

Sustratos para el cultivo sin suelo.

Materiales, propiedades y manejo*

PEDRO-FLORIÁN MARTÍNEZ¹ Y DOLORS ROCA²

1. Introducción

El suelo, medio en el que tienen lugar funciones de tanta importancia para la vida de las plantas, con frecuencia tiene condiciones limitantes que, en diferentes grados, impiden buenos resultados agronómicos. Por este motivo, en la horticultura, es frecuente reemplazar el suelo natural por sustratos de origen diverso, que en alguna o en todas las fases de un cultivo permiten superar esas condiciones limitantes y colocar el sistema radicular y la planta completa en una situación más cercana a la óptima para su alimentación hídrica y mineral.

La posibilidad de aprovechar como sustrato hortícola la diversidad de materiales disponibles en nuestro entorno, está supeditada al buen conocimiento de sus propiedades, con el fin de saber si requieren alguna preparación previa a su uso, decidir sus aplicaciones y adoptar las técnicas de manejo pertinentes. Hay una preocupación por llegar a acuerdos sobre los criterios y métodos que permitan normalizar y homogeneizar la caracterización de los sustratos en horticultura, que se pone de manifiesto en numerosos trabajos (de Boodt y Verdonck, 1972; Bunt, 1983; Andre, 1987; Gras, 1987; Arrieta y Terés, 1992; Cadahía y Eymar, 1993; Diego, 1992; González *et al.*, 1992; Guerrero *et al.*, 1992; Martínez, 1992; Brun, 1993; Noguera, 1999; Abad *et al.*, 2001). El Grupo de Trabajo de “Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo” del Comité Técnico de Normalización AEN/CTN 142 de AENOR, ha efectuado un esfuerzo notable, que ha permitido avanzar considerablemente en la actualización y el establecimiento de normas para la caracterización de los sustratos, acordes con la normativa europea (CEN/TC 223) (CEN Normas UNE-EN, 2001-2008) (Abad *et al.*, 2001; Rodríguez y Vidal, 2004). Especialmente esta labor es indispensable

* Para citar este capítulo: Martínez, P.F. y Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 37-77.

1 Consultor Internacional en Horticultura, pedroflorianmtz@gmail.com

2 Investigadora, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), Apartado Oficial 46113, Moncada, Valencia, España. roca_dolfer@gva.es.

en el caso de nuevos productos o nuevas aplicaciones (Zuang y Musard, 1986; Abad *et al.*, 1992; García *et al.*, 1992; Ordovás *et al.*, 1992; Maloupa *et al.*, 1993; Martínez y Abad, 1993; Benoit y Ceustermans, 1995; Fakhri *et al.*, 1995; Martínez y Abdel-Fattah, 1995; Arias, 2003).

2. Clasificación de los sustratos

2.1 Según sus propiedades

químicamente inertes: arena silíceo o granítica, grava, roca volcánica, perlita, lana de roca, arcilla expandida, etc.

químicamente activos: turbas rubias y negras, orujos, residuos de la industria maderera, vermiculita, etc.

En las figuras 1a, 1b y 1c se aprecian sustratos inertes y sustratos activos, así como un ensayo con diversos tipos de sustratos. La diferencia entre ambos grupos se establece por su capacidad de intercambio catiónico (CIC). Cuando la CIC es pequeña o nula, el material actúa exclusivamente como medio de soporte físico para el cultivo, sin ejercer influencia sobre el intercambio de minerales de los que se alimenta la planta. Estos sustratos de baja CIC son los empleados en el cultivo hidropónico. Los materiales químicamente activos acumulan los nutrientes y forman una reserva de la cual los va tomando la planta. Actúan, por lo tanto, como un colchón nutritivo para la planta, que amortigua cualquier variación del suministro de nutrientes a lo largo del tiempo.

2.2 Según su origen

2.2.1 Materiales orgánicos

naturales: turbas rubias y negras, fibra de coco, son los más empleados; subproductos de actividades agrícolas, urbanas e industriales. En general, necesitan un tratamiento de “compostaje” para ser aptos para el cultivo. Algunos de estos productos son orujos de uva, cortezas de árboles y residuos madereros en general, paja de cereales, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas, etc.

sintéticos: son polímeros de la industria de los plásticos, no biodegradables, como poliuretano, poliacrilamida y poliestireno.

2.2.2. Minerales

naturales: proceden de rocas y minerales diversos: arenas, gravas, gravas volcánicas (puzolanas, zeolitas), etc.

tratados: proceden de rocas y minerales tratados industrialmente por procedimientos físicos en general, y en menor medida químicos, de tal modo que sus propiedades resultan muy alteradas: perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, escorias industriales de altos hornos, estériles del carbón, etc.

Entre los grupos de sustratos citados, los más indicados para el cultivo hidropónico son aquellos que no tienen actividad química o la tienen muy reducida. Estos materiales sirven de soporte al cultivo, proporcionan al sistema cierta capacidad de amortiguación de la disponibilidad de agua y nutrientes, inferior a la de los materiales orgánicos, pero superior a la de los sistemas líquidos, y también aumentan la inercia térmica del ambiente radicular.

3. Propiedades de los sustratos

3.1 Propiedades mecánicas

Es imprescindible que el material mantenga estable su estructura a lo largo del ciclo de cultivo, sin degradarse. Asimismo es preferible que carezca de aristas que podrían lesionar las raíces y el cuello de las plantas. Un material excesivamente frágil puede fragmentarse en partículas finas que reducirán la porosidad y la capacidad de aireación, sobre todo en las capas del fondo del contenedor y esto limitará la supervivencia de las raíces en las zonas afectadas, disminuyendo el volumen aprovechable de sustrato.

3.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas constituyen el conjunto de características que describen el comportamiento del sustrato en relación con su porosidad. Estas propiedades determinan las fracciones sólida, líquida y gaseosa del sustrato y, por lo tanto, las cantidades de agua y de aire de los que va a disponer la planta. Por consiguiente, de dichas características dependen tanto la alimentación de la planta como la respiración radicular y todos los procesos afectados por ellas. Para la definición y determinación de estas propiedades, es extremadamente importante establecer métodos normalizados (Martínez, 1992; Ansorena, 1994; Burés, 1997; CEN Normas UNE-EN, 2001-2008). Sin ellos es muy difícil cuantificar la calidad de los sustratos, comparar los diversos materiales y prever sus aplicaciones, su comportamiento y cómo deben manejarse.

Por otro lado, una vez que el sustrato ha sido ocupado por las raíces dentro de un contenedor, no es posible modificar sus propiedades físicas por lo cual este es un asunto importante que sólo se resuelve a priori haciendo la elección acertada del material.

3.2.1 Granulometría

La granulometría de un sustrato expresa la distribución de las partículas como porcentaje de la masa de cada fracción de tamaño, en relación con la masa total seca al aire. En los laboratorios no hay una norma única sobre la serie de tamaños de los tamices a emplear para esta determinación. Un ejemplo de serie de tamices es 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,250, 0,125 mm.

Se consideran materiales gruesos los de partículas mayores de 0,9 mm. Estos sustratos tienen buena aireación pero escasa retención de agua. Los materiales finos tienen partículas menores de 0,25 mm y, al contrario de los gruesos, retienen mucha agua y su capacidad de aireación es muy pequeña.

3.2.2 Densidad real (*particle density*)

La densidad real expresa la relación entre la masa del material seco a 105°C y el volumen real ocupado por las partículas, sin incluir el espacio de poros intermedio. La densidad real de los materiales orgánicos ronda los 1,45 g.cm⁻³ y la de los minerales es de alrededor de 2,65 g.cm⁻³.

3.2.3 Densidad aparente (*bulk density*)

La densidad aparente es la masa del volumen del sustrato definida como la relación entre la masa del material seco a 105°C y el volumen ocupado, incluido el espacio de poros intermedio. Una misma muestra de sustrato puede ocupar mayor o menor volumen según su grado de compactación o su consistencia, por lo cual la densidad aparente puede ser muy distinta en cada caso. Por ello debe atenderse a la medida en condiciones bien definidas y normalizadas (Martínez, 1992; de Boodt *et al.*, 1974; Ansorena, 1994; Burés, 1997; CEN Normas UNE-EN, 2001-2008). Los valores óptimos se considera que deben ser inferiores a 0,4 g.cm⁻³ (tabla 2). La densidad aparente representa al modo en el que el sustrato se presenta en la realidad y por lo tanto indica su peso, que es importante a los efectos del transporte y la manipulación y también de la estabilidad de las plantas ante el viento en los viveros. Para el cultivo de plantas en tiestos y contenedores al aire libre se recomienda una densidad aparente de 0,50 a 0,75 g.cm⁻³, mientras que si se cultivan en invernadero, puede ser menor de 0,15 g.cm⁻³.

3.2.4 Porosidad total (PT) (*total pore space, TPS*)

La porosidad total es el volumen total de sustrato no ocupado por partículas. La estimación más difundida de la porosidad total (PT) se hace a partir de las densidades real (DR) y aparente (DA):

$$PT(\%) = \left(1 - \frac{DA}{DR}\right) \times 100$$

También existen estimaciones a partir de la densidad aparente:

$$PT = 95,83 - 32,43DA \quad (\text{Gras, 1983})$$

Se considera como valor óptimo una PT superior al 85% (vol) (tabla 2).

Pueden cometerse errores más o menos importantes en el cálculo de la porosidad total cuando el sustrato tiene una parte de porosidad ocluida, es decir, un volumen de poros que se encuentran aislados del exterior y que, por lo tanto, no intervienen en la distribución del aire y el agua en el sustrato. La existencia de este tipo de poros puede producir errores de importancia variable en la medida de la densidad real y por consiguiente también en la estimación de la porosidad total (Martínez, 1992). La porosidad ocluida se puede determinar por diferencia entre las densidades reales del material intacto y pulverizado.

También se distingue en los sustratos dos tipos de poros abiertos, según su tamaño. Se considera que hay poros capilares o microporos, de diámetro inferior a 30 μm , que almacenan el agua, y macroporos, superiores a 30 μm que se llenan de aire después del drenaje.

De todo lo anterior se deduce que conocer el porcentaje de PT no es suficiente para asegurar que un sustrato tiene un buen equilibrio entre los contenidos de agua y de aire, sino que para ello es necesario conocer también el tipo de poros y su proporción volumétrica.

3.2.5 Agua fácilmente disponible (AFD) (*Easily available water, EAW*)

El AFD es el volumen de agua que libera el sustrato al aumentar la tensión de succión de 10 a 50 cm de columna de agua (-1 a -5 kPa) (tabla 1) y se considera que en estas condiciones hídricas la planta tiene un crecimiento óptimo. La metodología más difundida para la caracterización de las relaciones aire-agua de un sustrato es la puesta a punto por de Boodt *et al.* (1974), que permite conocer la curva de liberación de agua del material.

La cantidad de agua retenida por el sustrato a 10 cm de tensión matricial corresponde a la capacidad de contenedor después de drenaje libre. En los buenos sustratos hortícolas la mayor parte del agua se retiene a bajo potencial, entre -1 y -10 kPa (10 a 100 cm de columna de agua (c.a.)) (tabla 1) lo que permite una buena disponibilidad de agua para la planta y un nivel de aireación suficiente para las raíces.

El límite inferior de tensión, de 100 cm, se ha establecido experimentalmente por diversos autores, como nivel a partir del cual se limita la disponibilidad hídrica para la planta (de Boodt y Verdonck, 1972; Puustjarvi y Robertson, 1975), aun cuando esto puede variar mucho de unas especies a otras.

Tabla 1. Correspondencia aproximada entre unidades de tensión del agua en sustrato y suelo.

cm de columna de agua	atmósfera	kPa	mbar	pF
1	0,000966	0,098	0,9789	0
10	0,00966	0,978	9,789	1
100	0,0966	9,78	97,89	2
1000	0,966	97,8	978,9	3

pF = Logaritmo del potencial hídrico

Fuente: Bunt (1988).

Se considera como óptimo un rango de valores de agua fácilmente disponible entre 20 y 30% (en volumen) (tabla 2). El tamaño de los poros tiene enorme importancia en la disponibilidad del agua para la planta, ya que parte del agua total retenida por el sustrato, la de los poros más pequeños (menores de 30 μm), ofrecerá una resistencia excesiva que no podrá vencer la succión de la planta (figura 2).

