses |
| | Frec. Riego | S/ necesidad |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | 2 meses |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 10 y 15 mm | |
| DESTINO | Jardinería en general y agricultura. | |

3.1.7. CFORM1



| | | |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 18/11/2009 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | COMPOST (P/C309) | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Fracción Orgánica de Recogida Municipal/Restos Vegetales | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Recogida selectiva municipal/Municipios+jardinerías+particulares | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | Aprox. 2/1 (v/v) | |
| LUZ TROMEL (ENTRADA) | 80 mm. | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Pilas volteadas |
| | Tiempo (semanas) | 11 |
| | Frec. volteo | 7 volteos durante esta etapa |
| | Frec. Riego | 5 riegos durante la etapa |
| | Tipo de agua | 3 lixiviados + 2 agua (pluviales) |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas volteadas |
| | Tiempo (semanas) | 6 |
| | Frec. volteo | 1 volteo durante esta etapa |
| | Frec. Riego | Sin riego |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | 1 semana (según demanda) |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 10 mm. | |
| DESTINO | Agricultura | |

3.1.8. CFORM2



| | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 19/02/2010 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | Compost de FORM | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | FORM +FV | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | FORM: municipal / FV: municipal+deixalleries+particulares | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | 3FORM / 1FV (v/v) | |
| LUZ TROMEL (ENTRADA) | 80 mm cuadrado | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Túneles impulsados |
| | Tiempo (semanas) | 3 |
| | Frec. volteo | - |
| | Frec. Riego | Variable en función de la etapa de descomposición |
| | Tipo de agua | Lixiviados |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas volteadas |
| | Tiempo (semanas) | 8-9 |
| | Frec. volteo | Variable en función necesidad. Mínimo 1 semana |
| | Frec. Riego | Variable en función necesidad y época del año |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | Variable en función de la demanda (0.5-4 meses) |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 16 mm redondo | |
| DESTINO | Agricultura extensiva, viñedos, huerta, industrias de preparación de tierras abonadas | |

3.1.9. CVEG1



| | | |
|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|
| FECHA DE MUESTREO | 18/11/2009 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | COMPOST VEGETAL | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Restos Vegetales | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | R.V. de municipios+jardinerías+particulares | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Pilas volteadas |
| | Tiempo (semanas) | 5-6 |
| | Frec. volteo | Según necesidad |
| | Frec. Riego | Según necesidad |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas volteadas |
| | Tiempo (semanas) | 8-10 |
| | Frec. volteo | Según necesidad |
| | Frec. Riego | Cuando llueve |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| ALMACENADO | Tiempo | 2 años aprox. |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 5 mm. | |
| DESTINO | Agricultura y jardinería | |

3.1.10. CVEG2



| | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 16/12/2009 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | MANTILLO | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Poda de jardín triturada (ramas, hojas, restos de vegetación, cortezas); fracción gruesa de cribado de mantillo que incorpora subproductos de industria agroalimentaria (frutas, semillas, restos vegetales de extracción, cel.lulosa, entre otros) | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Jardinería, industria agroalimentaria | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | 1/1 (v/v) | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | Pilas al aire libre |
| | Tiempo (semanas) | 3 - 4 |
| | Frec. volteo | 3 volteos semanales |
| | Frec. Riego | Según necesidad |
| | Tipo de agua | Agua de riego |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas al aire libre |
| | Tiempo (semanas) | 6 semanas (mínimo) |
| | Frec. volteo | No se voltea |
| | Frec. Riego | No se riega |
| | Tipo de agua | - |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | Según demanda mercado |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 12 mm | |
| DESTINO | Enmienda orgánica de origen vegetal. | |
| | Materia prima para elaboración de mezclas | |

3.1.11. CVEG3



| | | |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 03/02/10 | |
| DENOMINACIÓN | COMPOST VEGETAL | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Material vegetal ; Purín como fuente de N | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | M.Vegetal proveniente de poda de jardinería; Purín de Puerco proveniente de granjas locales. | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | Material vegetal (80%), Purín (20%) | |
| DESCOMPOSICIÓN | Sistema | En pilas de compostaje |
| | Tiempo (semanas) | 7 - 8 |
| | Frec. volteo | semanal |
| | Frec. Riego | S/ necesidad |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| MADURACIÓN | Sistema | En pilas |
| | Tiempo (semanas) | 5 - 8 |
| | Frec. volteo | 2 semanas |
| | Frec. Riego | S/ necesidad |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | Alrededor de un mes, dependiendo de la demanda. |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 10 mm y 15 mm | |
| DESTINO | Componente base para mezcla de sustratos. | |

3.1.12. CVER



| | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| FECHA DE MUESTREO | 03/02/2010 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | Vermicompost de lombriz californiana (eisenia foétida) | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Estiércol compostado de bovino y porcino | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Estiércol proveniente de granjas de la zona | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | Estiércol bovino (50%), estiércol porcino (50%) | |
| MADURACIÓN | Sistema | Pilas de 40 cm de alto al aire libre |
| | Tiempo (meses) | 12 aprox. |
| | Frec. volteo | No se voltea |
| | Frec. Riego | S/necesidad |
| | Tipo de agua | Pluvial |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | s/ demanda |
| LUZ TROMEL (REFINO) | 10 mm y 15 mm | |
| DESTINO | Jardinería, horticultura y agricultura ecológica. | |

3.1.13. REC



| | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| FECHA DE MUESTREO | 03/02/2010 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | RECEBO | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Compost vegetal base; Estiércol; Arena | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Compost Vegetal Base (CVEG3), estiércol de granjas (CEST2), arena de río | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | CVEG3 (70-80%); CEST2 (10-15%); arena (10-15%) | |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | S/ demanda |
| DESTINO | Jardinería (céspedes) | |

3.1.14. SUST



| | | |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|-----------|
| FECHA DE MUESTREO | 03/02/2010 | |
| DENOMINACIÓN DEL COMPOST | Sustrato vegetal | |
| COMPONENTES (M. PRIMA) | Compost vegetal base; Turba rubia de Sphagnum | |
| ORIGEN DE LOS COMPONENTES | Turba rubia de Sphagnum proveniente de Letonia | |
| PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES | T. Vegetal (75%), T. Rubia (25%) | |
| ALMACENADO | Tiempo (semanas) | 4 semanas |
| DESTINO | Jardinería en general | |

3.2. MÉTODOS

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.

Las propiedades físicas se determinan siguiendo la metodología propuesta por Martínez Farré, Xavier en las “Actas de horticultura de las I jornadas de sustratos, S.E.C.H. 1992”.

3.2.1.1 Toma de muestras

3.2.1.1.1 *Toma de muestras a campo*

Para realizar los análisis de laboratorio se necesita obtener una muestra representativa del lote del que proviene el material. Para ello se debe recoger una cantidad lo suficientemente grande para que alcance para los diferentes ensayos.

Martínez F. X. Propone que la cantidad de la muestra tomada se ha de referir volúmen y no a peso debido a que la densidad aparente de los sustratos es muy variada. El volúmen de una muestra normal ha de tener como mínimo 10 litros. Para este trabajo se utilizaron sacos de 15 litros etiquetados y precintados, que se almacenaron en una cámara frigorífica entre 2 y 3º C para bajar la temperatura y frenar la actividad biológica de los microorganismos.

En el caso de que el material se encuentre acumulado en pilas alargadas, la forma de proceder a realizar el muestreo es la siguiente: se debe distribuir los diferentes puntos de muestreo a lo largo de la pila, evitando las partes altas, las bajas y los extremos de la misma. Con una pala de hoja ancha se realizan incisiones en los puntos de muestreo elegidos, retirando los primeros 30 ó 40 cm que están en contacto con la atmósfera y suelen estar resacos ó compactados, facilitando de esa forma la apertura de una ventana en la pila y poder extraer las diferentes muestras elementales, de forma alternada, en las diferentes ventanas ayudándose de una pala de hoja fina, que toma pequeños volúmenes favoreciendo una mayor representatividad, hasta completar los 15 litros de la muestra final (muestra a enviar al laboratorio).

Materiales:

- Pala de hoja ancha
- Pala de hoja fina
- Sacos rotulados
- Botas y guantes
- Hilo para atar los sacos



3.2.1.1.2 Toma de muestras en el laboratorio

Para los análisis de laboratorio, se extrae la muestra de la cámara de refrigeración donde está almacenada. Una vez en el laboratorio se vuelca el contenido de los sacos en recipientes apropiados etiquetados con tapa, luego se homogeneiza el material de forma manual ayudándose con un cucharón ó pala pequeña, teniendo cuidado de no alterar la estructura física del sustrato. Las muestras para los diferentes análisis se obtienen utilizando el método de la cuchara, que consiste en ir tomando al azar volúmenes pequeños de diferentes puntos del recipiente de homogeneización, hasta alcanzar la cantidad suficiente para cada análisis, resultando este método eficaz y representativo. Ya terminado el muestreo, se vuelve el material al saco correspondiente y se lleva nuevamente a la cámara frigorífica para mantener las condiciones del sustrato durante todo el período de estudio.

Materiales:

- Recipiente de homogeneización (1/muestra).
- Cuchara (1/muestra).
- Guantes y bata.



3.2.1.2 Determinación de la humedad y de la materia seca

La humedad o contenido hídrico de los sustratos es la medida del porcentaje de masa de agua perdida cuando la muestra se seca a $105^{\circ} \text{C} \pm 3^{\circ} \text{C}$, referida a la masa inicial. La materia seca se expresa como el porcentaje de residuo tras el secado de la muestra, referido asimismo a la masa inicial.

Para obtener la humedad de un sustrato, se tara una bandeja seca y luego se pesan unos 200 gramos de la muestra, con una precisión de 0.01 gramos. La bandeja con el sustrato se lleva a estufa de desecación por aire forzado a 105°C durante 24 horas, tiempo que asegura llegar a peso constante. Pasado ese tiempo se extrae la bandeja de la estufa, se deja enfriar a temperatura ambiente de laboratorio y de seguido se pesa. Las determinaciones se realizan por triplicado.

El resultado final de la humedad del material es la media aritmética de las tres determinaciones redondeadas a una cifra decimal. Los resultados de las réplicas no pueden desviarse más que $\pm (0.1\% + 0.005 \times \text{humedad en } \%)$ del valor medio.

Cálculo de Humedad:

$$\% H = ((P1-P2) / (P1-P0)) \times 100$$

Donde:

% H = porcentaje de humedad.

P0 = peso de la bandeja (g).

P1 = peso muestra húmeda + peso bandeja (g).

P2 = peso muestra seca a 105º C + peso de bandeja (g).

Una vez conocida la humedad se puede conocer la materia seca con la siguiente fórmula:

$$\% M.S = 100 - \%H.$$

Donde:

%M.S = porcentaje de materia seca.

%H = porcentaje de humedad.

Materiales:

- Recipiente de homogeneización (1/muestra)
- Estufa de desecación por aire forzado a 105ºC
- Balanza de precisión
- Bandejas de aluminio numeradas (3/muestra)
- Guantes y bata
- Cuchara



3.2.1.3 Determinación de la densidad real

La densidad real o de las partículas es la relación entre la masa del material sólido seco (a 105º C) y el volumen real ocupado por las partículas que lo forman, sin considerar el espacio poroso interparticular. Se expresa en g/cm³.

La densidad real se suele medir directamente mediante métodos picnométricos donde la masa se determina por gravimetría y el volumen a partir de la masa y la densidad de un fluido (agua, alcohol, benceno, tolueno, etc.) desplazado por la muestra. Las determinaciones picnométricas (Blake y Hartge, 1986) son las adecuadas cuando se trata de materiales inorgánicos ó con bajos contenidos en materia orgánica. En aquellos materiales que además presenten porosidad ocluída, las determinaciones picnométricas deben realizarse con muestras intactas y muestras pulverizadas (Martínez F.X., 1992).

En este trabajo se determinó la densidad real con el método más utilizado para los sustratos de cultivo con una elevada componente orgánica, propuesto por Martínez F. X. en las "Actas de las I Jornadas de Suatratos, S.E.C.H. 1992".

Se calcula la densidad real como una estimación indirecta a partir de la determinación de la materia orgánica y de las cenizas obtenidas en el proceso de calcinación. De acuerdo con de Boodt et al. (1974), la densidad real de los materiales orgánicos es de 1.45 g.cm^{-3} y la de las cenizas, como materia mineral, es de 2.65 g.cm^{-3} .

Cálculo:

$$\text{D.R.} = 100 / ((\% \text{M.O} / 1.45) + (\% \text{M.M} / 2.65))$$

Donde:

D.R = densidad real en g/cm^3

% M.O = porcentaje de materia orgánica

% M.M = porcentaje de materia mineral

3.2.1.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE

3.2.1.4.a. *Densidad aparente seca*

La densidad aparente o masa volumétrica se define como la relación entre la masa de material sólido seco (a 105°C) y el volumen que ocupa en unas condiciones determinadas, incluyendo el espacio poroso entre partículas. Se expresa generalmente en g/cm^3 ó en g/l .

Para determinar la densidad aparente de un sustrato se utiliza el método de M. De Boodt et al (1974). Este método define la densidad aparente como la relación entre el peso de materia seca (a 105°C) de un sustrato en gramos y el volumen útil del sustrato en cm^3 , siendo el volumen útil el que ocupa un sustrato previamente saturado en agua, sometido a una tensión de 10 cm de columna de agua en un anillo metálico de 7.7 cm de diámetro interior y de 4 cm de altura.

Procedimiento:

Se toma un anillo metálico de 7.7 cm de diámetro interior y de 4 cm de altura (lo llamamos aro II) se le mide su volumen con un pie de rey. Se miden 4 diámetros interiores y 4

alturas y con la media aritmética de los cuatro datos se calcula el volúmen del anillo mediante la siguiente función aritmética:

$$V = (\pi \cdot r^2) \times h$$

Donde:

V= volúmen del anillo II en cm³

R= media aritmética de 4 radios del anillo II en cm

H= media aritmética de 4 alturas del anillo II en c

Se enumera el anillo II y junto con un trozo de tela de nylon se pesa en una bandeja de aluminio limpia, seca y también numerada, obteniendo así la tara del conjunto (con una precisión de 0.01g). Una vez tarado, se reserva la bandeja numerada y se fija el nylon al aro II mediante una goma elástica a un extremo del anillo y en el otro extremo se coloca un anillo de igual diámetro interior y de 3 cm de altura fijándose con una cinta de goma elástica. Se llena con sustrato el conjunto de los dos anillos unidos utilizando una cuchara, evitando compactar. Seguidamente se colocan los anillos en un recipiente de plástico que se va llenando de agua destilada hasta que falten unos 2 mm para llegar a la superficie del anillo superior (anillo I). Se trata de saturar el sustrato con agua desde la base, desplazando lentamente el aire existente entre las partículas, humectando y saturando las fibras u otras partículas que lo constituyen. Hay que llenar gradualmente para evitar que el ascenso del agua por el interior del doble cilindro arrastre el sustrato y se derrame hacia el exterior. Esto puede suceder si el sustrato está muy seco y/o es difícil de humedecer. Si esto ocurriese, la saturación puede hacerse con agua templada, a unos 40-45º C. Se deja saturando durante 24 hs ó más, hasta conseguir la saturación total y obtener agua líquida por encima de la superficie del sustrato en el aro superior. Después de ese tiempo se traspasa el conjunto al baño de arena, que es un recipiente que contiene arena fina y que se utiliza para aplicar una tensión de 10 cm. Entre la superficie de arena y el punto de drenaje hay 10 cm, ya que esta tensión se considera una estimación aceptable de la situación del material en condiciones de capacidad de contenedor en el campo. Antes se debe saturar el baño de arena y colocar un papel de filtro en la superficie evitando que queden burbujas de aire entre el papel y la arena. El traspaso de los anillos dobles se debe hacer con sumo cuidado sin sacudirlos ni inclinarlos.

El conjunto se deja tensionando 48 hs, el tiempo necesario para llegar al equilibrio. Pasado este período, los anillos se extraen del recipiente y se separa el anillo I del anillo II, sacando la goma que los unía. Luego utilizando un cuchillo aserrado, se va cortando con cuidado el sustrato a ras del anillo II, ayudándose con una tijera si quedasen trozos de fibra que sobresalgan de la superficie cortada. Después se retira la gomita elástica que sujetaba la tela de nylon a la base del anillo II y se coloca, con suavidad y sin inclinarlo, el anillo con el sustrato y la tela en su respectiva bandeja tarada y numerada, reservada anteriormente, y se pesa el conjunto (peso C). Seguidamente se coloca el conjunto en la estufa de desecación por aire forzado durante 24 h a 105ºC. Pasado este tiempo se extrae el conjunto (anillo II, bandeja, tela de nylon y sustrato seco), se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa con una precisión de 0.01 g (peso A). Por cada muestra se realizan tres repeticiones.

Cálculos:

$$D.A = (A - B) / V$$

Donde:

D.A = densidad aparente en g/cm^3

A = peso de la muestra seca a $105^{\circ}C$ + tara en g

B = tara (bandeja + tela nylon + anillo II) en g

V = volúmen del anillo II en cm^3

Materiales:

- Recipiente de homogeneización (1/muestra)
- Recipiente de plástico para saturar anillos
- Baño de arena
- Estufa de desecación
- Balanza de precisión 0.01 g
- Papel de filtro
- Agua destilada
- Bandejas numeradas (3/muestra)
- Anillos metálicos (3 pares/muestra)
- Tela de nylon (3/muestra)
- Gomita elástica (3/muestra)
- Cinta de goma elástica (3/muestra)
- Cuchillo dentado y tijeras
- Guantes y bata



3.2.1.4.b. Densidad aparente húmeda

La densidad aparente húmeda se define como la relación entre la masa del material sólido húmedo, tensionado a 10 cm de columna de agua y el volúmen aparente que ocupa, incluyendo el espacio poroso entre partículas. Se expresa en g/cm^3 . Para obtenerla se utiliza la metodología descrita para la determinación de la densidad aparente.

Cálculos:

$$DAh = (C - B) / V$$

Donde:

DAh = densidad aparente húmeda en g/cm^3

C = peso de la muestra húmeda a tensión de 10 cm c.a. + tara en g

B = tara (bandeja + tela nylon + anillo II) en g

V = volúmen del anillo II en cm^3

3.2.1.5. DETERMINACIÓN DEL VOLÚMEN DE CONTRACCIÓN

El volúmen de contracción es la pérdida de volúmen que experimenta un sustrato que se encuentra en unas condiciones normalizadas de humedad cuando se somete a un proceso de desecación. Normalmente se expresa en % de pérdida de volúmen cuando el sustrato se seca a 105°C durante 24 horas, referido al volúmen aparente en unas condiciones de humedad determinadas. La contracción de volúmen de un sustrato informa sobre el grado de variación de su volúmen que puede producirse bajo condiciones de cultivo en ciclos de humectación-desecación.

Para determinar la contracción de un sustrato, se introduce un complemento en la metodología utilizada para determinar la densidad aparente descrita anteriormente. Una vez que el conjunto anillo-sustrato se ha secado a 105°C y pesado, con un pie de rey se mide la altura del cilindro seco en seis puntos diferentes y el diámetro del mismo en otros seis puntos a diferente altura. Con las medias aritméticas de altura y radio se calcula el volúmen del cilindro del sustrato seco.

La contracción del volúmen será:

$$C (\%) = ((V1-V2) / V1) \times 100$$

Donde:

C (%) = contracción de volúmen en porcentaje

V1 = volúmen del anillo II en cm³

V2 = volúmen del sustrato seco a 105°C en cm³

Materiales:

- Bandeja metálica redonda
- Pie de rey



3.2.1.6. DETERMINACIÓN DEL ESPACIO POROSO TOTAL

El espacio poroso total ó porosidad total es el volúmen de sustrato no ocupado por partículas sólidas, es decir, la relación entre el volúmen de poros y el volúmen aparente del sustrato, expresado en porcentaje en volúmen.

La porosidad total se estima a partir de las determinaciones de la densidad aparente (método de De Boodt) y de la densidad real, obtenida a partir del porcentaje de materia orgánica.

La fórmula que se utiliza es la siguiente:

$$\text{E.P.T (\%)} = ((1 - (\text{D.A}/ \text{D.R})) \times 100$$

Donde:

E.P.T (%) = espacio poroso total en porcentaje

D.A = densidad aparente en g/cm³

D.R = densidad real en g/cm³

3.2.1.7. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL SÓLIDO

El material sólido se calcula una vez obtenido el espacio poroso de la siguiente manera:

$$\text{M.S (\%)} = 100 - \text{E.P.T (\%)}$$

Donde:

M.S. (%) = material sólido en porcentaje

E.P.T (%) = espacio poroso total en porcentaje

3.2.1.8. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico de un sustrato es la clasificación de sus partículas en función de su tamaño. Se expresa como porcentaje de masa de cada fracción granulométrica en relación a la masa de la muestra inicial seca al aire. Se utilizan una serie de tamices con la siguiente luz: 25, 12.5, 6.3, 5, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.125 mm. Esta graduación permite obtener una información suficientemente precisa del posible comportamiento del sustrato.

Para una descripción gráfica precisa de la distribución del tamaño de las partículas, se utilizan con frecuencia las curvas acumuladas, que se obtienen representando para cada tamaño de partícula el porcentaje en peso de muestra que atraviesa el tamiz de dicho tamaño. En el eje de las ordenadas (y) se presenta el % en peso del material que pasa por un determinado tamiz y en el eje de abscisas (x), el logaritmo decimal de la luz de la criba correspondiente.

Además la construcción de la curva permite expresar la granulometría por medio de diversos índices numéricos:

- Valor D_x = es el tamaño del tamiz a través el cual pasan el X % de partículas, y se obtiene directamente de la curva acumulada. El más utilizado es el D_{50} que estima el tamaño medio de las partículas. También se utilizan D_{90} , D_{10} , D_{80} y D_{20} .
- Índice de gradación = también conocido como Índice de uniformidad, se emplea para describir la uniformidad de la distribución de tamaños de partícula, que influye mucho en la densidad de empaquetamiento y la estabilidad del material. Se expresa como la relación de tamaños de partículas grandes a otras más pequeñas; siendo los más utilizados el D_{90}/D_{10} , y el D_{80}/D_{20} . Cuanto más pequeño es su valor, menos amplio es el intervalo de tamaños, y más uniforme la distribución.

En la figura N° 6 se observan las curvas acumuladas de diferentes materiales del mismo diámetro de partícula (D_{50}), pero diferente uniformidad de la distribución de tamaños. Una curva muy vertical como la A indica que la distribución de tamaños de partícula es muy estrecha, por lo que los valores de D_{90} y D_{10} no serán muy diferentes.

A medida que aumenta la amplitud de tamaños de partícula y se reduce la uniformidad, la curva se tumba (curva B), aumentando la diferencia entre los valores de D_{90} y D_{10} .

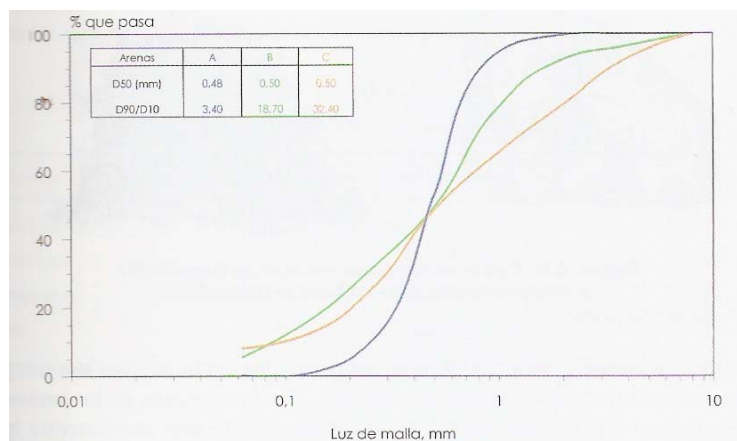


Figura N°6. Curvas acumuladas de diferentes materiales con igual tamaño $1/2$ de part.

Procedimiento:

Se toma 1 L de sustrato del recipiente de homogenización y se expande sobre un papel de filtro identificado. Cada muestra se realiza por triplicado. Se remueve cuidadosamente varias veces durante unos días para acelerar y homogenizar el secado, sin alterar el tamaño de las partículas. Una vez se encuentra el sustrato seco al aire, se lo traspa a un vaso de precipitado, previamente tarado, y se pesa el total de sustrato seco al aire con una precisión de 0.01 g. Se pesan uno a uno los distintos tamices y se los ensambla montando la torre de tamizado. Luego se vuelca el sustrato en la torre y se procede al tamizado durante 5 minutos a una amplitud máxima y con intermitencia (Martínez et al. 1990). Pasado el tiempo determinado, se extrae la torre y se pesan una a una las cribas con el material retenido, con la misma precisión que la muestra inicial. La pérdida de tamizado es la diferencia entre la suma de la masa de las distintas fracciones y la masa de la muestra inicial. Esta pérdida no puede

superar el 2 % de la materia seca inicial y la pérdida se añade a la fracción más fina. El porcentaje en peso de cada fracción, redondeado al 1 %, se expresa como la media aritmética de los porcentajes de las tres repeticiones.

Materiales:

- Papel de filtro (3/muestra)
- Recipiente de homogeneización
- Balanza de precisión
- Torre de tamizado
- Cribas de 25, 12.5, 6.3, 5, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.125 mm
- Vaso de precipitado de 1 L
- Cuchara para remover
- Guantes y bata
- Cepillo para limpiar cribas



3.2.1.9. DETERMINACION DE LAS RELACIONES AIRE –AGUA.

Para caracterizar las relaciones de aire-agua de los sustratos, se debe encontrar la distribución de fases (material sólido, agua y aire) en función del potencial matricial. El potencial matricial está relacionado con las fuerzas de adsorción y fuerzas capilares de la matriz del sustrato, ocasionadas por la tensión superficial del agua y el ángulo de contacto de las partículas sólidas, siendo función de la porosidad.

Los sustratos, como característica diferencial respecto a los suelos, pueden retener una gran parte de su contenido hídrico a bajas tensiones, por lo cual tensiones muy pequeñas serán suficientes para eliminar un gran volumen de agua de la porosidad, que se irá enriqueciendo en aire.

Las determinaciones consisten en la medida de la humedad volumétrica del sustrato a distintos valores del potencial matricial, expresados en términos de presión negativa o tensión (empleándose como unidades cm, pF, Pa ó KPa). Los rangos de tensión que se aplicaron en este trabajo fueron de 10, 50 y 100 cm de c.a., ya que normalmente el rango del potencial matricial donde se cultivan las plantas en sustrato y en contenedor va de 10 a 100 cm de c.a. Se estima que a 10 cm de c.a. el estado hídrico del sustrato se aproxima a capacidad de contenedor y a partir de 100 cm de c.a. el crecimiento se ve restringido debido a que el agua puede ser factor limitante, por estar retenida a una tensión que ya limita la disponibilidad de agua por el crecimiento de las células vegetales.

La metodología utilizada para la determinación de las relaciones aire-agua es la descrita por De Boodt et al. (1974). Esta metodología parte de una muestra previamente saturada, que se somete a diferentes tensiones predeterminadas. El agua liberada en estas condiciones sale del sustrato por drenaje a través de una placa porosa, siendo la presión de entrada de aire de la placa muy superior a la máxima presión de tensión aplicada, en este caso 10 kPa. Una vez se ha llegado a condiciones de equilibrio se determina por gravimetría el contenido de agua de la muestra. La representación gráfica de la humedad volumétrica del sustrato referida a la tensión aplicada se llama curva de liberación de agua, permitiendo observar como varía el contenido de agua del sustrato en función de su estado energético o tensión aplicada.

Fundamento:

Se utiliza un embudo con una placa porosa, que deja pasar el agua libremente y mantiene intacta la columna de agua a tensiones inferiores a 150 cm de columna de agua, conectada mediante un tubo flexible con un reservorio en contacto con el exterior. Se llena el sistema de agua y se mueve el reservorio verticalmente, se cumplirá el principio de los vasos comunicantes y el nivel de agua se mantendrá constante en el embudo y en el reservorio. El embudo tiene una doble llave en la parte inferior que según su posición, permite conectarlo con el sistema general (conexión interior embudo –tubo) ó bien con el exterior.

Si sobre la placa porosa del embudo se coloca la muestra del sustrato a analizar y se llena de agua todo el sistema, al bajar el reservorio, el sustrato se irá liberando agua hasta que la tensión que se le crea se iguale a la fuerza que la matriz del sustrato retiene el agua. Se habrá llegado al equilibrio del sistema. Aplicando tensiones sucesivas al embudo se podrá obtener la curva de liberación de agua del sustrato, representando en las abscisas la tensión aplicada y en las ordenadas el porcentaje de volumen aparente, es decir, el material sólido más el espacio poroso total.

Procedimiento:

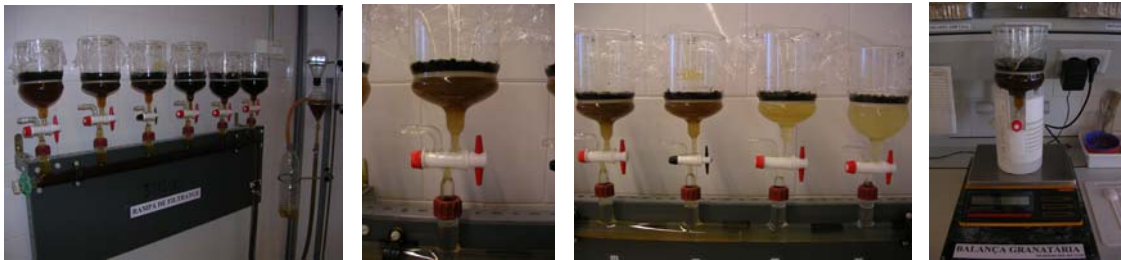
Para la determinación se utiliza una batería de embudos conectada al exterior mediante nivel reservorio. Al lado del equipo de succión se encuentra una regla graduada, fijada a la pared, que permitirá saber donde se colocará el nivel del reservorio, esto se hará moviéndose verticalmente, para tener el sistema una determinada tensión en cm de c.a. El 0 de la regla graduada está justo a nivel de la parte superior de la placa porosa de los embudos.

Utilizando una bomba de vacío se llena la parte inferior del embudo con agua destilada. Se debe tener en cuenta que no queden burbujas para evitar crear bolsas de aire entre la placa y el agua, que impedirían la buena formación del circuito continuo de agua.

Se tara el embudo, seco y limpio, con la parte inferior llena de agua y un trozo de film de PVC, que evitará la evaporación de agua del embudo y al que se le realizan perforaciones con el objetivo de evitar el vacío cuando se succione, ya que tiene que mantener la presión atmosférica. A continuación se coloca un posaembudos en la balanza y se lo tara a "0". Luego, con el método de la cuchara, se va colocando una capa de sustrato sobre la capa porosa del embudo de una altura aproximada de 2 cm, evitando compactar y se pesa el conjunto.

Inmediatamente se satura de agua destilada y se deja en la rampa durante 24 hs. Paralelamente se extrae una muestra de este sustrato para determinar su humedad (método explicado en el apartado correspondiente a la humedad).

