

MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE LAS CARÁCTERISTICAS FÍSICAS DE SUSTRATOS: EL CASO DE FIBRA DE COCO

Freddy Soto Bravo^{1/}, Alejandro Betancourt Flores²*

¹Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr.

*Universidad de Costa Rica. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

²Universidad de Costa Rica. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-7757-5967>

RESUMEN

Introducción. El incremento en la demanda de sustratos como medio de cultivo alternativo a suelos contaminados con complejos de fitopatógenos, tal es el caso del cultivo de fresas, plantea la necesidad de validar metodologías para la evaluación agronómica de sus características fisicoquímicas. Esto es causa de falta de control de calidad de materiales nacionales e importados, que limita el éxito del cultivo sin suelo en cultivos hortícolas.

Objetivo. El objetivo del presente estudio fue validar tres distintas metodologías para la evaluación de las características físicas de un sustrato, utilizando fibra de coco. **Materiales**

y métodos. Las metodologías evaluadas fueron: 1. el porómetro, 2. contenedor “in situ” y 3. caja de arena, para determinar componente sólido (CS), contenido de humedad volumétrica a capacidad de contenedor (θ_{cc}), capacidad de aireación (CA), densidad aparente (Da) y porosidad total (Pt). Adicionalmente, la caja de arena permite determinar los contenidos de humedad a diferentes potenciales mátricos, desde θ_{cc} hasta punto de marchitez permanente (PMP). **Resultados.** Para todos los parámetros, la variación entre métodos fue baja. Los valores de θ_{cc} oscilaron entre 74,9% en el método de contenedor hasta 78,3% en el método de caja de arena; y aunque fueron ligeramente superiores al valor óptimo, los valores de CA (15,13 a 16,33%) estuvieron dentro del rango óptimo de un buen sustrato. El método de caja de arena, a diferencia de los otros, permitió determinar el contenido de agua fácilmente disponible (AFD: 23,6%), agua de reserva (AR: 2,3%) y agua no disponible (AND: 49,9%). **Conclusión.** El porómetro y el contenedor in situ”, por su sencillez y accesibilidad, son útiles para estimar con precisión la mayoría de los parámetros físicos. Sin embargo, a diferencia del método de caja de arena, no permite la elaboración de la curva completa de liberación de agua y de aire con los diferentes tipos de agua en el sustrato, lo cual tiene un gran valor práctico para el manejo del riego en cultivos sin suelo.

Palabras clave: cultivo sin suelo, capacidad de contenedor, capacidad de aireación, agua total disponible.

ABSTRACT

Introduction. The increase in the demand for substrates as an alternative growing medium to soils contaminated with phytopathogen complexes, such as strawberries, raises the need to validate methodologies for the agronomic evaluation of their physicochemical characteristics. This is the cause of a lack of quality control of national and imported materials, which limits the success of soilless cultivation in horticultural crops. **Objective.** The objective of this study was to validate three different methodologies for the evaluation of the physical characteristics of a substrate, using coconut fiber. **Materials and methods.** The methodologies evaluated were: 1. the porometer, 2. container "in situ" and 3. sandbox, to determine solid component (SC), volumetric water content at container capacity (θ_{cc}), aeration capacity (AC), apparent density (AD) and total porosity (TP). Additionally, the sandbox method allows determining moisture contents at different matric potentials, from θ_{cc} to permanent wilting point (PWP). **Results.** For all parameters, the variation between methods was low. The θ_{cc} values ranged from 74.9% in the container method to 78.3% in the sandbox method; and although they were slightly higher than the optimal value, the CA values (15.13 to 16.33%) were within the optimal range of a good substrate. The sandbox method, unlike the others, made it possible to determine readily available water (RAW: 23.6%), reserve water (RW: 2.3%) and unavailable water (UW: 49.9%). **Conclusion.** The porometer and the container "*in situ*", due to their simplicity and accessibility, are useful for estimating with precision most of the physical parameters. However, unlike the sandbox method, it does not allow the elaboration of the complete water and air release curve with the different types of water in the substrate, which has great practical value for irrigation management in crops without soil.

Keywords: Soilless crops, container capacity, aeration capacity, available water

INTRODUCCIÓN

Un sustrato es todo material sólido distinto del suelo "*in situ*", natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular para soporte para la planta, además de proteger las raíces y almacenar el aire, agua y nutrientes (Ansorena 1994; Rivière and Caron 2001; Castro *et al.* 2019).