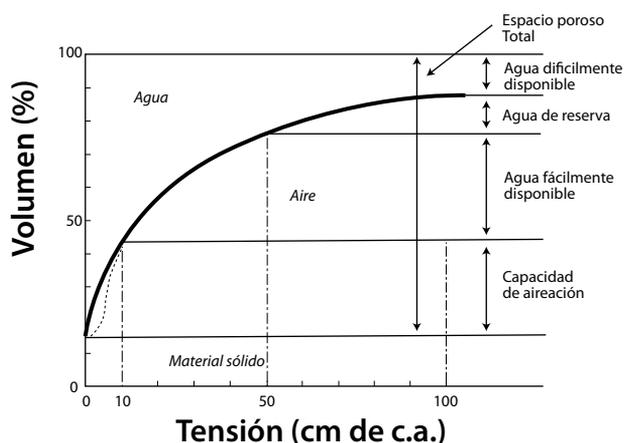


Figura 2. Curva de liberación del agua de un sustrato tipo (Cortesía de M. Abad)

Cuando un sustrato tiene insuficiente retención de agua fácilmente disponible, puede deberse a una baja porosidad o a tener un exceso de poros grandes que pierdan el agua por gravedad después del riego. También, como se ha dicho antes, si los poros son muy finos el agua no estará disponible para las plantas por ser retenida con excesiva tensión.

3.2.6 Agua de reserva (AR) (water buffering capacity, WBC)

El agua de reserva es el volumen que se libera cuando la tensión de succión en el sustrato aumenta de 50 a 100 cm de c.a. El valor óptimo del agua de

reserva se encuentra en el rango de 4 a 10% (en volumen) (tabla 2 y figura 2), y se considera la suma de AFD y AR como agua disponible (AD) para la planta, con un rango óptimo entre el 24 y el 40% (en volumen) (tabla 2).

3.2.7 Capacidad de contenedor (*container capacity*)

Se emplea el concepto “capacidad de contenedor” (White, 1974) definido como la humedad media de una masa de sustrato, que después de ser saturado con agua, se deja drenar totalmente y alcanza un estado de equilibrio. El valor de la capacidad de contenedor va asociado siempre con el espesor del sustrato, dada la influencia que éste tiene sobre el volumen de agua retenida. Por ello, se habla de humedad media, ya que el contenido de agua no es homogéneo, aumenta hacia la base del contenedor.

Para extraer el agua que necesita, la planta debe vencer las fuerzas de retención de la misma debidas a la gravedad, la presión osmótica por los electrolitos disueltos y la succión capilar de los microporos. El potencial mátrico que corresponde a la fuerza de succión o retención del agua por el sustrato, es una componente importante del potencial hídrico total. Este potencial caracteriza la disponibilidad de agua para la planta y se expresa por las curvas de liberación, que hacen posible comparar las características hídricas de los diversos tipos de sustratos. Estas curvas se pueden expresar también en función del logaritmo del potencial, el pF, de modo que a 10 cm de tensión de c.a. corresponde un pF = 1, valor que se asocia a la humedad de capacidad del contenedor, que corresponde a la humedad a mitad de profundidad del sustrato. Los valores 100 cm c.a. (pF = 2) y 300 cm c.a. (pF = 2,47) (tabla 1) se consideran como valores prácticos de consigna de riego (de Boodt y Verdonck, 1972 y White, 1974, respectivamente).

3.2.8 Capacidad de aire (CA) (*Air-filled porosity, AFP*)

La capacidad de aire del sustrato es la diferencia entre el volumen de porosidad total y el volumen de agua a 10 cm de tensión de c.a. Este volumen coincide empíricamente con el de poros vacíos de agua cuando, después de saturar el sustrato, se deja drenar. Su óptimo se sitúa entre 10 y 30% (en volumen) (tabla 2). En este margen se considera que las raíces disponen de suficiente volumen de aire para su función respiratoria. No se hace distinción de la composición de esa atmósfera, aun cuando se ha comprobado que la concentración de CO₂ es muy superior a la normal del aire y es mayor en los sustratos orgánicos que en los minerales, debido sin duda a la mayor actividad microbiana que tiene lugar en aquellos (Gruda *et al.*, 2008).

3.3 Propiedades químicas

Desde este punto de vista se distinguen dos tipos de materiales. Los *químicamente activos* en los que tienen lugar intercambios de minerales entre

el sustrato y la solución, por ejemplo los sustratos que llevan componentes orgánicos, en los que las sustancias húmicas tienden a retener cationes de la solución, y los *materiales químicamente inertes*, en los cuales los intercambios de materia entre las fases sólida y líquida deben ser nulos o muy reducidos. La inactividad química del sustrato garantiza que el equilibrio iónico de la solución nutriente no será alterado y por ello estos sustratos son los empleados para el cultivo hidropónico.

El pH del sustrato puede afectar la disponibilidad de iones para la planta. Los materiales con altos contenidos de carbonato cálcico son problemáticos y deben desecharse por elevar el pH de la solución excesivamente. Se considera el rango de 5 a 6,5 (en extracto de saturación) como óptimo (tabla 4). En algunos materiales que inicialmente no tienen condiciones de pH adecuadas, se hacen tratamientos iniciales para corregir dichos niveles de partida, como es el caso de la lana de roca (pH = 7,5) y la perlita (pH = 7) que deben recibir un tratamiento acidificante previamente a su uso, y la turba rubia ácida que debe ser neutralizada con tratamiento alcalino (tabla 3).

La **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** se define como la cantidad de cationes presentes en la superficie del sustrato y que pueden intercambiarse con los cationes de la solución nutriente, hasta alcanzar un equilibrio. En el cultivo hidropónico es interesante una CIC nula o muy reducida, dado que por la escasa retención de agua, el riego se aplica con mucha frecuencia y, por consiguiente, los nutrientes siempre se encuentran disponibles y no es necesario ni conveniente alterar los equilibrios iónicos de la solución nutriente. Tampoco es necesario formar reservas de nutrientes en el sustrato, que dificultarían las posibilidades de control de la nutrición por parte del horticultor, e incluso podrían producir acumulaciones peligrosas de cationes no absorbidos por la planta pero presentes en el agua, por ejemplo el sodio (tabla 3).

En cambio en el caso de un cultivo no hidropónico es interesante una alta CIC que garantiza que los fertilizantes añadidos al sustrato van a ser retenidos y puestos gradualmente a disposición de las raíces, evitando pérdidas por lavado (tabla 3).

Se considera que la CIC tiene un nivel medio cuando está entre 75 y 100 meq.100g⁻¹ y en cualquier caso conviene que sea superior a 20 meq.100g⁻¹. Cuanto mayor sea, con menor frecuencia será necesario aportar fertilizantes en el riego.

Tabla 2. Niveles óptimos en las propiedades físicas y fisicoquímicas de un sustrato.

Propiedad	Rango de valores
Tamaño de partícula (mm)	0,25 - 2,50
Densidad aparente (g.cm ⁻³)	< 0,75
Densidad real (g.cm ⁻³)	1,45 - 2,65
Espacio poroso total (% vol)	> 85
Capacidad de aireación (% vol)	20 - 30
Agua fácilmente disponible (% vol)	20 - 30
Agua de reserva (% vol)	4 - 10
Agua total disponible (% vol)	24 - 40
Contracción	< 30
pH (extr. saturación)	5,2 - 6,5
Conductividad eléctrica	0,75 - 3,5
Capacidad de intercambio catiónico:	
Fertirriego permanente	Nula o muy baja
Fertirriego ocasional	> 20

Fuentes: de Boodt (1974, 1975); Bunt (1988); Abad *et al.* (1992); Baudoin *et al.* (2002)

Tabla 3. Valores de pH y de CIC en algunos materiales empleados como sustrato.

Material	pH	CIC (eq.m ⁻³)
Materiales orgánicos		
Turba rubia	4,5	115
Turba negra	5,0	200 - 400
Corteza de pino molida	5,1	95
Basuras compostadas	6,1	158
Materiales minerales		
Tierra arcillosa	5,0 - 7,5	200 - 300
Perlita	6,9	6
Lana de roca	7,5	0
Arena	6-8	0
Vermiculita	7,5	27
Arcilla expandida	8,3	0
Materiales sintéticos		
Poliestireno	7,9	1,9
Polimetilurea	2,8	1,4
Poliuretano	6,2	0,9

Fuente: Lemaire *et al.* (1989).

La salinidad original del sustrato o bien su facilidad mayor o menor para acumular sales pueden afectar negativamente al cultivo. Se considera que valores de conductividad eléctrica (CE), medidas en el extracto de saturación, superiores a $3,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (a 25°C) son excesivos para la mayor parte de las especies cultivadas. La acumulación salina de un sustrato guarda relación con su CIC y con el manejo que se haga de la fertirrigación. En un sustrato inerte, con baja o nula CIC, cualquier desviación en más o menos de la conductividad de consigna, es corregida con rapidez y facilidad por lavado o bien por modificación de la concentración salina de la solución nutriente.

La respuesta de las plantas varía ante las condiciones de salinidad. El tomate es tolerante a niveles que serían excesivos para el rosal. Concentraciones de sales en solución nutritiva de hasta $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ no han afectado al desarrollo y al funcionamiento de las raíces del tomate (Brun y Montarone, 1987).

Se recomienda, en tomate, para un resultado óptimo mantener niveles entre $2,5$ y $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de sales en el entorno de las raíces.

El clavel también tolera hasta unos $8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ y a partir de este nivel se reduce su crecimiento. Los niveles salinos óptimos, en el entorno radicular, son de 2 a $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ para esta especie. Para la gerbera, menos tolerante, se recomiendan niveles de $1,5$ a $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de sales, aun cuando para esta especie hay una gran variabilidad de tolerancia según el cultivar, en relación con su capacidad de producción de flores. Una solución intermedia de compromiso sería de $2,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, correspondiente a una conductividad de unos $3,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Brun y Montarone, 1987).

La **relación carbono/nitrógeno (C/N)** en sustratos de origen orgánico informa sobre su estado de descomposición, en la que intervienen los microorganismos que, en el proceso de transformación del material, consumen principalmente nitrógeno y oxígeno. Estos datos son importantes porque el cultivo en sustrato orgánico puede verse limitado en la disponibilidad de estos elementos necesarios debido a la competencia de las bacterias. Los materiales con relaciones C/N altas, son poco estables y han de sufrir una transformación a lo largo del tiempo, que hará variar, no solo sus propiedades químicas sino también las físicas, reducción del volumen, reducción de porosidad y capacidad de aireación. La relación C/N permite apreciar el estado de degradación en el que se encuentra el material a emplear como sustrato y su estabilidad a lo largo del cultivo.

Para el cultivo en sustrato orgánico se considera óptima una relación C/N inferior a 20 que indica que el material es estable (tabla 4).

Tabla 4. Niveles óptimos para características químicas y fisicoquímicas de sustratos de uso hortícola (*en el extracto de saturación).

Factor	Nivel óptimo
pH	5,0 - 6,5
Conductiva Eléctrica (dS.m ⁻¹)	< 0,7 sin riesgo 0,7 - 2,0 adecuado para germinación y crecimiento 2,0 - 3,5 riesgo de salinización > 3,5 excesivo
Macroelementos solubles* (mg.L⁻¹)	
N-NO ₃ ⁻	100 - 199
N-NH ₄ ⁺	0 - 20
Fósforo	6 - 10
Potasio	150 - 249
Calcio	> 200
Magnesio	> 70
Capacidad de intercambio catiónico (meq.100 g ⁻¹)	< 75 baja 75 - 100 media > 100 alta
Microelementos* (mg.L⁻¹)	
Hierro	0,3 - 3,0
Magnesio	0,02 - 3,0
Molibdeno	0,01 - 0,1
Zinc	0,3 - 3,0
Cobre	0,001 - 0,5
Boro	0,05 - 0,5
Carbono/Nitrógeno	20 - 40

Fuente: Cadahía y Eymar (1993); Abad *et al.* (1993).