Pasado este tiempo, se llena con agua destilada todo el sistema y el tubo que conecta el embudo con el reservorio, sin crear burbujas de aire en el sistema. Cuando esté lleno de agua y con los embudos conectados al exterior, se sube el reservorio hasta que comience a gotear agua destilada por el grifo de los embudos. Cuando hayan dejado de gotear se cierran las llaves del embudo, un cuarto de vuelta. Después se coloca el reservorio a la altura de la regla de 10 cm de c.a. y se giran las llaves otro cuarto de vuelta más, para conectarlas al circuito interior. Los embudos permanecerán en esta posición durante 24 hs, para así llegar al equilibrio, cuando se tensiona a 10 y a 50 cm de c.a. y sólo permanecerá 12 hs cuando se tensiona a 100 cm c.a. Pasados estos períodos de tiempo se girarán un cuarto de vuelta la llave del embudo para cerrarlos, se moverá el reservorio verticalmente hasta la altura que permitan los embudos sin vaciar el sistema de agua, se conecta el embudo con el exterior, se extrae de la rampa aflojando la rosca, se seca las gotas que queden y se pesa. Una vez pesado el embudo se coloca nuevamente en la rampa, se conecta nuevamente al sistema y se repite el proceso para tensionar a la nueva altura.



Cálculos:

Porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato a una tensión “i”=

$$\%Vi = ((Ci-A-D) / D) \times 100 \times D.A$$

Donde:

% Vi = porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato una vez aplicada la tensión “i”.

Ci = peso del embudo con la parte de abajo llena de agua, el film de PVC y el sustrato sometido a una tensión “i” una vez arribado al equilibrio (g).

A = peso del embudo limpio y seco, la parte inferior llena de agua y el film (g).

D = gramos de materia seca dentro dentro del embudo.

D.A = densidad aparente (g/cm³).

Cálculo de los gramos de materia seca dentro del embudo:

$$D = ((B - A) \cdot \%MS) / 100$$

Donde:

B = peso del embudo con la parte inferior llena de agua, el film de PVC y la muestra del sustrato dentro del embudo (g)

A = peso del embudo limpio y seco con la parte inferior llena de agua y film (g)

% MS = porcentaje de materia seca en el momento de llenar el embudo

Se obtiene:

$$\% MS = 100 - \%H$$

Siendo:

%H = el porcentaje de humedad de la muestra de sustrato en el momento de colocarlo en el embudo

3.2.1.8.a. Capacidad de Aire:

Cálculo:

$$C.A (\%) = POR (\%) - \%V10$$

Donde:

C.A (%) = porcentaje en volúmen de agua liberada al pasar de 0 a 10 cm de c.a. de tensión

POR (%) = porosidad total en porcentaje en volúmen

%V10 = porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato una vez aplicada la tensión de 10 cm. c.a

3.2.1.8.b. Aqua fácilmente disponible:

Cálculo:

$$A.F.D (\%) = \% V10 - \% V50$$

Donde:

A.F.D (%) = porcentaje de volúmen de agua liberada cuando la tensión aumenta de 10 a 50 cm c.a.

% V10 = porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato una vez aplicada la tensión de 10 cm. c.a.

% V50 = porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato una vez aplicada la tensión de 50 cm. c.a.

3.2.1.8.c. Agua de reserva:

Cálculo:

$$\text{A.R (\%)} = \% \text{ V50} - \% \text{ V100}$$

Donde:

A.R (%) = porcentaje de volúmen de agua liberada cuando la tensión aumenta de 50 a 100 cm c.a.

% V50 = porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato una vez aplicada la tensión de 50 cm. c.a.

% V100 = porcentaje de volúmen de agua que queda dentro del sustrato una vez aplicada la tensión de 100 cm. c.a.

3.2.1.8.d. Agua disponible:

Cálculo:

$$\text{A.D (\%)} = \text{A.F.D (\%)} + \text{A.R (\%)}$$

Donde:

A.D (%) = porcentaje de volúmen de agua liberada cuando la tensión aumenta de 10 a 100 cm c.a.

A.F.D (%) = porcentaje de volúmen de agua liberada cuando la tensión aumenta de 10 a 50 cm c.a.

A.R (%) = porcentaje de volúmen de agua liberada cuando la tensión aumenta de 50 a 100 cm c.a.

3.2.1.8.e. Agua difícilmente disponible:

Cálculo:

$$\text{A.D.D (\%)} = \% \text{ V100}$$

Donde:

A.D.D (%) = porcentaje de volúmen de agua que queda retenido en un sustrato sometido a una tensión de 100 cm c.a.

3.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.

Las propiedades físico-químicas se determinan siguiendo la metodología propuesta por Martínez Farré, Xavier para sustratos.

3.2.2.1 DETERMINACIÓN DE CENIZAS Y MATERIA ORGÁNICA

Esta determinación se realiza en sustratos orgánicos ó con una componente orgánica apreciable. Su realización en sustratos inorgánicos tiene poco sentido y en determinados casos puede ocasionar errores por pérdidas de materia a la temperatura de calcinación.

Las cenizas se expresan como el porcentaje de residuo obtenido al calcinar a $560^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ una muestra seca a 105°C referido a la masa seca inicial. El contenido en materia orgánica total es el porcentaje de pérdida de masa de la determinación anterior referida asimismo a la masa seca inicial.

Procedimiento:

Las determinaciones de cenizas y materia orgánica se realizan por triplicado en muestras de 2 g (precisión 0.001 g) de material seco a 105°C previamente molido, en molinillo de esferas de circonio, y reservado en recipientes etiquetados correspondientemente . Los crisoles se deben precalcinarse y dejar enfriar en desecador. Se taran los crisoles y luego se pesan los 2 g de sustrato molido, y se los lleva a la manta calefactora bajo la campana extractora para que los vapores tóxicos se vayan y no queden en la mufla. Una vez que el crisol deje de humear se traslada a la mufla cogiéndolo con las pinzas. La calcinación se realiza durante cuatro horas y se completa cuando las cenizas no contienen partículas negruzcas. Al finalizar las muestras se extraen y se dejan enfriar en desecador hasta temperatura ambiente. Ya enfriado los crisoles, se pesan las cenizas remanentes. El resultado se expresa como la media aritmética de las tres determinaciones siempre y cuando las réplicas posean una desviación menor del 5% del valor medio.

Materiales:

- Molinillo de esferas de circonio, modelo PM 100
- Mufla a 560°C , marca SELECTA, modelo SELECT-HORN
- Crisoles numerados (3/muestra)
- Balanza de precisión (0.001 g), marca SCALTEC, modelo SBA 31
- Manta calefactora a 250°C , marca SELECTA, modelo 3031410 (1000 mL)
- Desecador
- Campana extractora
- Pinzas, pincel y cucharilla



3.2.2.2. DETERMINACIÓN DEL pH

El pH indica la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en una solución, siendo una medida de la acidez o alcalinidad de la misma. La determinación del pH se mide en suspensión de una solución en concentración volumétrica de 1:2 (V/V), o sea 100 ml de sustrato fresco en 200 ml de agua destilada. Para saber cuantos gramos de sustrato hay en 100 ml se utiliza el método del cilindro de 500 mL a una presión de 10 g/cm^3 .

Procedimiento del cilindro de presión de 500 mL:

En primer lugar se homogeneiza bien el sustrato en un recipiente. El procedimiento consiste en llenar de sustrato fresco un cilindro previamente tarado de volumen conocido (500 mL), sometido a una presión de 10 g/cm^3 , que simula la presión que se ejerce cuando se llena un contenedor de sustrato. Esto se realiza con una cuchara y se le va aplicando presión a 1/3, 2/3 y 3/3 del volumen del cilindro con un émbolo hasta llegar a la marca de referencia. Una vez completo el cilindro, se pesa el conjunto cilindro-sustrato y se obtiene el peso en g de 500 mL de sustrato, restando el peso del cilindro. Luego se calcula el peso de 100 mL de sustrato fresco por la regla de tres simple.

Materiales:

- Recipiente de homogeneización
- Cilindro de presión de 500 mL
- Balanza de precisión
- Cuchara
- Calculadora



Procedimiento:

En primer lugar se debe calibrar el pH-metro con las soluciones tampón y como mínimo debe encenderse 30 minutos antes de realizar las mediciones. Luego se procede a llenar el frasco de vidrio, previamente tarado, con el peso de 100 mL de sustrato obtenidos por el método antes descrito. Después, con la ayuda de una probeta, se agrega 200 mL de agua destilada al frasco de vidrio para obtener una relación volumétrica de 1:2. Se remueve alternadamente con la varilla de vidrio durante $\frac{1}{2}$ hora y se deja descansar otra $\frac{1}{2}$ hora si son sustratos estabilizados, en caso contrario se debe dejar reposar 6 horas.

Para determinar el pH, se debe introducir el electrodo en la suspensión del frasco, realizando un ligero movimiento circulatorio, mover la perilla de lectura del pH y luego dejar quieto el recipiente hasta que se estabilice el valor resultante. Una vez registrado el valor se gira nuevamente la perilla a la posición inicial, se extrae el frasco y con la ayuda de agua destilada y papel se limpia el electrodo para la próxima lectura. Todo el procedimiento se realiza por triplicado.

3.2.2.3. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

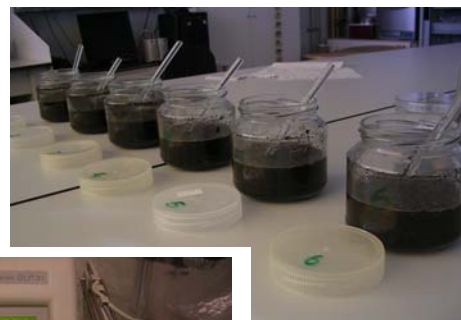
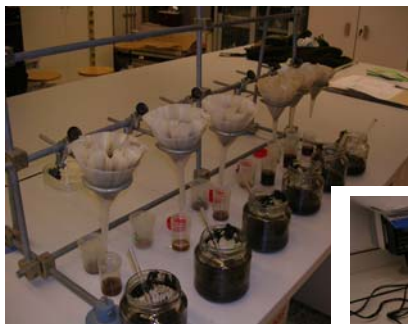
La C.E (conductividad eléctrica) se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sustancias en forma iónica) aproximada que posee el sustrato y se expresa en dS/m ó mS/cm. La C.E se obtiene a partir del filtrado de una solución de concentración volumétrica 1:2, a una temperatura de 25°C.

Procedimiento:

Una vez medido el pH en la suspensión, se vierte la misma en un embudo de filtración rápida con doble filtro de papel plegado. Se elimina los primeros mL del filtrado para evitar posibles contaminaciones, y se recoge el mismo en vasos de precipitado. El conductímetro se debe encender y calibrar, por lo menos ½ hora antes de las determinaciones. Ya obtenido un volumen suficiente de filtrado se procede a las mediciones, colocando el recipiente con el filtrado debajo del electrodo y del termómetro, obteniendo una lectura ya corregida a 25°C. Todo el procedimiento es por triplicado.

Materiales:

- PH-metro y soluciones tampó
- Conductímetro
- Cuchara para toma de muestras
- Frascos de vidrio (3/muestra)
- Probeta de 200 mL
- Vasos de precipitado pequeños (3/muestra)
- Varillas de vidrio (3/muestra)
- Embudos de filtración rápida (3/muestra)
- Rampa de filtrado
- Filtros de papel plegado (6/muestra)
- H₂O destilada
- Tijeras para cortar filtros



3.2.3 BIOENSAYO DE GERMINACIÓN.

El bioensayo de germinación o test de fitotoxicidad tiene como objetivo detectar la presencia de fitotoxinas ó en su caso de sustancias estimuladoras en los sustratos y también permite evaluar el grado de madurez de los productos orgánicos sometidos a procesos de compostaje. Se utilizan semillas de *Lactuca sativa* L., ya que esta especie es muy sensible a compuestos tóxicos y a altas C.E., y consiste en incubar 48 h en cámara de germinación las semillas en un extrato acuoso (1:1 de relación volumétrica) y compararlas con un testigo con agua destilada unicamente. Se mide el Nº de semillas germinadas y la longitud de las radículas.

Procedimiento:

Se coloca el sustrato en el recipiente de homogeneización y se remueve sin alterar la estructura del mismo con la ayuda de una cuchara. Luego se realiza el proceso del cilindro de presión, anteriormente explicado, para determinar la cantidad en g del material equivalente a 100 ml. Una vez calculado se pesa esta cantidad y se coloca en un frasco de vidrio numerado y se añade 100 ml de agua destilada para lograr una concentración volumétrica 1:1 y se remueve alternadamente durante dos horas con una varilla de vidrio (cuatro repeticiones por muestra de sustrato). Por otro lado se coloca una tela cuadrada de nylon limpia y seca, que realiza la función de filtro, sobre un embudo de filtración rápida, y al cabo de las dos horas se vierte el contenido del frasco sobre el embudo, cogiendo la tela por las cuatro esquinas y apretando con la varilla para abtener el extracto que se depositará en los vasos de precipitado numerados (se obtienen 4 extractos por muestra de sustrato). Después se preparan 4 cápsulas de Petri, cada una de ellas con un doble disco de papel de filtro en el fondo. Sobre el papel se distribuyen uniformemente 25 semillas de *Lactuca sativa* L. (25x4=100 semillas/ muestra de sustrato). Luego se recoge con una pipeta 6 ml de extracto del vaso de precipitado y se añade a la cápsula de Petri mojando todo el fondo (1 extracto por cápsula de Petri), cuidando que las semillas permanezcan en su lugar y no se amontonen. A continuación se realiza el mismo proceso con el testigo (4 cápsulas con doble papel de filtro y con 25 semillas cada una) añadiendo sólo agua destilada. Por último se llevan las cápsulas de Petri a la cámara de germinación a 20°C en condiciones de oscuridad y luego de transcurridas 48 hs de incubación se mide el número de semillas germinadas por cápsula y la longitud de cada radícula, teniendo cuidado en cerrar la cápsula entre mediciones para que no se sequen las radículas. Obtenidos estos resultados se calcula, para cada cápsula, el porcentaje de germinación, la longitud media de la radícula y el índice de germinación respecto al testigo.

Cálculos:

$$\text{Germinación (\%)} = \frac{\text{Nº semillas germinadas de la muestra} \times 100}{\text{Nº semillas germinadas del control}}$$

$$\text{Longitud radicular (\%)} = \frac{\text{longitud media radicular de la muestra} \times 100}{\text{Longitud media radicular control}}$$

$$\text{Índice de germinación. (\%)} = \frac{\% \text{ germ. muestra} \times \text{long. radicular muestra} \times 100}{\% \text{ germ. control} \times \text{long. media radicular control}}$$

Materiales:

- Recipiente de homogeneización
- Cuchara para toma de muestras
- Cilindro de presión de 500 mL
- Balanza de precisión
- Frascos de vidrio numerados (4/muestra)
- Varillas de vidrio
- Vasos de precipitado pequeños (4/muestra)
- Embudos de filtración rápida (4/muestra)
- Rampa de filtrado
- Tela cuadrada de nylon (4/muestra)
- H₂O destilada
- Probeta de 100 mL
- Pipeta de 10 mL
- Portapipeta de 10mL
- Cápsulas de Petri (4/muestra)
- Papel de filtro (2/cápsula)
- Pie de rey
- Recipiente y pinzas para coger semillas



3.2.4 TRATAMIENTO DE DATOS Y GRAFICACIÓN.

Para el tratamiento estadístico de cada parámetro se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) de un factor con 14 niveles que representan los distintos materiales analizados, con una $P \leq 0.05$.

Cuando el análisis de la varianza ha indicado efectos significativos del factor, se ha procedido a la separación de medias utilizando el test de Tuckey de rango studentizado HSD, con una $P \leq 0.05$.

Ambos análisis se han realizado mediante el paquete estadístico Statistical Analytic System (S.A.S).

Para analizar la relación entre parámetros, se han realizado distintas correlaciones determinando las rectas de correlación y sus correspondientes índices de determinación (R^2), utilizando las herramientas estadísticas del programa EXCEL de MICROSOFT.

Las gráficas se han realizado a los valores medios de los parámetros, para cada uno de los materiales, utilizando las herramientas de graficación del programa EXCEL de MICROSOFT.

Para la evaluación del grado de correlación que existe entre dos parámetros se ha utilizado la siguiente clasificación de los índices de determinación que muestra la tabla N° 2.

Tabla N° 2. Criterio de interpretación del grado de correlación entre parámetros

| R² | Clasificación |
|----------------------|----------------------|
| 0 - 0,25 | No hay correlación |
| 0,25 - 0,5 | Baja a moderada |
| 0,5 - 0,75 | Moderada a buena |
| > 0,75 | Buena a excelente |

Fuente: Tutorial básico de estadística



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

4.1.1. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES

Para una mejor visualización de la información se presenta la tabla N° 3 conjunta, que muestra el análisis estadístico de los porcentajes de masa que quedan en las distintas cribas en los diferentes materiales. De la misma se desprende que ninguno de los materiales presenta partículas superiores a 25 mm, o si las presentan no es significativo estadísticamente, ya que su porcentaje son < 1 %.

En cuanto al análisis estadístico de la fracción 25-12.5 mm, se observa que los composts CEDAR1 y CVER presentan un contenido mayor que la del resto de materiales, que son estadísticamente homogéneos.

El análisis de la varianza y la separación de medias arrojan diferencias entre los distintos materiales en cuanto a la fracción 12,5-6.3 mm. En orden de mayor a menor porcentaje, en primer lugar se encuentra CFORM2 formando un grupo homogéneo con CCORT1, CEDAR1 y CVER, que no presentan diferencias estadísticas significativas con CCORT2 y CESTIER2, presentando estos dos un contenido menor que CFORM2. A continuación aparece CVEG2, que es distinto a CCORT1, y que forma otro grupo homogéneo con los anteriores CEDAR1, CVER, CCORT2 y CESTIER2 que, a su vez, no se diferencia significativamente del siguiente grupo conformado por SUST, CESTIER1 y CFORM1 (que forman un grupo homogéneo con CVER, CCORT2, CESTIER2 y CVEG2) y que presentan menor contenido que CEDAR1. Seguidamente aparece CEDAR2 y REC, distintos a CVER, y que se agrupan estadísticamente con CCORT2, CESTIER2, CVEG2, SUST, CESTIER1 y CFORM1. Para finalizar aparecen CVEG3 y CVEG1, que se diferencian de CCOR2 y CESTIER2, y que forman otro grupo homogéneo con los anteriores CVEG2, SUST, CESTIER1, CFORM1, CEDAR2 y REC.

De la estadística de la fracción 6,3-5 mm de materiales estudiados, se desprenden también grandes diferencias y semejanzas entre ellos. En primer lugar aparece un grupo homogéneo entre sí formado por los composts de corteza (CCORT1 y CCORT2), seguido de un grupo formado por CEDAR1 y CESTIER2, sin diferencias estadísticas con CCORT2, pero con menor contenido que CCORT1. Siguiendo el orden de mayor a menor, aparecen CVER, CEDAR2, CFORM1, SUST, CVEG2 y REC, con contenido menor que CCORT2 i CEDAR1, que son homogéneos entre sí y sin diferencias significativas con el anterior en orden CESTIER2, y tampoco con el posterior CESTIER1, el cual presenta menor contenido que CESTIER2. A continuación se presenta el CFORM2, con menor contenido que CVER i CEDAR2, y que forma un grupo homogéneo estadísticamente con CFORM1, SUST, CVEG2, REC y CESTIER1. En último orden se ubican CVEG1 y CVEG3, homogéneos entre sí, los cuáles no se diferencian significativamente a CESTIER1 y CFORM2.

Del análisis de la fracción 5-2 mm se desprenden varios grupos homogéneos estadísticamente que se van enlazando entre ellos. En primer término, en orden de mayor a menor, se encuentran agrupados CCORT1, CFORM1, CCORT2 y CEDAR1, cuyos últimos tres no presentan diferencias significativas con el siguiente grupo homogéneo en orden formado por

Tabla Nº 3. Tabla con estadística conjunta de los porcentajes en peso de las diferentes fracciones granulométricas de los materiales.

| Material | Criba 25 mm (% p/p) | | Criba 12,5 mm (% p/p) | | Criba 6,3 mm (% p/p) | | Criba 5 mm (% p/p) | | Criba 2 mm (% p/p) | | Criba 1 mm (% p/p) | | Criba 0,5 mm (%) | | Criba 0,25 mm (% p/p) | | Criba 0,125 mm (% p/p) | | < 0,125 mm (% p/p) | | % part. > 1 mm | | % part. < 1 mm | | |
|----------|---------------------|---|-----------------------|---|----------------------|------|--------------------|-----|--------------------|------|--------------------|-----|------------------|----|-----------------------|----|------------------------|----|--------------------|----|----------------|----|----------------|----|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CCORT1 | 0,00 | a | 0,16 | b | 13,92 | ab | 9,35 | a | 36,48 | a | 16,05 | f | 11,95 | e | 5,95 | f | 3,04 | f | 3,1 | g | 75,96 | a | 24,04 | f | |
| CCORT2 | 0,00 | a | 0,08 | b | 9,02 | bcde | 8,03 | ab | 32 | ab | 16,96 | ef | 16,37 | cd | 10,49 | de | 3,95 | ef | 3,09 | g | 66,09 | b | 33,91 | e | |
| CEDAR1 | 0,85 | a | 4,99 | a | 12,11 | abc | 6,94 | b | 31,83 | ab | 22,15 | bc | 14,16 | de | 5,5 | f | 1,06 | g | 0,39 | i | 78,87 | a | 21,13 | f | |
| CEDAR2 | 0,00 | a | 0,01 | b | 3,63 | ef | 4,46 | cd | 24,29 | cdef | 20,93 | bc | 18,59 | bc | 13,15 | cd | 8,3 | c | 6,63 | d | 53,32 | cd | 46,68 | cd | |
| CESTIER1 | 0,00 | a | 1,39 | b | 5,07 | def | 3,41 | def | 27,44 | bcd | 27,01 | a | 20,57 | ab | 10,34 | e | 2,9 | f | 1,87 | h | 64,32 | b | 35,68 | e | |
| CESTIER2 | 0,01 | a | 0,41 | b | 8,36 | bcde | 6,01 | bc | 29,02 | bc | 20,02 | cd | 14,45 | de | 10,33 | e | 6,16 | d | 5,24 | f | 63,83 | b | 36,17 | e | |
| CFORM1 | 0,12 | a | 0,14 | b | 4,58 | def | 4,23 | cde | 33,37 | ab | 21,2 | bc | 15,64 | d | 9,77 | e | 5,42 | de | 5,53 | ef | 63,64 | b | 36,36 | e | |
| CFORM2 | 0,10 | a | 0,53 | b | 16,43 | a | 2,15 | ef | 27,15 | bcde | 18,01 | def | 14,68 | d | 9,88 | e | 5,77 | d | 5,3 | f | 64,37 | b | 35,63 | e | |
| CVEG1 | 0,05 | a | 0,03 | b | 0,85 | f | 1,52 | f | 17,71 | fg | 16,03 | f | 14,19 | de | 16,84 | ab | 17,31 | a | 15,47 | a | 36,19 | f | 63,81 | a | |
| CVEG2 | 0,01 | a | 0,23 | b | 6,21 | cdef | 3,98 | cde | 20,75 | defg | 19,7 | cde | 15,91 | d | 13,22 | c | 9,48 | c | 10,51 | b | 50,88 | d | 49,12 | c | |
| CVEG3 | 0,00 | a | 0,03 | b | 1,74 | f | 1,28 | f | 14,79 | g | 22,92 | b | 23,23 | a | 18,04 | a | 11,65 | b | 6,34 | de | 40,76 | ef | 59,24 | ab | |
| CVER | 0,87 | a | 4,93 | a | 10,11 | abcd | 4,54 | cd | 19,56 | fg | 20,33 | bcd | 21,7 | a | 13,14 | cd | 3,46 | f | 1,37 | hi | 60,34 | bc | 39,66 | de | |
| REC | 0,01 | a | 0,59 | b | 2,76 | ef | 3,85 | cde | 21,96 | def | 16,94 | ef | 15,24 | d | 17,02 | ab | 12,47 | b | 9,16 | c | 46,11 | de | 53,89 | bc | |
| SUST | 0,02 | a | 0,89 | b | 5,14 | def | 4,03 | cde | 20,66 | efg | 17,79 | def | 16 | cd | 14,52 | bc | 12,12 | b | 8,83 | c | 48,53 | d | 51,47 | c | |

CESTIER2, CESTIER1 y CFORM2, que presentan menor contenido que CCORT1, y que a su vez tampoco presentan diferencias significativas con CEDAR2, que ya se distingue de CFORM1, CCORT2 y CEDAR1. A continuación aparecen REC y CVEG2, con menor contenido que CESTIER2, y que no presentan diferencias significativas con CESTIER1 CFORM2 y CEDAR2. El siguiente en orden es el SUST, distinto a CESTIER1, y que forma grupo estadístico homogéneo con CFORM2, CEDAR2, REC y CVEG2. Luego se encuentra ubicado el grupo de CVER y CVEG1 que no presentan diferencias estadísticas con CEDAR2, REC, CVEG2 y SUST pero que presentan menor contenido que CFORM2. El material con menor contenido en esta fracción es CVEG3, que se distingue de CEDAR2 y REC, y que forma grupo estadísticamente homogéneo con CVEG2, SUST, CVER y CVEG1,

En la fracción de 2-1 mm se observa que CESTIER1 presenta un contenido significativamente mayor que el del resto de materiales. En segundo lugar se ubica un grupo homogéneo entre sí conformado por CVEG3, CEDAR1, CFORM1, CEDAR2 y CVER. A continuación se encuentran CESTIER2 y CVEG2, que se distinguen del CVEG3, y que forman grupo estadísticamente homogéneo con CEDAR1, CFORM1, CEDAR2 y CVER. Siguiendo el orden de mayor a menor, aparecen CFORM2 y SUST, con menor contenido que CADAR1, CFORM1 y CEDAR2, y que se agrupan estadísticamente con CVER, CESTIER2 y CVEG2. Seguidamente se encuentran CCORT2 y REC, los cuáles no presentan diferencias estadísticas significativas con los anteriores CVEG2, CFORM2 y SUST, aunque se distinguen de CVER y CESTIER2. El menor contenido en esta fracción se observa en CCORT1 y CVEG1, que se distinguen de CVEG2, siendo homogéneos entre sí y asimismo con CFORM2, SUST, CCORT2 y REC.

En la fracción 1-0,5 mm el análisis estadístico ordena los materiales de la siguiente manera: CVEG3, CVER y CESTIER1 formando un grupo homogéneo entre sí, seguido por CEDAR2, sin diferencia significativa con CESTIER1. Luego en orden aparece otro grupo formado por CCORT2 y SUST, sin diferencias significativas con CEDAR2, aunque distintos de CESTIER1. A continuación se encuentra un gran grupo homogéneo entre sí conformado por CVEG2, CFORM1, REC, CFORM2, CESTIER2, CVEG1, CEDAR1 y los anteriores CCORT2 y SUST. El menor contenido en esta fracción se presenta en CCORT1, sin diferencias estadísticas significativas con CESTIER2, CVEG1 y CEDAR1.

El análisis estadístico de la fracción 0,5-0,25 mm, muestra diferencias entre los diferentes materiales. De mayor a menor aparece en primera ubicación un grupo homogéneo estadísticamente entre sí formado por CVEG3, REC y CVEG1, seguido en orden por SUST, que no posee diferencias significativas con REC y CVEG1, y que también forma grupo homogéneo con los siguientes, con menor porcentaje, CVEG2, CEDAR2 y CVER. A su vez CEDAR2 y CVER, que se distinguen de CVEG1, son homogéneos estadísticamente con CCORT2, el cuál tampoco presenta diferencias significativas con el grupo homogéneo siguiente, conformado por CESTIER1, CESTIER2, CFORM2 y CFORM1, que presenta menor contenido que CVER. Por último se ubican los composts con menor contenido en esta fracción, CCORT1 y CEDAR1, homogéneos entre sí y diferentes significativamente del resto.

El análisis de la fracción de 0,25-0,125 mm indica diferencias más marcadas entre los materiales estudiados. CVEG1 presenta un contenido significativamente mayor que el del resto

de materiales. A continuación se observa un grupo homogéneo entre sí y diferente significativamente a todos, conformado por REC, SUST y CVEG3. Seguidamente se halla otro grupo, asimismo estadísticamente distinto de los demás, formados por CVEG2 y CEDAR2. Luego se encuentra otro grupo, homogéneo entre sí, conformado por CESTIER2, CFORM2 y CFORM1, este último sin diferencias significativas con CCORT2. Luego se presentan agrupados estadísticamente CVER, CCORT1 y CESTIER1, sin diferencias significativas con el anterior CCORT2, pero distintos de CFORM1. En último término, con el menor % de esta fracción y con diferencias estadísticas significativas con el resto de los materiales se posiciona el CEDAR1.

El % de partículas inferiores a 0.125 mm da como resultado lo siguiente: CVEG1 se diferencia estadísticamente del resto con el mayor contenido, seguido de CVEG2, también diferente significativamente de los demás materiales. Siguiendo el orden establecido aparece un grupo homogéneo entre sí y diferente al resto formado por REC y SUST. A continuación, con menor %, se ubica CEDAR2 y CVEG3, homogéneos estadísticamente entre sí. Después se posiciona CFORM1, sin diferencias significativas con el anterior CVEG3, y con el grupo siguiente formado por CFORM2 y CESTIER2. Siguiendo el orden, se diferencian significativamente del resto de materiales CCORT1 y CCORT2, homogéneos entre sí. Luego se agrupan estadísticamente CESTIER1 y CVER. Con el menor porcentaje de esta fracción se encuentra CEDAR1, que no se distingue estadísticamente del CVER.

El análisis estadístico del porcentaje de la fracción superior a 1 mm indica que con el mayor porcentaje de todos los materiales se distinguen CEDAR1 y CCORT1, homogéneos entre sí. A continuación se ubica un grupo homogéneo entre sí formado por CCORT2, CFORM2, CESTIER1, CESTIER2, CFORM1 y CVER. Luego, menor a CFORM1 y homogéneo a CVER se ubica CEDAR2. Seguidamente, diferentes a CVER y homogéneos a CEDAR2, se encuentran CVEG2, SUST y REC. En penúltima ubicación se halla CVEG3, menor a SUST y homogéneo estadísticamente a REC y al que posee el menor % de la fracción superior a 1 mm que es el CVEG1.

En cuanto a la naturaleza de los materiales, los compost de corteza (76-66%) presentan similares porcentajes de fracción superior a 1 mm, siendo de los que mayor % de fracción gruesa presentan, sólo superados por el CEDAR1 (78.9%), el cual presenta un 25% más que su par CEDAR2, esto seguramente causa de la naturaleza de las materias primas ya que el CEDAR2 posee un alto contenido de reciclado, lo que tiende a disminuir el tamaño de las partículas. Los compost de FORM (64.4-63.6%) y los de estiércol (64.3-63.8%) presentan similitudes entre sí y entre ellos en cuanto a fracción gruesa se refiere, mientras que el vermicompost es levemente inferior en fracción gruesa a su materia prima prima CESTIER2, lo que es de esperar por haber pasado por el proceso digestivo de la lombriz californiana. Los que poseen el menor % porcentaje de fracción mayor a 1 mm son los compost de restos vegetales, siendo el CVEG1 el que presenta el mayor % de partículas finas de todos los materiales.