Para el cultivo de plantas sin suelo o hidroponía se pueden utilizar diferentes tipos de materiales tales como arenas, piedra pómez, carbón vegetal, fibra de coco y cascarilla

de arroz, entre otros. La gran variabilidad en la proporción de tamaños de partículas y consecuentemente en las propiedades físicas de algunos sustratos comerciales, dificulta el manejo del riego en cultivos en sustrato, por el contrario, una adecuada selección estandarizada del tamaño de partículas permite mayor estabilidad en las características físicas del sustrato, lo cual consecuentemente facilita el manejo del riego en los sistemas de cultivos sin suelo (Quesada y Méndez 2005; Ortega *et al.* 2016).

La aplicación excesiva o el déficit de agua en el sustrato afectan con igual magnitud el crecimiento del cultivo, el rendimiento y calidad de frutos. El exceso de riego favorece la contaminación ambiental con nitratos y metales pesados e incrementa los costos de producción. De aquí se desprende la premisa de que para una óptima nutrición del cultivo es indispensable realizar un manejo preciso del riego, para lo cual es imprescindible conocer las características físicas del sustrato (Chamindu Deepagoda *et al.* 2013a).

En cultivos sin suelo, antes de sembrar, es muy importante asegurarse que el sustrato tenga las características físicas óptimas, ya que una vez establecido el cultivo no es posible mejorarlas. Por tanto, uno de los principales factores que determinan el éxito de un cultivo sin suelo es la calidad física del sustrato, lo cual permite una buena dosificación y programación del riego y la nutrición del cultivo. Por el contrario, la mayoría de las propiedades químicas es posible enmendarlas durante el ciclo de cultivo. Por ejemplo, un exceso de sales se puede corregir mediante lavado; altos o bajos niveles de uno o varios nutrientes puede solucionarse ajustando las concentraciones en la solución nutritiva (Carlile *et al.* 2015).

En los últimos años a nivel mundial, el uso de sustratos para la producción de cultivos ha incrementado sustancialmente, desde pequeños huertos familiares de autoconsumo hasta unidades productivas comerciales (Bracho *et al.* 2009). En algunos sistemas de producción convencional en suelo bajo invernadero, como es el caso de la fresa en Costa Rica, el mal manejo nutricional y fitosanitario del suelo trae como consecuencia su agotamiento nutricional y la contaminación con complejos fitopatógenos, lo que conlleva a un aumento en la aplicación de pesticidas, que, junto al monocultivo, promueve un círculo vicioso que agrava la problemática y hace imposible la producción. Esto ha llevado a que un alto porcentaje de productores emigren hacia el cultivo hidropónico, utilizando como sustrato, principalmente la fibra de coco (González *et al.* 2015).

En Costa Rica, actualmente, no existen metodologías validadas para la interpretación de los análisis fisicoquímicos de sustratos, por lo que no existe ningún control de calidad tanto de materiales importados como nacionales. Esto limita el éxito del cultivo sin suelo y hace que los productores incurran en grandes pérdidas, lo que evidencia la necesidad de investigación en este tema. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue validar tres distintas metodologías para la evaluación de las características físicas de sustratos, utilizando fibra de coco

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica ($10^{\circ} 01' N$ y $84^{\circ} 16' W$, 840 msnm), con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, $22^{\circ}C$ y 78%, respectivamente.

Análisis granulométrico. Para realizar el análisis granulométrico se utilizó un texturómetro (Geotech, 2011) que consta de un soporte plástico con escala porcentual (1 a 100), cuatro frascos con sus respectivas cribas de $> 2,0$ mm (72 OPN), $> 1,0 - < 2,0$ mm (40 OPN), $> 0,5 - < 1,0$ mm (20 OPN) y $> 0,25 - < 0,5$ mm (9 OPN), respectivamente, y un último frasco que recoge las partículas finas de $< 0,25$ mm. Se utilizaron 8 muestras o repeticiones de sustrato, que se colocaron en el primer cilindro con la criba de 2,0 mm, la cual se agitó manualmente hasta obtener la separación de partículas en cada uno de los cinco frascos. Seguidamente, se determinó para cada fracción de tamaño de partículas, la distribución porcentual en base a volumen ($v v^{-1}$) según la escala del texturómetro. Además, cada fracción fue pesada por separado para determinar su distribución porcentual en base a peso ($p p^{-1}$).