4. Materiales para el cultivo de plantas

4.1 Sustratos minerales naturales

4.1.1 Arena y grava

La arena, de granulometría comprendida ente 0,2 y 2 mm y la grava entre 2 y 20 mm, tienen composición y propiedades dependientes de su material de origen. Para su empleo en horticultura se recomienda atender a dos aspectos, su contenido de carbonato cálcico total no superior al 10%, y su distribución granulométrica, debido al efecto de la misma sobre la disponibilidad de agua y de aire. Desde este punto de vista se recomienda emplear arena de tamaño de grano entre 0,5 y 2 mm, que tiene buena porosidad, aunque su retención hídrica es pequeña (figuras 1d y 1e). Las granulometrías inferiores a 0,5 mm

son peligrosas por el riesgo de asfixia radicular que entrañan (figura 1f) y las superiores a 5 mm no retienen agua, lo que obliga a un rígido control o supervisión de la frecuencia del riego.

Las arenas y gravas que no contienen carbonato cálcico tienen una CIC inferior a 5 meq.100 g⁻¹, pero es conveniente someterlas a un lavado ácido antes del cultivo, para eliminar contenidos minerales que pueden liberarse lentamente de modo incontrolado. Las que sí contienen carbonato cálcico, poseen reacción química y es preferible desecharlas (tabla 3).

Entre las ventajas más importantes de las arenas y gravas están su bajo coste, su estabilidad estructural, facilidad de limpieza y de tratamiento desinfectante, inactividad química en el caso de materiales no calcáreos. Sus inconvenientes son su alta densidad, que dificulta el manejo y su baja retención de agua (tabla 9).

Es frecuente la mezcla de arena con turba (50:50 v/v) para conseguir los efectos de aumento de la densidad aparente, que es baja en la turba y también de la capacidad de retención de agua, que es escasa en la arena. Como explican Abad *et al.* (2005), las mezclas de arena con sustratos orgánicos dan como resultado propiedades que dependen particularmente de las propie-

dades físicas de dichos componentes orgánicos más que de las de la arena.

Para mejorar la capacidad de aireación de un sustrato mezclándolo con arena, es necesario añadir una gran proporción de ésta, entre el 70 y el 80% en volumen, con tamaño de partículas superior a 400 micras y un 40% de ellas superior a 250 micras (Abad *et al.*, 2005; Bunt, 1988).

4.1.2 Rocas volcánicas

Según su origen tienen características diversas. Conviene distinguir algunos grupos que han sido más estudiados en aplicación hortícola y que difieren en sus propiedades más importantes, las zeolitas y las puzolanas, aun cuando todos ellos son ricos en minerales.

Las **zeolitas** son silicatos hidratados, cristalinos con alta porosidad abierta. Debido a esto, su capacidad para absorber agua, nutrientes y aire es muy elevada.

Las **puzolanas** en cambio tienen una alta porosidad gruesa y cerrada al exterior (hasta el 10%), por lo que su capacidad de retención del agua y nutrientes es muy baja, con alta aireación. En un material con partículas de 2 a 5 mm, la microporosidad apta para la retención hídrica es del 10% y la capacidad de aireación (AFP) mayor del 50% (Moinereau *et al.*, 1987), o puede descender a menos del 20% en el caso de partículas más finas (Maloupa *et al.*, 1993) (tabla 9).

La porosidad total de las zeolitas de 2 a 5 mm es de alrededor del 64% frente a un 55 a 70% en las puzolanas, pero el reparto de esta porosidad es el 36%

de microporos de alta retención de agua y solo 28% de capacidad de aireación. Las capacidades de contenedor respectivas son del 47% en las zeolitas y el 19% en la puzolana. De esta cantidad de agua los contenidos a baja tensión (2 pF) son del 40% en zeolitas y del 15% en las puzolanas, siempre en materiales de 2 a 5 mm de tamaño de partícula. Una parte importante del agua, un 30%, es retenida por las zeolitas a una tensión excesiva para ser aprovechada por las plantas. Esta fracción de agua se almacena en los poros más pequeños y también es atrapada higroscópicamente.

Las CIC son asimismo distintas, alta en las zeolitas, del orden de 23 meq.100 g⁻¹ para menos de 5 meq.100 g⁻¹ en la puzolanas (Maloupa *et al.*, 1993; Moinereau *et al.*, 1987). En otras zonas volcánicas puede ser de baja a moderada y pueden ocurrir adsorciones del fosfato, fijación de potasio asimilable y liberación de manganeso con pH bajo.

Se considera por lo tanto que las puzolanas son materiales químicamente inertes, en tanto que las zeolitas tienen actividad química para los cationes de cambio. Ambos sustratos son interesantes para el cultivo, pero requieren aplicaciones y, sobre todo, manejos diferentes. En el cultivo hidropónico las puzolanas son perfectamente utilizables teniendo en cuenta su escasa retención de agua y de nutrientes (Zuang y Musard, 1986).

El **tezontle** es una grava de origen volcánico muy porosa, de color rojo, amarillento o negro, abundante en varias regiones de México y, al igual que el “picón” de la isla de Tenerife, muy popular como sustrato hortícola. Se considera un material químicamente inerte. Tiene pH de neutro a ligeramente alcalino, muy baja CIC, alta porosidad total, aunque sus propiedades físicas dependen mucho del tamaño de las partículas (tabla 5), mantiene su estructura inalterada a lo largo del tiempo.

Tabla 5. Propiedades físicas del tezontle negro en dos proporciones granulométricas.

Material	Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Densidad real (g.cm ⁻³)	Capacidad aireación (%)	Capacidad retención agua (%)	Porosidad total (%)
25% fino + 75% grueso	0,61	2,45	39,2	27,9	74,7
75% fino + 25% grueso	0,75	2,18	17,4	43,9	65,6

Fino = partículas < 2mm; Grueso = 2 a <12,5 mm

Fuente: Ojodeagua *et al.* (2008).

4.1.3 Otros minerales naturales

La **attapulgita** y **sepiolita** son rocas arcillosas de silicatos de aluminio (figura 3a) y de magnesio respectivamente, con baja CIC, que en granulometrías adecuadas tienen alta capacidad de aireación alrededor del 40%, inferior a la perlita pero suficiente, y menor capacidad de retención de agua (AFD) a baja

tensión, del 2 al 3% solamente en el caso de granulometrías entre 2 y 6 mm (70%) y entre 0 y 2 mm (30%) (tabla 9).

Este comportamiento con el agua puede mejorarse empleando granulometrías menores (Martínez y Abad, 1992; Martínez y Abdel Fattah, 1995), es decir, reduciendo el porcentaje de partículas de los tamaños mayores.

La **pedra pómez** es asimismo otro material disponible en cantidades importantes en ciertos países y regiones. Sus propiedades pueden variar de unos a otros lugares. En general el pH es cercano a la neutralidad, ligeramente alcalino, con baja salinidad ocasional que se reduce parcialmente por lavado, tiene elevada porosidad total (75%) y una capacidad de retención de agua mayor o similar a la perlita (Manios *et al.*, 1995; Fakhri *et al.*, 1995), dependiendo de la granulometría empleada.

4.2 Sustratos minerales tratados

4.2.1 Perlita

Este material es un tipo de arena volcánica de sílice que calentada a unos 1.000°C se funde y se hincha formando copos muy porosos (Moinereau *et al.*, 1987). La densidad aparente es baja y la porosidad es elevada, aunque estas y el resto de las propiedades físicas varían según el tamaño de las partículas (tabla 6).

Tabla 6. Propiedades físicas de muestras de perlita comercial de diferentes granulometrías. Densidad real (DR), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD) y agua de reserva (AR).

Tipo de perlita	DR	DA	PT	CA	AFD	AR
	(g.cm ⁻³)					
A 13	0,97	0,121	87,5	62,9	5,6	2,5
B 12	1,01	0,155	84,7	33,5	20,9	5,7
B 10	0,96	0,128	86,7	41,9	17,6	6,7
B 9	1,43	0,086	94,8	15,7	38,3	9,7
B 6	1,30	0,062	95,2	33,3	30,9	8,7

Fuente: Marfà *et al.* (1993).

Los tamaños de partícula correspondientes son: A-13 (3 a 5 mm), B-12 (0 a 5 mm), B-10 (0 a 3 mm), B-9 (0 a 1,5 mm) y B-6 (0 a 1,5 mm). En la tabla se aprecian sus propiedades; entre ellas hay que destacar la menor capacidad de aireación y la mayor retención de agua en las perlitas de partículas finas. Este hecho es la causa de mayores crecimientos y rendimientos en algunos cultivos en dichos sustratos de partículas más finas, siempre y cuando la capacidad de aireación no sea limitante (Serrano *et al.*, 1993). En el tipo B-6, que tiene alrededor del 95% de partículas entre 0 y 1 mm, comparado con el

tipo A-13 que tiene un 4,05%, la retención de agua fácilmente disponible es del 37% por un 7% en A-13. La capacidad de aireación de B-6 es suficiente, con un 23%, aun cuando muy inferior a la de A-13 con un 58%.

La perlita es químicamente inerte y de muy fácil lavado cuando los niveles de salinidad aumentan. El pH inicial es de 7 a 7,5 y se hace descender saturando el sustrato con una solución ácida, pero nunca debe regarse con solución de pH menor de 5, debido a que puede liberar aluminio y producir toxicidad en algunos cultivos (tablas 3 y 9).

En cultivo hidropónico (figuras 3b, 3c, 3d y 3e) es normal recomendar el tipo B-12 que mantiene un buen equilibrio entre aireación y contenido de agua y por otro lado, con un manejo cuidadoso, conserva su estructura más tiempo.

El reemplazo de la perlita, como el de otros sustratos, es posible como han demostrado diversas investigaciones y asimismo la práctica agrícola (Hanna, 2005; Giuffrida *et al.*, 2008b). Estos trabajos muestran cómo algunas de las propiedades de los sustratos sufren cambios tras su uso, por ejemplo puede reducirse la capacidad de aireación y aumentar la retención de agua fácilmente disponible (tabla 7), sin por ello afectar negativamente al cultivo. Se recomienda lavarla y eliminar los restos de raíces, o bien desinfectarla y lavarla después.

Tabla 7. Cambios en las propiedades de la perlita reutilizada.

Perlita	Densidad aparente (g.mL ⁻¹)	Porosidad total (mL.mL ⁻¹ .100)	Capacidad de aireación (mL.mL ⁻¹ .100)	Agua fácilmente disponible (mL.mL ⁻¹ .100)	Materia orgánica (%)
Nueva	0,132	95,0	66,1	4,8	0
Reutilizada	0,140	95,4	58,0	7,8	3,36
	n.s.	n.s.	*	**	**

Fuente: Giuffrida *et al.* (2008b).

4.2.2 Vermiculita

La vermiculita es una arcilla de estructura laminar, que por tratamiento térmico a más de 1.000°C pierde el agua interlaminar y se hincha unas 10 veces, quedando convertida en un material muy ligero, de elevada porosidad, 96% como la perlita y también de niveles similares de retención de agua, del 45 al 50%. Sin embargo, su capacidad de intercambio catiónico es muy alta, de 60 a 140 meq.100g⁻¹ (Moinereau *et al.*, 1987) y, por lo tanto, no es un material recomendable para el cultivo hidropónico, además de poseer una alta fragilidad estructural que puede modificar sus propiedades físicas a lo largo del tiempo. Su empleo en horticultura ha disminuido mucho (tablas 3 y 9).

4.2.3 Arcilla expandida

Se obtiene tratando gránulos de arcilla húmeda a alta temperatura, de lo que resultan bolas muy porosas, de porosidad ocluida, de estructura y forma estables (figura 3f). La capacidad de retención del agua es pequeña, como en la perlita o algo menor según su granulometría y la aireación es alta. Se considera como químicamente inerte, aun cuando esta característica puede ser diferente según el origen del producto, y puede incluso requerir lavados previos a su empleo para eliminar sales (tablas 3 y 9).

4.2.4 Lana de roca

Este sustrato, muy difundido, se obtiene por calentamiento a 1.600°C de roca basáltica, carbonato cálcico y coque bajo corriente de aire, que sometido a rotación forma un fundido fibroso muy fino; se enfría y trata con polímero de urea-formol y con un mojante, ya que es hidrófugo.