En cuanto a los materiales complementarios presentan un porcentaje de partículas superior a 1 mm similares entre ellos y bajo, aunque el SUST levemente superior al REC. Ambos poseen un porcentaje apenas mayor de partículas finas (menor a 1 mm) que de gruesas.

4.1.2. D_{50} , D_{90}/D_{10} y D_{80}/D_{20}

Dada la complejidad de las fracciones analizadas, tanto por su número como por los resultados generalmente solapados de la separación de medias entre materiales, se ha considerado adecuado determinar el valor D_{50} , que indica el tamaño del tamiz por el que pasa el 50% de las partículas, como indicador del tamaño medio de las mismas. Asimismo, y con el objeto de predecir el grado de empaquetamiento de las partículas se han calculado los índices de gradación D_{90}/D_{10} y D_{80}/D_{20} . A medida que aumentan estos índices, aumenta el grado de empaquetamiento y por lo tanto de compactación de las partículas, de modo tal que un índice bajo indica homogeneidad en el tamaño de las partículas y un índice alto heterogeneidad en las mismas.

Tabla Nº 4. Valor D_{50} de los materiales

| Material | D_{50} | |
|----------|----------|----|
| CCORT1 | 1271.13 | a |
| CCORT2 | 976.11 | bc |
| CEDAR1 | 1213.30 | ab |
| CEDAR2 | 579.74 | de |
| CESTIER1 | 765.08 | cd |
| CESTIER2 | 859.39 | c |
| CFORM1 | 829.00 | c |
| CFORM2 | 900.16 | c |
| CVEG1 | 258.21 | f |
| CVEG2 | 523.80 | de |
| CVEG3 | 400.51 | ef |
| CVER | 754.55 | cd |
| REC | 436.11 | ef |
| SUST | 477.01 | ef |

Del análisis estadístico, se desprenden diferencias entre los materiales en cuanto al tamaño medio de las partículas. Ordenados de mayor a menor tamaño, en primer lugar se encuentra CCORT1 y CEDAR1, homogéneos estadísticamente entre sí, seguidos de CCORT2, que no posee diferencias estadísticas con CEDAR1. Seguidamente se agrupan estadísticamente CFORM2, CESTIER2, CFORM1, CESTIER1 y CVER, sin diferencias con CCORT2, pero diferentes a CEDAR1. A continuación aparece el grupo formado por CEDAR2, CVEG2, sin diferencias significativas con CESTIER1 y CVER y menor a CFORM1. Después se ubican SUST, REC y CVEG3, menores a CVER, quienes no presentan diferencias significativas con CEDAR2 y CVEG2. Con el menor tamaño medio de partículas se presenta CVEG1, sin diferencias estadísticas con SUST, REC y CVEG3.

En cuanto a la naturaleza de los composts, los de corteza presentan similares tamaños medio de partículas (1.27-0.97 mm), siendo los más gruesos de todos los analizados. Los compost de FORM (0.9-0.83 mm), similares entre si, poseen valores medianos, y los de estiércol (0,9 - 0,76 mm), algo más finos que los de FORM. Los compost más finos son los vegetales (0.52-0.25 mm), mientras que el vermicompost presenta un tamaño medio de partículas intermedio (0.75 mm), levemente inferior a los de estiércol. Los únicos tipos de composts que no se agrupan en relación al tamaño medio de partículas son los lodos EDAR,

siendo el CEDAR1 (1.21 mm) claramente más grueso que el CEDAR2 (0.56 mm). Este resultado deriva en gran medida al menor tamaño de la criba final en el caso del CEDAR2.

Los materiales complementarios SUST y REC, son muy ligeramente más gruesos que los composts vegetales.

Tabla N° 5. Índice de gradación D_{90}/D_{10} de los materiales

| Material | D_{90}/D_{10} | |
|----------|-----------------|----|
| CCORT1 | 26.18 | cd |
| CCORT2 | 28.93 | cd |
| CEDAR1 | 19.14 | cd |
| CEDAR2 | 33.16 | bc |
| CESTIER1 | 12.49 | d |
| CESTIER2 | 36.81 | bc |
| CFORM1 | 18.86 | cd |
| CFORM2 | 52.58 | b |
| CVEG1 | . | |
| CVEG2 | . | |
| CVEG3 | 31.93 | cd |
| CVER | 33.15 | bc |
| REC | 93.80 | a |
| SUST | 100.28 | a |

En cuanto al Índice de gradación D_{90}/D_{10} , se desprende que en primer lugar se encuentran SUST y REC, con diferencias estadísticas significativas con el resto de materiales y homogéneos entre sí. En segundo término se agrupan estadísticamente CFORM2, CESTIER2, CEDAR2 y CVER, no teniendo éstos últimos tres materiales diferencias significativas con el grupo homogéneo siguiente, de menor índice, formado por CVEG3, CCORT2, CCORT1, CEDAR1 y CFORM1. Con el menor índice se ubica CESTIER1, sin diferencias significativas con CVEG3, CCORT2, CCORT1, CEDAR1 y CFORM1, pero distinto a CVER. Este índice no tiene en cuenta los composts CVEG1 y CVEG2, al no poder calcularlos.

En relación a la naturaleza de los compost, sólo se observa homogeneidad en el índice de gradación D_{90}/D_{10} en los composts de corteza (28.9-26.2), que puede considerarse medio. Para el resto de compost se observa notables diferencias dentro de un mismo tipo. Un representante de cada uno de ellos, en el caso de los compost de lodos EDAR, de estiércol y de FORM, presenta un índice de gradación bajo, mientras que el otro es medio (CEDAR2 y CESTIER2) ó alto (CFORM2). El CVER presenta un índice inferior esperado al CESTIER2. En los compost de residuos vegetales como ya se ha comentado no se puede valorar su comportamiento para este parámetro, solamente el CVEG3 (31.9) que se considera con un índice de gradación medio, similar al CVER (33.15).

Según este índice, los materiales que presentan el tamaño de partículas más heterogéneo, con mucha diferencia, son los materiales complementarios SUST y REC (100.28-93.8), por lo tanto los que presentan mayor riesgo de empaquetamiento de las mismas.

Tabla Nº 6. Índice de gradación D_{80}/D_{20} de los materiales

| Material | D_{80}/D_{20} | |
|-----------------|-----------------------------------|----|
| CCORT1 | 7.49 | bc |
| CCORT2 | 6.65 | bc |
| CEDAR1 | 7.68 | bc |
| CEDAR2 | 8.68 | bc |
| CESTIER1 | 5.27 | c |
| CESTIER2 | 7.92 | bc |
| CFORM1 | 6.88 | bc |
| CFORM2 | 12.39 | b |
| CVEG1 | 24.20 | a |
| CVEG2 | 12.33 | b |
| CVEG3 | 6.86 | bc |
| CVER | 8.84 | bc |
| REC | 12.86 | b |
| SUST | 13.09 | b |

El análisis estadístico del Índice de gradación D_{80}/D_{20} , muestra menos diferencias entre materiales. El material que sobresale estadísticamente al resto es CVEG1. Luego en orden de mayor a menor, se agrupan de forma homogénea SUST, REC, CFORM2, CVEG2, CVER, CEDAR2, CESTIER2, CEDAR1, CCORT1, CFORM1, CVEG3 y CCORT2. Al final, con el menor índice, se encuentra CESTIER1, el cual no se diferencia estadísticamente con CVER, CEDAR2, CESTIER2, CEDAR1, CCORT1, CFORM1, CVEG3 y CCORT2.

La información que se puede obtener a partir de este índice, es distinta a la obtenida con el D_{90}/D_{10} . Los compost de corteza, los de EDAR y los de estiércol presentan un índice de gradación D_{80}/D_{20} muy bajo y muy similar entre ellos (8.7-5.3). El CFORM1 (6.9) presenta un índice similar a los anteriores composts, mientras que el CFORM2 (12.3) es algo más heterogéneo. En los composts vegetales se observa la mayor heterogeneidad en estos índices, con un representante con muy bajo índice (CVEG3), otro con índice medio (CVEG2) y CVEG1 con índice más alto de todos los materiales analizados. Los materiales complementarios REC y SUST presentan una heterogeneidad similar entre ellos (12.9-13), levemente superior a CFORM2 y a CVEG2 y la mitad de CVEG1.

4.1.3. CURVAS ACUMULADAS

A continuación se presentan las diferentes curvas acumuladas de las diferentes fracciones granulométricas de los materiales analizados, agrupados según su tipología. Esta representación permite visualizar gráficamente el tamaño medio de las partículas (luz de malla por la que pasa el 50 % de las partículas en peso), las diferencias en la distribución granulométrica de los materiales comparados (según el perfil de la curva) y la mayor ó menor heterogeneidad del tamaño de las partículas en relación a la pendiente de las mismas (menor pendiente cuanto más heterogéneo).

| Parámetro | CCORT1 | CCORT2 |
|----------------------------------|---------|--------|
| D ₅₀ (μm) | 1271.13 | 976.11 |
| D ₉₀ /D ₁₀ | 26.18 | 28.93 |
| D ₈₀ /D ₂₀ | 7.49 | 6.65 |

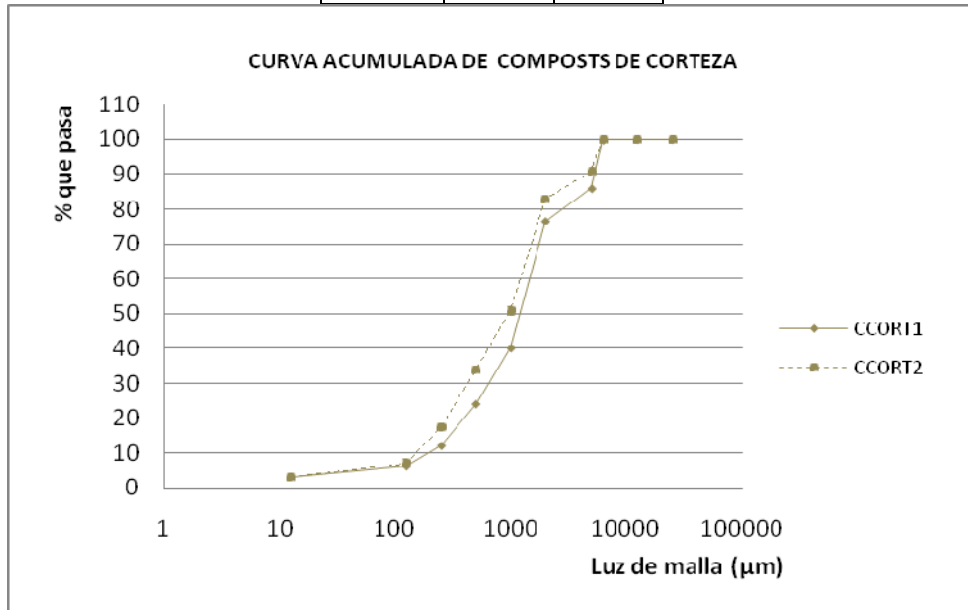


Figura N° 7. Curva acumulada de los composts de corteza.

| Parámetro | CEDAR1 | CEDAR2 |
|----------------------------------|---------|--------|
| D ₅₀ (μm) | 1213.30 | 579.74 |
| D ₉₀ /D ₁₀ | 19.14 | 33.16 |
| D ₈₀ /D ₂₀ | 7.68 | 8.68 |

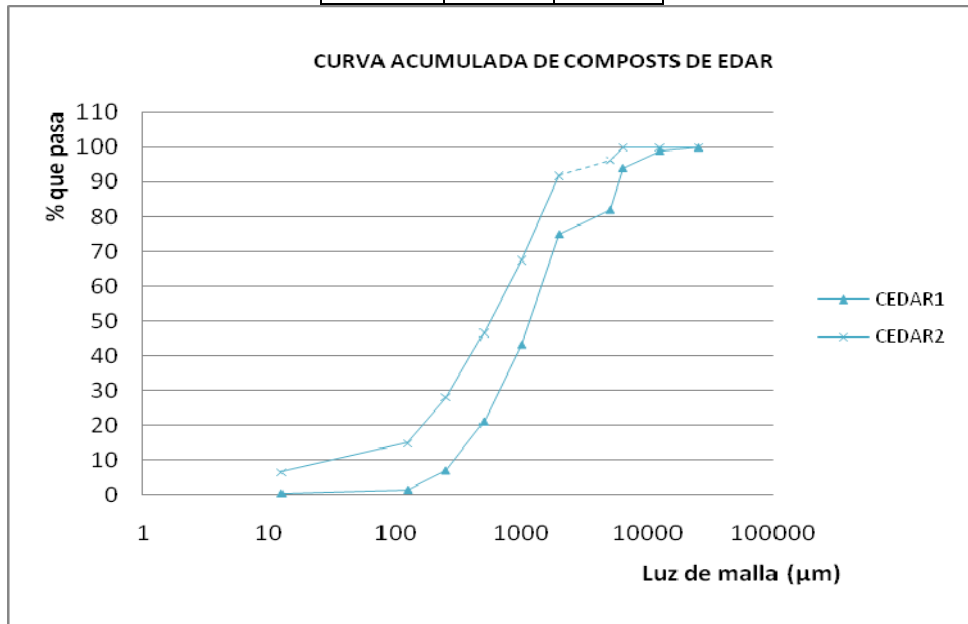


Figura N° 8. Curva acumulada de los composts de EDAR.

| Parámetro | CESTIER1 | CESTIER2 | CVER |
|----------------------------------|----------|----------|--------|
| D ₅₀ (μm) | 765.08 | 859.39 | 754.55 |
| D ₉₀ /D ₁₀ | 12.49 | 36.81 | 33.15 |
| D ₈₀ /D ₂₀ | 5.27 | 7.92 | 8.84 |

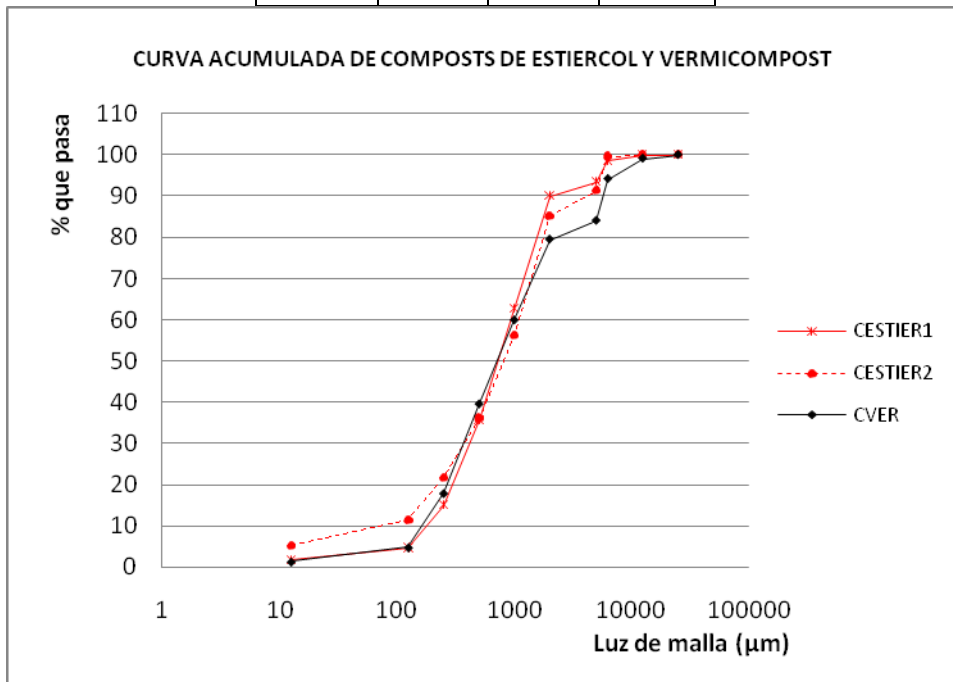


Figura Nº 9. Curva acumulada de los composts de estiércol y vermicompost.

| Parámetro | CFORM1 | CFORM2 |
|----------------------------------|--------|--------|
| D ₅₀ (μm) | 829.00 | 900.16 |
| D ₉₀ /D ₁₀ | 18.86 | 52.58 |
| D ₈₀ /D ₂₀ | 6.88 | 12.39 |

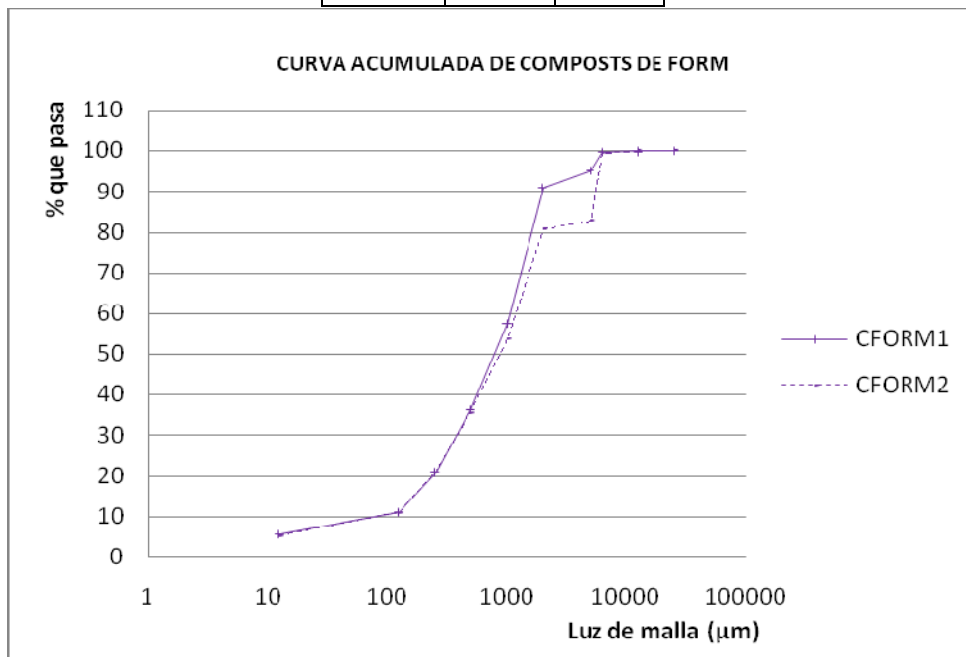


Figura Nº 10. Curva acumulada de los composts de FORM.

| Parámetro | CVEG1 | CVEG2 | CVEG3 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|
| D ₅₀ (μm) | 258.21 | 523.80 | 400.51 |
| D ₉₀ /D ₁₀ | . | . | 31.93 |
| D ₈₀ /D ₂₀ | 24.20 | 12.33 | 6.86 |

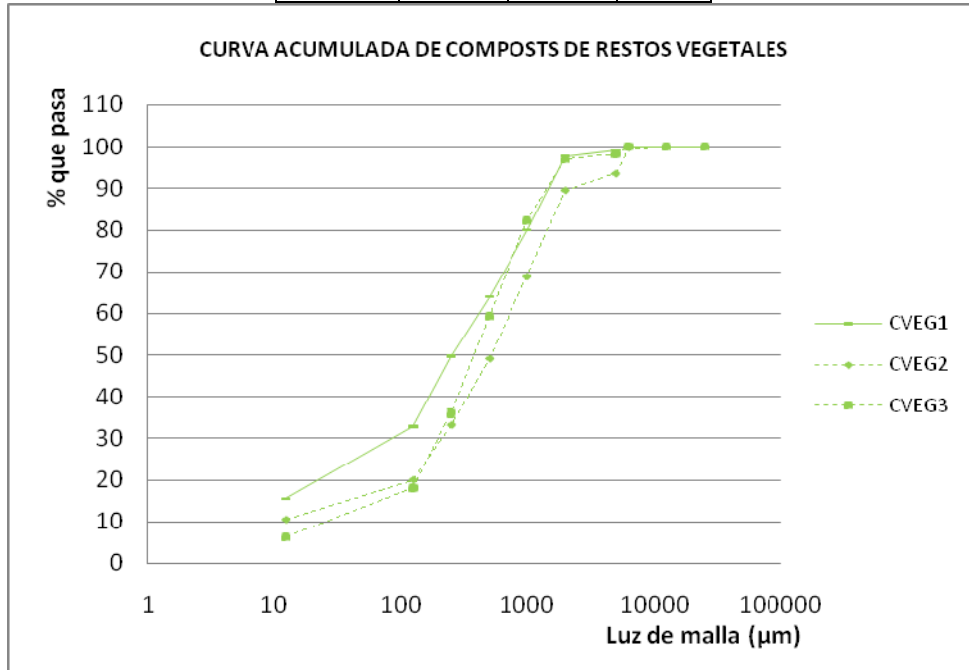


Figura Nº 11. Curva acumulada de los composts de restos vegetales.

| Parámetro | REC | SUST |
|----------------------------------|--------|--------|
| D ₅₀ (μm) | 436.11 | 477.01 |
| D ₉₀ /D ₁₀ | 93.80 | 100.28 |
| D ₈₀ /D ₂₀ | 12.86 | 13.09 |

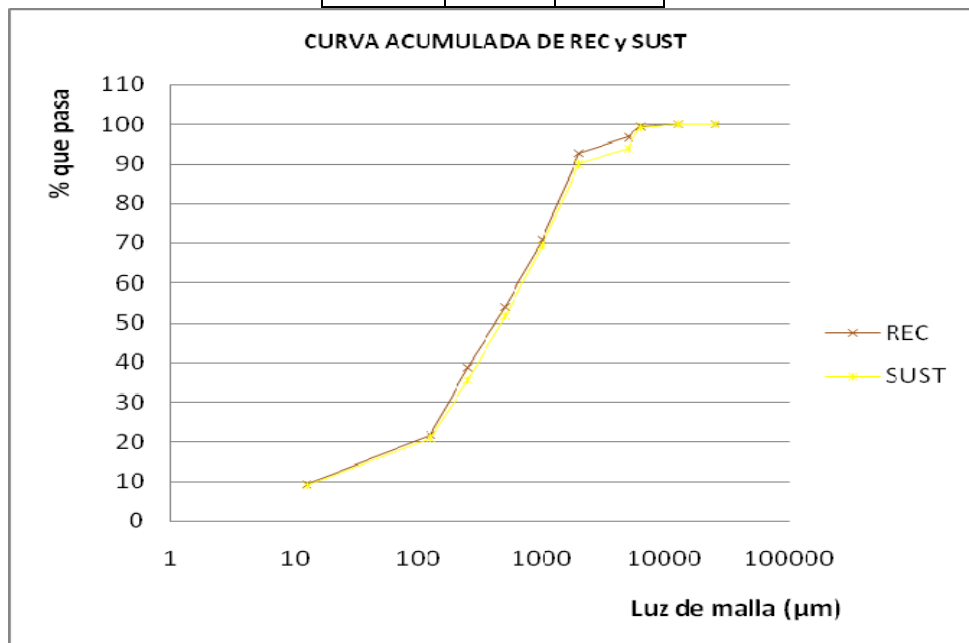


Figura Nº 12. Curva acumulada de REC y SUST.

De las anteriores gráficas (figuras Nº 7 a 12) se puede observar que los dos representantes de compost de corteza y los dos representantes de compost de estiércol, presentan perfiles muy similares. Este autogrado de solapamiento del perfil de las curvas indican una similitud en la distribución del tamaño de partículas en cada caso. En el caso de los compost de FORM el solapamiento entre los dos representantes es de menor grado en las fracciones más pequeñas de las partículas.

Contrariamente se observa un rango de variación mayor en los compost de lodos EDAR y en los compost de restos vegetales, de acuerdo a las diferencias observadas, tanto en la distribución de las fracciones granulométricas como en los índices de gradación D_{90}/D_{10} y D_{80}/D_{20} , anteriormente comentadas.

En el caso del vermicompost, el proceso que realiza la lombriz altera las propiedades del material original, en este caso el compost de estiércol CESTIER2, cambiando el perfil de la curva otorgándole más pendiente, lo que significa mayor homogeneidad en el tamaño de las partículas otorgándole menor grado de empaquetamiento.

Por otro lado, los dos materiales complementarios SUST y REC, presentan un altísimo grado de solapamiento, mostrando características muy similares.

Para poder visualizar mejor el conjunto de materiales analizados se presenta a continuación una gráfica conjunta de las curvas acumuladas (figura Nº 13).

De esta gráfica se deduce que la mayor parte de los materiales analizados presentan una curva acumulada similares, que deriva en parte, del tamizado en el afinado final (tromeles de luz entre 10 a 18 mm). De este perfil común se alejan los materiales a lo que se han detectado anomalías granulométricas y sus propiedades derivadas (tamaño medio de partículas, % de partículas >1mm, contenido de agua a 1 kPa, CA, etc.) en relación con los materiales de origen: CEDAR1 en relación a CEDAR2 y CVEG1 en relación a CVEG2 y CVEG3.

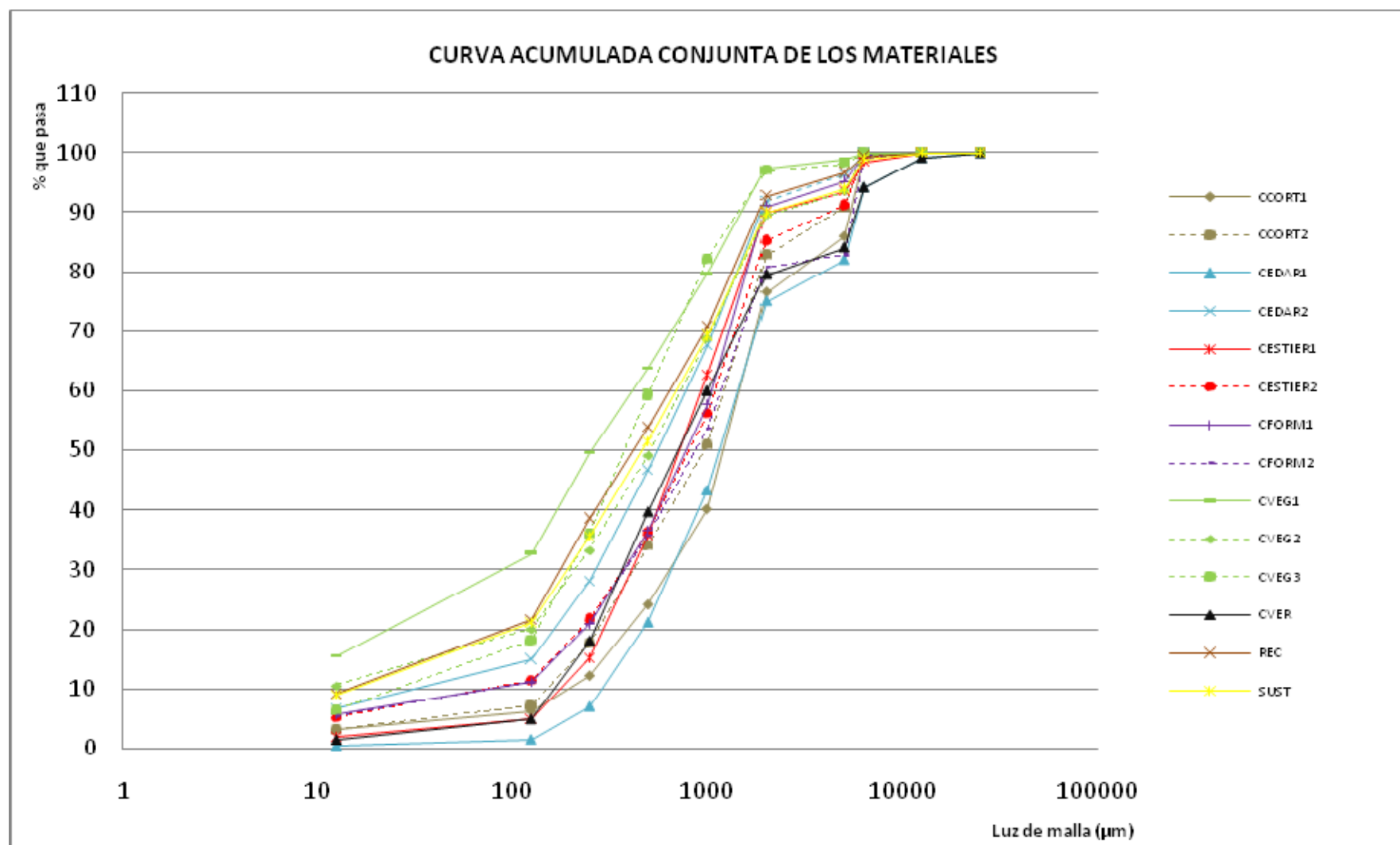


Figura Nº 13. Curva acumulada conjunta de todos los materiales

4.2. ANÁLISIS DE LA PROPIEDADES FÍSICAS

4.2.1. DENSIDAD REAL

Tabla N° 7. Densidad real de los materiales

| Material | D.R. (g/cm ³) | |
|----------|---------------------------|---|
| CCORT1 | 1.53 | f |
| CCORT2 | 1.68 | e |
| CEDAR1 | 1.83 | c |
| CEDAR2 | 1.75 | d |
| CESTIER1 | 1.81 | c |
| CESTIER2 | 1.83 | c |
| CFORM1 | 1.70 | e |
| CFORM2 | 1.68 | e |
| CVEG1 | 2.04 | a |
| CVEG2 | 1.96 | b |
| CVEG3 | 2.06 | a |
| CVER | 1.84 | c |
| REC | 2.05 | a |
| SUST | 1.95 | b |

En primer lugar, con una DR por encima de 2 g/cm³ se encuentra el grupo homogéneo entre sí y significativamente diferente del resto conformado por CVEG3, REC y CVEG1. A continuación, con menor DR, se posiciona el grupo de CVEG2 y SUST, homogéneos así mismos y distintos al resto, siguiéndoles en orden el grupo formado por CVER, CEDAR1 y los compost de estiércol CESTIER2 y CESTIER1, también homogéneos y distintos al resto. Luego se diferencia CEDAR2, seguido por otro grupo homogéneo, conformado por CFORM1, CCORT2 y CFORM2, distinto a todos. Con la menor DR, con diferencias estadísticas significativas, se encuentra el CCORT1 con una densidad real típica de los materiales orgánicos.

En cuanto a la naturaleza de los composts se observa que los mayores valores de DR se presentan en los tres compost vegetales y por el contrario los valores más bajos los presentan los composts de corteza y los de FORM. Los composts de estiércol poseen DR muy agrupadas y medias, perteneciendo a ese grupo también los de lodos de depuradora, aunque en este caso existe mayor variación entre los dos representantes que en los demás tipos de composts. El valor del vermicompost es medio y similar al de los compost de estiércol, debido a que de uno de ellos proviene (CESTIER2). Los materiales complementarios SUST y REC presentan DR medias y muy similares, aunque estadísticamente se distinguen, y están totalmente en consonancia con su contenido en materia orgánica (bajos).

Las variaciones en la DR de los materiales analizados viene condicionada por el contenido en materia orgánica, como se puede observar en la excelente correlación lineal negativa entre estos dos parámetros (Fig N° 14), donde se aprecia que los valores más altos de MO se corresponden a los valores más bajos de DR.