Figura 1. Texturómetro formado por soporte plástico con escala porcentual (1 a 100) y cinco frascos con sus respectivas cribas, utilizado para determinar distribución de tamaños de partículas en sustratos.

Metodologías de análisis físico. Para determinar la D_a , P_t , C_s , CA y el contenido de humedad a CC se utilizaron tres distintas metodologías: i- el porómetro, ii- el contenedor “*in situ*” y iii- caja de arena.

El porómetro. En este estudio se hizo una adaptación al método de North Caroline State University descrito por Fonteno (2003), el cual consistió en un recipiente plástico de aproximadamente 500 ml, con una proporción altura y diámetro 1:1. En la parte inferior de cada recipiente se hicieron 5 perforaciones, donde se insertaron microtubos (4 mm) sellados con silicón y con tapones de goma que permitieron cerrar y abrir los orificios (Figura 2a).



Figura 2. Recipiente plástico utilizado como porómetro con una proporción 1:1 de altura y diámetro (a), colocación de muestras en el recipiente (b), saturación de muestras (c), brillo metálico del agua (d) y recolección y medición de drenajes (e).

La recolección de las muestras se realizó siguiendo el procedimiento de la norma europea UNE-EN 12579 (2000). Se utilizaron 8 repeticiones o muestras de sustrato, cuyas muestras fueron colocadas en los porómetros (Figura 2b). Seguidamente, se procedió a saturar con agua destilada hasta la marca de aforo hasta observar el brillo metálico del agua, sin excesos sobre la superficie del sustrato (Figuras 2c, 2d).

Durante el proceso de saturación, dependiendo del tipo de sustrato, es necesario realizar de dos a tres ciclos de saturación y drenaje con agua destilada con el fin de mejorar la capacidad de hidratación, desplazar burbujas de aire en el interior del sustrato y así obtener una saturación más homogénea. La duración de este proceso de humectación y drenaje puede variar dependiendo de la granulometría y del tipo de material; por ejemplo, la piedrilla de río drenará más rápido que la fibra de coco.

El sustrato saturado se pesó, e inmediatamente se destaparon los agujeros en la base del porómetro para recolectar y medir el volumen de agua drenada (V_d), hasta que cesa completamente el drenaje (Figura 2e). La duración del proceso de drenado puede variar dependiendo de la granulometría y tipo de material.

A cada porómetro se le midió el volumen a rellenar con sustrato (V_s : 350 ml) y se cuantificó su peso (g) sin sustrato (P_p) utilizando una balanza analítica (BOECO, BPS 40 plus). Después de cesar el drenaje, se cuantificó el peso (g) del porómetro con sustrato húmedo (PPSh). A continuación, las muestras de PPSh se secaron en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso seco constante obteniendo el peso de porómetro con sustrato seco (PPSs). Finalmente, se determinó el peso del sustrato húmedo (PS_h) y el peso del sustrato seco (PS_s) seco (g) del sustrato (PSs) según las ecuaciones $PS_h(g) = [PPSh(g) - P_p(g)]$ y $PS_s(g) = [PPSs(g) - P_p(g)]$, respectivamente.

La D_a , CA , CC , P_t y C_s de la fibra de coco, se determinaron según el procedimiento descrito a continuación. La D_a ($g\ L^{-1}$) se obtuvo como el cociente entre el peso seco de sustrato (PSs) a (105°C) y el volumen total de la muestra del sustrato (V_s) según la Ec.

$$D_a(g\ ml^{-1}) = \frac{PS_s(g)}{V_s(ml)}.$$

El porcentaje de humedad volumétrica a capacidad de contenedor ($\% \theta_{CC}$) se calculó como la diferencia entre el peso de sustrato húmedo (PS_h) menos el PS_s, dividido entre el V_s según la Ec.

$$\% \theta_{CC} = \frac{PS_h(g) - PS_s(g)}{V_s(ml)} \times 100.$$

El $\% CA$ se obtuvo al dividir el volumen drenado (V_d) entre el V_s con la Ec.

$$\% CA = \frac{V_d(ml)}{V_s(ml)} \times 100.$$

El %Pt correspondió a la suma de $\% \theta_{cc}$ más el %CA según la Ec. $\%Pt = \% \theta_{cc} + \%CA$. Finalmente, el %Cs fue obtenido como la diferencia entre 100 menos el %Pt.