Se comercializa suelto o en forma de tablas, cubos, cilindros, de tamaños diversos, envueltos en lámina de polietileno o desnudos. Las dimensiones de las tablas de lana de roca dependen del cultivo a realizar. Para el tomate se emplean tablas de menor volumen, con 100 x 15 x 7,5 cm, mientras que para pepino son mayores, con 100 x 30 x 7,5 cm.

La siembra o el enraizamiento se hacen en cilindros o cubos de lana de roca en bandejas de poliestireno, y de ahí se trasplantan fácilmente a bloques de 10 cm de ancho que tienen un orificio en el que encaja perfectamente el cilindro de siembra y finalmente, el trasplante definitivo a la tabla, se hace depositando el bloque sobre la misma (figuras 1b y 4a). La planta en todo el proceso no sufre ningún traumatismo ni parada. La lana de roca es un material con características ideales para el cultivo hidropónico. Baja densidad aparente, 0,08; alta porosidad, 95%; y alta retención de agua (tabla 9). Tiene inicialmente un pH alto y puede liberar cantidades significativas de cationes especialmente de hierro y manganeso; todo ello se resuelve saturando el sustrato antes del cultivo con una solución ácida de pH 5,0 a 5,5. Posteriormente el material es inerte químicamente (tabla 3).

Se fabrica en densidad de unos 70 a 80 kg.m⁻³ y también en densidad menor con el objetivo de reducir el coste y la cantidad de material en aplicaciones de un solo ciclo de cultivo, sin desinfección, en las que las garantías sanitarias para el cultivo son mayores. Los inconvenientes más importantes de la lana de roca son su alto precio y su no degradabilidad, que produce graves problemas de contaminación ambiental.

4.2.5 Residuos industriales

Los residuos de minería del carbón llamados estériles de lavadero, con granulometrías entre 0 y 10 mm, son materiales con características físicas similares a las de las arenas de idénticas dimensiones. Los trabajos de Gon-

zález *et al.* (1992) y García *et al.* (1992) los caracterizan como materiales con baja retención de agua fácilmente disponible, inferior al 8%, porosidad del 40 al 50% y densidad aparente del 1,2 al 1,5. Desde el punto de vista químico, sus propiedades son variables según su origen.

En materiales procedentes de minas españolas el pH es normalmente de 6,3 a 7; la CIC oscila entre 2,9 y 10,5 meq.100 g⁻¹. Contienen elementos nutrientes, principalmente Ca, Mg y K, oligoelementos y metales pesados en cantidades inferiores o dentro de los límites máximos permitidos (Directiva CE, marzo 1986), con la excepción del boro que se presenta en cantidades superiores al límite de 100 mg.L⁻¹. Esta cantidad se refiere a boro total, el boro asimilable debe ser muy inferior, dado que en los ensayos efectuados hasta el momento, no se han presentado problemas de toxicidad (González *et al.*, 1992). Con un conocimiento detallado de sus características y un manejo adecuado, estos residuos industriales pueden ser, por su bajo precio, materiales interesantes en el cultivo sin suelo (tabla 9).

4.3 Sustratos orgánicos sintéticos

En el grupo de materiales polímeros sintéticos se encuentran la espuma de poliuretano, el poliestireno expandido, la resina fenólica y la resina expandida de urea formaldehído.

El poliestireno expandido es un material inerte en partículas de 4 a 12 mm, estable, de pH neutro y sin actividad química, cuya propiedad principal es el aporte de aireación al sustrato, ya que no retiene agua (tabla 3).

La espuma de poliuretano es la única que tiene aplicación práctica, sobre todo en semilleros y en el cultivo del anturio. Este polímero puede emplearse en forma de tablas como las de la lana de roca y granulado mezclado con turba o con otros sustratos. Es muy poroso, más de un 90% de porosidad total, tiene alta aireación, más del 80%, pero muy baja retención de agua, AFD menor que 1% cuando en la lana de roca es superior al 60%. Es químicamente inerte. Su escasa retención de agua es un inconveniente importante, dado que el manejo del riego debe ser muy cuidadoso y muy frecuente, con volúmenes pequeños. Si el equipo de riego falla por algún accidente, este sustrato se seca rápidamente (tablas 3 y 9).

4.4 Sustratos orgánicos naturales

4.4.1 Turba

Las turbas son los sustratos orgánicos naturales de uso más general y tradicional en la horticultura. En síntesis, se distinguen dos tipos:

- **Poco descompuestas**, son materiales de reacción ácida, pobres en minerales por estar muy lavados, debido a su origen de zonas altas de precipitaciones abundantes, y que conservan parcialmente su estructura y un buen equilibrio entre agua y aire después del riego.

- **Muy descompuestas**, son las turbas negras, sin estructura, con frecuencia muy salinizadas y que presentan menor aireación que las anteriores. Son apropiadas para mezclas con materiales que mejoren sus propiedades deficientes.

Las propiedades físicas de una turba rubia poco descompuesta dependen mucho de su textura (tabla 8).

Tabla 8. Propiedades físicas de la turba Sphagnum según su textura.

Características	Textura media fina	Textura gruesa
Densidad aparente	0,093	0,054
Densidad real (g.cm ⁻³)	1,22	1,22
Espacio poroso total	92	96
Capacidad de aireación	12	54
Agua fácilmente disponible (%)	38	15
Agua de reserva	10	4
Agua total disponible	48	19

Como propiedades generales, las turbas rubias poco descompuestas tienen una elevada porosidad total y buena capacidad de aireación, con alta disponibilidad de agua. Su pH es ácido, con elevada CIC (110 a 130 meq.100 g⁻¹) y una relación C/N entre 40 y 50.

Las turbas negras, muy descompuestas tienen, sobre todo, el inconveniente de su baja disponibilidad de agua para las plantas y frecuentemente de altos contenidos de sales, que les convierten en sustratos peligrosos para las plantas si antes no se someten a lavados (tablas 3 y 9).

El conjunto de buenas propiedades, físicas, químicas y biológicas (presencia de hormonas y sustancias húmicas), de las turbas es la causa de su amplia difusión en el cultivo de plantas en sustrato. Su empleo se extiende tanto a la producción de plántulas en semilleros, como al cultivo de plantas en tiestos y contenedores y asimismo al cultivo sin suelo en general (figura 4b).

Un problema actual es el impacto medioambiental debido a la explotación de las turberas, por el hecho de que la turba es un material natural no renovable, aun cuando todavía las reservas mundiales son enormes, pero los países productores están adquiriendo conciencia de la necesidad de no explotar y restaurar sus yacimientos de turba.

Tabla 9. Resumen de propiedades de algunos materiales utilizables como sustrato en horticultura (Zuang y Musard, 1986; Gras, 1987; Moineau et al., 1987; González et al., 1992; Brun, 1993; Maloupa et al., 1993; Martínez y Abad, 1992; Benoit y Ceustermans, 1995; Martínez y Abdel Fattah, 1995; Noguera et al., 1997; Struve y McCoy, 1996; Pire y Pereira, 2003; Evans, 2008).

	Densidad aparente	Porosidad	Aireación	Retención agua	pH	CIC	Estabilidad
Turba rubia	0,09	alta	buena	buena	2,5 - 7	>20	limitada
Turba negra	0,2 - 0,5	alta	buena a baja	buena	4 - 7	>20	limitada
Corteza de pino	0,2 - 0,4	alta	alta	baja	4 - 5	>20	limitada
Virutas de madera	0,08 - 0,11	alta	alta	buena	4,5	<20	alta
Orujo de uva (1)	0,2 - 0,3	alta	buena	alta	7,4	-	limitada
Fibra de coco	0,03 - 0,09	alta	alta	alta	4,9 - 6,1	>20	alta
Cascarilla de arroz	0,09	alta	alta	baja	5,2	<20	alta
Arena gruesa	1,5 - 1,8	alta	alta	baja	-	<20	alta
Puzolanas	0,8 - 1,3	alta	alta	baja	6,5	<20	alta
Rocas volcánicas	0,7 - 1,3	buena a alta	buena	baja	7	>20	alta
Attapulgita y sepiolita	0,60	alta	buena	baja	7,7	<20	alta
Perlita	0,08 - 0,12	alta	alta	buena	7 - 7,5	<20	baja
Lana de roca	0,07 - 0,09	alta	buena	alta	7	<20	alta
Arcilla expandida	0,75	alta	alta	buena	5 - 7	<20	alta
Vermiculita	0,09 - 0,14	alta	buena	buena	7	>20	baja
Estériles de carbón	1,17 - 1,54	buena	buena	baja	6,3 - 7	<20	alta
Escorias de alto horno	0,8	alta	alta	baja	10	>20	alta
Poliuretano	0,07	alta	alta	baja	-	<20	alta

(1) de 2 años

(2) parcialmente no disponible

Los recursos mundiales se encuentran en unos 6'500.000 km² de turberas con una profundidad media de 1,3 a 1,5 m. Los países en los que están las reservas mayores son Rusia (63%), Canadá (28%) y EE.UU. (15%). Las extracciones actuales de turba en estos países son muy inferiores a la regeneración natural de las turberas por el crecimiento y desarrollo de las poblaciones de Sphagnum, pero aún así las tendencias de la opinión pública y de las políticas gubernamentales están encaminadas a la preservación de las turberas y al fomento del uso de los residuos de diferentes orígenes en la agricultura.

4.4.2 La fibra de coco

Es un material de desecho de la industria cocotera, compuesto por la parte desechable de los residuos del mesocarpo después de aprovechar las fibras largas. El resto contiene fibras cortas no aprovechadas por la industria y partículas de corteza de diferentes tamaños. Esta heterogeneidad es, por cierto, uno de los problemas importantes que tiene la fibra de coco pues dificulta su manejo durante el cultivo (Abad *et al.*, 2002).

La caracterización de este sustrato en cuanto a tamaño de partículas y a la distribución de tamaños en el material, así como su comportamiento respecto a las relaciones agua/aire mejoraría considerablemente el manejo de los cultivos y su valor como sustrato hortícola. Contribuciones destacables son las de Noguera (1999), Abad *et al.* (2002) y Arias (2003), entre otras.

A pesar de ser un residuo orgánico y concebirse como un sustituto de la turba, se comporta de modo bastante diferente de ella. Por ejemplo, la turba es hidrófuga, es muy difícil de rehidratar cuando se seca, se contrae o expande en función de su contenido de agua, afectando esto a su capacidad de aireación. En cambio la fibra de coco es hidrófila, absorbe el agua con facilidad cualquiera que sea su estado de partida y no sufre contracciones y expansiones que afecten a su capacidad de aireación al variar su contenido de agua. En la actualidad, su aprovechamiento se ha extendido en las aplicaciones hortícolas por todo el mundo (figuras 4d, 4e y 4f). El componente más importante de su precio es el del transporte, que puede ser un factor limitante en el futuro, aun cuando esta dificultad se ha resuelto comprimiéndolo en seco previamente a la expedición hasta cinco sextas partes de su volumen. Luego se expande sin problemas al rehidratarlo multiplicando por seis su volumen. La fibra de coco es una alternativa muy buena o un complemento de la turba, ya que con una granulometría adecuada tiene muy buenas características físicas (Noguera *et al.*, 2000, 2003). Aunque es un material orgánico, su descomposición es lenta debido al alto contenido de lignina, por lo cual mantiene sus propiedades con bastante estabilidad. La precaución más importante a tomar antes de usarlo es comprobar si ha sido lavado en origen, ya que de lo contrario su contenido salino puede ser limitante para el cultivo (Abad *et al.*, 2002) (tabla 9).

En las mezclas de fibra de coco con otros componentes sustituyendo una parte de la turba en viveros ornamentales, los mejores resultados de crecimiento de las plantas expresados en altura, pesos de biomasa fresca y seca y área foliar, se registran en las mezclas con las mayores proporciones de fibra de coco, al nivel del 80% del volumen (Valdés *et al.*, 2009), que se asocian a la mayor proporción de agua fácilmente disponible aportada por la fibra de coco.