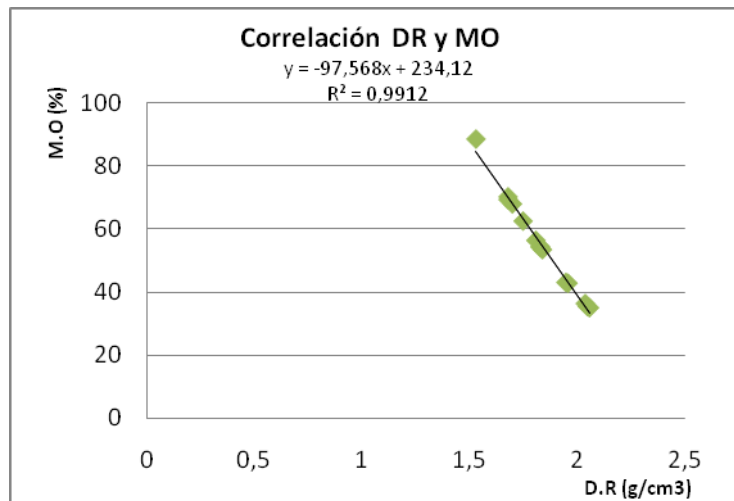


Figura Nº 14. Correlación entre los parámetros DAS y DR

4.2.2. DENSIDAD APARENTE SECA

Tabla Nº 8. Densidad aparente seca de los materiales

| Material | D.A.S (g/cm³) | |
|----------|---------------|----|
| CCORT1 | 0.18 | f |
| CCORT2 | 0.23 | e |
| CEDAR1 | 0.28 | d |
| CEDAR2 | 0.31 | d |
| CESTIER1 | 0.23 | e |
| CESTIER2 | 0.28 | d |
| CFORM1 | 0.24 | e |
| CFORM2 | 0.20 | ef |
| CVEG1 | 0.52 | a |
| CVEG2 | 0.38 | c |
| CVEG3 | 0.43 | b |
| CVER | 0.30 | d |
| REC | 0.56 | a |
| SUST | 0.37 | c |

En primer lugar, con mayor densidad aparente seca, se encuentra un grupo estadísticamente homogéneo y diferente al resto formado por CVEG1 y REC. En segundo término, se diferencia el CVEG3, seguido de un grupo estadísticamente homogéneo diferente al resto formado por CVEG2 y SUST. A continuación se diferencia otro grupo homogéneo entre sí y diferente estadísticamente al resto, conformado por CEDAR2, CVER, CEDAR1 y CESTIER2. Siguiendo el orden establecido, aparece un grupo estadísticamente homogéneo compuesto por CFORM1, CCORT2, CESTIER1 y CFORM2. Con la menor Das se encuentra el CCORT1, distinto al CESTIER1, sin diferenciarse estadísticamente del CFORM2.

En cuanto al efecto de la naturaleza de las materias primas de los composts en la DAS, se observa que los de restos vegetales se presentan agrupados y con los mayores valores, atribuyéndose esto en parte al menor contenido en materia orgánica, tal como se ve reflejado en el correlograma de la figura N° 15, donde se observa el efecto de la materia orgánica sobre la densidad aparente seca. En el otro extremo con las DAS menores, se presentan los composts de corteza y de FORM, condicionados también en buena parte por su contenido en materia orgánica. También se incluye en este grupo el CESTIER1, que no viene determinado tanto por presentar un contenido alto de materia orgánica, si no por el tamaño medio de las partículas y a la mayor riqueza en la fracción superior a 1 mm, que condiciona un menor grado de empaquetamiento y una estructura más esponjosa.

Los compost de lodos EDAR se presentan también con densidades aparentes similares y parecidas al otro compost de estiércol (CESTIER2) y al vermicompost que deriva del mismo. Esta posición intermedia viene condicionada principalmente por el contenido medio de materia orgánica.

Los materiales complementarios poseen DAS bastante distintas, siendo mayor la del recebo, dado su bajo contenido en materia orgánica, mientras que en el SUST, la DAS es similar a la de los composts vegetales, en parte por su relativo bajo contenido en materia orgánica, pero también influido por su alto porcentaje en fracción fina.

Lo dicho anteriormente se demuestra gráficamente con las altas correlaciones lineales negativas que presenta la materia orgánica con los parámetros DAS y tamaño de partículas superiores a 1 mm, como muestra la figura N° 16.

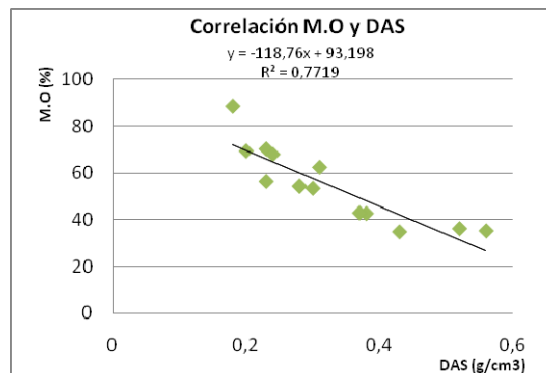


Figura N° 15. Correlación entre los parámetros MO y DAS

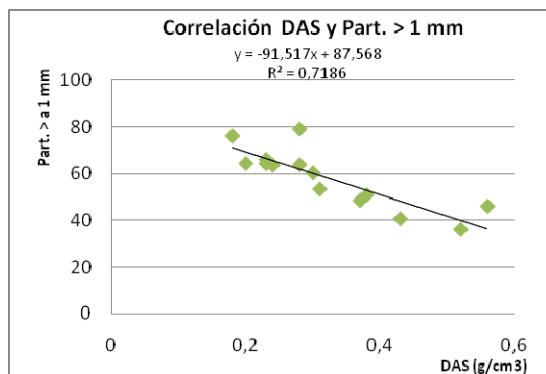


Figura N° 16. Correlación entre los parámetros DAS y Part > 1 mm

4.2.3. DENSIDAD APARENTE HÚMEDA

Tabla Nº 9. Densidad aparente húmeda de los materiales

| Material | D.A.Hum. (g/cm ³) | |
|----------|-------------------------------|----|
| CCORT1 | 0.60 | h |
| CCORT2 | 0.64 | h |
| CEDAR1 | 0.82 | ef |
| CEDAR2 | 0.74 | fg |
| CESTIER1 | 0.73 | g |
| CESTIER2 | 0.79 | fg |
| CFORM1 | 0.56 | hi |
| CFORM2 | 0.51 | i |
| CVEG1 | 1.11 | a |
| CVEG2 | 0.87 | de |
| CVEG3 | 0.98 | bc |
| CVER | 0.78 | fg |
| REC | 1.06 | ab |
| SUST | 0.92 | cd |

En cuanto a la densidad aparente húmeda, los materiales se ordenan de mayor a menor, de la siguiente manera: Con una mayor densidad aparente húmeda se encuentra el grupo homogéneo formado por CVEG1 y REC, seguido por CVEG3, homogéneo a REC y distinto a CVEG1. A continuación aparece SUST, distinto a REC y homogéneo a CVEG3, que a su vez no se diferencia del siguiente CVEG2, diferente a CVEG3. A continuación se haya el CEDAR1, menor que SUST, sin diferencias con CVEG2. Luego se encuentra un grupo homogéneo estadísticamente formado por CESTIER2, CVER y CEDAR2, de menor densidad que CVEG2, los cuáles no poseen diferencias CEDAR1, ni con CESTIER1 de menor densidad. Después se encuentran, menores a CESTIER1, los compost de corteza CCORT2 y CCORT1 conjuntamente con CFORM1, el cual no posee diferencias significativas con el CFORM2, que presenta la menor densidad aparente húmeda.

La influencia del tipo de compost en la DAH es muy similar a la descrita para la DAS, como se observa en el correlograma de la figura Nº 17. Se puede observar que los composts están bien agrupados según la tipología y origen de sus materias primas. Los composts vegetales son los que presentan valores más altos y los compost de FORM y de cortezas, los más bajos. Presentando, como ocurría con la DAS, valores medios y similares entre sí, están los composts de lodos, los de estiércol y el vermicompost derivado de uno de ellos.

Los materiales complementarios presentan, también, idéntico comportamiento al descrito en la DAS, atribuible a los mismos argumentos.

Hay que tener en cuenta que la DAH reúne dos componentes, la DAS y la humedad que retienen las partículas de la matriz del sustrato a una tensión de 1 kPa. Al aumentar la densidad aparente, aumenta también la retención de agua por disminuir la porosidad total y el tamaño de los poros. Esto se refleja en los siguientes correlogramas (fig. Nº 18 y Nº 19).

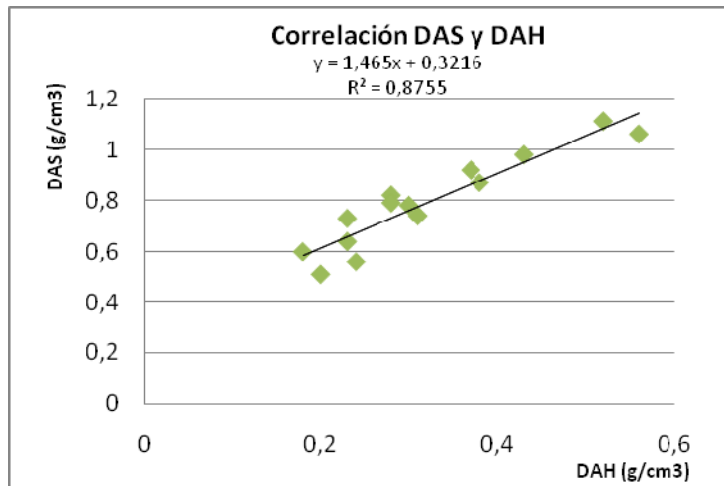


Figura Nº 17. Correlación entre los parámetros DAS y DAH

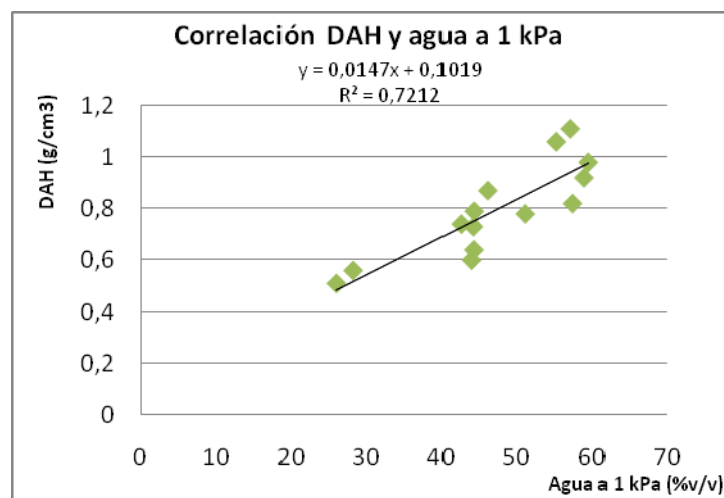


Figura Nº 18. Correlación entre los parámetros DAH y agua a 1 kPa de tensión

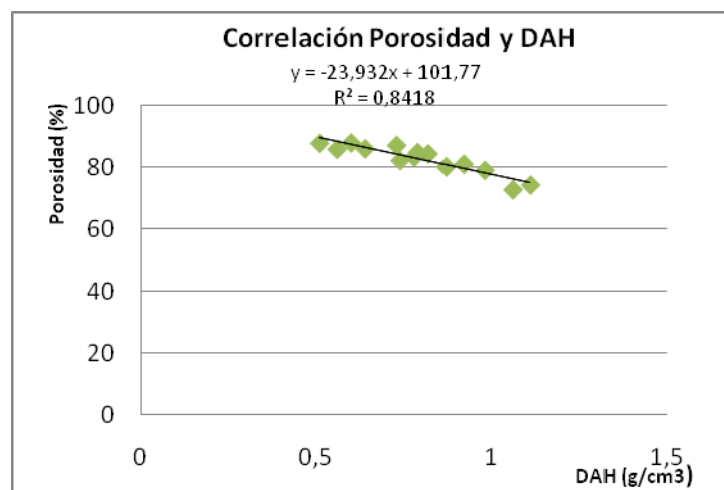


Figura Nº 19. Correlación entre los parámetros porosidad y DAH

4.2.4. VOLÚMEN DE CONTRACCIÓN

Tabla Nº 10. Volúmen de contracción de los materiales

| Material | V.C. (%) | |
|----------|----------|------|
| CCORT1 | 10.66 | ef |
| CCORT2 | 11.60 | def |
| CEDAR1 | 26.77 | a |
| CEDAR2 | 6.49 | f |
| CESTIER1 | 10.02 | ef |
| CESTIER2 | 13.14 | cde |
| CFORM1 | 11.56 | def |
| CFORM2 | 9.66 | ef |
| CVEG1 | 11.95 | cdef |
| CVEG2 | 8.55 | ef |
| CVEG3 | 17.60 | bc |
| CVER | 21.78 | ab |
| REC | 10.54 | ef |
| SUST | 17.29 | bcd |

La interpretación de los resultados se realiza según criterios que muestra la siguiente tabla:

Tabla Nº 11. Clasificación del volúmen de contracción

| V.C. (%) | Clasificación |
|----------|---------------|
| 0-10 | Muy bajo |
| 10-20 | Bajo |
| 20-30 | Medio |
| >30 | Alto |

El CEDAR1 y CVER son los materiales que mayormente se contraen formando un grupo estadístico homogéneo, clasificándose ambos de contracción alta según la tabla de referencia usada. A continuación se puede observar distintos grupos homogéneos que se van enlazando entre ellos de la siguiente manera: CVEG3 (moderada) y SUST (moderada), menores a CEDAR1, forman un grupo homogéneo con CVER; siguiendo el orden, aparecen CESTIER2 y CVEG1, menores a CVER y homogéneos a CVEG3 y a SUST, todos ellos clasificados con VC moderado. Seguidamente se encuentran CCORT2 y CFORM1, menores a CVEG3, sin diferencias con SUST, CESTIER2 y CVEG1 todos ellos superando la barrera de 10 considerándolos de moderado VC. Luego se observa un grupo homogéneo, menor a SUST, formado por CCORT1, REC, CESTIER1, CFORM2 y CVEG2, homogéneos a CESTIER2, CVEG1, CCORT2, CFORM1, todos ellos de VC moderada menos CFORM2 y CVEG2 que se clasifican de bajo VC. Por último con el menor VC, clasificándose como bajo, se halla CEDAR2, homogéneo a CVEG1, CCORT2, CFORM1, CCORT1, REC, CESTIER1, CFORM2, CVEG2 y CEDAR2.

El volumen de contracción de los compost analizados, en la mayor parte de los casos, son muy similares y bajos ó muy bajos, aunque estadísticamente muestran diferencias. Los mayores valores, aunque medios ó bajos, los presentan el vermicompost y el CEDAR1. El

volumen de contracción aumenta con el contenido de sustancias húmicas presentando una variación importante en volumen en estado de hidratación y deshidratación. Los resultados globales indican que ninguno de los materiales analizados están enriquecidos en sustancias húmicas, aunque indican que estos contenidos son mayores en el caso del CEDAR1 y en el vermicompost, atribuible en el segundo caso a la acción de las lombrices, y en el primero al mayor tiempo de compostaje.

4.2.5. POROSIDAD

Tabla N° 12. Porosidad de los materiales

| Material | Por. (%) | |
|-----------------|-----------------|----|
| CCORT1 | 88.07 | a |
| CCORT2 | 86.17 | ab |
| CEDAR1 | 84.55 | bc |
| CEDAR2 | 82.37 | de |
| CESTIER1 | 87.27 | a |
| CESTIER2 | 84.94 | bc |
| CFORM1 | 86.02 | ab |
| CFORM2 | 87.97 | a |
| CVEG1 | 74.45 | g |
| CVEG2 | 80.34 | ef |
| CVEG3 | 79.20 | f |
| CVER | 83.45 | cd |
| REC | 72.91 | g |
| SUST | 81.19 | ef |

La interpretación de los resultados se realiza según criterios que muestra la siguiente tabla:

Tabla N° 13. Clasificación de la porosidad de los materiales

| Porosidad. (%) | Clasificación |
|-----------------------|----------------------|
| <50% | Muy baja |
| 50-65% | Baja |
| 65-80 | Media |
| 80-90% | Alta |
| >90% | Muy alta |

En primer lugar, en orden de mayor a menor porosidad, se encuentra un grupo estadísticamente homogéneo conformado por CCORT1, CFORM2, CESTIER1, CCORT2 y CFORM1, todos ellos clasificados según la tabla N° 13 de alta porosidad. A continuación se hallan CESTIER2 y CEDAR1, de menor porosidad que CESTIER1, y formando grupo con CCORT2 y CFORM1, todos ellos clasificados como de alta porosidad. Siguiendo el orden establecido, con menos porosidad que CFORM1, se encuentra el CVER (alta), el cual no posee diferencias significativas con CESTIER2 y CEDAR1. Con menos porosidad que el CEDAR1, se haya CEDAR2

(alta), que no posee diferencias con CVER, ni con SUST (alta) y CVEG2 (alta). Luego, clasificado de porosidad media, aparece CVEG3, distinto a CEDAR2 y homogéneo a SUST y CVEG3. Con la menor porosidad, se ubica el grupo estadísticamente homogéneo y significativamente diferente al resto de materiales, formado por CVEG1 y REC con una porosidad media según la tabla de referencia utilizada.

Todos los materiales analizados presentan una porosidad satisfactoria clasificada de media a alta. Al considerar los porcentajes de porosidad en relación con el tipo de compost, se observa un comportamiento muy similar al descrito en el apartado de DAS, en el contexto de que los materiales con alta porosidad son los que presentan baja densidad y al revés, como se refleja en la alta correlación negativa entre ambos parámetros que muestran las figuras N° 20 y N° 21. En este contexto los compost de FORM y los de cortezas, poseen porosidades mayores asociadas a la baja DA y al alto contenido en materia orgánica. En el otro extremo, con baja porosidad, se sitúan los compost de restos vegetales, que presentan la mayor DA y menor contenido en MO. En posiciones intermedias y agrupados se presentan los lodos EDAR, el CESTIER2 y el vermicompost, siendo la porosidad de este último muy parecida a la del estiércol que deriva. El único material que no sigue de forma clara la naturaleza de su materia prima es el CESTIER1, que presenta porosidad superior a la esperada, debido a su baja DAS que se explica en el apartado correspondiente a éste último parámetro.

En cuanto a los materiales complementarios, la porosidad es baja y similar a los compost de restos vegetales, viendose condicionados estos resultados por su contenido en materia orgánica y su mayor DAS, observándose que el material con menor porosidad es el REC, que a su vez posee la mayor DAS y además forma parte del grupo que contiene menor materia orgánica.

En las figuras se refleja la excelente correlación lineal negativa entre la porosidad y las densidades aparentes que presentan los materiales analizados, demostrando que la porosidad depende de la densidad de los materiales, siendo esta mayor cuando las densidades de los mismos es menor y viceversa.

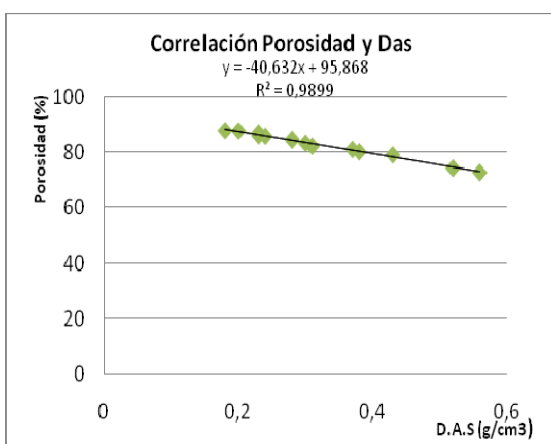


Figura N° 20. Correlación entre Porosidad y DAS

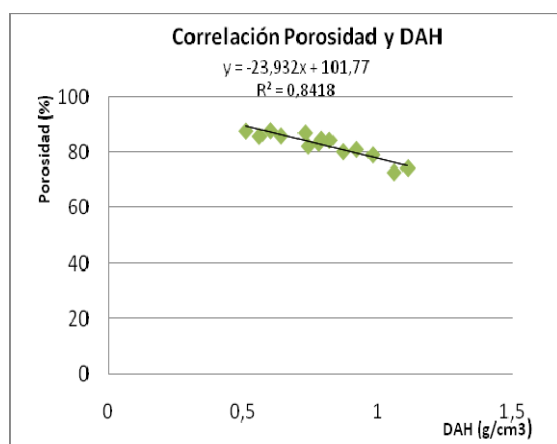


Figura N° 21. Correlación entre Porosidad y DAH

4.2.6. RELACIONES AIRE-AGUA

Para la interpretación de los distintos parámetros aire-agua, se hace referencia a intervalos ó valores de evaluación indicando en unos casos rangos de fácil manejo y en otros valores limitativos, especialmente por defecto. Estos rangos ó valores deben interpretarse en el contexto que un material que presente los distintos parámetros en el nivel de fácil manejo, mal llamado óptimo por algunos autores, será un material físicamente activo, es decir que retiene una cantidad importante de agua disponible a la vez que a tensiones bajas contiene aire suficiente que permita una buena actividad respiratoria radicular. Asimismo este sustrato, mal llamado ideal, presenta un contenido notable en agua difícilmente disponible que permite aliviar ó retrasar episodios de déficit hídrico graves. En este contexto el sustrato ideal permite riego de baja frecuencia y alta dosis, manteniendo condiciones de aireación satisfactoria aún después del riego y por su cantidad de agua difícilmente soslayar los efectos adversos por restricciones en el suministro hídrico cuando se retrasa el momento de riego por motivos diversos.

Atendiendo a todo lo expuesto y aunque en cada apartado se hace referencia a que el material se encuentra dentro ó fuera del rango de fácil manejo, esta apreciación sólo tiene sentido si se tiene en cuenta a la vez los valores de los restantes parámetros. Como ejemplo, si un material tiene una CA superior a 30, esto no significa que un exceso de aireación sea perjudicial, sino que en general valores altos de CA conllevan a bajos contenidos en agua y muchas veces en la fracción de agua fácilmente disponible. El manejo racional de este sustrato conlleva a aumentar la frecuencia de riego y disminuir la dosis en relación al denominado sustrato ideal.

4.2.6.1. Capacidad de Aire

Tabla Nº 14. Porcentajes de capacidad de aire de los materiales

| Material | C.A. (%v/v) | |
|-----------------|--------------------|----|
| CCORT1 | 44.09 | b |
| CCORT2 | 41.86 | b |
| CEDAR1 | 27.03 | de |
| CEDAR2 | 39.75 | b |
| CESTIER1 | 43.03 | b |
| CESTIER2 | 40.59 | b |
| CFORM1 | 57.73 | a |
| CFORM2 | 61.91 | a |
| CVEG1 | 17.23 | f |
| CVEG2 | 34.16 | c |
| CVEG3 | 19.59 | f |
| CVER | 32.26 | cd |
| REC | 17.59 | f |
| SUST | 22.16 | ef |

En el extremo superior siguiendo un orden de mayor a menor CA, se encuentra el grupo conformado por los composts de FORM (CFORM2 y CFORM1) diferente estadísticamente al resto. A continuación se posiciona un grupo homogéneo entre sí y significativamente diferente al resto conformado en orden por: CCORT1, CESTIER1, CCORT2, CESTIER2 y CEDAR2. Luego, con menor CA se halla el grupo homogéneo de CVEG2 y CVER. Seguidamente aparece CEDAR1, distinto a CVEG2 y homogéneo a CVER. A continuación se encuentra el SUST que no se diferencia estadísticamente con CEDAR1, de menor CA que CVER y de mayor CA que el siguiente grupo homogéneo conformado por CVEG3, REC y CVEG1, que presentan la menor CA de todos los materiales.

Tabla N° 15. Criterio de clasificación para capacidad de aire

| C.A (%) | Clasificación |
|---------|-----------------------------|
| 20-30 | Fácil manejo (óptimo) |
| < 15 | Riesgo de asfixia radicular |

La mayor parte de los compost analizados presentan CA altas ó muy altas y ninguno de los materiales presenta riesgo de asfixia. La elevada CA de estos compost viene condicionada por el tamaño de las partículas, observándose que los materiales con alta CA, los FORM, las cortezas y los de estiércol poseen las mayores proporciones de partículas superiores a 1 mm. No obstante, además del tamaño de partículas, la aireación viene condicionada por la capacidad de humectación de los materiales y su hidrofilia. En este contexto se puede indicar que los compost de FORM, aún teniendo un contenido inferior de fracción gruesa y un tamaño medio de partículas inferior a los de corteza, presenta mayor aireación, esto atribuible a la menor retención de agua de la matriz del compost de FORM en comparación de la corteza. El vermicompost posee menos CA que los estiércoles, dado que el proceso de vermicompostaje disminuye el tamaño medio de las partículas y el porcentaje de partículas gruesas (>1 mm). Los que poseen menor CA se encuentran en aquellos materiales que presentan mayor porcentaje de fracción fina (<1 mm.), en este caso se encuentra el CVEG1 y muy cerca del CVEG3. El CVEG2 tiene mayor CA que los anteriores, dado que tiene menor contenido de fracción fina, y también presenta un tamaño medio de partícula mayor.

Al analizar los resultados derivados del análisis granulométrico se observa que el CEDAR1 en relación al CEDAR2, presenta un contenido mayor en fracción gruesa (>1mm), un diámetro medio de partículas superior y un índice D_{90}/D_{10} inferior. Todo esto debería conllevar una CA superior a la del CEDAR2, y los resultados indican lo contrario. Esta anomalía sólo puede atribuirse a un error en la nomenclatura de la muestra al realizar uno de los dos análisis (granulometría o curvas de liberación de agua).

En cuanto a los materiales complementarios, que presentan CA cercanos al valor mínimo del rango de fácil manejo, los resultados obtenidos concuerdan con el relativo bajo contenido en fracción gruesa (>1mm), que es muy similar a CVEG1 y CVEG3, como así lo es su CA y su tamaño medio de partículas (fig. N° 22 y N° 23).

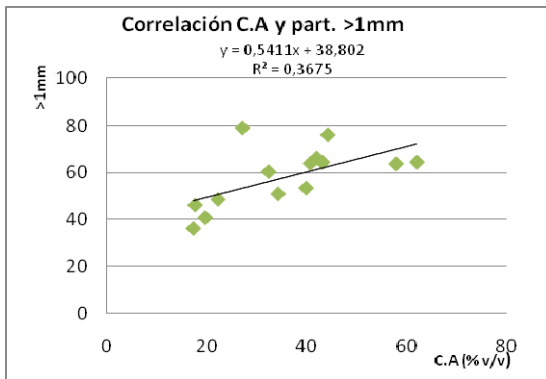


Figura Nº 22. Correlación entre CA y % part. >1mm

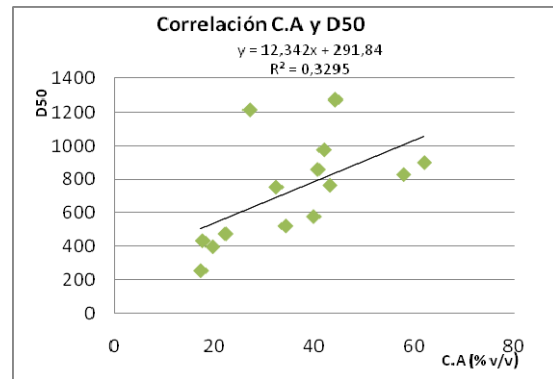


Figura Nº 23. Correlación entre CA y D50

Los materiales que se desvían de esta tendencia son CCORT1 y CEDAR1 por encima, y CVEG1 por debajo

4.2.6.2. Agua a 1 kPa de tensión

Tabla Nº 16. Densidad real de los materiales

| Material | Agua a 1 kPa (%v/v) | |
|----------|------------------------|----|
| CCORT1 | 43.98 | d |
| CCORT2 | 44.31 | d |
| CEDAR1 | 57.52 | a |
| CEDAR2 | 42.62 | d |
| CESTIER1 | 44.23 | d |
| CESTIER2 | 44.35 | d |
| CFORM1 | 28.29 | e |
| CFORM2 | 26.05 | e |
| CVEG1 | 57.21 | a |
| CVEG2 | 46.17 | cd |
| CVEG3 | 59.61 | a |
| CVER | 51.18 | bc |
| REC | 55.32 | ab |
| SUST | 59.04 | a |

En orden de mayor a menor retención de agua por la matriz a 1 Kpa, en primer lugar se encuentra un grupo homogéneo estadísticamente conformado por CVEG3, SUST, CEDAR1, CVEG1 Y REC, este último sin presentar diferencias significativas con el siguiente en orden (CVER), que a su vez no se diferencia con CVEG2, de menor retención que REC. A continuación se halla un grupo, homogéneo entre sí estadísticamente y menor que CVER, formado por CESTIER2, CCORT2, CESTIER1, CCORT1 Y CEDAR2, sin diferencias significativas con CVEG2. En último término con la menor retención de agua a 1 Kpa de tensión, se ubica un grupo homogéneo entre sí y diferente significativamente al resto de materiales conformado por los composts procedentes de la fracción orgánica de residuos municipales: CFORM1 y CFORM2.

Tabla N° 17. Criterio de clasificación para agua a 1 kPa de tensión

| Agua a 1 kPa (%v/v) | Clasificación |
|---------------------|-----------------------|
| 55-70 | Fácil manejo (óptimo) |

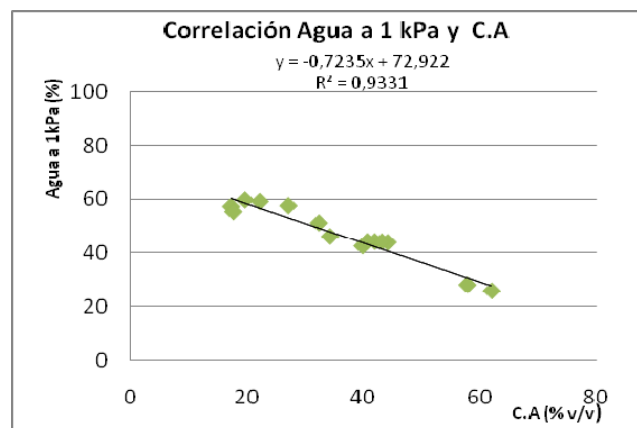
La retención de agua a 1 kPa de tensión presenta, como es de esperar, un comportamiento inverso al descrito en el apartado CA, dado que ambos parámetros son complementarios en relación a la distribución aire-agua en la porosidad cuando se establece una tensión de 1 kPa. Esto se puede apreciar en la excelente correlación lineal negativa entre ambos parámetros, que se refleja en el correlograma de la figura N° 24.

En este caso la gran mayoría de materiales presentan cantidades de agua a 1 kPa por debajo del valor considerado de fácil manejo, entrando en este rango solamente CEDAR1, CVEG1 y CVEG3 y los materiales complementarios REC y SUST.

Para este parámetro los compost de FORM, los de corteza y los de estiércol presentan los valores mínimos, mientras que los vegetales presentan los valores máximos, junto con el vermicompost, aunque este último y el CVEG2 presentan valores intermedios, tal como ocurre con la CA.