Método de contenedor “in situ”. Este método es útil para evaluar las características físicas del sustrato directamente en el contenedor de cultivo antes de sembrar “in situ”, independientemente del tipo de contenedor. Los orificios de drenaje en el fondo del contenedor de cultivo deben ser impermeabilizados o sellados temporalmente para poder saturar el sustrato.

En este estudio, como el cultivo a establecer era tomate, se utilizaron tablas de fibra de coco con dimensiones de 14,5 cm de alto por 13 cm de ancho y 100 cm de largo para un volumen aproximado de 18,2 L. Para esto se diseñaron cuatro recipientes (repeticiones) en acero inoxidable con dichas medidas. A cada contenedor se le realizaron tres perforaciones en la parte inferior a un lado, donde se colocaron llaves de paso plásticas (1/2”) selladas en su base con silicón para evitar fugas. A cada contenedor se le midió el volumen real con agua (V_c) y se le cuantificó el peso sin sustrato (P_c).



Figura 3. Recipiente metálico con sus respectivos drenajes (a) que contiene una tabla de fibra de coco saturada de un volumen aproximado de 18,2 L (b).

Se seleccionaron al azar cuatro tablas comprimidas de fibra de coco, dentro de un lote de 408 tablas. A cada una se les removió el empaque plástico, se colocaron en el contenedor y se hidrataron mediante riegos cortos y frecuentes hasta alcanzar el tamaño equivalente al volumen de 18,2 L. Una vez hidratado, este se saturó utilizando el mismo procedimiento descrito para el porómetro, cubriéndolo con plástico para evitar la evaporación de agua. Seguidamente, se determinó el peso del sustrato saturado (PSs).

Posteriormente, se abrieron las llaves de drenaje, se recolectó y se midió el volumen drenado. A continuación, después de cesar el drenaje, se cuantificó el peso del contenedor

con las tablas de sustrato húmedo (PCSh). En seguida, los PCSh se secaron en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante, para obtener así el peso de contenedor con sustrato seco (PCSs). La determinación de las variables físicas (D_a , CA , CC , P_t , C_s) de la fibra de coco, se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito para el porómetro.

Método de caja de arena. Este método se basa en el principio de la dinámica hídrica en la planta, que extrae agua del sustrato ejerciendo una succión o potencial mátrico (ψ_m), por medio de la columna de transpiración que fluye desde las raíces hasta las hojas en la interacción sustrato-planta-clima. Dicha dinámica hídrica puede ser representada a través de la curva de desorción de agua, sometiendo submuestras de sustrato a ψ_m crecientes, en las cuales se determina el contenido de humedad respectivo.

Para ello se utiliza un equipo denominado “caja de arena” (Fig. 4), compuesto por un reservorio con arena sílica, un depósito de agua destilada, tuberías internas interconectadas a una manguera transparente (12,5 mm) que funge como columna de agua ajustable entre 0 y 100 cm ($\psi_m = 0$ a 10 kPa), lo que permite someter las muestras de sustrato a diferentes succiones (ψ_m).