4.4.3 Otros materiales orgánicos

La dependencia de la turba hace de la horticultura un sistema estratégicamente frágil. Por ello, si bien no está justificado pensar en un agotamiento de recursos, sí hay que prever futuras subidas de precios debidos al coste del transporte y esto puede llegar a causar problemas de viabilidad económica para la actividad hortícola. Por ello es aconsejable trabajar en el desarrollo de materiales alternativos, con el fin de reducir dicha dependencia de la turba. Existe una gama de materiales muy diversos susceptibles de ser aprovechados como sustratos hortícolas, a través de tratamientos de transformación y estabilización, pero también es cierto que en la mayoría de los casos no se ha llegado a productos bien definidos, de suministro asegurado, de buena calidad y de cualidades comparables a las de la turba, a precios interesantes (Martínez, 2000).

Un ejemplo es el de la **cascarilla del arroz**, de uso bastante generalizado en las zonas arroceras por su bajo precio. La cascarilla aporta a las mezclas propiedades de mejor aireación, pero tiene muy escasas capacidad de retención de agua y mojabilidad, inconvenientes importantes (tabla 9), por lo que no es aconsejable usarla sin mezclar con otros materiales, por ejemplo las mezclas con turba hasta un 20 a 25% de cascarilla dan buenos resultados (Evans y Gachukia, 2004), también la cascarilla carbonizada mezclada con fibra de coco mejora su comportamiento físico (Awang *et al.*, 2009; Quintero *et al.*, 2009). Con frecuencia se le dan tratamientos de acondicionamiento que tratan de mejorar sus inconvenientes, por ejemplo la carbonización parcial para mejorar su retención hídrica, pero este tratamiento es muy poco eficaz. Si se usa en su estado natural, es de pH casi neutro y puede aportar capacidad de aireación y de drenaje a la mezcla. Si se tamiza a tamaño igual o menor de 2 mm se mejora mucho la capacidad de retención hídrica y también se eliminan las semillas que pueda llevar.

Se ha comprobado que el bloqueo de nitrógeno producido por la cascarilla de arroz sin compostar es mínimo debido a su lento proceso de descomposición, esto es aún más cierto cuando se usa mezclada con turba hasta una proporción máxima del 40%, aunque se recomienda no rebasar el 20 a 25% en las mezclas, pues hasta esa proporción se comporta de modo similar a la perlita (tamaño 6 a 8 mm) en capacidad de aireación y en retención hídrica, pero en proporciones mayores se distancia de la perlita aumentando excesivamente

la aireación a costa de reducir la retención de agua (Evans y Gachukia, 2004; Evans, 2008).

En las mezclas con cascarilla aumentan los contenidos de fósforo, potasio, calcio y magnesio, pero sobre todo el nivel de manganeso es alto en la cascarilla; sin embargo, en las proporciones en las que se usa en las mezclas, esto no afecta al manejo de la nutrición. El compostaje de la cascarilla previo troceo y tamizado a 0,5 cm, requiere un mínimo de 18 meses, resultando un producto con pH de 5,4 a 5,7, porosidad total del 30% y mayor capacidad de retención de agua, por lo tanto con mejores aptitudes como sustrato. Un tratamiento más rápido es el envejecimiento, con el que la cascarilla se deja descomponer pasivamente durante unas semanas. Este tratamiento apenas afecta las características del material.

Yoon *et al.* (2007) han comprobado que el empleo repetido hasta tres años de un sustrato compuesto de turba rubia, perlita y cascarilla de arroz (3:4:3 vol) ha dado resultados excelentes en el cultivo de fresa, con lavado y esterilización con vapor intercalados. Los buenos resultados se atribuyen principalmente a las mejores características físicas que ha ido adquiriendo la cascarilla a lo largo del tiempo, sobre todo en cuanto a la retención de agua (tabla 10).

Tabla 10. Evolución de propiedades físicas de un sustrato de turba rubia más perlita más cascarilla de arroz (3:4:3 vol), a lo largo del tiempo de uso en un cultivo de fresa.

Tratamiento	Densidad aparente (kg.m ⁻³)	Porosidad total (%)	Retención hídrica (%)	Capacidad de aireación (%)
Sustrato nuevo	170	83,2	38,9	44,3
1 año de uso	170	82,8	52,3	30,5
2 años de uso	210	79,2	53,7	25,5
3 años de uso	220	78,2	57,3	20,9

Fuente: Yoon *et al.* (2007).

La disponibilidad de residuos orgánicos es enorme y se está dedicando mucho esfuerzo en desarrollar técnicas de tratamiento, que aseguren el aprovechamiento de estos residuos para la agricultura. El que su empleo sea todavía escaso en horticultura, tiene que ver, entre otras cosas, con niveles de calidad insuficientes, precios no competitivos, falta de las condiciones necesarias (sociales, políticas, jurídicas) para llevar a cabo una labor de reciclaje de residuos eficaz a una escala amplia.

4.4.4 Compostaje

El compostaje es la descomposición biológica de los constituyentes orgánicos de los residuos en condiciones controladas (Golueke, 1972). El objetivo del compostaje es dar estabilidad al material, eliminar componentes dañinos y dotarle de mejores propiedades para el cultivo de plantas. Para ello son necesarias condiciones de humedad y de aireación que determinen temperaturas favorables para organismos llamados termófilos.

El proceso tiene tres fases: 1) Fase inicial, de 1 a 2 días, en la que se descomponen los compuestos fácilmente degradables; 2) Fase termófila, que dura varios meses, en la que se degrada la celulosa en un proceso bacteriano aerobio; y 3) Fase de estabilización, en la que la temperatura baja, el ritmo de la descomposición disminuye y el compost es recolonizado por microorganismos mesófilos.

Conviene evitar que en la segunda fase la temperatura llegue a niveles excesivos, en todo caso nunca superiores a 60°C, que inhibirían la actividad microbiana. Esto se consigue manteniendo la temperatura entre 38 y 60°C por inyección de aire. Regulando el flujo de aire se puede controlar la temperatura. Por otra parte, esta aireación es conveniente porque si falta oxígeno, un proceso anaerobio daría lugar a productos fitotóxicos.

La estimación del grado de maduración de un compost tiene importancia para su uso. Dos indicadores que se pueden emplear son la capacidad de intercambio catiónico, que debe ser superior a 60 meq.100 g⁻¹, y la relación de carbono orgánico a nitrógeno orgánico en el extracto acuoso. La relación clásica C/N no es fiable en estos casos porque los materiales agregados para dar volumen varían mucho en la relación lignina/celulosa y por lo tanto en su biodegradabilidad (Hoitink y Kuter, 1986).

Experiencias bien controladas demuestran que con una separación previa de componentes es posible producir un buen sustrato compostado de basura urbana, que reduce en un 40 a 50%, en peso la cantidad de vertido (Schauner, 1998). Igualmente, se pueden aprovechar residuos de la industria local, como es el caso del Trópico de Cochabamba (Bolivia), en donde se han hecho ensayos muy controlados de compostaje rápido de los residuos de la industria del palmito, a través de la hiperventilación del material en silos con aireación exterior e interior, sin necesidad de volteo ni aireación forzada, consiguiendo acortar la duración del proceso. A los residuos se les agregan otros materiales (serrín, cascarilla de arroz y deyecciones de cerdo y aves), así como miel de caña y levadura como activadores de la fermentación, resultando un producto estable con buena calidad para aplicaciones agrícolas (Yáñez *et al.*, 2007).

Muy extendido está ya en horticultura el uso de los orujos resultantes de la industria de la vinificación (tabla 9), pero es conveniente destacar la importancia de un compostaje supervisado, que asegure la desaparición de cualquier residuo fitotóxico y la obtención de un producto suficientemente

maduro. La combinación con vermicompostaje aumenta la estabilidad del producto resultante, como se desprende de los trabajos de Paradelo *et al.* (2009). Como contraste, el empleo como componente del sustrato de los residuos sólidos de la industria de extracción de aceite de oliva, los llamados alperujos, pueden producir efectos fitotóxicos en horticultura ornamental debido a la presencia de sustancias de naturaleza fenólica por un compostaje deficiente (Carmona *et al.*, 2009).

En mayor medida aún, se puede valorar la posibilidad de reciclaje de residuos agrícolas como sustrato tras un compostaje adecuado, dada la mayor homogeneidad de los materiales de partida (Lamont, 1998). Experimentalmente se ha comprobado la posibilidad de obtener un material equilibrado después de compostaje, previa adición de ácido fosfórico para bajar el pH y añadir fósforo, agregar nitrato amónico para reducir el pH y aumentar el nitrógeno y diluirlo usando un material complementario fibroso de baja riqueza mineral, debido a que los tres problemas más destacables de un compost procedente de material vegetal son el contenido alto de sales solubles, el desequilibrio de nutrientes, con alto potasio y bajos nitrógeno y fósforo, y el elevado pH (Rainbow y Wilson, 1998). Fornes *et al.* (2010) consiguen rebajar la salinidad del compost de restos de biomasa de cosecha de melón, pimiento y calabacín, mediante lavados que dejan los contenidos de sales en niveles aceptables para el cultivo de ornamentales en maceta. Mendoza *et al.* (2009) obtienen muy buenos resultados combinando vermicompostaje con restos de cosecha de tomate, tanto sin compostaje previo, como con compostaje previo de dichos residuos. En el primer caso, se alarga el proceso unos dos meses más. Como complemento indispensable a una acertada técnica de compostaje, es indispensable la elaboración de una norma de calidad que, preferiblemente, debería ser consensuada a nivel internacional, de tal modo que un compost se pueda etiquetar y el usuario sepa exactamente lo que compra cualquiera que sea la procedencia (Verdonck, 1998). Las aportaciones más interesantes del compost son la mayor aireación y la reducción de la retención de agua de la turba. Además, se ha comprobado que tiene efectos supresores a través de los organismos antagonistas que se desarrollan en él. Las altas temperaturas que se alcanzan durante el compostaje, eliminan la mayor parte de las malas yerbas y otros microorganismos dañinos (Verdonck, 1998). En la figura 4c se aprecia un cultivo de fresa en sustrato orgánico.

4.4.5 Residuos de la madera

La **corteza de pino**, residuo muy común aprovechado en horticultura, tiene un contenido alto de lignina (alta relación lignina/celulosa). A menudo se usa sin compostaje previo, es decir, fresca. En este caso, por lo menos, debe enriquecerse con microelementos esenciales y con calcio y magnesio (tablas 3 y 9).

Las **cortezas de maderas duras**, como son las de *Quercus*, alcanzan un grado de descomposición muy notable en el compostaje. Hay muchas cortezas que liberan excesos de manganeso asimilable; esto debe vigilarse, ya que la concentración no debe nunca sobrepasar los 200 mg.L⁻¹.

En general todos los residuos de la madera, cortezas, serrines, etc., deben enriquecerse con nitrógeno, de 1 a 1,5 kg.m⁻³ y preferiblemente también con fósforo, antes del compostaje. El pH óptimo es de 6,5 a 7,5 y, dado que el pH de la corteza suele ser menor, esto se compensa añadiendo nitrógeno amoniacal y/o gallinaza, con ello se activa la descomposición. La urea, la gallinaza y los lodos son buenas fuentes de nitrógeno.

El aprovechamiento agrícola de la gran cantidad y diversidad de productos residuales de la industria maderera está condicionado a su caracterización, ya que sus propiedades son muy diversas, como pone de manifiesto un estudio de González *et al.* (2009). La distribución del tamaño de las partículas con más del 95% superiores a 5 mm y más del 70% superiores a 10 mm en las **virutas de eucaliptos y de salicáceas**, más del 60% entre 1 y 2 mm en **serrines de salicáceas y de chopos**, o cerca del 90% entre 2 y 5 mm en residuos de **corcho de roble**, son condicionantes absolutos para las aplicaciones y el manejo de estos materiales. Del mismo modo, conocer las propiedades fisicoquímicas y químicas ha de permitir tomar decisiones sobre las posibilidades de uso directo y la conveniencia de someterlos a tratamientos previos de acondicionamiento y mejora. Véanse la diversidad de características (tabla 11), con pH generalmente ácidos que requerirán corrección, las diferentes conductividades, sobre todo más altas en las **cortezas**, los niveles de relación C:N generalmente altos, superiores en los serrines e inferiores en las cortezas, que precisarán de adiciones diferentes de nitrógeno para el compostaje.