Los argumentos expuestos para la CA son también aplicables a este parámetro, pero en sentido inverso. Los compost con mayor contenido en fracción fina (<1mm), son los que presentan mayor retención de agua a 1 kPa de tensión.

El correlograma entre agua a 1 kPa y la DAH (fig. N° 25), pone de manifiesto que a medida que aumenta la DAH, que implica un aumento de la DAS y disminución de la porosidad, se promueve, por disminución del tamaño de partículas y disminución de tamaño de poro, una mayor retención de agua.

**Figura N° 24.** Correlación entre los parámetros agua retenida a 1 kPa de tensión y CA

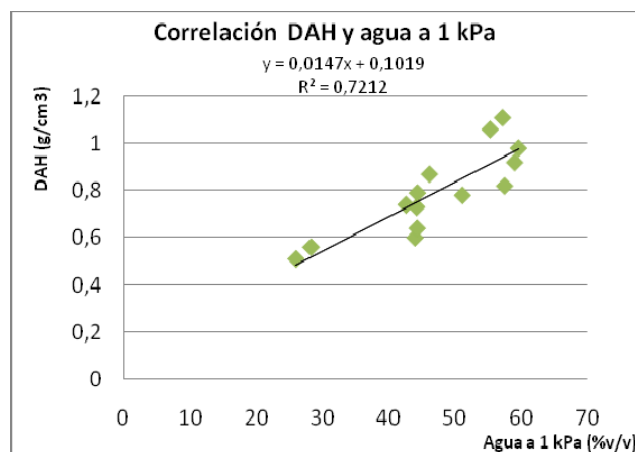


Figura Nº 25. Correlación entre los parámetros DAH y agua retenida a 1 kPa de tensión

4.2.6.3 Agua a 5 kPa de tensión

Tabla Nº 18. Valores de los materiales a 5 kPa de tensión

| Material | Agua a 5 kPa (%v/v) | |
|----------|---------------------|-----|
| CCORT1 | 32.05 | f |
| CCORT2 | 30.77 | fg |
| CEDAR1 | 44.76 | a |
| CEDAR2 | 29.85 | fg |
| CESTIER1 | 30.59 | fg |
| CESTIER2 | 29.54 | g |
| CFORM1 | 19.47 | h |
| CFORM2 | 18.68 | h |
| CVEG1 | 36.67 | cde |
| CVEG2 | 34.45 | e |
| CVEG3 | 37.16 | cbd |
| CVER | 35.90 | de |
| REC | 38.46 | bc |
| SUST | 39.22 | b |

Con la máxima retención de agua a 5 kPa de tensión, se encuentra CEDAR1. En el extremo opuesto, con la menor retención de agua, se ubica un grupo homogéneo entre sí y diferente significativamente al resto conformado por CFORM1 y CFORM2. En el medio se encuentran el resto de materiales en orden de mayor a menor retención de agua. En segundo lugar se ubica un grupo estadísticamente homogéneo entre sí formado por SUST, REC, CVEG3, del cual éstos dos últimos no poseen diferencias significativas con CVEG1 (menor a SUST). A continuación aparece CVEG2, distinto a CVEG3, sin diferencias estadísticas con CVEG1 y CVER. A continuación se agrupan homogéneamente entre sí los materiales: CCORT1, CCORT2, CESTIER1 y CEDAR2, de los cuales los últimos tres no presentan diferencias significativas estadísticas con CESTIER2, distinto a CCORT1. Formando otro grupo homogéneo entre sí y

diferente al resto de materiales se hallan los compost de FORM, con la menor retención de agua a 5 kPa de tensión.

Tabla N° 19. Criterio de clasificación para agua a 5 kPa de tensión

| Agua a 5 kPa (%v/v) | Clasificación |
|---------------------|-----------------------|
| 31-40 | Fácil manejo (óptimo) |

En el rango de fácil manejo se ubican la totalidad de los materiales, exceptuando a ambos compost de FORM que están muy por debajo del mínimo establecido. El contenido de agua a tensión de 5 kPa viene condicionado por los mismos parámetros granulométricos que para el agua a 1 kPa, como se puede observar en la excelente correlación entre ambos parámetros (figura N° 26).

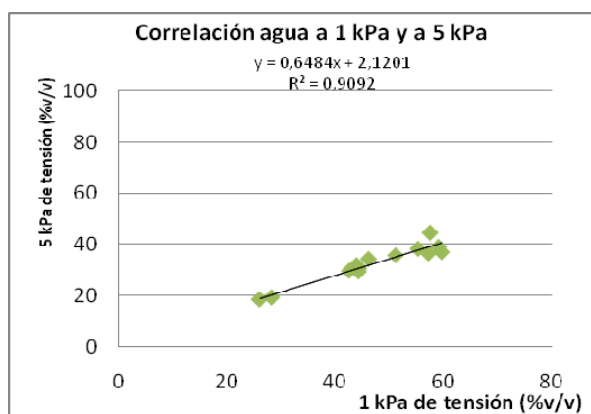


Figura N° 26. Correlación entre Agua a 1 kPa y a 5 kPa de tensión

4.2.6.4. Agua Fácilmente Disponible

Tabla N° 20. Porcentajes de agua fácilmente disponible de los materiales

| Material | A.F.D (%v/v) | |
|----------|--------------|-----|
| CCORT1 | 11.94 | ef |
| CCORT2 | 13.53 | de |
| CEDAR1 | 12.76 | def |
| CEDAR2 | 12.77 | def |
| CESTIER1 | 13.64 | de |
| CESTIER2 | 14.81 | de |
| CFORM1 | 8.81 | fg |
| CFORM2 | 7.38 | g |
| CVEG1 | 20.54 | ab |
| CVEG2 | 11.72 | efg |
| CVEG3 | 22.45 | a |
| CVER | 15.28 | cde |
| REC | 16.86 | bcd |
| SUST | 19.82 | abc |

Con la máxima AFD se ubica el CVEG3, formando un grupo homogéneo con CVEG1 y SUST, estos dos últimos formando otro grupo estadísticamente homogéneo entre sí con REC que posee menos AFD que CVEG3. El siguiente en orden es el CVER, menor a CVEG1, el cual no se diferencia significativamente del SUST y del REC. A continuación, distinto a SUST, se halla el grupo homogéneo entre sí formado por CVER, CESTIER2, CESTIER1, CCORT2, CEDAR2 y CEDAR1, los cuales no presentan diferencias estadísticas significativas con REC, y con los de menor AFD siguientes, homogéneos entre sí CCORT1 y CVEG2, así mismos distintos a CCORT2. Luego aparece el CFORM1, distinto a CCORT2, que no presenta diferencias estadísticas significativas con CEDAR2, CEDAR1, CCORT1 y CVEG2. Cerrando la clasificación con la menor AFD se ubica el CFORM2, el cual no posee diferencias significativas con CVEG2 y CFORM1.

Tabla Nº 21. Criterio de clasificación para agua fácilmente disponible

| A.F.D (%v/v) | Clasificación |
|-----------------|---------------------------|
| 20-30 | Fácil manejo (óptimo) |
| < 15 | Riesgo de déficit hídrico |

El contenido de agua fácilmente disponible de todos los materiales analizados, exceptuando los compost vegetales CVEG1 y CVEG3 y el SUST, se encuentran por debajo del rango de fácil manejo, y en algunos casos muy por debajo del mínimo, como pasa en los compost de FORM. Esto es atribuible por una parte, al relativamente alto contenido en fracción gruesa de los FORM, pero especialmente determinado por la menor humectabilidad de este material en relación a los de corteza, que aunque presenta un tamaño medio de partículas menor y un porcentaje menor de la fracción gruesa, tiene una cantidad de AFD menor.

Los valores de AFD de los compost de corteza, los de fangos de EDAR y los de estiércol así como el vermicompost, son parecidos entre sí y limitantes, en el sentido de exigir frecuencias de riego elevadas. Los compost de restos vegetales, como se ha indicado anteriormente, no se comportan de forma homogénea, dado que el CVEG2 tiene la mitad de contenido que los otros dos, atribuyéndose esto a que posee mayor contenido en fracción gruesa (1mm), y explicando que posea mayor CA y menor agua a 1 kPa y a 5 kPa de tensión.

Los resultados obtenidos globalmente se pueden asociar al contenido en fracciones gruesas (>1mm), al tamaño medio de las partículas, a la naturaleza y la higroscopía del material. Aunque no de forma tan clara como ocurre en el agua retenida a 1 kPa de tensión, dado que esta fracción evalúa el agua que se libera y no la que se retiene, y esta liberación depende de la arquitectura, especialmente de la distribución del tamaño de la porosidad.

En las siguientes gráficas (fig. Nº 27 y N 28) se puede observar las correlaciones lineales negativas moderadas, aunque con tendencias bien definidas, entre los parámetros AFD y D_{50} y AFD tamaño de partículas >1 mm

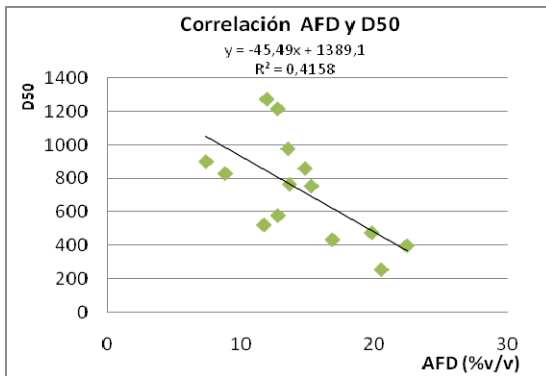


Figura Nº 27. Correlación entre AFD y D_{50}

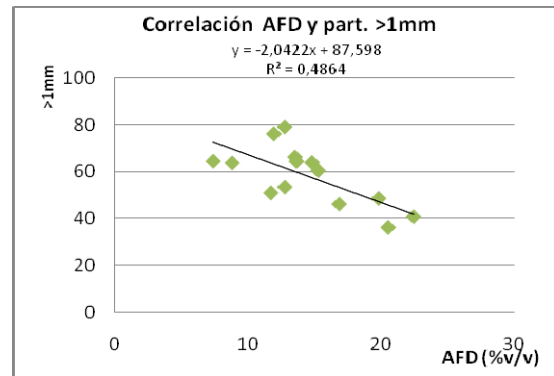


Figura Nº 28. Correlación entre AFD y part. >1 mm

4.2.6.5. Agua de Reserva

Tabla Nº 22. Porcentajes de agua de reserva de los materiales

| Material | A.R (%v/v) | |
|----------|------------|----|
| CCORT1 | 3.76 | cd |
| CCORT2 | 3.82 | c |
| CEDAR1 | 2.88 | ef |
| CEDAR2 | 2.91 | ef |
| CESTIER1 | 2.96 | ef |
| CESTIER2 | 1.37 | g |
| CFORM1 | 1.43 | g |
| CFORM2 | 1.76 | g |
| CVEG1 | 4.86 | b |
| CVEG2 | 3.76 | cd |
| CVEG3 | 4.24 | c |
| CVER | 2.45 | f |
| REC | 3.22 | ed |
| SUST | 5.81 | a |

En cuanto al agua de reserva (AR) de los materiales, el análisis estadístico arroja los siguientes diferencias: El SUST se diferencia estadísticamente de forma significativa colocándose por encima de todos los materiales analizados, secundado por CVEG1 que también se diferencia significativamente al resto. Siguiendo el orden establecido se agrupan de forma estadísticamente homogénea los siguientes: CVEG3, CCORT2, CVEG2 y CCORT1, de los cuales el CVEG2 y CCORT1 no se diferencian significativamente del REC, con menos AR que CCORT2. Luego formando un grupo homogéneo se encuentran CESTIER1, CEDAR2 y CEDAR1, menores a CCORT1, sin diferencias con REC. A continuación se posiciona el CVER, distinto a REC, que no posee diferencias con CESTIER1, CEDAR2 y CEDAR1. En último lugar con la menor AR, se halla el grupo homogéneo entre sí y con diferencias estadísticas al resto, formado por los composts de FORM (CFORM2 y CFORM1) y CESTIER2.

Tabla N° 23. Criterio de clasificación para agua de reserva

| A.R (%v/v) | Clasificación |
|-----------------------|----------------------------------------------|
| 4-10 | Fácil manejo (óptimo) |
| < 4 | Riesgo de estrés hídrico, si se agota el AFD |

Según la anterior clasificación, los únicos materiales que entran en el rango de fácil manejo son los compost vegetales CVEG1 y CVEG3 y el complementario SUST. En el resto de materiales existe un riesgo de estrés hídrico si se agota el AFD, lo que indica que en estos casos la periodicidad del riego debe ser mayor.

En cuanto a la naturaleza de los compost, el compost de restos vegetales que se diferencia de sus pares (CVEG2) posee igual valor de AR que los compost de corteza, similares entre sí. Los valores de los compost de EDAR para este parámetro se equiparan entre ellos, al igual que los compost de FORM, con valores menores que los anteriores. En cuanto a los de estiércol, se observa las mayores diferencias entre tipología de compost, siendo el CESTIER1 el que posee mayor AR que el CESTIER2. Esto es debido principalmente a que el CESTIER1 presenta menor tamaño medio de partículas que el CESTIER2. En el medio de los anteriores se encuentra el vermicompost, con mayor AR que su materia prima principal (CESTIER2), hecho previsible ya que al pasar este por el proceso de digestión de las lombrices, disminuye el tamaño de partículas y aumenta la retención de agua por parte de la matriz.

En cuanto a los complementarios, el REC se ubica entre los compost de corteza y los de estiércoles, mientras que el SUST es el que posee la mayor cantidad de AR de todos los materiales estudiados.

4.2.6.6. Agua Disponible

Tabla N° 24. Porcentajes de agua disponible de los materiales

| Material | A.D (%v/v) | |
|-----------------|-------------------|----|
| CCORT1 | 15.69 | bc |
| CCORT2 | 17.35 | bc |
| CEDAR1 | 15.64 | bc |
| CEDAR2 | 15.68 | bc |
| CESTIER1 | 16.60 | bc |
| CESTIER2 | 16.17 | bc |
| CFORM1 | 10.24 | d |
| CFORM2 | 9.14 | d |
| CVEG1 | 25.40 | a |
| CVEG2 | 15.48 | c |
| CVEG3 | 26.69 | a |
| CVER | 17.73 | bc |
| REC | 20.08 | b |
| SUST | 25.63 | a |

Estadísticamente se reflejan diferencias entre los materiales analizados, en cuanto al parámetro agua disponible (AD). Con diferencias estadísticas significativas al resto de materiales y con la mayor cantidad de AD se encuentra el grupo homogéneo entre sí formado por CVEG3, SUST y CVEG1. Siguiendo el orden de mayor a menor AD, se posiciona un grupo homogéneo conformado por REC, CVER, CCORT2, CESTIER1, CESTIER2, CCORT1, CEDAR2 Y CEDAR1, de los cuales todos, menos el REC, no se diferencian al siguiente de menor AD que es el CVEG2. A continuación y con la menor AD, se agrupan con características estadísticas homogéneas y con diferencias significativas al resto los materiales provenientes de FORM: CFORM1 y CFORM2.

Tabla Nº 25. Criterio de clasificación para agua disponible

| A.D (%v/v) | Clasificación |
|------------|-----------------------|
| 24-40 | Fácil manejo (óptimo) |

El parámetro AD, al ser la sumatoria de los dos parámetros anteriormente descritos, está influenciado por estos, aunque en mayor medida por el AFD. En este contexto, los resultados son semejantes a los anteriores y están influenciados por los mismos parámetros.

En este caso, como sucede en el parámetro AFD Los materiales que se consideran de fácil manejo según el criterio utilizado son los composts de restos vegetales CVEG1 y CVEG3 y el complementario SUST. En el resto de materiales hay que aplicar un riego más periódico por la posibilidad de déficit hídrico.

4.2.6.7. Agua difícilmente disponible o Agua a 10 kPa de tensión

Tabla Nº 26. Porcentajes de agua difícilmente disponible de los materiales

| Material | Agua a 10 kPa (%v/v) | |
|----------|----------------------|----|
| CCORT1 | 28.29 | e |
| CCORT2 | 26.95 | e |
| CEDAR1 | 41.88 | a |
| CEDAR2 | 26.94 | e |
| CESTIER1 | 27.63 | e |
| CESTIER2 | 28.17 | e |
| CFORM1 | 18.04 | f |
| CFORM2 | 16.91 | f |
| CVEG1 | 31.81 | cd |
| CVEG2 | 30.69 | d |
| CVEG3 | 32.92 | c |
| CVER | 33.45 | bc |
| REC | 35.24 | b |
| SUST | 33.41 | bc |

El análisis estadístico con referencia a la retención de agua a tensión de 10 Kpa, ó agua difícilmente disponible, muestra los siguientes resultados: En primer lugar, con diferencia significativa al resto de materiales se encuentra El CEDAR1, seguido por un grupo homogéneo entre sí formado por REC, CVER y SUST, de los cuales el CVER y SUST no presentan diferencias estadísticas significativas con el grupo homogéneo, de menor ADD que REC, conformado por CVEG3 y CVEG1. Siguiendo el orden establecido, aparece el CVEG2, distinto a CVEG3, que no posee diferencia significativa con CVEG1. A continuación se ubica un grupo homogéneo estadísticamente y con diferencias significativas al resto conformado por CCORT1, CESTIER2, CESTIER1, CCORT2 Y CEDAR2. Al final, se encuentra el grupo homogéneo entre sí formado por los composts de FORM (CFORM1 y CFORM2) con la menor retención de agua a tensión de 10 KPa.

Tabla N° 27. Criterio de clasificación para agua difícilmente disponible

| A.D.D (%) | Clasificación |
|-----------|-----------------------|
| 25-31 | Fácil manejo (óptimo) |

En el parámetro ADD, que es lo mismo que el agua retenida a una tensión de 10 kPa, todos los materiales analizados poseen valores superiores al 25%, algunos superando el valor máximo de este rango como en el caso de los compost vegetales, el vermicompost, el CEDAR1 y los materiales complementarios REC y SUST. Los únicos composts que presentan valores por debajo del rango establecido para fácil manejo son los de FORM (< 18%). Esto principalmente a consecuencia de la distribución del tamaño fino del poro.

En cuanto a la naturaleza de los compost, la mayoría se encuentran agrupados según su tipología, exceptuando en el caso de los composts EDAR, que son antagónicos, encontrándose el CEDAR1 con la máxima cantidad de ADD y el CEDAR2 del lado opuesto, rayando el mínimo del rango de fácil manejo. Los compost de restos vegetales presentan un contenido levemente superior en ADD a los de corteza y a los de estiércol, semejantes entre ellos, y el vermicompost posee valor superior a los estiércoles, hecho esperable por todo lo comentado en otros parámetros.

En cuanto a los materiales complementarios, ambos poseen similares cantidades de ADD, hecho que viene relacionado con la granulometría semejante que presentan.

4.2.6.8. Curvas de liberación de agua de los materiales

A partir de los parámetros hidrofísicos anteriormente descritos se han confeccionado las curvas de liberación de agua de los materiales agrupados según la naturaleza de sus materias primas.

Se presentan las diferentes curvas modernas de liberación de agua de los distintos materiales, agrupados según su tipología, una curva moderna conjunta y una curva clásica conjunta de todos los materiales analizados. Estas representaciones permiten visualizar gráficamente los volúmenes de agua que presentan los materiales sometidos a diferentes tensiones que van de 0 a 10 kPa.

| Tensión (kPa) | CCORT1 (% agua v/v) | CCORT2 (% agua v/v) |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 88,07 | 86,17 |
| 1 | 43,98 | 44,31 |
| 5 | 32,05 | 30,77 |
| 10 | 28,29 | 26,95 |

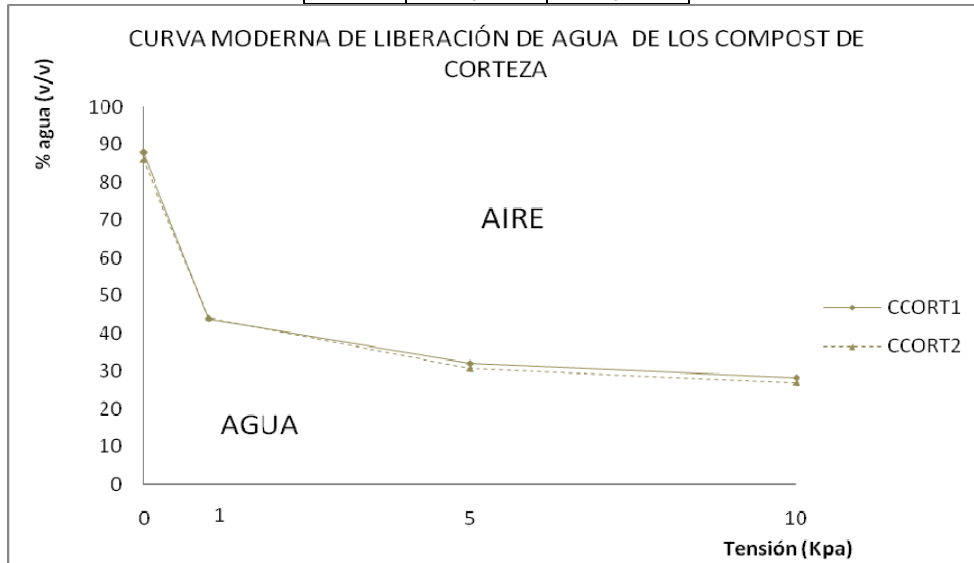


Figura Nº 29. Curva moderna de liberación de agua de los composts de corteza

| Tensión (kPa) | CEDAR1 (% agua v/v) | CEDAR2 (% agua v/v) |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 84,55 | 82,37 |
| 1 | 57,52 | 42,62 |
| 5 | 44,76 | 29,85 |
| 10 | 41,88 | 26,94 |

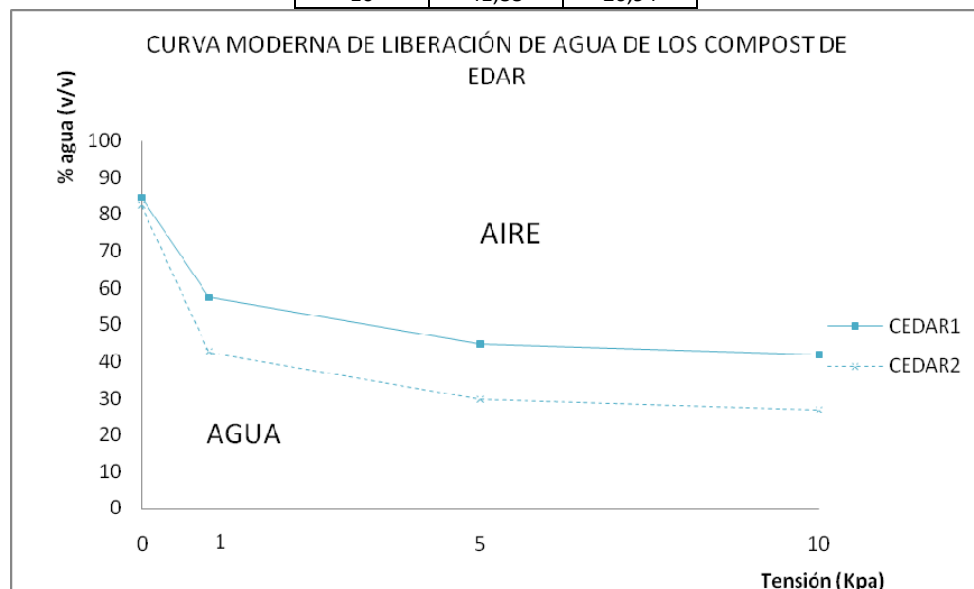


Figura Nº 30. Curva moderna de liberación de agua de los composts de EDAR

| Tensión (kPa) | CESTIER1 (% agua v/v) | CESTIER2 (% agua v/v) | CVER (% agua v/v) |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 0 | 87,27 | 84,94 | 83,45 |
| 1 | 44,23 | 44,35 | 51,18 |
| 5 | 30,59 | 29,54 | 35,90 |
| 10 | 27,63 | 28,17 | 33,45 |

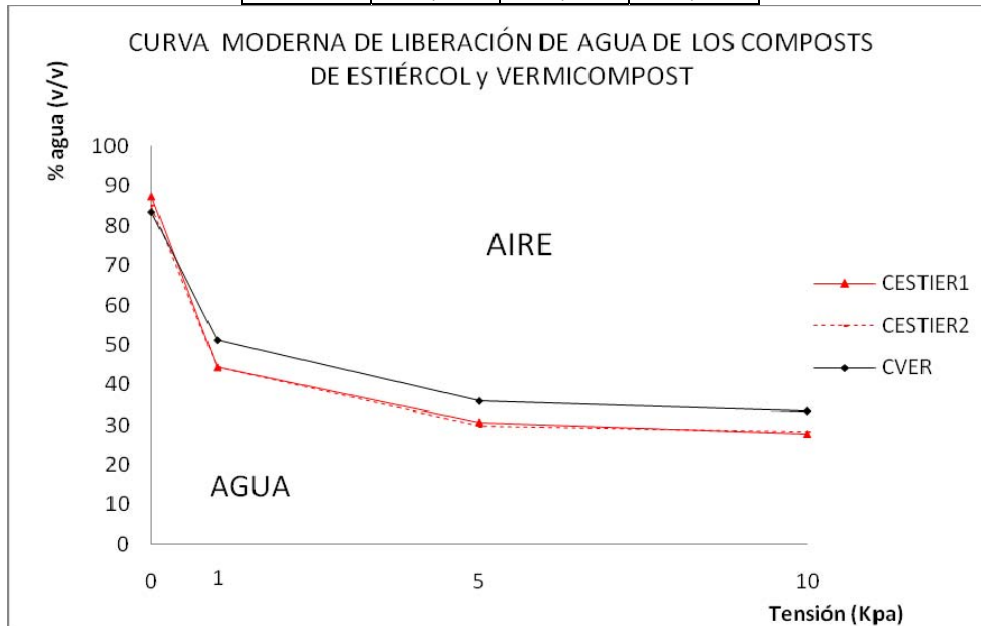


Figura Nº 31. Curva moderna de liberación de agua de los composts de estiércol y Vermicompost

| Tensión (kPa) | CFORM1 (% agua v/v) | CFORM2 (% agua v/v) |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 86,01 | 87,97 |
| 1 | 28,29 | 26,05 |
| 5 | 19,47 | 18,68 |
| 10 | 18,04 | 16,91 |

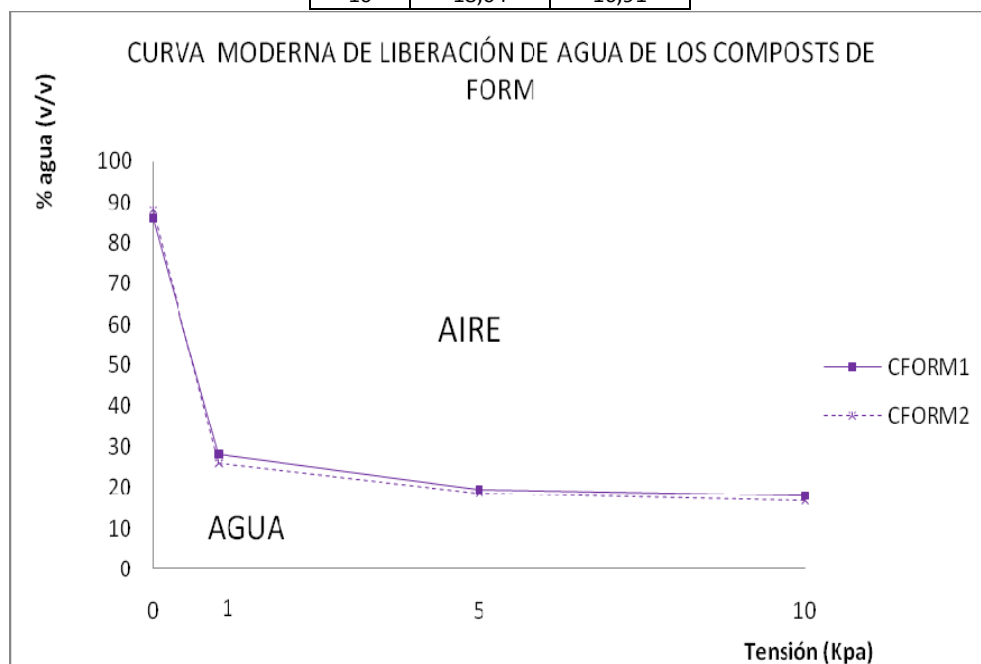


Figura Nº 32. Curva moderna de liberación de agua de los composts de FORM

| Tensión (kPa) | CVEG1 (% agua v/v) | CVEG2 (% agua v/v) | CVEG3 (% agua v/v) |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 74,45 | 80,34 | 79,20 |
| 1 | 57,21 | 46,17 | 59,61 |
| 5 | 36,67 | 34,45 | 37,16 |
| 10 | 31,81 | 30,69 | 32,92 |

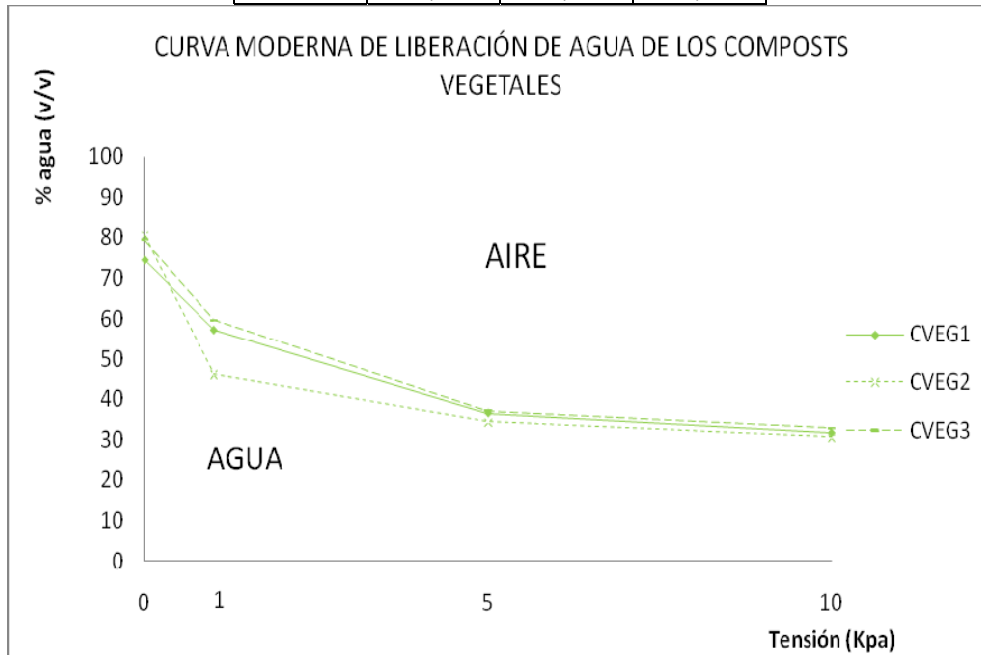


Figura N° 33. Curva moderna de liberación de agua de los composts de restos vegetales

| Tensión (kPa) | REC (% agua v/v) | SUST (% agua v/v) |
|---------------|------------------|-------------------|
| 0 | 72,91 | 81,19 |
| 1 | 55,32 | 59,04 |
| 5 | 38,46 | 39,22 |
| 10 | 35,24 | 33,41 |

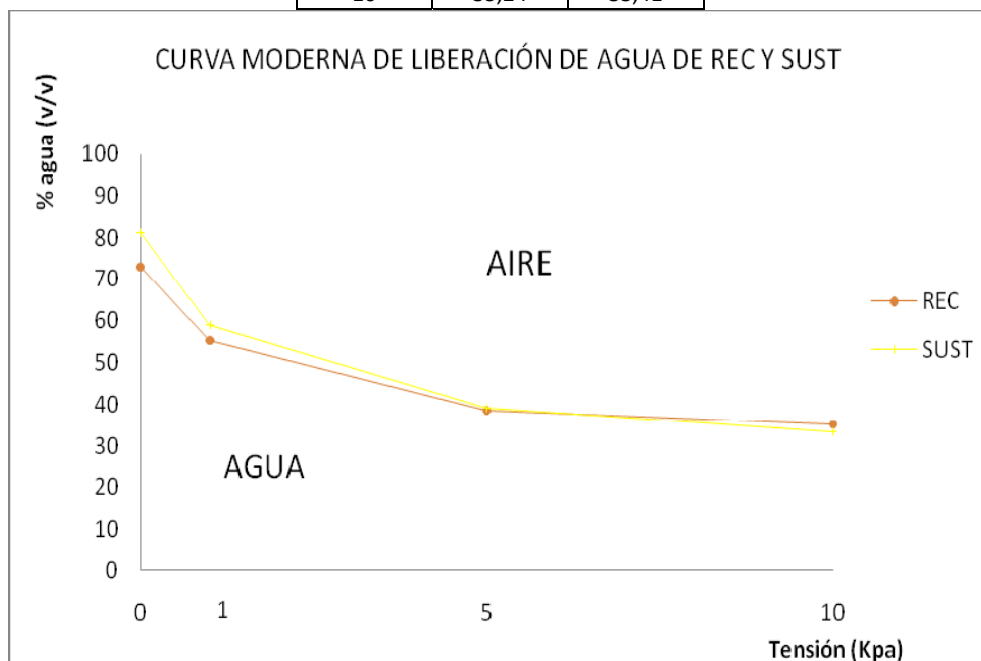


Figura N° 34. Curva moderna de liberación de agua de REC y SUST

Como se puede apreciar en las anteriores gráficas (fig. Nº 29 a 34), la mayoría de los composts de la misma tipología se comportan de forma semejante cuando se le aplican diferentes tensiones a su matriz.