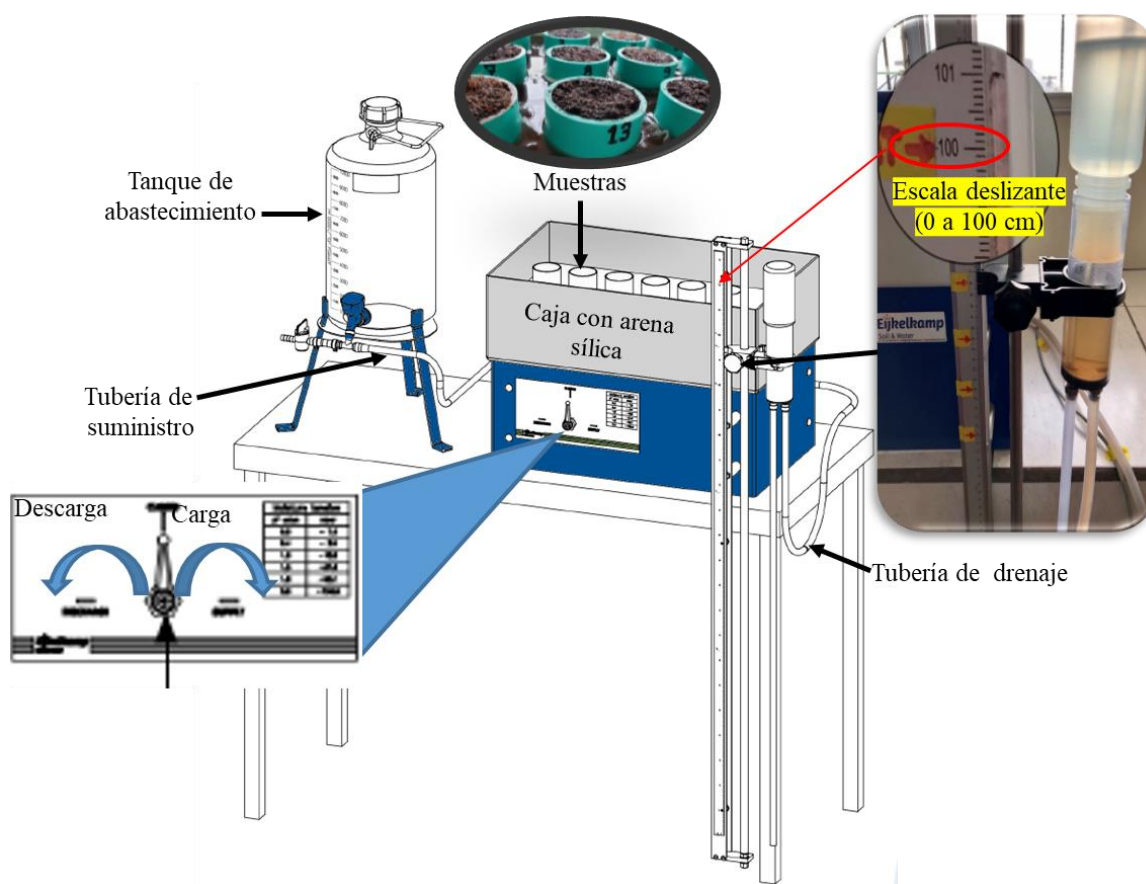


Figura 4. Equipo de “caja de arena” sílica, con una columna de agua ajustable (0 - 100 cm) que permite someter muestras de sustrato a diferentes succiones (ψ_m).

Para extraer las muestras de fibra de cocos se utilizó un tubo metálico (52,5 mm) con bordes afilados (Figura 5a), el cual se hacía girar de forma circular y constante para cortar las fibras más largas y evitar su compactación y disturbación. La muestra se tomó horizontalmente en la parte media del perfil del sustrato (Figura 5b).

Las muestras recolectadas se colocaron en cilindros de 52,5 mm de diámetro y 4,6 mm de alto con un volumen estándar de 100 ml, se enrasaron a la altura de cada cilindro con una navaja, y se cubrió con una malla 45 mesh sujeta con una liga en la base de los cilindros, para evitar la pérdida de sustrato durante el pesado (Figura 5c). Los cilindros con las muestras se colocaron en una bandeja de plástico donde se realizaron tres ciclos de saturación y drenaje (Figura 5d) para llenar los micro, meso y macroporos y desplazar burbujas de aire. Finalmente, las muestras se dejaron drenando durante un periodo de 24 horas.



Figura 5. Equipo de muestreo (a), toma de muestra (b), colocación de la muestra en el cilindro (c) y saturación de la muestra (d).

Después de saturar y drenar, las muestras se pusieron en la caja de arena, haciendo coincidir la columna de agua a 100 cm (10 kPa) con la altura media de los cilindros (26,25 mm) y dejando estabilizar por una hora (Figura 6). Las succiones de la columna de agua de 0 a 100 cm se expresaron en kPa (10 a 100 cm.c.a = 1 a 10 kPa).