Tabla 11. Características fisicoquímicas y químicas de residuos de la industria de la madera.

Materiales	pH	CE (dS.m ⁻¹)	MO (%)	N (mg.L ⁻¹)		C:N
				NH ₄	NO ₃	
Virutas <i>Eucalyptus saligna</i>	5,0	0,67	97,7	23	353	332
Virutas <i>Eucalyptus rostrata</i>	5,0	0,59	97,9	16	259	313
Virutas salicáceas	6,2	0,30	99,3	25	306	284
Serrín <i>Eucalyptus rostrata</i>	5,7	0,08	98,8	26	345	358
Serrín salicáceas	7,0	0,38	99,1	22	590	317
Serrín <i>Populus angulata</i>	7,1	0,64	95,2	35	296	207
Cortezas <i>Eucalyptus saligna</i>	5,8	0,37	92,6	27	351	120
Cortezas <i>Eucalyptus rostrata</i>	5,4	2,20	83,1	27	343	126
Cortezas salicáceas	6,5	1,45	93,3	22	603	173
Cortezas <i>Populus angulata</i>	5,8	1,40	92,6	27	302	92
Corcho <i>Quercus ruber</i>	5,2	0,26	99,4	18	474	69

Fuente: González *et al.* (2009)

La **corteza de pino** (tablas 12, 13 y 14) procedente del desecho de la industria de la madera, es un material muy difundido, particularmente en la producción de plantas ornamentales, y está formada por la corteza externa y la interna del tronco. Es un material de características variables debido a su origen y se puede usar directamente o después de someterlo a un proceso de compostaje para mejorar sus propiedades y, sobre todo, para convertirlo en un material más estable, que no inmovilice parte del nitrógeno suministrado a las plantas y asegurar la eliminación de sustancia fitotóxicas.

Como en cualquier sustrato, en las cortezas es decisiva la granulometría para determinar las propiedades físicas. Se considera conveniente que un 20 a 40% (peso) de las partículas sean menores de 8 mm.

Las virutas y otros restos de la industria maderera se reciclan también como **fibra de madera**, que se obtiene después de un tratamiento al vapor, a 100 a 120°C, que asegura su esterilización. Este material tiene el inconveniente de ser muy poco estable por lo que sus propiedades físicas cambian y se produce bloqueo de nitrógeno, por ello durante el proceso de elaboración se impregna con nutrientes nitrogenados que tratan de reducir al mínimo la inmovilización de nitrógeno durante el cultivo. Tiene alta capacidad de aireación, pH de 5,0 a 6,0 y bajo contenido de sales. Teniendo en cuenta estas cuestiones puede sustituir parcialmente a la turba en las mezclas (Frangi *et al.*, 2008).

Tabla 12. Propiedades de la corteza de pino.

Propiedades	Rango de valores
Densidad aparente (g.cm ⁻³)	0,10
Porosidad total (%)	80 - 85
Porosidad interna abierta (%)	43
Agua disponible (%)	baja a media
Capacidad aireación	alta
pH	ácido (corteza fresca)
pH	neutro (corteza compostada)
CIC	55 meq.100g ⁻¹

Una cualidad adicional de la corteza es el mostrar propiedades supresoras frente a ciertos patógenos (*Phytophthora*, *Pythium*), a lo que hay que añadir su alta disponibilidad y bajo precio.

4.4.6 El compostaje de las cortezas de pino

El material fresco se acumula en pilas de 3 a 4 metros de altura, preferiblemente bajo cubierta. Si no se dispone de cubierta, se debe cubrir con

lámina de plástico. La fermentación que se produce durante el compostaje tiene como objetivo estabilizar el material, reduciendo su relación C/N a un valor de alrededor de 20 a 30. Debe enriquecerse el material para el compostaje con adiciones de 3 a 4 kg.m⁻³ de urea (0,75% para maderas blandas y 1,2% para maderas duras). Hay dos posibilidades, añadir la urea en una sola vez o repartir la adición en varias veces para reducir las posibles pérdidas por lavado. También es posible agregar otros materiales orgánicos ricos en bacterias y en nitrógeno, si se dispone de ellos y son baratos, pues facilitarán la fermentación. En este material el pH inicial de la materia prima es correcto y no necesita modificación.

Tabla 13. Elementos asimilables en el extracto de saturación de una muestra de corteza de pino.

Característica	Valores
pH	6,51
CE	0,84
N-NH ₄	4,51
N-NO ₃	99
Fósforo	17,9
Potasio	71,3
Calcio	28,9
Magnesio	9,51
Sulfato	170
Sodio	7,84
Cloruro	171

Tabla 14. Valores en porcentaje de propiedades físicas de una muestra de corteza de pino comparada con la turba.

	Corteza de pino	Turba rubia
Contracción	14,3	35,3
Porosidad	88,6	96,5
Macroporosidad	73,1	80,2
Microporosidad	15,5	16,3
Capacidad de aireación	31,3	35,6
Agua fácilmente asimilable	30,9	13,4

Debe darse un nivel de humedad inicial mediante remojado. Seguidamente se inicia la fermentación. Cuando llega a 60-65°C es necesario voltear las pilas para mantener la fermentación en este nivel de temperatura, evitando que suba. En casos concretos efectuados en España, los volteos han sido cada

10 a 15 días y el proceso ha durado unos cuatro meses. También se ha hecho fijando la temperatura del proceso en 50-55°C, con volteos cada siete días y finalización en unos 2,5 meses. El producto resultante, como es lógico, no es igual. Es mejor el efectuado a la temperatura más alta. La medida de la temperatura se hace con sonda colocada hasta 1 metro de profundidad.

Si es necesario, se debe aportar agua simultáneamente al volteo o entre los volteos. La humedad debe mantenerse aproximadamente en un nivel del 50% en peso.

Dado que el mantenimiento riguroso del nivel de temperatura de los diversos montones, obligaría a dar volteos continuos por el diferente ritmo de cada pila, lo normal es hacer volteos periódicos a intervalos fijos, por ejemplo una vez por semana, para todos los montones de la misma partida, con lo cual se reducen los costes del proceso. Al principio de la fermentación es conveniente voltear en intervalos más cortos, según la evolución de la temperatura puede ser necesario dar volteos cada tres días. Normalmente a los tres a cinco meses se alcanza la maduración. Finalmente se deja estabilizar hasta que desciende a la temperatura ambiente.

Si el material original es medianamente grueso, tamaño máximo de 3 cm, no se presentan problemas con el remojado, ya que el exceso de agua se elimina por gravedad. Si hay partículas mayores, es conveniente molerlas para que queden de 2 a 3 cm. En el caso de materiales jóvenes, fibrosos, conviene trabajar en la salida del molino con la criba de 3 cm para evitar atascos en el molino, y en el caso de cortezas más viejas, no fibrosas se puede trabajar con la de 2 cm. Si hay una fracción de partículas finas importante, hay que ser precavido con los posibles excesos de retención de agua, que alterarían la fermentación aerobia.

La presencia de fenoles en las cortezas de pino se achaca a los trozos de madera adheridos. Por lo general, estos compuestos desaparecen con el compostaje. Si la presencia de trozos de madera es notable, deben separarse previamente al inicio del tratamiento. Por último, si localmente hay residuos de fibra de madera disponibles baratos o sin coste, es conveniente la mezcla de fibra de madera con la corteza. Esta mezcla compostada da un sustrato muy efectivo.

5. Interacciones del sustrato con los organismos fitopatógenos

En el ambiente radicular reside una parte importante de las condiciones preventivas de la protección del cultivo frente a las enfermedades. Una buena elección del sustrato y el acertado manejo del mismo, que da lugar a condiciones favorables para el crecimiento de la planta, constituyen medidas preventivas de mucha importancia (Martínez, 2002). Además de esto, los sustratos orgánicos ofrecen posibilidades valiosas para la protección de los cultivos, que es conveniente aprovechar.

Las propiedades supresoras son comunes en los sustratos compostados y están relacionadas con factores físicos, químicos y biológicos. El hongo *Phytophthora cinnamomi* no puede actuar cuando la capacidad de aireación del sustrato es superior al 25%, como es el caso de las cortezas. El pH ácido, alrededor de 5, impide la actividad de *Phytophthora* y de *Pythium* (Tu *et al.*, 2000; Huang y Tu, 1999). Hay en los sustratos compuestos fungicidas naturales, ésteres etílicos de ácidos hidroxioleicos que controlan *Phytophthora* y ácidos grasos de peso molecular bajo (acético, propiónico, butírico). En tomate cultivado en fibra de corteza de *Chamaecyparis obtusa* se ha observado reducción en la incidencia de *Fusarium oxysporum f.sp. radialis-lycopersici* y también la de *Pseudomonas solanacearum* (Yu y Komada, 1999) y este efecto se atribuye a la presencia de compuestos en la corteza, etanol, aceites volátiles, etc., con actividades antifúngica y antibacteriana. Finalmente, la microflora antagonista que prolifera en materiales orgánicos, *Trichoderma viride*, *Streptomyces spp.*, etc. es supresora de diversas enfermedades de los cultivos, como *Pythium*, *Rhizoctonia* y *Fusarium*. Esto sucede, por ejemplo, en turbas del tipo Sphagnum con alto nivel de celulosa y en cortezas de pino, que favorecen esta proliferación. Los compost de residuos de corcho y los de orujo de uva han demostrado propiedades supresoras de fusariosis vascular del tomate (Borrero *et al.*, 2004).

Por otra parte, hay un interés claro por el uso repetido de los sustratos por razones económicas, pero también hay un temor a los riesgos fitopatológicos que esto comporta. Sin embargo, los resultados de diversos trabajos indican la eficacia de la solarización para mantener el sustrato reutilizado libre de patógenos (Moncada *et al.*, 2008).

6. Manejo del sustrato

6.1 Regulación de las condiciones físicas (agua/aire)

El manejo del riego en el sustrato debe dirigirse a conseguir suficiente capacidad de aire para la respiración radicular y un volumen adecuado de solución nutriente retenida a baja tensión. En sustratos de granulometría muy fina esto puede ser difícil de conseguir y será necesario reducir la frecuencia de los riegos, que en los casos de elevado déficit de saturación ambiente, dará lugar a desajustes en la disponibilidad de agua por la planta. También la granulometría fina dificultará el lavado de sales en los casos en que este sea necesario, bien por empleo de agua de alta salinidad o bien por errores de manejo del riego. Esto adquiere importancia en los casos en los que se aplica un manejo con recirculación de la solución nutritiva (figuras 5a a 5e), en los que el riesgo de aumento paulatino de la concentración de nutrientes es mayor. Ni qué decir si el agua de origen contiene cloruro sódico, aun cuando conviene distinguir ambos casos de aumento del potencial osmótico en la zona radicular. En el caso en que la salinidad se debe al aumento de la concentración de nutrien-

tes, como señalan Giuffrida *et al.* (2008a), el aumento del potencial osmótico limita la absorción de agua por la planta. Estos autores miden hasta un 11% de reducción de dicha absorción, lo que afecta negativamente al crecimiento en biomasa fresca, con pérdida de turgencia en los tejidos, lo cual es diferente de la limitación fotosintética que produce la salinidad por un exceso de NaCl en el sustrato. En ambos casos, la capacidad de lavado de los excesos de sales según la granulometría del sustrato es esencial para la continuidad del cultivo.

En el empleo de sustratos de elevada porosidad total y alta capacidad de aireación (tabla 6), el problema que se plantea es cómo conseguir una disponibilidad suficiente de agua en todo momento, sin grandes pérdidas por drenaje en el caso de sistemas abiertos. Dada la importancia de conseguir un reparto homogéneo del agua y los nutrientes en todo el volumen del sustrato, se practica habitualmente el riego en exceso, que por una parte asegura que la solución llegue a todo el volumen del sustrato compensando las irregularidades del riego y, por otra, desplaza restos de solución nutritiva anterior cuyo equilibrio iónico ha sido modificado por la absorción mineral selectiva de las plantas.

Se considera que el exceso debe alcanzar un mínimo del 15 al 20% sobre la dosis, pero esta proporción se verá modificada por las condiciones climáticas y aumentará si la tasa de transpiración de las plantas crece debido a mayor sequedad del aire.