En el caso de lodos EDAR, son claramente diferentes. Esta diferencia se debe principalmente a las características en sus granulometrías (diferentes tamaño medio de partículas y % >1 mm de las mismas), lo que provoca diferencias notables en su aireación.

En los compost de restos vegetales, el CVEG2 es el que se comporta de forma diferente, debido principalmente, como se ha indicado anteriormente, a que posee un mayor porcentaje de partículas gruesas (>1mm), y un mayor tamaño medio de partículas que CVEG1 y CVEG2, lo que provoca que este posea una mayor aireación (CA), por lo tanto una mayor liberación de agua a tensiones que van desde 0 a 1 kPa.

En el caso del vermicompost se puede observar que la curva va por encima de los estiércoles, manteniendo la misma tendencia, hecho que es de esperar ya que la materia prima del mismo es el mismo estiércol, pero la diferencia viene dada principalmente por el mayor contenido en partículas finas (<1mm), hecho derivado del proceso de vermicompostaje, que lleva a la disminución del diámetro del poro, provocando de esta manera una mayor retención de agua a diferentes tensiones.

En cuanto a los gráficos conjuntos (fig. Nº 35 y Nº 36), se puede apreciar claramente, que los materiales se agrupan según la naturaleza de sus componentes, a excepción de los EDAR y el CVEG2 anteriormente comentado.

Los compost de FORM son los que presentan la mayor pendiente en la parte inicial de las curvas, debido a que estos composts presentan la mayor CA de todos los materiales. Contrariamente se aprecia que los que poseen menor aireación son los que presentan menor pendiente inicial (SUST, REC, CVEG1, CVEG3 y CEDAR1). No obstante, la pendiente inicial de todos los materiales es alta, dado que todos ellos tienen CA elevadas.

En el caso del CEDAR1 se observa que es el material que retiene mayor cantidad de agua a diferentes tensiones, diferenciándose claramente del CEDAR2 que posee unas características semejantes a los compost de estiércol.

Entre los compost, también se puede observar (fig. Nº 36) que los de restos vegetales son los que poseen el mayor porcentaje volumétrico de material sólido, por lo tanto menor porosidad, de todos los compost. Encontrándose en el otro extremo, con la mayor porosidad, menor porcentaje volumétrico de material sólido, los compost de corteza. En medio con porosidades similares, los compost de FORM, los de estiércol, los de lodos EDAR y el vermicompost.

En los materiales complementarios se observa, que junto a los compost vegetales, son los que poseen la porosidad más baja, siendo el SUST más poroso que el REC.

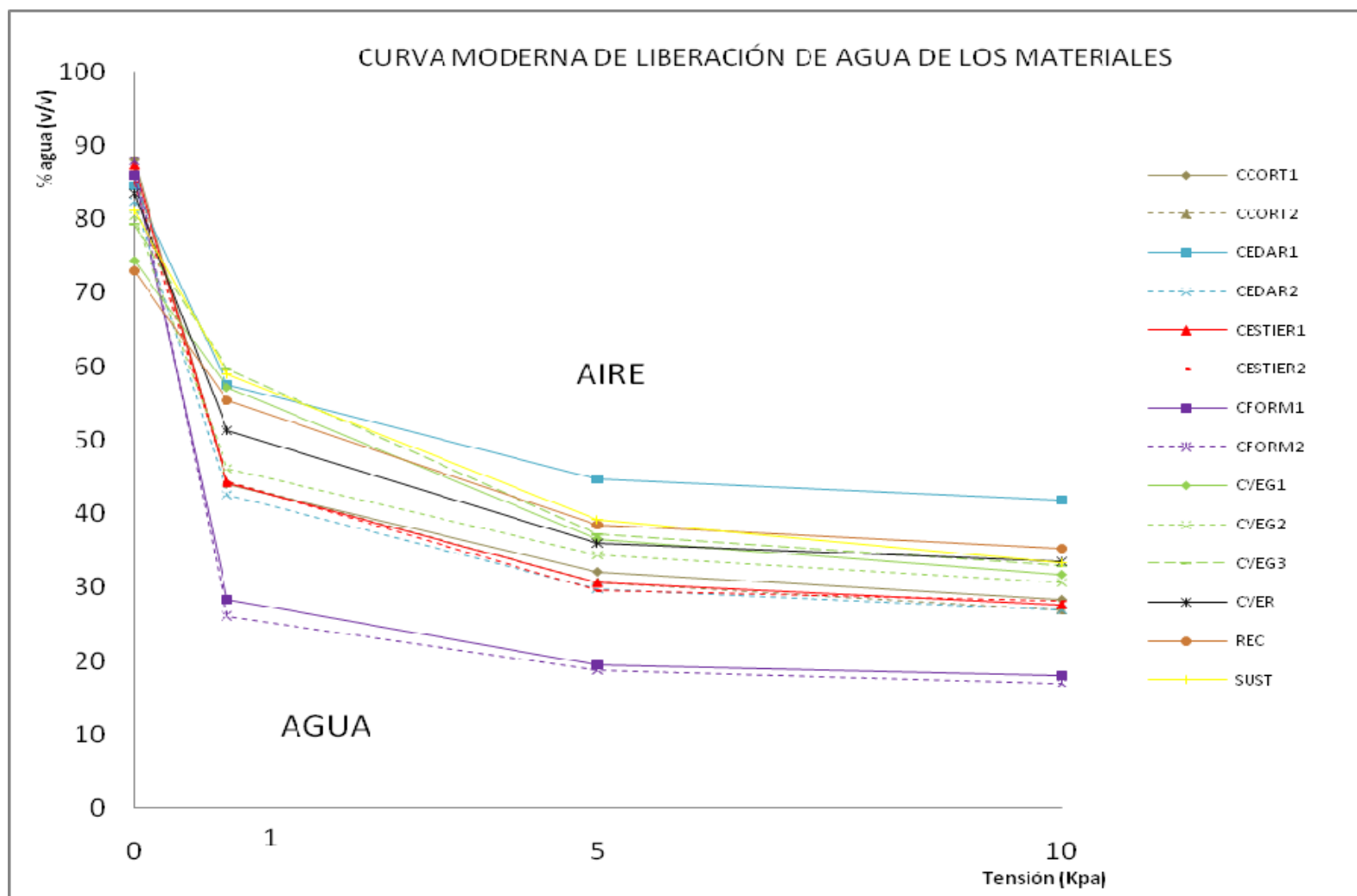


Figura N° 35. Curva moderna conjunta de liberación de agua de los materiales

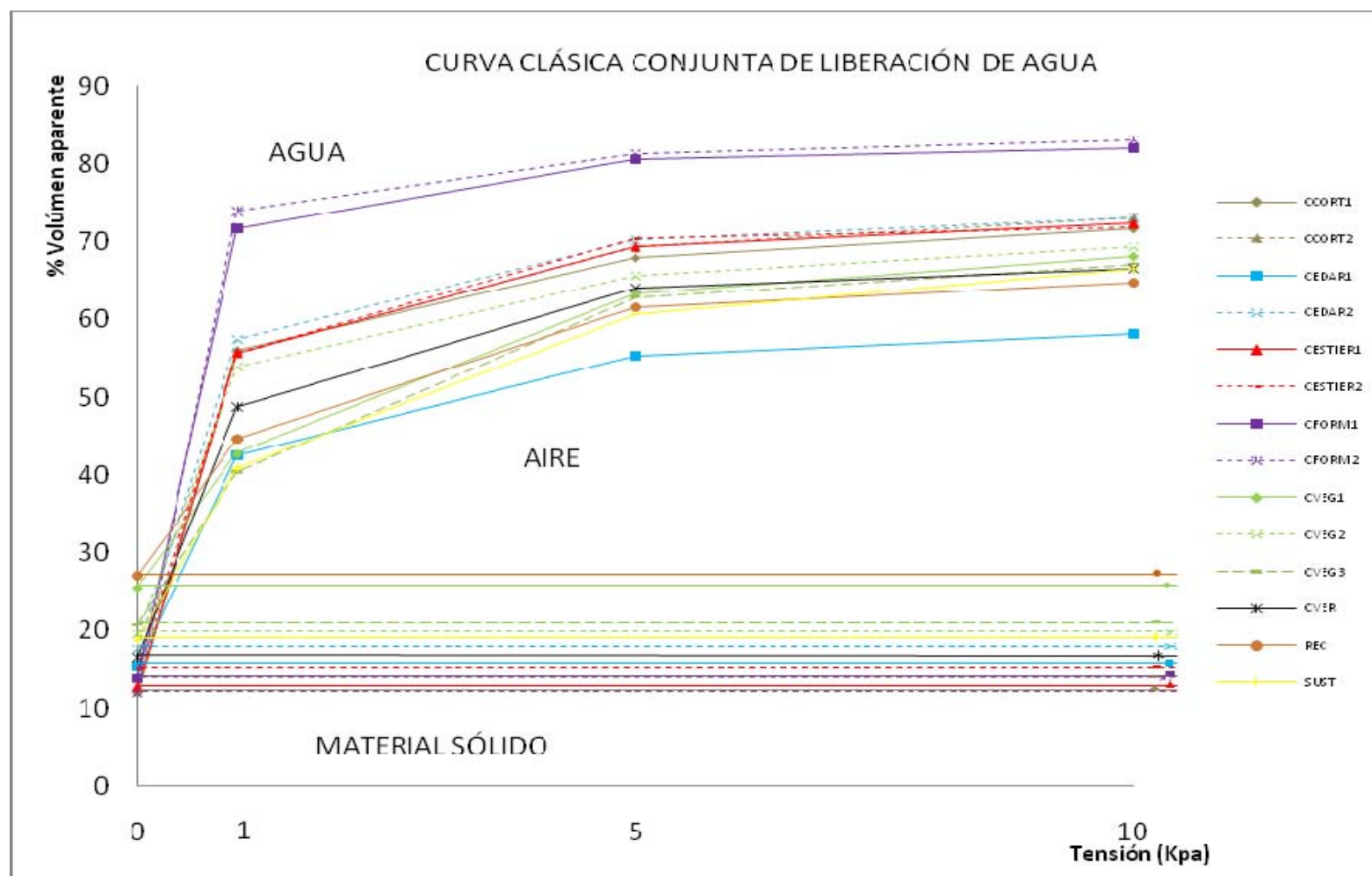


Figura N° 36. Curva clásica conjunta de liberación de agua de los materiales

4.3. ANÁLISIS DE LA PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

4.3.1. HUMEDAD

Tabla Nº 28. Porcentajes de humedad de los materiales

| Material | Humedad (%) | |
|----------|-------------|----|
| CCORT1 | 64.74 | a |
| CCORT2 | 53.29 | c |
| CEDAR1 | 58.21 | b |
| CEDAR2 | 15.19 | k |
| CESTIER1 | 50.99 | d |
| CESTIER2 | 33.08 | f |
| CFORM1 | 15.93 | k |
| CFORM2 | 25.65 | i |
| CVEG1 | 24.43 | j |
| CVEG2 | 29.59 | g |
| CVEG3 | 34.73 | e |
| CVER | 52.36 | c |
| REC | 28.02 | h |
| SUST | 34.08 | ef |

El material que posee mayor humedad es el CCORT1, encontrándose por encima de los 60%, con diferencia estadísticamente significativa al resto de materiales. En el otro extremo de la tabla, con el mínimo porcentaje de humedad inferior al 20%, se encuentra un grupo homogéneo y diferente estadísticamente al resto conformado por CFORM1 y CEDAR2. Siguiendo el orden de mayor a menor porcentaje de humedad, en segundo lugar se encuentra el CEDAR1, diferente a todos, seguido de un grupo homogéneo entre sí y distinto al resto, conformado por CCORT2 y CVER. Luego se diferencia de todos el CESTIER1, a continuación aparecen CVEG3 y SUST, homogéneos entre sí, seguidamente aparece CESTIER2, sin diferencias con SUST y distinto a CVEG3. Hasta llegar a los de menor porcentaje de humedad se encuentran en orden de mayor a menor: CVEG2, REC, CFORM2 y CVEG1 con diferencias estadísticas entre ellos y al resto de materiales.

Al considerar los contenidos de Humedad de los composts en relación con la tipología del material analizado, se puede destacar que los compost de FORM (CFORM1 y CFORM2) presentan una humedad muy baja (16-26%), inferior al límite establecido por la ley española para los composts (>30%). Los composts de corteza (CCORT1 y CCORT2) presentan una alta humedad (53-65%), superior al límite máximo establecido por la legislación. De lo anterior se deduce que ambos grupos de composts (FORM y cortezas) si se colocan en el mercado español como composts no cumplirían (por defecto y por exceso respectivamente) los requerimientos legales. El contenido de humedad en el caso del compost vegetales CVEG1 (25%), no cumple tampoco con el mínimo establecido por la legislación, en cambio los demás (CVEG2 y CVEG3) están dentro de los márgenes aceptables por la ley, aunque el CVEG2 raya el valor mínimo establecido (29,6%). Los composts de estiércol, presentan una humedad de media a alta, y uno de ellos (CESTIER1) con un 60 %, supera el límite máximo que dicta el Real decreto 824/2005

para este tipo de productos. El vermicompost (52%) también excede el líte permitido para esta clase de compost. En cuanto a los EDAR, se observa una gran variación entre los dos materiales analizados (15-58%). Valores que exceden por defecto y por exceso los contenidos mínimos y máximo establecidos por la legislación si estos productos se colocaran en el mercado bajo el epígrafe de compost.

Al considerar los materiales complementarios, la humedad del REC y del SUST, son respectivamente bajos y medios, y adecuados para los usos previstos para estos productos.

4.3.2. MATERIA ORGÁNICA

Tabla Nº 29. Porcentajes de materia orgánica de los materiales

| Material | M.O. (%) | |
|-----------------|-----------------|---|
| CCORT1 | 88.50 | a |
| CCORT2 | 70.18 | b |
| CEDAR1 | 54.21 | d |
| CEDAR2 | 62.48 | c |
| CESTIER1 | 56.35 | d |
| CESTIER2 | 54.41 | d |
| CFORM1 | 67.93 | b |
| CFORM2 | 69.31 | b |
| CVEG1 | 36.30 | f |
| CVEG2 | 42.75 | e |
| CVEG3 | 34.96 | f |
| CVER | 53.41 | d |
| REC | 35.37 | f |
| SUST | 43.00 | e |

En primer lugar, diferenciándose estadísticamente con el máximo porcentaje de materia orgánica, se encuentra el CCORT1. En segundo orden se halla un grupo homogéneo entre sí y con diferencias estadísticas significativas al resto, formado por CCORT2, CFORM2 y CFORM1. Luego se diferencia del resto CEDAR2, siendo superior al grupo (homogéneo entre sí y significativamente diferente a los demás) conformado por CESTIER1, CESTIER2, CEDAR1 y CVER. A continuación, con menor materia orgánica se ubican SUST y CVEG2, homogéneos entre sí y diferente estadísticamente a todos. Con la menor porosidad, se diferencia el grupo homogéneo entre sí, formado por CVEG1, REC y CVEG3.

Los mayores contenidos de MO de los composts estudiados se observan en los de cortezas, con valores mucho más altos (70-89%) que el límite establecido por la legislación española para compost vegetales (40%); característica que también presentan los compost de FORM, con un intervalo más estrecho (68-69%). Los compost de estiércol presentan a si mismos valores muy similares y altos (54-56%), al igual que el Vermicompost (53%). En el caso de los composts de EDAR, el contenido de materia orgánica es de medio a alto (54-62%), presentando variación entre ellos.

Todos estos composts superan con holgura los límites establecidos por la legislación (35% para estiércoles y 40% para el resto).

El contenido de materia orgánica de los composts vegetales analizados es claramente inferior a los demás composts, y dos de ellos, CVEG1 y CVEG3, se encuentran en el límite del valor mínimo que indica la legislación (35%).

En cuanto a los materiales complementarios, el REC presenta bajo contenido de materia orgánica (35%), característica esperada dada la composición de este material a base de compost y arena, formulación adecuada para su uso en recuperación de superficies cespitosas deterioradas. El contenido de materia orgánica del SUST es muy inferior al que cabría de esperar, si se tiene en cuenta que este producto se ha elaborado a base de compost vegetal y turba rubia de sphagnum. Esto se explicaría si el porcentaje de turba en la composición del sustrato fuese baja, o por contaminación del producto por materiales térreos en las operaciones de elaboración del mismo.

La mayor parte de los resultados obtenidos con los compost están de acuerdo con la composición inicial de las materias primas que han seguido un proceso de compostaje. Las cortezas tienen poco contenido en cenizas y un contenido elevado en componentes orgánicos de difícil descomposición (ligninas, suberinas, etc), por todo ello, el compost resultante debe presentar bajo contenido en materia mineral y alto en materia orgánica resistente. Los elevados niveles de M.O. de los composts de FORM, también se justifican por la naturaleza de las materias primas, las cuáles poseen un alto contenido en M.O poco degradable, derivado principalmente de los restos de poda urbana. Ambos compost de FORM poseen bajos contenidos de materia mineral. Los compost de EDAR han mostrado contenidos en MO inferiores a los anteriores, lo que implica una mayor componente mineral, atribuible asimismo a las materias primas: fangos EDAR que han sufrido un proceso previo de descomposición en el tratamiento de aguas residuales, (por tanto un empobrecimiento en MO degradable y enriquecida en materia mineral) y residuos vegetales de distintos orígenes, pero todos ellos ricos en materia orgánica resistente. El menor contenido de MO de los compost de estiércol deriva, de sus materias primas, que presentan alto contenido en materia orgánica degradable en los estiércoles de animales. La presencia de camas vegetales en estos estiércoles es el que permite que los niveles de MO al final del proceso sean relativamente elevados. El contenido ligeramente bajo en el caso del vermicompost, es similar al del compost de estiércol, dado que la materia prima del mismo es el propio compost de estiércol que se ha sometido a un proceso de digestión por la lombriz californiana. Aunque en este trabajo no se ha determinado el contenido de MO resistente, seguramente el vermicompost presenta mayor contenido en esta que los compost de estiércol utilizados para producirlo.

La figura Nº 37 muestra la excelente correlación lineal negativa, entre el contenido de M.O de los materiales analizados y la DAH de los mismos, indicando que a mayor contenido de materia orgánica, la densidad aparente húmeda de los materiales es menor, favoreciendo de esta manera un aumento del espacio poroso, como lo demuestra la figura Nº 38, y también un aumento en la C.A, como establece la figura Nº 39, ambas correlaciones consideradas lineales positivas buenas. En el apartado de DR se muestra la correlación directa de este parámetro con el contenido en materia orgánica, incluido en la fórmula para su obtención.

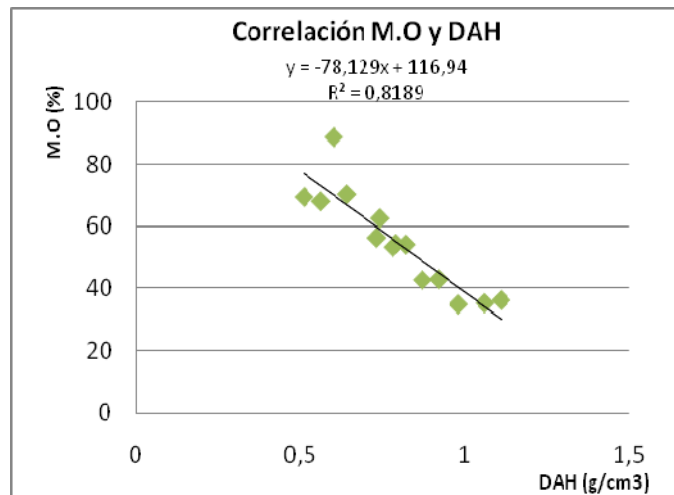


Figura Nº 37. Correlación entre los parámetros M.O y DAH

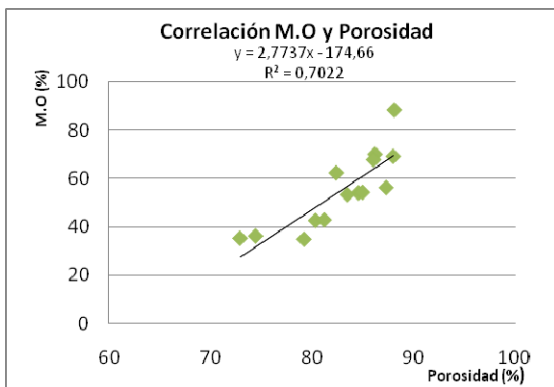


Figura Nº 38. Correlación entre M.O y Porosidad

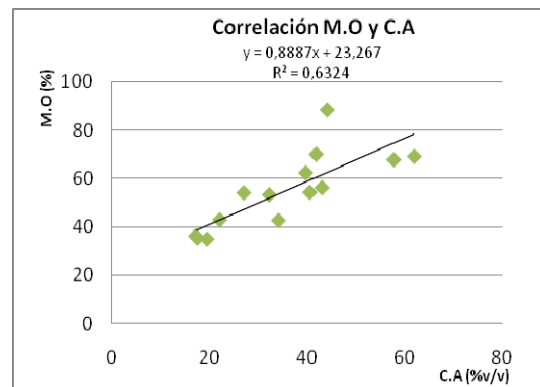


Figura Nº 39. Correlación entre M.O y C.A

4.3.3. pH

Tabla Nº 30. pH de los materiales

| Material | pH | |
|----------|------|----|
| CCORT1 | 6.55 | i |
| CCORT2 | 7.30 | h |
| CEDAR1 | 6.51 | i |
| CEDAR2 | 8.03 | f |
| CESTIER1 | 8.92 | b |
| CESTIER2 | 9.43 | a |
| CFORM1 | 8.27 | de |
| CFORM2 | 8.24 | e |
| CVEG1 | 8.49 | c |
| CVEG2 | 8.30 | e |
| CVEG3 | 8.47 | c |
| CVER | 7.47 | g |
| REC | 8.09 | f |
| SUST | 8.23 | e |

Tabla Nº 31. Clasificación de los materiales según el pH

| pH | Clasificación |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| <4.5 | Extremadamente ácido |
| 4.5-5.0 | Muy fuertemente ácido |
| 5,1-5.5 | Fuertemente ácido |
| 5.6-6.0 | Medianamente ácido |
| 6.1-6.5 | Ligeramente ácido |
| 6.6-7.3 | Neutro |
| 7.4-7.8 | Medianamente básico (frecuentemente suelos con carbonato cálcico) |
| 7.9-8.4 | Básico (frecuentemente suelos calizos) |
| 8.5-9.0 | Ligeramente alcalino |
| 9.1-10.0 | Alcalino (carbonato sódico) |
| >10 | Fuertemente alcalino (ESP>15% suelos sódicos) |

Los composts de estiércol analizados presentan los valores más altos de toda la serie y el CESTIER2 es significativamente superior al CESTIER1. El CESTIER2 se clasifica dentro del rango alcalino al superar el pH de 9.1, mientras que el CESTIER1 se clasifica como ligeramente alcalino aunque se encuentra en el margen superior de este rango.

En el margen del dominio ácido sólo se encuentran dos materiales (CCORT1 y CEDAR1), que son estadísticamente homogéneos y distintos del resto de materiales, que de acuerdo con el criterio de clasificación adoptado, ambos se catalogan como neutros, aunque en el límite inferior de este rango.

Entre los dos extremos anteriores se sitúan el resto de los materiales analizados. De mayor a menor basicidad se agrupan de la siguiente forma: El CVEG1 y CVEG3 (ligeramente alcalinos) que son menos básicos que los estiércoles, y homogéneos entre sí, seguidos del CVEG2 y CFORM1 (básicos) cuyo pH es menor a los dos anteriores. A continuación se sitúa el CFORM2 y el SUST que forman un grupo estadísticamente homogéneo entre sí y así mismos básicos, no pudiéndose diferenciar del CFORM1. A continuación se sitúa otro grupo homogéneo estadísticamente que son el REC y el CEDAR2 que entrarían en el grupo de los básicos también, que son significativamente diferentes al CVER considerado medianamente básico, que a su vez se diferencia del CCORT2 que también pertenece a la categoría de medianamente básico según el criterio utilizado.

La mayoría de los composts analizados presentan pH superiores a 8 y sólo 4 se sitúan en el rango de la neutralidad.

Tra la acidificación inicial en las primeras fases de la descomposición, el pH va aumentando a lo largo del proceso de compostaje, alcanzando la mayor parte de las veces valores superiores a 7,5. El pH final del compost viene determinado por la composición de la materia prima y principalmente en sus contenidos de bases débiles (Ca y Mg) y fuertes (Na y K). Los composts procedentes de materias primas vegetales muy poco mineralizadas como las

cortezas de árboles, presentan valores ligeramente ácidos ó neutros tal como presentan CCORT1 y CCORT2. El compost de lodo CEDAR1 presenta un pH bajo (6.5), coherente con lo que cabría de esperar si se tratara de compostar una pequeña parte de lodo y una alta proporción de RV recién triturados, tal como sucede en este caso (80 RV- 20 Lodos). Contrariamente cuando aumenta la proporción de lodos y la fracción vegetal procede mayoritariamente de fracción gruesa recirculable, procedente del mismo proceso, el pH final es más elevado, como sucede en el caso del CEDAR2 (pH 8), que tiene como materia prima un 30 % de fangos, el 60 % conformado por recirculado de procesos de compostaje enriquecido en materia mineral en los anteriores procesos y solo un 10 % de restos vegetales recién triturados. El Vermicompost estudiado presenta un pH cercano a la neutralidad, a pesar que su materia prima (CESTIER2) posee un elevado pH (9.4). Esto responde a dos hechos complementarios, por una parte la progresiva humificación de la materia orgánica resistente, que acidifica el material, y por otro lado el lavado de sales solubles principalmente Na y cloruros, al realizarse el proceso de vermicompostaje en pilas de poca altura al aire libre. En el pH de los compost vegetales también se encuentran similitudes entre ellos, situándose en el rango básico ó ligeramente alcalino. Es usual para este tipo de compost posean elevados contenidos de Calcio y ligeros contenidos en Na. Los pH más altos y en el dominio de la alcalinidad se observa en los compost de estiércol (8.9-9.4). Esta reacción hay que atribuirla a la presencia de Na en concentraciones relativamente altas que son comunes en los estiércoles y especialmente en los de cerdo.

En cuanto a los materiales complementarios, el pH del REC (8.1) es sólo ligeramente inferior al CVEG3 (8,5), que es su componente principal con un 70 %, hecho que cabría esperar de este material si se hubiera mezclado con un 30% de arena silíceo, no obstante la formulación indica la presencia de un 15% de arena y un 15% de CESTIER2 (pH 9,4). Los resultados obtenidos permiten sugerir que la proporción de arena sea mayor que la indicada. El pH del SUST (8,2) es demasiado elevado para su uso para cultivos en contenedor y no parece estar de acuerdo con la composición de la mezcla indicada por el fabricante (75% CVEG -25% turba rubia de sphagnum). De haberse realizado dicha mezcla y teniendo en cuenta que el pH de CVEG3 es de 8.5, y el de la turba es cercano a 4, el pH final debería de ser más bajo, salvo que se halla realizado un encalado de la turba, que en cualquier caso sería totalmente inadecuado.

4.3.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Tabla Nº 32. Clasificación de los materiales según la C.E

| CE (mS/cm) | Clasificación |
|-----------------------|----------------------------------|
| <0,15 | Muy baja (no salino) |
| 0,15-0,50 | Baja (no salina) |
| 0,50-1,80 | Moderada (ligeramente salino) |
| 1,8-2.25 | Alta (salino) |
| 2,25-3,40 | Bastante alta (muy salino) |
| >3,40 | Muy alta (extremadamente salino) |

Tabla Nº 33. C.E de los materiales a 25°C

| Material | CE a 25° C (mS/cm) | |
|-----------------|-------------------------------|----|
| CCORT1 | 1.70 | i |
| CCORT2 | 2.79 | g |
| CEDAR1 | 3.30 | f |
| CEDAR2 | 3.90 | de |
| CESTIER1 | 4.28 | d |
| CESTIER2 | 10.88 | a |
| CFORM1 | 7.44 | c |
| CFORM2 | 8.23 | b |
| CVEG1 | 3.58 | ef |
| CVEG2 | 3.86 | de |
| CVEG3 | 2.15 | hi |
| CVER | 3.24 | f |
| REC | 2.18 | h |
| SUST | 1.86 | hi |

El CESTIER2 es el que mayor CE presenta, seguido en segundo lugar por el CFORM2, luego por el CFORM1, encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre ellos, los cuales se clasifican como extremadamente salinos al poseer una CE muy alta según el criterio utilizado. A continuación se encuentra un grupo homogéneo y diferente estadísticamente a los demás formado por los CESTIER1, CEDAR2 y CVEG2 que asimismo son extremadamente salinos por que cruzan también la barrera de 3.4 de CE. Siguiendo el orden de mayor a menor CE, aparece otro grupo, homogéneo estadísticamente, conformado por CVEG1 (extremadamente salino), CEDAR1 y CVER (muy salinos), donde el CVEG1 no posee diferencias significativas con el CVEG2 y el CEDAR2. Luego se diferencia el CCORT2 (muy salino) que posee menor CE que los anteriores, y superior a la del grupo estadísticamente homogéneo formado por REC, CVEG3 y SUST, clasificados como salinos por poseer una CE bastante alta (1.8 -2.25). En último término se encuentra el CCORT1 con una CE considerada moderada clasificándose como un material ligeramente salino, el cual no posee diferencias estadísticamente significativas con el CVEG3 y el SUST.

La C.E en la mayor parte de los materiales analizados es demasiado alta para su uso como sustratos de cultivo, ya sea como componentes únicos ó en proporción volumétrica relativamente alta. No obstante, su incorporación en una mezcla puede ser adecuada siempre y cuando los demás componentes presenten baja C.E y el porcentaje volumétrico a incluir sea menor cuanto mayor sea la CE.

El material menos apto para este uso es CESTIER2, con una C.E igual a 11 y los compost de FORM (7,4 – 8,2). La elevada C.E de la mayor parte de estos composts también pueden ser corregidas mediante el lavado de los mismos con agua de baja conductividad. Esta corrección que realizan algunos formuladores de sustratos y especialmente para los compost de estiércol

y de FORM, tienen el inconveniente de generar lixiviado con contenido salino elevado, con el consiguiente perjuicio medio ambiental, a la hora de eliminar estos lixiviados. Sin embargo este lavado se puede considerar té de compost (compost tea) que puede ser de utilidad para otros usos en agricultura desde su perspectiva en contenidos en sustancias húmicas (ácidos fúlvicos principalmente) ó por sus propiedades en el control fitopatológico asociado al posible carácter supresor del compost extraído. Aunque en este trabajo no se ha analizado el contenido en N amoniacal de los composts, los antecedentes bibliográficos indican que una buena parte de la C.E de los compost de estiércol y de FORM derivan de un alto contenido en N amoniacal, que es un índice de falta de madurez del compost, es decir de procesos de compostaje insuficientes.

La elevada salinidad de algunos materiales analizados puede derivar en parte de su bajo contenido de humedad, dado que el extracto 1:2 (v/v) se realiza con un volúmen de muestra de 100 ml, con la humedad que presenta el material y añadiendo 200 ml de agua destilada. Esta metodología al no tener en cuenta la cantidad de agua presente en el material extraído, provoca que los materiales más secos presenten mayor contenido en sales y contrariamente los que poseen mayor humedad, exhiban una C.E inferior. En este contexto se pueden destacar que los composts de FORM, quedan claramente perjudicados por este efecto y que también lo están el CVEG1 y CEDAR2. Contrariamente y dada su mayor humedad se verían beneficiados los composts de corteza (CCORT1 y CCORT2), CEDAR1, CESTIER1 y CVER.

En cuanto a la naturaleza de los materias primas de los composts, se observa que el compost de corteza presenta los valores más bajos debido a su composición, que tal como se ha indicado al discutir el pH presenta un bajo contenido en fracción mineral y que por lo tanto en sales solubles. Los compost EDAR y los composts vegetales (CVEG1 y CVEG2) presentan una C.E parecida y superior a los de corteza dado su mayor grado de mineralización, como indica su menor contenido en M.O. El CVEG3, presenta una C.E similar a las de las cortezas, claramente inferior a los otros compost vegetales, resultado poco coherente con la presencia de purines de cerdo. La elevada C.E en los compost de FORM, ya ha sido detectada por otros muchos autores y deriva, en parte del alto contenido en sales solubles de la FORM, por el uso de lixiviados para el riego en la etapa de descomposición del propio compostaje, y por el elevado contenido, generalmente, en N amoniacal. La elevada C.E de los composts de estiércol se asociaría a la salinidad de la materia prima inicial, agudizándose en el caso de CESTIER2, que contiene un alto contenido (50%) en estiércol de cerdo.

En cuanto a la baja C.E del REC (2.18), confirma que la proporción de CESTIER2 (10.88) en su formulación es menor que la indicada por el fabricante (15%), como se discute en el pH, ya que la C.E es similar a la materia prima de mayor proporción en la mezcla, con un 70%, que es CVEG3 (2.15). En el caso del SUST la baja C.E también confirma que la proporción de uno de sus componetes sería menor a la indicada por el fabricante, en este caso de turba rubia de sphagnum, ya que la C.E del SUST (1.86) es ligeramente inferior a la de su mayor componete que es el CVEG3 con una C.E de 2.15.

4.4. BIOENSAYO DE GERMINACIÓN

4.4.1. % GERMINACIÓN

Tabla Nº 34. Efecto de los materiales en el porcentaje de germinación

| Material | % Germ. | |
|-----------------|----------------|---|
| CCORT1 | 100.13 | a |
| CCORT2 | 94.92 | a |
| CEDAR1 | 97.73 | a |
| CEDAR2 | 0.00 | c |
| CESTIER1 | 41.62 | b |
| CESTIER2 | 0.00 | c |
| CFORM1 | 0.00 | c |
| CFORM2 | 0.00 | c |
| CVEG1 | 31.30 | b |
| CVEG2 | 41.26 | b |
| CVEG3 | 100.05 | a |
| CVER | 101.22 | a |
| REC | 93.90 | a |
| SUST | 99.95 | a |

El análisis estadístico del parámetro % de germinación, agrupa los materiales en tres grupos homogéneos y estadísticamente diferentes entre ellos de forma significativa. En orden de mayor a menor, el primer grupo se forma por los materiales CVER, CCORT1, CVEG3, SUST, CEDAR1, CCORT2 y REC. El segundo grupo se compone por CESTIER1, CVEG2 y CVEG1. En último término se agrupan los materiales que no permitieron la germinación (CEDAR2, CESTIER2, CFORM1 y CFORM2).

Tabla Nº 35. Criterio de interpretación de los índices de germinación

| Germinación (%) | Clasificación |
|------------------------|------------------------------------------------|
| > 100 | Estímulo al % de germinación |
| < 80 | Inhibición al % de germinación (fitotoxicidad) |

En cuanto a la naturaleza de los materiales, las cortezas no afectan significativamente al % de germinación. En cuanto a los lodos EDAR, el CEDAR1 tampoco afecta la germinación en cambio el CEDAR2, la inhibe por completo, seguramente debido a que posee un alto contenido en recirculados del mismo proceso de compostaje, lo que provoca una mayor concentración de sustancias tóxicas. En el caso de los compost de estiércol, el CESTIER2 también inhibe por completo la germinación, debido en principio por poseer la salinidad más alta de todos los materiales, en cambio el CESTIER1 inhibe la germinación a la mitad, atribuible seguramente a alguna sustancia tóxica. En el caso de los compost de FORM, la inhibición de la germinación también es total, debido principalmente a la alta salinidad, por la utilización de lixiviados, con

altos contenidos en metales pesados y sustancias tóxicas derivadas de las materias primas y del propio proceso de compostaje. Todo esto agravado seguramente por la falta de madurez del producto final. Los compost de restos vegetales también inhiben a menos de la mitad la germinación en comparación con el testigo, excepto el CVEG3 que no lo afecta y que posee menor salinidad que CVEG1 y CVEG2. El vermicompost tampoco afecta la germinación, a pesar que su material base (CESTIER2) inhibe por completo la germinación, indicando esto que el proceso que realizan las lombrices a través de su digestión, favorece de alguna manera la desaparición de la fitotoxicidad del CESTIER2.

Los materiales complementarios no afectan significativamente la germinación.

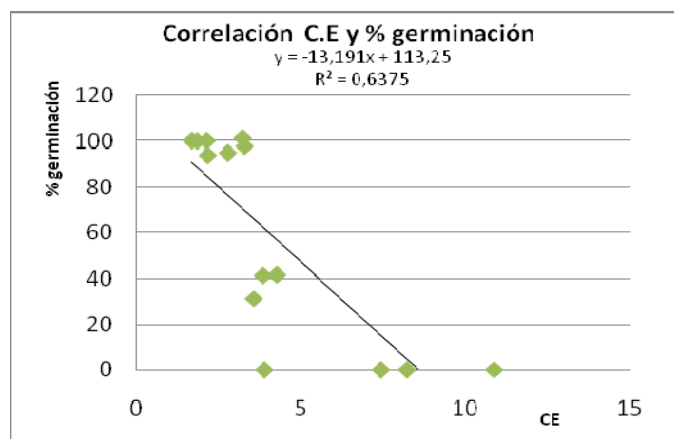


Figura N° 40. Correlación entre los parámetros M.O y DAH

La figura N° 40 muestra el efecto que tiene la CE sobre el Índice de germinación de las semillas, indicando con una correlación lineal negativa considerada buena, que a mayor C.E, el % de germinación es menor, inclusive llega a inhibirlo por completo cuando la CE es muy alta.

4.4.2. LONGITUD RADICULAR

Tabla N° 36. Efecto de los materiales en el porcentajes de longitud radicular

| Material | Long. Rad. (%) | |
|----------|----------------|----|
| CCORT1 | 120.47 | bc |
| CCORT2 | 152.50 | a |
| CEDAR1 | 107.30 | c |
| CEDAR2 | 0.00 | f |
| CESTIER1 | 44.46 | e |
| CESTIER2 | 0.00 | f |
| CFORM1 | 0.00 | f |
| CFORM2 | 0.00 | f |
| CVEG1 | 59.77 | e |
| CVEG2 | 45.01 | e |
| CVEG3 | 106.26 | c |
| CVER | 109.24 | bc |
| REC | 79.17 | d |
| SUST | 126.45 | b |

En cuanto al parámetro % longitud radicular, el resultado del análisis estadístico, arroja que con el máximo valor se diferencia al resto de materiales el CCORT2. Siguiendo el orden de mayor a menor, aparece un grupo homogéneo conformado por SUST, CCORT1 y CVER, seguido por otro grupo estadísticamente homogéneo formado por CEDAR1 y CVEG3, distintos a SUST, sin diferencias con CCORT1 y CVER. Luego se diferencia del resto el REC, con mayor longitud radicular que el grupo homogéneo siguiente, el cual se conforma por CVEG1, CEVEG2 y CESTIER1. Por último, se agrupan estadísticamente: CEDAR2, CESTIER2, CFORM1 y CFORM2, los cuáles no presentaron germinación.

Criterio usado para la interpretación:

Tabla N° 37. Criterio de interpretación del % de longitud radicular

| Long. radicular (%) | Clasificación |
|---------------------|------------------------------------------------------|
| > 100 | Estímulo al alargamiento radicular |
| < 80 | Inhibición al alargamiento radicular (fitotoxicidad) |

Los compost de corteza estimulan de forma notable porcentaje de alargamiento radicular, debido a que contienen en sus materias primas sustancias estimulantes del crecimiento, principalmente auxinas. En cuanto a los composts CESTIER1, CVEG1 y CVEG2, en el alargamiento radicular, se presentan con los mismos efectos claramente inhibitorios. En el caso de CEDAR1, CVEG3 y CVER estimulan ligeramente el alargamiento de las radículas.

En el caso del SUST, se considera que estimula el alargamiento de la raíz, no así en el caso del otro material complementario (REC), inhibe ligeramente este parámetro parámetro.

La siguiente figura muestra una correlación lineal negativa moderada entre la CE y el % longitud radicular de los materiales respecto al testigo, indicando que la CE también afecta la longitud de las radículas, disminuyendolas a medida que aumenta la C.E en los materiales.

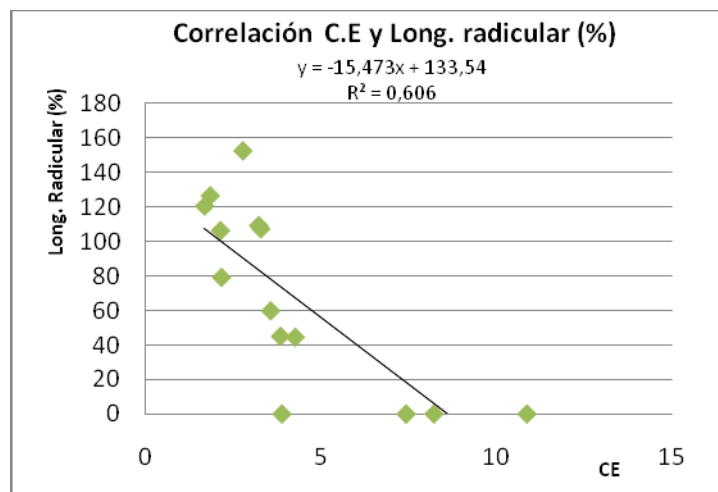


Figura N° 41. Correlación entre los parámetros C.E y Longitud radicular

4.4.3. ÍNDICE DE GERMINACIÓN

Tabla Nº 38. Porcentajes del índice de germinación de los materiales

| Material | Ind. Germ. (%) | |
|-----------------|-----------------------|----|
| CCORT1 | 120.64 | bc |
| CCORT2 | 144.69 | a |
| CEDAR1 | 104.95 | c |
| CEDAR2 | 0.00 | e |
| CESTIER1 | 18.36 | e |
| CESTIER2 | 0.00 | e |
| CFORM1 | 0.00 | e |
| CFORM2 | 0.00 | e |
| CVEG1 | 17.70 | e |
| CVEG2 | 19.37 | e |
| CVEG3 | 106.21 | c |
| CVER | 110.63 | bc |
| REC | 73.97 | d |
| SUST | 126.24 | ab |

Para el parámetro Índice de germinación, el análisis estadístico separa los materiales, en orden de mayor a menor, de la siguiente manera: con el mayor índice de germinación se ubica el CCORT2, que es homogéneo estadísticamente al SUST, este último sin diferenciarse significativamente de CCORT1 y CVER, distintos y menores a CCORT2. Continuando con el orden establecido aparecen agrupados estadísticamente CVEG3 y CEDAR1, menores que SUST, y homogéneos a CCORT1 y CVER. A continuación con menor Índice de germinación se diferencia el REC, que a su vez supera al siguiente grupo homogéneo entre sí y diferente significativamente al resto, conformado por CVEG2, CESTIER1, CVEG1, CEDAR2, CESTIER2, CFORM1 y CFORM2, con el menor Índice de germinación.

Tabla Nº 39. Criterio de interpretación del índice de germinación de los materiales

| Ind. Germinación (%) | Clasificación |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| > 100 | Estímulo la germinación (porcentaje y/o longitud) |
| < 80 | Inhibición de la germinación (porcentaje y/o longitud) (fitotoxicidad) |

En cuanto al índice de germinación, los resultados vienen condicionados por los anteriores parámetros, ya que este índice incluye el efecto que los materiales producen en el % de germinación y el alargamiento radicular.

El parámetro Índice de germinación esta correlacionado con la C.E de forma lineal negativa y moderada. Esto significa que la C.E, como se aprecia en los parámetros anteriores, afecta negativamente a la germinación a medida que conductividad aumenta. Esto se ve reflejado en la siguiente figura. Aunque la alta concentración de sales no es el único motivo, ya

que a similares CE, existen diferentes índices de germinación, lo que indica la presencia en algunos casos de sustancias fitotóxicas ó estimuladoras.

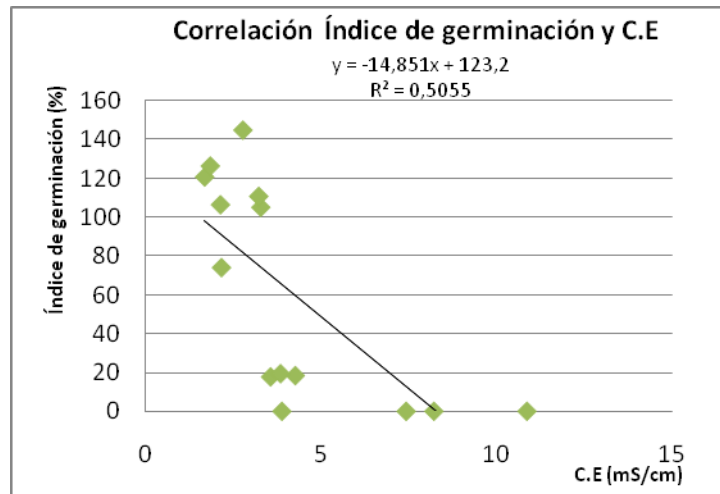


Figura Nº 42. Correlación entre los parámetros Índice de germinación y C.E

Considerando globalmente los resultados del ensayo de fitotoxicidad, se puede indicar que los dos composts de FORM, los dos de estiércol, los compost de restos vegetales CVEG1 y CVEG2 y el compost de lodos CEDAR2 son altamente tóxicos.

El origen de la fitotoxicidad de estos composts no puede establecerse, dado que este no era el objetivo del presente estudio. Sin embargo, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se puede indicar que, en parte, viene condicionado por una muy excesiva salinidad en los composts de FORM y de estiércol y además, aunque en menor grado excesiva, en los dos composts vegetales (CVEG1 y CVEG2) y en CEDAR2. Contrariamente los composts de cortezas, el vermicompost, el otro representante de los composts de restos vegetales (CVEG3) y el CEDAR1, aún presentando cierta salinidad, exhiben propiedades estimuladoras a la germinación, especialmente notorias en los de corteza. Este efecto estimulador, puede atribuirse a la presencia de sustancias fenólicas estimuladoras a la germinación ó bien a ácidos húmicos, auxinas u otros componentes, de acuerdo a lo indicado por diversos autores.

En cuanto a los materiales complementarios se observa una ligera fitotoxicidad en el recebo, que no se justifica por la salinidad, y un estímulo en el caso del sustrato (SUST) formado a base del CVEG3, que podría atribuirse, en parte, al contenido en auxinas y ácidos húmicos.



CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el presente Trabajo de final de carrera, y bajo las condiciones experimentales impuestas, se desprenden las siguientes conclusiones.

1. Los composts de corteza presentan baja densidad real (DR), baja densidad aparente húmeda (DAH), baja densidad aparente seca(DAS), bajo volúmen de contracción (VC), alta porosidad, alta capacidad de aire (CA), agua fácilmente disponible (AFD) por debajo de lo óptimo, agua de reserva (AR) por debajo de lo óptimo, agua difícilmente disponible (ADD) óptima, mediana heterogeneidad en la distribución de las partículas con mediano riesgo de empaquetamiento, alto contenido en materia (MO), alto % de humedad, pH neutro y conductividad eléctrica (CE) entre alta y bastante alta.
2. Los compost de EDAR presentan densidades medias (DR, DAS, DAH), VC medio en CEDAR1 y bajo en CEDAR2, porosidad media satisfactoria, CA óptima en CEDAR1 y alta en CEDAR2, AFD y AR por debajo de lo óptimo, ADD supera lo óptimo, homogeneidad en la distribución de las partículas en CEDAR1 y mediana heterogeneidad con mediano riesgo de empaquetamiento CEDAR2, contenido medio en MO, alto % de humedad en CEDAR1 y bajo en CEDAR2, pH de neutro a básico y CE entre bastante alta y muy alta.
3. Los compost de estiércol presentan densidades medias (DR, DAS, DAH), VC bajo, porosidad media satisfactoria, CA alta, AFD y AR por debajo de lo óptimo, ADD óptimo, homogeneidad en la distribución de las partículas en CESTIER1) y mediana con mediano riesgo de empaquetamiento en CESTIER2, contenido medio en MO, medio a alto % de humedad, pH ligeramente alcalino a alcalino y CE muy alta.
4. Los compost de FORM presentan densidades bajas (DR, DAS, DAH), VC bajo, porosidad media satisfactoria, CA muy alta, AFD, AR y ADD por debajo de lo óptimo, homogeneidad en la distribución de las partículas en CFORM1 y mediana heterogeneidad con mediano riesgo de empaquetamiento en CFORM2, contenido alto MO, muy bajo % de humedad, pH básico y CE muy alta.
5. Los compost de restos vegetales presentan densidades medias-altas (DR, DAS, DAH), VC muy bajo a bajo, porosidad medias, CA óptimas, AFD y AR por debajo de lo óptimo en CVEG2 y óptimo en CVEG1 y CVEG3, ADD óptimo, homogeneidad en la distribución de las partículas baja CVEG1, media en CVEG2) y alta en CVEG3, contenido bajo en MO, muy bajo % de humedad en CVEG1 y CVEG2 y medio en CVEG3, pH básico y CE de alta a muy alta.
6. El vermicompost presenta densidades medias (DR, DAS, DAH), VC medio, porosidad alta, CA alta, AFD y ADD óptimo, AR por debajo de lo óptimo, mediana heterogeneidad con mediano riesgo de empaquetamiento, contenido alto en MO, alto % de humedad, pH medianamente básico y CE bastante alta.

7. Los resultados del bioensayo de germinación ponen de manifiesto lo siguiente:
 - 7.1. Los dos composts de FORM (CFORM1 y CFORM2), el compost de lodos CEDAR2 y el compost de estiércol CESTIER2 son altamente fitotóxicos presentando un índice de germinación nulo.
 - 7.2. Los composts de restos vegetales CVEG1 y CVEG2 y el compost de estiércol CESTIER1 presentan también elevada fitotoxicidad, disminuyendo notablemente el % de germinación, el alargamiento radicular y el índice de germinación.
 - 7.3. Los dos composts de corteza (CCORT1 y CCORT2) y en menor medida el compost de lodos CEDAR1, el de restos vegetales CVEG3 y el vermicompost (CVER) estimulan el alargamiento radicular y el índice de germinación.
8. El estudio de las correlaciones entre parámetros se desprende lo siguiente:
 - 8.1. Existen correlaciones lineales positivas excelentes entre: DAS y DAH, DAH y agua a 1 kPa de tensión, agua a 1 kPa y agua a 5kPa, MO y Porosidad.
 - 8.2. Existen correlaciones lineales negativas excelentes entre: DR y MO, DAH y MO, Porosidad y DAS, Porosidad y DAH, MO y DAS, CA y agua a 1 kPa de tensión.

CONSIDERACIONES AGRONÓMICAS

Desde la óptica del uso de los composts analizados, como sustratos de cultivo ó componentes de sustrato de cultivo, se podría indicar lo siguiente:

9. El factor más limitante de la mayoría de los materiales analizados es su excesiva conductividad eléctrica (CE) ó salinidad, que condicionará el volúmen del compost en el sustrato mezcla final.
10. El elevado pH de la mayor parte de los composts es un factor a tener en cuenta también en el momento de proponer la naturaleza y reacción de los demás componentes de la mezcla.
11. Salvo el vermicompost, los demás composts analizados, se caracterizan por presentar elevada CA y bajo contenido en AFD y AD, por lo que es recomendable mezclarlos con materiales de granulometría inferior para aumentar su contenido en AD, ó someterlos a un programa de riego de alta frecuencia y baja dosis.
12. Considerando globalmente las limitaciones anteriores se puede concluir que, salvo el compost CCORT1, los demás composts analizados no pueden ser utilizados como componente único de sustrato de cultivo. La mayor parte de las limitaciones pueden subsanarse formulando mezclas con otros componentes de baja CE, pH ácidos y contenido elevado de AD.



BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- ABAD, M.; NOGUERA, P., 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. 287-347.
- ANSORENA, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-prensa.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas, S.L.
- CEREIJO, D., et al. 2007. “Estudio comparativo sobre la aptitud para compostaje de la fracción orgánica de RSU separada en origen y la recuperada por separación mecánica a partir de la fracción inerte”. Universidad de Vigo.
- Comisión Europea. “Ejemplos de buenas prácticas de compostaje y recogida selectiva de residuos”. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo (2000).
- DE BERTOLDI, M., et al. 1986. Compost: production, Quality and use. Artículo: Compost as a growing medium for horticultural plants. 399-405.
- ESPAÑA. REAL DECRETO 824/2005, de 8 de Julio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial de Estado Nº 171 del 19 de Julio de 2005, p. 25592 – 25669.
- MARTÍNEZ F., X. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. Actas de las I Jornadas de Sustratos, S.E.C.H. 55-65.
- MERINO, D.; ANSORENA, J., 1998. Césped deportivo. Construcción y mantenimiento. Ediciones Mundi-prensa. Madrid.
- NOVALES, A. 2008. Bondad del ajuste del modelo de regresión. Departamento de Economía cuantitativa. Universidad complutense.
- STOFFELLA, P. J., KAHN, B. A. 2000. Compost utilization in Horticultural Cropping Systems. Capítulos: 2,3 y 4.
- SOLIVA T., M. 2001. Compostatge i gestió de residuos orgànics. Diputació Barcelona.
- HOITINK, H. A.J.; KEENER, H. M. 1993. Science and engineering of composting. Artículo: Properties for establishing for utilization of composts in container media. 668-694.

- VERDONCK, O., et al. 1982. The determination of optimal parameters for the composting of solid organic wastes. Seminar "Composting of organic wastes" Denmark, pp 183-190.
- RODRÍGUEZ Y., J. R. 2000. Tutorial básico de estadística. Ediciones Medal.



ANEJOS

ANEJO Nº 1: DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DE LA MATERIA SECA

| Muestra | P. Bandeja (g) | P. Band. + sustrato (g) (1) | P. Sustrato (g) | (1) a 105º C (g) | P. Sustrato a 105 º C (g) | Humedad (%) | M. Seca (%) |
|-----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|---------------------------|-------------|-------------|
| CVEG1 | 11,17 | 113,9 | 102,73 | 88,57 | 77,4 | 24,66 | 75,34 |
| | 11,15 | 112,27 | 101,12 | 87,71 | 76,56 | 24,29 | 75,71 |
| | 11,16 | 113,8 | 102,64 | 88,81 | 77,65 | 24,35 | 75,65 |
| CFORM1 | 11,16 | 82,89 | 71,73 | 71,4 | 60,24 | 16,02 | 83,98 |
| | 11,17 | 82,08 | 70,91 | 70,66 | 59,49 | 16,10 | 83,90 |
| | 11,14 | 82,56 | 71,42 | 71,38 | 60,24 | 15,65 | 84,35 |
| CESTIER1 | 11,33 | 112,37 | 101,04 | 61,43 | 50,1 | 50,42 | 49,58 |
| | 11,38 | 112,07 | 100,69 | 60,77 | 49,39 | 50,95 | 49,05 |
| | 11,37 | 112,81 | 101,44 | 60,46 | 49,09 | 51,61 | 48,39 |
| CVEG2 | 11,01 | 111,63 | 100,62 | 81,65 | 70,64 | 29,80 | 70,20 |
| | 11,12 | 111,8 | 100,68 | 81,69 | 70,57 | 29,91 | 70,09 |
| | 11,13 | 111,68 | 100,55 | 82,45 | 71,32 | 29,07 | 70,93 |
| CVER | 16,79 | 216,65 | 199,86 | 112,45 | 95,66 | 52,14 | 47,86 |
| | 16,06 | 216,49 | 200,43 | 111,59 | 95,53 | 52,34 | 47,66 |
| | 16,13 | 216,58 | 200,45 | 111,16 | 95,03 | 52,59 | 47,41 |
| REC | 16,72 | 216,94 | 200,22 | 160,55 | 143,83 | 28,16 | 71,84 |
| | 16,1 | 216,4 | 200,3 | 160,34 | 144,24 | 27,99 | 72,01 |
| | 16,83 | 216,57 | 199,74 | 160,8 | 143,97 | 27,92 | 72,08 |
| SUST | 16,79 | 216,93 | 200,14 | 148,78 | 131,99 | 34,05 | 65,95 |
| | 16,07 | 216,72 | 200,65 | 148,01 | 131,94 | 34,24 | 65,76 |
| | 16,13 | 216,51 | 200,38 | 148,48 | 132,35 | 33,95 | 66,05 |
| CESTIER2 | 16,73 | 216,31 | 199,58 | 150,32 | 133,59 | 33,06 | 66,94 |
| | 16,16 | 216,87 | 200,71 | 150,54 | 134,38 | 33,05 | 66,95 |
| | 16,85 | 216,8 | 199,95 | 150,56 | 133,71 | 33,13 | 66,87 |
| CVEG3 | 16,8 | 216,28 | 199,48 | 146,19 | 129,39 | 35,14 | 64,86 |
| | 16,05 | 216,12 | 200,07 | 146,21 | 130,16 | 34,94 | 65,06 |
| | 16,13 | 216,4 | 200,27 | 148,1 | 131,97 | 34,10 | 65,90 |
| CEDAR1 | 16,74 | 216,65 | 199,91 | 100,13 | 83,39 | 58,29 | 41,71 |
| | 16,16 | 217,08 | 200,92 | 100,34 | 84,18 | 58,10 | 41,90 |
| | 16,84 | 218,08 | 201,24 | 100,86 | 84,02 | 58,25 | 41,75 |
| CCORT1 | 16,77 | 217,09 | 200,32 | 87,56 | 70,79 | 64,66 | 35,34 |
| | 16,07 | 216,66 | 200,59 | 86,08 | 70,01 | 65,10 | 34,90 |
| | 16,11 | 216,77 | 200,66 | 87,41 | 71,3 | 64,47 | 35,53 |
| CCORT2 | 16,72 | 216,78 | 200,06 | 109,16 | 92,44 | 53,79 | 46,21 |
| | 16,18 | 217,26 | 201,08 | 109,68 | 93,5 | 53,50 | 46,50 |
| | 16,84 | 217,57 | 200,73 | 112,03 | 95,19 | 52,58 | 47,42 |
| CEDAR2 | 16,82 | 215,49 | 198,67 | 185,14 | 168,32 | 15,28 | 84,72 |
| | 16,03 | 216,12 | 200,09 | 186,03 | 170 | 15,04 | 84,96 |
| | 16,12 | 216,73 | 200,61 | 186,13 | 170,01 | 15,25 | 84,75 |
| CFORM2 | 16,75 | 216,27 | 199,52 | 165,29 | 148,54 | 25,55 | 74,45 |
| | 16,13 | 216,2 | 200,07 | 166,2 | 150,07 | 24,99 | 75,01 |
| | 16,89 | 217,04 | 200,15 | 164,2 | 147,31 | 26,40 | 73,60 |