6.2 Regulación de las condiciones químicas

Algunos sustratos requieren un ajuste inicial de sus propiedades químicas para poder ser utilizados. Es frecuente que el pH del material no sea inicialmente el conveniente. Esto ocurre con la lana de roca y la perlita, que tienen pH excesivos y deben ser saturados con una solución ácida de pH 5 a 5,5, que se deja actuar unas horas, antes de abrir orificios de drenaje previamente a la plantación (tablas 3 y 9).

El reparto de los nutrientes en el sustrato está condicionado por la colocación de los emisores de riego y por el manejo del mismo acorde con la tasa de transpiración del cultivo y la absorción mineral. Una dosificación del agua adecuada a la capacidad de retención del sustrato, con el exceso requerido, debe permitir una distribución homogénea de nutrientes en el volumen del sustrato. Si la dosificación del riego es deficiente, se puede dar lugar a gradientes verticales de CE, con valores más elevados hacia la base del contenedor, lo que puede disminuir el volumen de sustrato disponible para las raíces.

7. Evaluación agronómica del sustrato

Para determinar el valor agronómico de un sustrato, es necesario efectuar el proceso siguiente (Abad *et al.*, 1992): *i*) caracterizar el material; *ii*) hacer un estudio de sus propiedades; *iii*) mejorar las propiedades deficientes; y *iv*)

efectuar ensayos de crecimiento de plantas. La caracterización y el estudio de las propiedades han sido tratadas en los epígrafes anteriores.

La mejora de propiedades que resulten desfavorables para el cultivo, desde un punto de vista general para los sustratos, se hace por: *i*) compostaje y envejecimiento en el caso de materiales orgánicos no estables; *ii*) lavado de excesos de sales; y *iii*) corrección del pH.

Después de la caracterización de los materiales y la corrección de sus deficiencias, los ensayos de germinación y crecimiento hacen posible comprobar la aptitud del sustrato para el cultivo de plantas.

Un ensayo de germinación se lleva a cabo haciendo germinar semillas de especies diversas según los autores, en medios variados (arena, papel de filtro, etc.) que contienen un extracto acuoso del sustrato. Un método bastante difundido es el de Zucconi *et al.* (1981), según el cual se extrae un extracto acuoso del material que contenga un 60% de humedad, por presión de 250 atm durante 15 minutos. Semillas de *Lepidium sativum* L. se incuban 24 horas a 27°C en oscuridad, en placa Petri de 5 cm de diámetro, sobre papel de filtro con 1 mL de extracto. Se recomiendan de 10 a 15 repeticiones de 6 a 8 semillas. Se calcula un índice de germinación, IG, producto del porcentaje de germinación por la longitud media de las raíces:

$$IG = \frac{G}{G_0} \times \frac{LR}{LR_0} \times 100$$

Donde: G = número de semillas germinadas en el extracto del sustrato en ensayo; G₀ = ídem, en sustrato de referencia; LR = longitud de raíces en el extracto del sustrato en ensayo; y LR₀ = ídem, en sustrato de referencia.

Los ensayos de crecimiento se deben efectuar en comparación con sustratos ya conocidos, que se toman como referencia.

Las especies a emplear como testigos deben reunir ciertas condiciones: tener amplia información bibliográfica, ser de día neutro, tener crecimiento rápido, proceder de material vegetal uniforme (híbridos, clones), ser de cultivo fácil y ser sensibles a las propiedades que interesa estudiar en el sustrato.

Las condiciones de cultivo deben decidirse cuidadosamente. El tipo de tiesto o contenedor puede afectar notablemente al crecimiento de la planta. La altura, la sección, el volumen, la forma, el color del contenedor, pueden influir sobre los parámetros del crecimiento aéreo y radicular. Por lo tanto, según el tipo de planta deberán cuidarse estos aspectos.

El manejo del riego deberá hacerse sin crear situaciones de déficit hídrico, y para ello hay que tomar en cuenta las condiciones microclimáticas del ambiente, la especie y su estado de desarrollo y las características físicas del propio sustrato. La dosis de agua a aportar dependerá de la disponibilidad

hídrica del sustrato y del volumen del contenedor, aumentando en un 10 a 30% de exceso según la época del año y el tamaño de la planta.

El suministro de los nutrientes debe ser a través de una fórmula equilibrada según la especie en cultivo y siempre bajo un seguimiento cuidadoso del nivel salino en el sustrato o en el drenaje.

La evaluación del crecimiento y el desarrollo de la especie testigo se puede hacer a partir de algunos de los parámetros que siguen, siempre observando que las condiciones de ambiente que puedan afectar al ensayo, sean homogéneas:

- a. medidas de crecimiento y desarrollo: *i)* masas fresca y seca del total de la planta o de los distintos componentes; *ii)* índices de crecimiento (tasa relativa de crecimiento, RGR; tasa de asimilación neta, NAR; relación de área foliar, LAR, etc.); y *iii)* caracteres morfológicos y anatómicos (altura de la planta, longitud de entrenudos, número de hojas, longitud de raíces, número de flores, etc.).
- b. cuantía y calidad de la cosecha: *i)* variación temporal; *ii)* precocidad; y *iii)* calidades, fisiopatías.
- c. síntomas de toxicidad: *i)* reducciones del crecimiento; *ii)* cambios de colores; y *iii)* parámetros indicadores de efectos concretos (de salinidad, de asfixia radicular, etc.).

8. Conclusión

El estudio de los sustratos no se puede dar por concluido; no es posible decir que los materiales actualmente más difundidos por razón de sus propiedades y de su buen respaldo comercial, están consolidados. Es necesario continuar buscando materiales que reúnan características adecuadas para las diversas aplicaciones hortícolas, buen precio y, algo importantísimo en el momento presente, que contribuyan a evitar la continua agresión del hombre sobre el medioambiente. El aprovechamiento de materiales disponibles localmente a precios interesantes, no debería descartarse por los grupos de investigadores ni por los horticultores. Tanto los materiales naturales como los residuales deben ser estudiados, caracterizados y ensayados como alternativas potenciales a otros sustratos de alto precio actualmente en uso y muy en especial si implican cualquier contribución al deterioro ambiental. No debe olvidarse que un sustrato que cumpla con unas características aptas para el cultivo, puede ser interesante siempre y cuando se sepa manejar con buen conocimiento técnico, en relación con el cultivo, el clima y la calidad del agua y las técnicas de cultivo. Es necesario avanzar, queda mucho trabajo por hacer para el aprovechamiento de nuevos sustratos basados en subproductos reciclables.

Bibliografía

- Abad, M., Martínez, P.F., Martínez, M.D. y Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 11:141-154.
- Abad, M., Noguera, P. and Burés, S. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77:197-200.
- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A. and Noguera, V. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource Technology*, 82:241-245.
- Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahia, C. (Ed.) 2005. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Madrid: Ed. Mundi-Prensa. 681p.
- Andre, J.P. 1987. Propriétés chimiques des substrats. En: Les cultures hors sol, INRA: 127-147.
- Ansorena M., J. 1994. *Sustratos: propiedades y caracterización*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 172p.
- Arias, M.D. 2003. Utilización agrícola de los derivados del mesocarpio del coco. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Arrieta, V. y Terés, V. 1992. Caracterización física de mezclas de sustratos a base de escoria cristalizada de horno alto, corteza de pino y turba. *Actas de Horticultura*, 11:77-82.
- Awang, Y., Shaharon, A.S., Mohamad, R.B. and Selamat, A. 2009. Chemical and physical characteristics of cocopeat-based media mixtures and their effects on the growth and development of *Celosia cristata*. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 4(1):63-71.
- Benoit, F. and Ceustermans, N. 1995. A decade of research on ecologically sound substrates. *Acta Horticulturae*, 408:17-29.
- Baudoin, W., Grafiadelis, M., Jiménez, R., la Malfa, G., Martínez, P.F., Monteiro, A.A., Nosen, A., Verlodt, H., de Villele, O., von Zabeltitz, C. y Garnaud, J.C. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Serie Estudios, Dirección de Producción y Protección Vegetal, núm. 90, FAO, Roma, 323p. Descarga en <http://www.fao.org/docrep/005/s863os/s863os00.htm>.
- Borrero, C., Infantes, M.J., Castillo, S. y Avilés, M. 2005. Supresividad de un sustrato formulado con un compost del residuo del cultivo del champiñón y conductividad de la fibra de coco frente a la fusariosis vascular del tomate. *Actas de Horticultura*, VII Jornadas del Grupo de Sustratos de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas SECH, Madrid 2004.

- Brun, R. 1993. Pour choisir un substrat de culture hors.sol: connaître ses caractéristiques. *PHM*, 334:25-35.
- Brun, R. et Montarone, M. 1987. Influence de la concentration saline de la solution nutritive sur la réaction de la plante. En: Blanc, D. (Ed.). *Les cultures hors sol*. 2^a. ed. Paris: INRA, pp. 170-202.
- Bunt, A.C. 1984. Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. *Acta Horticulturae*, 150:143-153.
- Bunt, A.C. 1988. *Media and mixes for container-grown plants*. London: Unwin Hyman Ltd. 309p.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, S.L., 342p.
- Cadahía, C. y Eymar, E. 1992. Caracterización química y fisiológica de sustratos. *Actas de Horticultura*, 11:19-25.
- Carmona, E., Moreno, M.T., Pajuelo, P. y Ordovás, J. 2009. Evaluación de diversos composts de residuos agroindustriales como sustratos para el cultivo del clavel. *Actas de Horticultura*, 54:686-689.
- Comité Europeo de Normalización CEN. Normas UNE-EN, Norma española de mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. UNE-EN 13037. 2001. UNE-EN 13038. 2001. UNE-EN 13040. 2008. UNE-EN 13041:2001/A1. 2007. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid. (www.aenor.es).
- De Boodt, M. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux*, 81:59-72.
- De Boodt, M. and Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae*, 26:37-44.
- De Boodt, M., Verdonck, O. and Cappaert, I. 1974. Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37:2054-2062.
- Diego, L.F. 1992. Correlaciones entre la granulometría y las propiedades físicas en sustratos a partir de corteza de pino. *Actas de Horticultura*, 11:83-86.
- Evans, M.R. 2008. Rice hulls 101. *Grower Talks*, 71:61-64.
- Evans, M.R. and Gachukia, M. 2004. Fresh parboiled rice hulls serve as an alternative to perlite in greenhouse crop substrates. *HortScience*, 39:232-235.
- Fakhri, M.N., Maloupa, E. and Gerasopoulos, D. 1995. Effects of substrate and frequency of irrigation on yield and quality of three *Gerbera jamesonii* cultivars. *Acta Horticulturae*, 408:41-45.
- Fornes, F., Carrión, C., García-de-la-Fuente, R., Puchades, R. and Abad, M. 2010. Leaching composted lignocellulosic wastes to prepare container media: Feasibility and environmental concerns. *Journal of Environmental Management*, 91:1747-1755.