ANEJO Nº 2: DETERMINACIÓN DEL VOLÚMEN DE RETENCIÓN DE AGUA A DIFERENTES TENSIONES

| Muestra | Nº embudo | P. Emb. lleno+nylon (g) (1) | P. (1) + 2 cm muestra (g) | P. 2 cm muestra (g) | P. 2 cm muestra seca (g) | P. Emb. 10 cm (g) | Vol. Agua a 10 cm (%) | P. Emb. 50 cm (g) | Vol. Agua a 50 cm (%) | P. Emb. 100 cm (g) | Vol. Agua a 100 cm (%) |
|-----------------|-----------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| CVEG1 | 13 | 685,0 | 759,5 | 74,5 | 56,13 | 803,6 | 57,87 | 781,3 | 37,21 | 776,0 | 32,30 |
| | 14 | 553,3 | 621,8 | 68,5 | 51,86 | 662,0 | 56,99 | 640,9 | 35,83 | 636,2 | 31,12 |
| | 15 | 504,4 | 571,0 | 66,6 | 50,38 | 609,8 | 56,78 | 590,6 | 36,96 | 585,8 | 32,01 |
| CFORM1 | 16 | 562,3 | 597,8 | 35,5 | 29,81 | 627,2 | 28,24 | 615,6 | 18,91 | 613,8 | 17,46 |
| | 17 | 703,0 | 739,1 | 36,1 | 30,29 | 770,4 | 29,41 | 757,8 | 19,43 | 755,9 | 17,92 |
| | 18 | 690,2 | 728,6 | 38,4 | 32,39 | 759,3 | 27,20 | 749,7 | 20,09 | 747,9 | 18,76 |
| CESTIER1 | 13 | 685,7 | 713,7 | 28,0 | 13,88 | 726,2 | 44,09 | 717,8 | 30,18 | 716,0 | 27,20 |
| | 14 | 553,7 | 583,3 | 29,6 | 14,52 | 594,8 | 42,11 | 587,0 | 29,75 | 585,3 | 27,06 |
| | 15 | 504,9 | 531,5 | 26,6 | 12,87 | 543,8 | 46,50 | 535,6 | 31,85 | 533,8 | 28,64 |
| CVEG2 | 16 | 562,5 | 599,3 | 36,8 | 25,84 | 619,3 | 45,54 | 611,0 | 33,34 | 608,7 | 29,95 |
| | 17 | 703,5 | 737,2 | 33,7 | 23,62 | 756,7 | 47,58 | 749,5 | 36,00 | 747,1 | 32,14 |
| | 18 | 691,8 | 729,0 | 37,2 | 26,39 | 749,7 | 45,39 | 741,8 | 34,01 | 739,0 | 29,98 |
| CVER | 13 | 685,3 | 740,2 | 54,9 | 26,28 | 755,4 | 50,03 | 743,0 | 35,87 | 740,7 | 33,25 |
| | 14 | 553,4 | 599,8 | 46,4 | 22,12 | 614,0 | 52,21 | 601,8 | 35,66 | 600,1 | 33,35 |
| | 15 | 504,7 | 544,0 | 39,3 | 18,63 | 555,2 | 51,31 | 545,8 | 36,18 | 544,3 | 33,76 |
| REC | 16 | 562,1 | 621,6 | 59,5 | 42,74 | 651,2 | 60,74 | 634,4 | 38,73 | 632,0 | 35,58 |
| | 17 | 702,9 | 756,4 | 53,5 | 38,53 | 777,3 | 52,14 | 768,0 | 38,63 | 765,7 | 35,28 |
| | 18 | 690,6 | 752,0 | 61,4 | 44,26 | 776,8 | 53,07 | 764,9 | 38,02 | 762,4 | 34,85 |
| SUST | 13 | 686,4 | 717,6 | 31,2 | 20,58 | 739,6 | 58,66 | 728,1 | 37,99 | 724,9 | 32,23 |
| | 14 | 553,8 | 583,0 | 29,2 | 19,20 | 603,1 | 58,00 | 593,4 | 39,31 | 590,3 | 33,34 |
| | 15 | 504,9 | 531,4 | 26,5 | 17,50 | 551,0 | 60,45 | 541,5 | 40,37 | 538,8 | 34,66 |
| CESTIER2 | 16 | 562,2 | 601,6 | 39,4 | 26,37 | 629,3 | 43,24 | 615,7 | 28,80 | 614,5 | 27,53 |
| | 17 | 703,6 | 741,8 | 38,2 | 25,58 | 769,9 | 44,58 | 756,4 | 29,80 | 755,1 | 28,38 |
| | 18 | 691,6 | 727,4 | 35,8 | 23,94 | 754,2 | 45,22 | 741,2 | 30,01 | 740,0 | 28,61 |
| CVEG3 | 13 | 685,8 | 722,5 | 36,7 | 23,80 | 743,1 | 60,50 | 730,4 | 37,56 | 728,1 | 33,41 |
| | 14 | 553,6 | 586,7 | 33,1 | 21,53 | 605,5 | 60,64 | 594,0 | 37,67 | 591,8 | 33,28 |
| | 15 | 505,2 | 541,1 | 35,9 | 23,66 | 560,6 | 57,70 | 548,8 | 36,25 | 546,5 | 32,07 |
| CEDAR1 | 16 | 562,7 | 608,2 | 45,5 | 18,98 | 620,3 | 56,97 | 612,0 | 44,73 | 610,2 | 42,07 |
| | 17 | 704,2 | 746,3 | 42,1 | 17,64 | 758,6 | 58,36 | 750,0 | 44,70 | 748,1 | 41,69 |
| | 18 | 691,6 | 739,2 | 47,6 | 19,87 | 752,1 | 57,24 | 743,3 | 44,84 | 741,2 | 41,88 |
| CCORT1 | 13 | 685,9 | 724,8 | 38,9 | 13,75 | 733,0 | 43,67 | 724,1 | 32,02 | 721,5 | 28,61 |
| | 14 | 553,8 | 591,0 | 37,2 | 12,98 | 599,0 | 44,66 | 590,3 | 32,60 | 587,5 | 28,72 |
| | 15 | 505,0 | 540,6 | 35,6 | 12,65 | 548,3 | 43,61 | 539,8 | 31,52 | 537,0 | 27,53 |
| CCORT2 | 16 | 562,6 | 598,3 | 35,7 | 16,50 | 611,9 | 45,74 | 601,8 | 31,66 | 599,0 | 27,75 |
| | 17 | 703,9 | 736,7 | 32,8 | 15,25 | 748,2 | 43,81 | 739,7 | 30,99 | 737,1 | 27,07 |
| | 18 | 691,8 | 727,9 | 36,1 | 17,12 | 741,2 | 43,37 | 731,0 | 29,67 | 728,3 | 26,04 |
| CEDAR2 | 13 | 685,6 | 722,3 | 36,7 | 31,09 | 759,7 | 42,88 | 746,0 | 29,22 | 743,0 | 26,23 |
| | 14 | 553,6 | 587,1 | 33,5 | 28,46 | 622,2 | 43,72 | 609,4 | 29,78 | 606,7 | 26,83 |
| | 15 | 504,7 | 537,5 | 32,8 | 27,80 | 569,5 | 41,27 | 559,9 | 30,56 | 557,4 | 27,77 |
| CFORM2 | 16 | 562,5 | 590,6 | 28,1 | 20,92 | 610,7 | 26,08 | 602,8 | 18,53 | 601,2 | 17,00 |
| | 17 | 703,6 | 727,2 | 23,6 | 17,70 | 744,1 | 25,76 | 737,7 | 18,53 | 736,0 | 16,61 |
| | 18 | 691,4 | 719,5 | 28,1 | 20,68 | 739,3 | 26,32 | 731,7 | 18,97 | 729,8 | 17,13 |

ANEJO Nº 3: DETERMINACIÓN DE MATERIA MINERAL, MATERIA ORGÁNICA Y D.R.

| Muestra | Nº Gresol | Tara Gresol (1)(g) | Peso muestra (g) | Peso (1) + muestra (g) | Peso final (g) | M.Mineral (g) | M.Orgánica (g) | % M.M. | % M.O. | D.R. (g/cm3) |
|----------|-----------|--------------------|------------------|------------------------|----------------|---------------|----------------|--------|--------|--------------|
| CVEG1 | 21 | 34,9051 | 2,0392 | 36,9443 | 36,1787 | 1,2736 | 0,7656 | 62,46 | 37,54 | 2,02 |
| | 1 | 27,7433 | 2,0167 | 29,76 | 29,0625 | 1,3192 | 0,6975 | 65,41 | 34,59 | 2,06 |
| | 4 | 31,8255 | 2,0005 | 33,826 | 33,0907 | 1,2652 | 0,7353 | 63,24 | 36,76 | 2,03 |
| CFORM1 | 13 | 35,0769 | 2,0072 | 37,0841 | 35,6959 | 0,619 | 1,3882 | 30,84 | 69,16 | 1,69 |
| | 17 | 31,4516 | 2,0215 | 33,4731 | 32,1288 | 0,6772 | 1,3443 | 33,50 | 66,50 | 1,71 |
| | 12 | 34,3275 | 2,0165 | 36,344 | 34,9703 | 0,6428 | 1,3737 | 31,88 | 68,12 | 1,69 |
| CESTIER1 | 14 | 31,861 | 2,0095 | 33,8705 | 32,7137 | 0,8527 | 1,1568 | 42,43 | 57,57 | 1,79 |
| | 61 | 34,0879 | 2,0209 | 36,1088 | 34,9496 | 0,8617 | 1,1592 | 42,64 | 57,36 | 1,80 |
| | 65 | 30,3055 | 2,0003 | 32,3058 | 31,2232 | 0,9177 | 1,0826 | 45,88 | 54,12 | 1,83 |
| CVEG2 | 51 | 31,9339 | 2,0093 | 33,9432 | 33,059 | 1,1251 | 0,8842 | 55,99 | 44,01 | 1,94 |
| | 67 | 33,6487 | 2,0664 | 35,7151 | 34,7977 | 1,149 | 0,9174 | 55,60 | 44,40 | 1,94 |
| | 58 | 32,0612 | 2,0013 | 34,0625 | 33,2651 | 1,2039 | 0,7974 | 60,16 | 39,84 | 1,99 |
| CVER | 14 | 34,3266 | 2,0161 | 36,3427 | 35,2482 | 0,9216 | 1,0945 | 45,71 | 54,29 | 1,83 |
| | 61 | 31,305 | 2,0026 | 33,3076 | 32,2486 | 0,9436 | 1,059 | 47,12 | 52,88 | 1,84 |
| | 65 | 32,4314 | 2,0031 | 34,4345 | 33,3717 | 0,9403 | 1,0628 | 46,94 | 53,06 | 1,84 |
| REC | 58 | 32,0632 | 2,0565 | 34,1197 | 33,4076 | 1,3444 | 0,7121 | 65,37 | 34,63 | 2,06 |
| | 12 | 34,3313 | 2,0329 | 36,3642 | 35,6449 | 1,3136 | 0,7193 | 64,62 | 35,38 | 2,05 |
| | 25 | 34,3284 | 2,0062 | 36,3346 | 35,6107 | 1,2823 | 0,7239 | 63,92 | 36,08 | 2,04 |
| SUST | 61 | 34,0909 | 2,0229 | 36,1138 | 35,2147 | 1,1238 | 0,8991 | 55,55 | 44,45 | 1,94 |
| | 13 | 35,0812 | 2,0182 | 37,0994 | 36,2478 | 1,1666 | 0,8516 | 57,80 | 42,20 | 1,96 |
| | 66 | 31,3067 | 2,0235 | 33,3302 | 32,4733 | 1,1666 | 0,8569 | 57,65 | 42,35 | 1,96 |
| CESTIER2 | 3 | 31,8645 | 2,0152 | 33,8797 | 32,7841 | 0,9196 | 1,0956 | 45,63 | 54,37 | 1,83 |
| | 51 | 31,9363 | 2,0089 | 33,9452 | 32,8423 | 0,906 | 1,1029 | 45,10 | 54,90 | 1,82 |
| | 4 | 31,83 | 2,0001 | 33,8301 | 32,7508 | 0,9208 | 1,0793 | 46,04 | 53,96 | 1,83 |
| CVEG3 | 1 | 27,7472 | 2,0596 | 29,8068 | 29,0735 | 1,3263 | 0,7333 | 64,40 | 35,60 | 2,05 |
| | 2 | 31,4561 | 2,0033 | 33,4594 | 32,7696 | 1,3135 | 0,6898 | 65,57 | 34,43 | 2,06 |
| | 65 | 30,3079 | 2,0219 | 32,3298 | 31,6255 | 1,3176 | 0,7043 | 65,17 | 34,83 | 2,06 |
| CEDAR1 | 19 | 34,9095 | 2,0157 | 36,9252 | 35,8459 | 0,9364 | 1,0793 | 46,46 | 53,54 | 1,84 |
| | 67 | 33,6511 | 2,0493 | 35,7004 | 34,6089 | 0,9578 | 1,0915 | 46,74 | 53,26 | 1,84 |
| | 26 | 32,4329 | 2,0033 | 34,4362 | 33,3181 | 0,8852 | 1,1181 | 44,19 | 55,81 | 1,81 |
| CCORT1 | 53 | 31,3471 | 1,519 | 32,8661 | 31,5166 | 0,1695 | 1,3495 | 11,16 | 88,84 | 1,53 |
| | 2 | 30,7708 | 1,5057 | 32,2765 | 30,949 | 0,1782 | 1,3275 | 11,84 | 88,16 | 1,53 |
| | 72 | 33,3002 | 1,5062 | 34,8064 | 33,4736 | 0,1734 | 1,3328 | 11,51 | 88,49 | 1,53 |
| CCORT2 | 71 | 30,3708 | 1,5127 | 31,8835 | 30,83 | 0,4592 | 1,0535 | 30,36 | 69,64 | 1,68 |
| | 74 | 32,9908 | 1,5083 | 34,4991 | 33,4063 | 0,4155 | 1,0928 | 27,55 | 72,45 | 1,66 |
| | 73 | 34,6629 | 1,5087 | 36,1716 | 35,1391 | 0,4762 | 1,0325 | 31,56 | 68,44 | 1,69 |
| CEDAR2 | 69 | 33,1002 | 1,5124 | 34,6126 | 33,6729 | 0,5727 | 0,9397 | 37,87 | 62,13 | 1,75 |
| | 45 | 31,4456 | 1,5028 | 32,9484 | 32,0098 | 0,5642 | 0,9386 | 37,54 | 62,46 | 1,75 |
| | 70 | 33,3902 | 2,0003 | 35,3905 | 34,1335 | 0,7433 | 1,257 | 37,16 | 62,84 | 1,74 |
| CFORM2 | 15 | 30,6021 | 1,5432 | 32,1453 | 31,0856 | 0,4835 | 1,0597 | 31,33 | 68,67 | 1,69 |
| | 27 | 34,4991 | 1,5611 | 36,0602 | 34,9385 | 0,4394 | 1,1217 | 28,15 | 71,85 | 1,66 |
| | 38 | 33,4096 | 1,516 | 34,9256 | 33,9039 | 0,4943 | 1,0217 | 32,61 | 67,39 | 1,70 |

ANEJO N° 4: DETERMINACIÓN DE pH Y CE

| Muestra | Repetición | pH | C.E. (mS/cm a 25° C) |
|-----------------|------------|------|----------------------|
| CVEG1 | 1 | 8,48 | 3,56 |
| | 2 | 8,47 | 3,71 |
| | 3 | 8,51 | 3,48 |
| CFORM1 | 1 | 8,28 | 7,43 |
| | 2 | 8,26 | 7,42 |
| | 3 | 8,28 | 7,46 |
| CESTIER1 | 1 | 8,92 | 4,33 |
| | 2 | 8,93 | 4,24 |
| | 3 | 8,92 | 4,28 |
| CVEG2 | 1 | 8,3 | 3,91 |
| | 2 | 8,31 | 3,86 |
| | 3 | 8,3 | 3,8 |
| CVER | 1 | 7,46 | 3,27 |
| | 2 | 7,48 | 3,19 |
| | 3 | 7,47 | 3,27 |
| REC | 1 | 8,1 | 2,2 |
| | 2 | 8,1 | 2,17 |
| | 3 | 8,07 | 2,18 |
| SUST | 1 | 8,19 | 1,93 |
| | 2 | 8,25 | 1,8 |
| | 3 | 8,26 | 1,85 |
| CESTIER2 | 1 | 9,42 | 10,59 |
| | 2 | 9,43 | 11,04 |
| | 3 | 9,44 | 11,02 |
| CVEG3 | 1 | 8,45 | 2,09 |
| | 2 | 8,48 | 2,23 |
| | 3 | 8,47 | 2,12 |
| CEDAR1 | 1 | 6,53 | 3,28 |
| | 2 | 6,51 | 3,37 |
| | 3 | 6,49 | 3,26 |
| CCORT1 | 1 | 6,52 | 1,67 |
| | 2 | 6,54 | 1,43 |
| | 3 | 6,59 | 2,01 |
| CCORT2 | 1 | 7,27 | 2,82 |
| | 2 | 7,32 | 2,6 |
| | 3 | 7,31 | 2,94 |
| CEDAR2 | 1 | 8,01 | 3,66 |
| | 2 | 8,04 | 3,92 |
| | 3 | 8,05 | 4,13 |
| CFORM2 | 1 | 8,26 | 8,24 |
| | 2 | 8,22 | 7,99 |
| | 3 | 8,24 | 8,46 |

ANEJO Nº 5: DETERMINACIÓN DEL % GERMINACIÓN, LONG. RAD.(%) E I. GERMINACIÓN

| SUSTRATO | Rep. | % Germinación | Long. Raíz (%) | Indice germinación (%) |
|-----------------|------|---------------|----------------|------------------------|
| CVEG1 | 1 | 56,522 | 48,444 | 27,381 |
| | 2 | 20,833 | 70,556 | 14,699 |
| | 3 | 21,739 | 59,695 | 12,977 |
| | 4 | 26,087 | 60,379 | 15,751 |
| CFORM1 | 1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| CESTIER1 | 1 | 56,522 | 46,921 | 26,521 |
| | 2 | 45,833 | 45,124 | 20,682 |
| | 3 | 25,000 | 52,026 | 13,007 |
| | 4 | 39,130 | 33,785 | 13,220 |
| CVEG2 | 1 | 34,783 | 48,885 | 17,004 |
| | 2 | 58,333 | 52,915 | 30,867 |
| | 3 | 45,833 | 46,472 | 21,300 |
| | 4 | 26,087 | 31,787 | 8,292 |
| CVER | 1 | 100,000 | 100,178 | 100,178 |
| | 2 | 104,545 | 118,995 | 124,404 |
| | 3 | 104,348 | 106,268 | 110,888 |
| | 4 | 96,000 | 111,517 | 107,057 |
| REC | 1 | 108,696 | 76,995 | 83,691 |
| | 2 | 90,909 | 89,700 | 81,545 |
| | 3 | 100,000 | 69,411 | 69,411 |
| | 4 | 76,000 | 80,559 | 61,225 |
| SUST | 1 | 95,652 | 141,679 | 135,519 |
| | 2 | 100,000 | 115,398 | 115,398 |
| | 3 | 100,000 | 120,910 | 120,910 |
| | 4 | 104,167 | 127,804 | 133,129 |
| CESTIER2 | 1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| CVEG3 | 1 | 100,000 | 102,720 | 102,720 |
| | 2 | 104,545 | 103,936 | 108,661 |
| | 3 | 95,652 | 112,954 | 108,043 |
| | 4 | 100,000 | 105,435 | 105,435 |
| CEDAR1 | 1 | 100,000 | 106,596 | 106,596 |
| | 2 | 90,909 | 96,320 | 87,564 |
| | 3 | 104,348 | 105,680 | 110,275 |
| | 4 | 95,652 | 120,607 | 115,363 |
| CCORT1 | 1 | 104,348 | 126,177 | 131,663 |
| | 2 | 96,000 | 120,716 | 115,887 |
| | 3 | 96,000 | 119,591 | 114,807 |
| | 4 | 104,167 | 115,391 | 120,199 |
| CCORT2 | 1 | 100,000 | 145,755 | 145,755 |
| | 2 | 92,000 | 165,890 | 152,619 |
| | 3 | 96,000 | 158,797 | 152,445 |
| | 4 | 91,667 | 139,562 | 127,932 |
| CEDAR2 | 1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| CFORM2 | 1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

ANEJO Nº 6: DETERMINACIÓN DE LA MASA DE MATERIAL EN LAS DIFERENTES CRIBAS

| SUSTRATO | 25 mm | 12,5 mm | 6,3 mm | 5 mm | 2 mm | 1 mm | 0,5 mm | 0,25 mm | 0,125 mm | menor 0,125 mm |
|---------------------|-------|---------|--------|------|-------|-------|--------|---------|----------|----------------|
| CVEG1 (g) | 0,13 | 0,03 | 0,62 | 1,17 | 17,22 | 16,01 | 14,44 | 17,39 | 17,52 | 15,48 |
| | 0,02 | 0,03 | 0,77 | 1,67 | 18,37 | 15,77 | 14,11 | 16,73 | 17,17 | 15,36 |
| | 0,02 | 0,02 | 1,15 | 1,73 | 17,55 | 16,31 | 14,01 | 16,39 | 17,25 | 15,57 |
| CFORM1 (g) | 0,02 | 0,16 | 5,32 | 4,07 | 34,73 | 20,79 | 15,21 | 9,35 | 5,02 | 5,34 |
| | 0,26 | 0,14 | 3,85 | 4,74 | 37,38 | 19,00 | 15,37 | 9,07 | 4,89 | 5,29 |
| | 0,09 | 0,12 | 4,56 | 3,87 | 28,00 | 23,81 | 16,34 | 10,88 | 6,36 | 5,97 |
| CESTIER1 (g) | 0,00 | 1,11 | 5,67 | 4,17 | 26,09 | 27,05 | 20,36 | 10,56 | 3,05 | 1,94 |
| | 0,00 | 3,03 | 4,06 | 3,39 | 27,42 | 26,95 | 20,57 | 9,98 | 2,79 | 1,81 |
| | 0,00 | 0,02 | 5,48 | 2,67 | 28,80 | 27,04 | 20,79 | 10,48 | 2,85 | 1,86 |
| CVEG2 (g) | 0,01 | 0,01 | 4,31 | 4,18 | 21,10 | 20,00 | 16,28 | 13,65 | 9,74 | 10,72 |
| | 0,01 | 0,02 | 7,50 | 3,33 | 20,53 | 19,75 | 15,84 | 13,20 | 9,41 | 10,41 |
| | 0,01 | 0,65 | 6,81 | 4,43 | 20,62 | 19,36 | 15,61 | 12,80 | 9,29 | 10,41 |
| CVER (g) | 0,00 | 4,84 | 12,20 | 5,26 | 18,96 | 19,86 | 21,17 | 12,79 | 3,53 | 1,38 |
| | 0,02 | 4,69 | 10,16 | 4,49 | 20,06 | 20,52 | 22,11 | 13,21 | 3,35 | 1,39 |
| | 2,59 | 5,25 | 7,98 | 3,86 | 19,65 | 20,61 | 21,82 | 13,41 | 3,51 | 1,33 |
| REC (g) | 0,01 | 0,04 | 2,51 | 3,73 | 22,26 | 16,96 | 15,35 | 17,27 | 12,55 | 9,31 |
| | 0,01 | 0,02 | 2,85 | 4,11 | 22,18 | 17,32 | 15,53 | 16,76 | 12,24 | 8,98 |
| | 0,02 | 1,70 | 2,91 | 3,71 | 21,45 | 16,53 | 14,84 | 17,03 | 12,62 | 9,20 |
| SUST (g) | 0,01 | 0,76 | 5,19 | 4,21 | 20,99 | 17,86 | 15,95 | 14,41 | 11,92 | 8,70 |
| | 0,02 | 1,56 | 6,15 | 3,32 | 19,56 | 17,91 | 16,08 | 14,54 | 12,05 | 8,80 |
| | 0,03 | 0,35 | 4,07 | 4,55 | 21,43 | 17,61 | 15,98 | 14,60 | 12,39 | 8,99 |
| CESTIER2 (g) | 0,03 | 0,03 | 6,87 | 5,09 | 26,71 | 20,36 | 16,12 | 12,03 | 7,10 | 5,67 |
| | 0,01 | 0,02 | 6,48 | 4,84 | 27,02 | 21,18 | 15,89 | 11,75 | 7,03 | 5,77 |
| | 0,00 | 1,17 | 11,72 | 8,09 | 33,33 | 18,52 | 11,35 | 7,20 | 4,34 | 4,28 |
| CVEG3 (g) | 0,00 | 0,02 | 1,93 | 1,14 | 14,79 | 23,38 | 23,13 | 17,80 | 11,47 | 6,33 |
| | 0,00 | 0,00 | 1,89 | 1,54 | 15,67 | 22,35 | 22,77 | 17,99 | 11,64 | 6,14 |
| | 0,01 | 0,05 | 1,40 | 1,14 | 13,90 | 23,01 | 23,77 | 18,33 | 11,84 | 6,55 |
| CEDAR1 (g) | 0,00 | 7,27 | 15,20 | 7,65 | 31,12 | 20,50 | 12,71 | 4,47 | 0,80 | 0,28 |
| | 0,00 | 3,47 | 11,01 | 7,02 | 33,13 | 22,87 | 14,61 | 6,16 | 1,28 | 0,45 |
| | 2,56 | 4,24 | 10,13 | 6,16 | 31,25 | 23,08 | 15,17 | 5,85 | 1,11 | 0,45 |
| CCORT1 (g) | 0,00 | 0,22 | 13,13 | 9,55 | 38,20 | 16,21 | 11,75 | 5,61 | 2,77 | 2,56 |
| | 0,00 | 0,25 | 14,43 | 9,32 | 35,73 | 15,95 | 12,00 | 6,04 | 3,09 | 3,18 |
| | 0,00 | 0,00 | 14,19 | 9,19 | 35,52 | 15,99 | 12,11 | 6,19 | 3,26 | 3,55 |
| CCORT2 (g) | 0,00 | 0,07 | 9,40 | 7,65 | 31,96 | 17,17 | 15,93 | 10,59 | 4,04 | 3,18 |
| | 0,00 | 0,00 | 8,19 | 7,48 | 31,16 | 17,52 | 16,97 | 11,24 | 4,19 | 3,27 |
| | 0,00 | 0,17 | 9,48 | 8,97 | 32,88 | 16,19 | 16,22 | 9,65 | 3,63 | 2,80 |
| CEDAR2 (g) | 0,00 | 0,01 | 3,15 | 4,84 | 21,90 | 20,97 | 19,36 | 13,94 | 8,85 | 6,99 |
| | 0,00 | 0,01 | 4,21 | 3,54 | 23,97 | 21,20 | 18,79 | 13,34 | 8,38 | 6,56 |
| | 0,00 | 0,02 | 3,53 | 4,99 | 26,99 | 20,64 | 17,63 | 12,19 | 7,67 | 6,35 |
| CFORM2 (g) | 0,17 | 0,49 | 10,37 | 3,04 | 30,88 | 18,80 | 14,56 | 10,03 | 5,98 | 5,68 |
| | 0,05 | 0,52 | 22,58 | 1,18 | 22,39 | 18,45 | 14,58 | 9,56 | 5,51 | 5,20 |
| | 0,09 | 0,59 | 16,34 | 2,25 | 28,19 | 16,78 | 14,90 | 10,04 | 5,81 | 5,01 |

ANEJO Nº 7: DETERMINACIÓN DE LA MASA ACUMULADA DE LAS DIFERENTES FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS

| Tamaño partícula (µm) | 12,5 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 6300 | 12500 | 25000 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| CCORT1 | 3,10 | 6,14 | 12,09 | 24,04 | 40,09 | 76,57 | 85,93 | 99,84 | 100,00 | 100,00 |
| CCORT2 | 3,09 | 7,04 | 17,53 | 33,90 | 50,86 | 82,86 | 90,90 | 99,92 | 100,00 | 100,00 |
| CEDAR1 | 0,39 | 1,45 | 6,95 | 21,11 | 43,26 | 75,10 | 82,04 | 94,15 | 99,15 | 100,00 |
| CEDAR2 | 6,63 | 14,93 | 28,08 | 46,68 | 67,61 | 91,90 | 96,36 | 99,99 | 100,00 | 100,00 |
| CESTIER1 | 1,87 | 4,77 | 15,11 | 35,68 | 62,69 | 90,13 | 93,54 | 98,61 | 100,00 | 100,00 |
| CESTIER2 | 5,24 | 11,40 | 21,73 | 36,18 | 56,20 | 85,21 | 91,22 | 99,58 | 99,99 | 100,00 |
| CFORM1 | 5,53 | 10,95 | 20,72 | 36,36 | 57,56 | 90,93 | 95,16 | 99,74 | 99,88 | 100,00 |
| CFORM2 | 5,30 | 11,06 | 20,94 | 35,62 | 53,63 | 80,79 | 82,94 | 99,37 | 99,90 | 100,00 |
| CVEG1 | 15,47 | 32,78 | 49,62 | 63,80 | 79,84 | 97,55 | 99,07 | 99,92 | 99,95 | 100,00 |
| CVEG2 | 10,51 | 19,99 | 33,21 | 49,12 | 68,83 | 89,58 | 93,56 | 99,77 | 99,99 | 100,00 |
| CVEG3 | 6,34 | 17,99 | 36,03 | 59,26 | 82,17 | 96,96 | 98,23 | 99,97 | 100,00 | 100,00 |
| CVER | 1,37 | 4,83 | 17,96 | 39,66 | 59,99 | 79,55 | 84,09 | 94,20 | 99,13 | 100,00 |
| REC | 9,16 | 21,64 | 38,65 | 53,89 | 70,83 | 92,79 | 96,64 | 99,40 | 99,99 | 100,00 |
| SUST | 8,83 | 20,95 | 35,47 | 51,47 | 69,26 | 89,93 | 93,95 | 99,09 | 99,98 | 100,00 |

ANEJO Nº 8: DETERMINACIÓN DE VALORES D_x E ÍNDICES DE GRADACIÓN D_{90}/D_{10} Y D_{80}/D_{20}

| SUSTRATOS | D10 (μm) | D20 (μm) | D50 (μm) | D80 (μm) | D90 (μm) | D90/D10 | D80/D20 |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|
| CCORT1 | 206.82 | 415.74 | 1271.13 | 3100.55 | 5379.08 | 26.18 | 7.49 |
| CCORT2 | 160.74 | 287.96 | 976.11 | 1909.67 | 4649.42 | 28.93 | 6.65 |
| CEDAR1 | 305.42 | 485.73 | 1213.30 | 3785.45 | 5828.13 | 19.14 | 7.68 |
| CEDAR2 | 58.53 | 173.72 | 579.74 | 1505.63 | 1920.39 | 33.16 | 8.68 |
| CESTIER1 | 188.34 | 309.45 | 765.08 | 1631.84 | 2349.75 | 12.49 | 5.27 |
| CESTIER2 | 103.40 | 247.91 | 859.39 | 1915.81 | 3782.38 | 36.81 | 7.92 |
| CFORM1 | 107.28 | 243.39 | 829.00 | 1666.49 | 1970.67 | 18.86 | 6.88 |
| CFORM2 | 104.45 | 238.20 | 900.16 | 2987.54 | 5481.23 | 52.58 | 12.39 |
| CVEG1 | . | 41.97 | 258.21 | 1015.84 | 1573.26 | . | 24.20 |
| CVEG2 | . | 124.76 | 523.80 | 1539.07 | 2663.55 | . | 12.33 |
| CVEG3 | 47.85 | 138.94 | 400.51 | 952.87 | 1527.15 | 31.93 | 6.86 |
| CVER | 174.23 | 273.51 | 754.55 | 2422.21 | 5774.38 | 33.15 | 8.84 |
| REC | 20.06 | 110.27 | 436.11 | 1417.87 | 1873.35 | 93.80 | 12.86 |
| SUST | 23.35 | 116.20 | 477.01 | 1520.35 | 2343.47 | 100.28 | 13.09 |