- Frangi, P., Amoroso, G., Ferrini, F. and Fini, A. 2008. Growth of ornamental shrubs in wood fibre-based growing media. *Acta Horticulturae*, 801:1571-1575.
- García, G., Fueyo, M-A., González, J. y Zabaleta, I. 1992. Los estériles de carbón como sustratos de cultivo hidropónico. *Actas de Horticultura*, 11:161-166.
- Giuffrida, F., Heuvelink, E. and Stanghellini, C. 2008a. Effects of root-zone nutrient concentration on cucumber grown in rockwool. *Acta Horticulturae*, 801:1055-1062.
- Giuffrida, F., Leonardi, C. and Marfá, O. 2008b. Substrate reuse in tomato soilless cultivation. *Acta Horticulturae*, 801:1577-1582.
- Golueke, C.G. 1972. *Composting: A study of the process and its principles*. Emmaus: Rodale Press, Inc. 110p.
- González, J., García, G., Zabaleta, I. y Fueyo, M.A. 1992. Los estériles del carbón: definición, clasificación y características fisicoquímicas. *Actas de Horticultura*, 11:97-110.
- González, J., del Pardo, K. and Martín, S. 2009. Wood waste characterization for composting. *Acta Horticulturae*, 843:337-341.
- Gras, R. 1983. Quelques propriétés physiques des substrats horticoles. *PHM*, 21:1-14.
- Gras, R. 1987. Propriétés physiques des substrats. En: Blanc, D. (Ed.). *Les cultures hors sol*. 2ª. ed. Paris: INRA, pp. 79-126.
- Gruda, N., Rocks, T. and Schmidt, U. 2008. CO₂ concentration in the root zone of vegetables, cultivated in organic substrates. *Acta Horticulturae*, 801:1063-1068.
- Guerrero, F., Masaguer, A. y Mediner, A. 1992. Propuesta de caracterización de sustratos de cultivo en la Comunidad de Madrid. *Actas de Horticultura*, 11:27-31.
- Hanna, H.Y. 2005. Properly recycled perlite saves money, does not reduce greenhouse tomato yield and can be reused for many years. *HorTechnology*, 15(2):342-345.
- Hoitink, H.A.J. and Kuter, G.A. 1986. Effects of composts in growth media on soil borne pathogens. En: Chen, Y. and Avnimelech, Y. (Eds.) *The role of organic matter in modern agriculture*. Holland: Martinus Nijhoff Publ. pp. 289-306.
- Huang, R. and Tu, M. 1999. Effects of hydrogen ion concentration and temperature on attachment of zoospores of *Pythium aphanidermatum* to tomato roots. Greenhouse and Processing Crops Research Centre. Harrow, Annual Report. pp.47-51.
- Lamont, A.K.G. 1998. Composting in a municipal recycling programme. The Dundee experience. *Acta Horticulturae*, 469:35-42.

- Lemaire, F., Dartigues, A., Riviere, L.M. et Charpentier, S. 1989. Cultures en pots et en conteneurs. París: INRA, 184 p.
- Maloupa, E., Mitsios, I., Martínez, P.F. and Bladenopoulou, S. 1993. Study of substrates use in gerbera soilless culture grown in plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*, 323:139-144.
- Manios, V.I., Papadimitriou, M.D. and Kefakis, M.D. 1995. Hydroponic culture of tomato and gerbera at different substrates. *Acta Horticulturae*, 408:11-15.
- Marfá, O., Martínez, A., Orozco, R., Serrano, L. and Martínez, F.X. 1993. The use of fine grade perlites in lettuce bag culture. I. Physical properties, rheologic effects and productivity. *Acta Horticulturae*, 342:339-348.
- Martinez, F.X. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*, 11:55-66.
- Martínez, P.F. 2000. Presente y futuro de los sustratos en la horticultura mediterránea. *Actas de Horticultura*, 32:19-31.
- Martínez, P.F. 2002. Manejo de sustratos para horticultura. En: "Caracterização, manejo e qualidade de sustratos para produção de plantas". Campinas: Instituto Agronômico. Documentos IAC 70:53-76.
- Martínez, P.F. and Abad, M. 1993. Soilless culture of tomato in different mineral substrates. *Acta Horticulturae*, 323:251-259.
- Martínez, P.F. and Abdel-Fattah, Y.M.M. 1995. Effects of substrate warming in soilless culture on gerbera crop performance under seasonal variations. *Acta Horticulturae*, 408:31-40.
- Mendoza, D., García, R., Hurtado, J., Fornes, F., Belda, R.M. y Abad, M. 2009. Uso de vermicomposts y compost de residuos agrícolas como sustratos para la producción de planta ornamental. *Actas de Horticultura*, 84:664-669.
- Moinereau, J., Herrmann, P., Favrot, J.C. et Riviere, L.M. 1987. Les substrats. Inventaire, caractéristiques, ressources. Les cultures hors sol, INRA, París, :15-77.
- Moncada, A., Caracciolo, G. and D'Anna, F. 2008. Effects of substrate solarization on tomato soilless cultivation. *Acta Horticulturae*, 801:1485-1491.
- Noguera, P. 1999. Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustrato. Tesis Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Noguera, V., Maquieira, A. and Martínez, J. 1997. Physical and chemical properties of coir waste and their relations to plant growth. *Acta Horticulturae*, 450:365-373.

- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R. and Maquieira, A. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Horticulturae*, 517:279-288.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Maquieira, A. and Noguera, V. 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34:593-605.
- Ojodeagua, J.L., Castellanos, J.Z., Muñoz, J.J., Alcántar, G., Tijerina, L., Vargas, P. y Enriquez, S. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(4):367-374.
- Ordovás, J., Aguado, M.T., Ortega, M.C., Moreno, M.T. y Suárez, M.P. 1992. Utilización del corcho como sustrato para semillero de tomate con seguimiento de las plantas en el campo. *Actas de Horticultura*, 11:155-159.
- Paradelo, R., Moldes, A.B., González, D. y Barral, M.T. 2009. Evaluación de composta y vermicompost de orujo agotado de uva como componentes de sustratos. *Actas de Horticultura*, 54:675-680.
- Pire, R. y Pereira, A. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1):55-63.
- Puustjarvi, V. and Robertson, R.A. 1975. *Physical and chemical properties. Peat in horticulture*. London: Academic Press. pp. 23-40.
- Quintero, M.F., González-Murillo, C.A., Flórez, V.J. and Guzmán, J.M. 2009. Physical evaluation of four substrates for cut-rose crops. *Acta Horticulturae*, 843:349-357.
- Rainbow, A. and Wilson, N. 1998. The transformation of composted organic residues into effective growing media. *Acta Horticulturae*, 469:79-88.
- Rodríguez, I. y Vidal, V. 2005. Estado de la normalización de los mejoradores del suelo y sustratos de cultivo en España. *Actas de Horticultura*, VII Jornadas del Grupo de Sustratos de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas SECH, Madrid, 2004.
- Schauner, P. 1998. High quality compost from household solid waste: fact or fiction. *Acta Horticulturae*, 469:31-34.
- Serrano, L., Orozco, R., Martínez, A. and Marfá, O. 1993. The use of fine graded perlites in bag culture. II. Yield and water consumption of lettuce. *Acta Horticulturae*, 335:435-442.
- Struve, D.K. and McCoy, E.L. 1996. Physical and chemical properties of media suitable for containerized bare root whip production. *Journal of Environmental Horticulture*, 14(3):137-141.

- Tu, M., Huang, R. and Zhang, W.Z. 2000. An integrated measure for controlling *Pythium* root rot of greenhouse tomatoes in rockwool culture. Comunicación personal.
- Valdés, R., Miralles, J., Conesa, E., Vicente, M.J., Navarro, A. y Bañón, S. 2009. Cultivo de *Myrtus communis* en fibra de coco: calibración de sondas ECH₂O. *Actas de Horticultura*, 54:721-726.
- Verdonck, O. 1998. Compost specifications. *Acta Horticulturae*, 469:169-177.
- White, J.W. 1974. Criteria for selection of growing media for greenhouse crops. *Florists' Review*, 155(4009):28-30, 73-75.
- Yáñez, P., Levy, A. y Azero, M., 2007. Evaluación del compostaje de residuos de dos agroindustrias palmiteras del Trópico de Cochabamba en silos hiperventilados. *Acta Nova*, 3(4):720-735.
- Yoon, H.S., Hwang, C.G., Hwang, H.J. and Shon, G.M. 2007. Effects of reuse of organic substrate on growth and yield of strawberry in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 761:521-526.
- Yu, J.Q. and Komada, H. 1999. Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) bark, a substrate with antipathogen properties that suppress some root diseases of tomato. *Scientia Horticulturae*, 81(1):13-24.
- Zuang, H. et Musard, M. 1986. Cultures légumières sur substrats. París: CTIFL. 276 p.
- Zucconi, F, Pera, A., Forte, M. and de Bertoldo, M. 1981. Evaluation toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22:54-57.



Figura 1. a) Turba rubia, perlita y lana de roca, b) Diversas presentaciones de lana de roca, c) Ensayo de sustratos diversos, d) Preparación de plantación de tomate en arena, e) Cultivo de tomate en arena, y f) Asfixia radicular en tomate cultivado en arena.

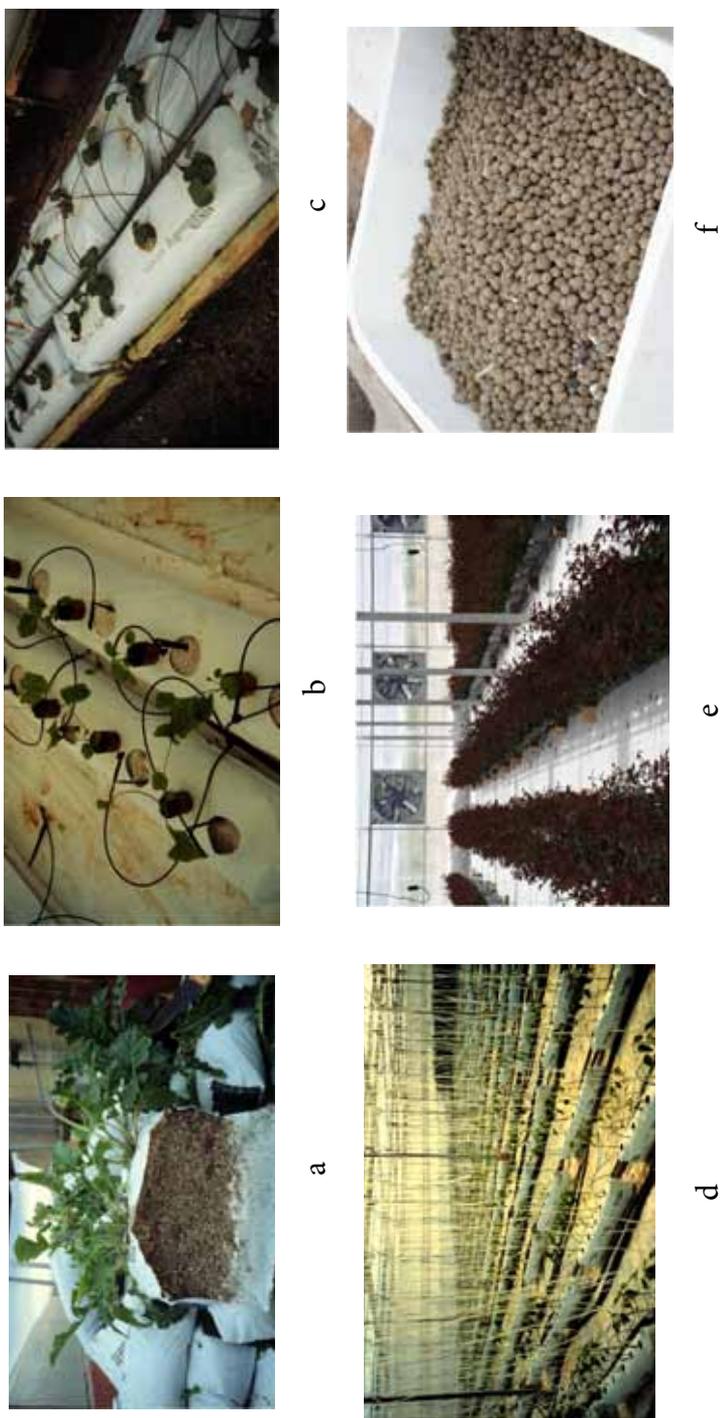


Figura 3. a) Gerbera cultivada en sacos de attapulgita, b) Transplante de gerbera a sacos de perlita. Cultivo de gerbera (c), de pimiento (d) y de rosa (e) en sacos de perlita; f) Arcilla expandida.



a



b



c



d



e



f

Sustratos para el cultivo sin suelo.
Materiales, propiedades y manejo

Figura 4. a) Gerberas en lana de roca, b) Cultivo de tomate en sacos de turba y c) Cultivo de fresa en columna de sustrato orgánico. Cultivo de pimiento en sacos (d) y en contenedores de poliestireno (e) con fibra de coco; y f) Rosal en canaleta de polipropileno con fibra de coco.



Figura 5. a) Automatización del riego en perlita, b) La sonda de succión. Técnica sencilla de supervisión del manejo del fertirriego, c) Estación de control del drenaje para manejo con recirculación, d) Gerbera en perlita con recirculación de la solución nutritiva, y e) Manejo en recirculación. Tanques de retorno de los drenajes y desinfección UV.