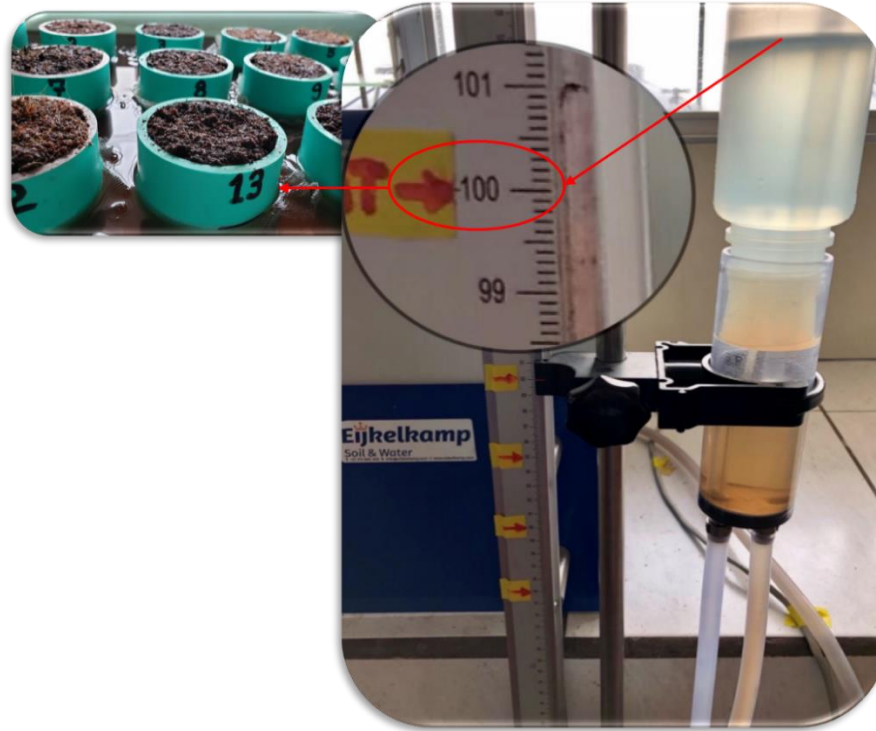


Figura 6. Estabilización de las muestras en la caja de arena haciendo coincidir la columna de agua a 100 cm con la altura media de los cilindros.

Las muestras fueron progresivamente sometidas a 10 diferentes succiones (ψ_m): 0,25 kPa; 0,5 kPa; 1,0 kPa; 1,5 kPa; 2,0 kPa; 2,5 kPa; 3,0 kPa; 5,0 kPa; 7,5 kPa y 10 kPa, coincidente con un día por cada ψ_m para un periodo de evaluación de 10 días. Para cada ψ_m se utilizaron 15 repeticiones. Cada día las muestras se pesaban en una balanza analítica (BOECO, BPS 40 plus), se ajustaba la columna de agua al siguiente ψ_m y se dejaban en estabilización para al día siguiente volver a determinar el peso húmedo, y así sucesivamente hasta completar los 10 puntos de ψ_m a los 10 días.

Determinación de características físicas. La D_a , CA , y θ_{cc} de la fibra de coco se determinaron según procedimiento UNE-EN-13041 (2007). Al finalizar el periodo de 10 días de pesado de las muestras de sustrato húmedo sometidas a las diferentes succiones, estas fueron secadas en estufa (105 °C) hasta peso constante. Seguidamente se determinó el porcentaje de humedad gravimétrica (%Hg) a partir de la diferencia entre el peso del sustrato húmedo (PSh) y el peso del sustrato seco (PSs) dividido entre el PSs, con la ec.

$$\%Hg = \frac{PSh(g) - PSs(g)}{PSs(g)} \times 100.$$

Los contenidos de humedad volumétrica (%v v⁻¹) de las muestras sometidas a las 10 diferentes ψ_m desde 2,5 hasta 10 kPa, fueron obtenidos como el producto del %Hg

multiplicado por la D_a del sustrato. La CA para cada ψ_m se obtuvo a partir de la diferencia entre P_t (saturado a 0 kPa) menos el respectivo contenido de θ en cada ψ_m .

Para determinar los distintos tipos de agua en el sustrato se asumió que el contenido de θ a 1 kPa correspondió a capacidad de contenedor (θ_{CC}) y la θ a 10 kPa al punto de marchitez permanente (θ_{PMP}). Adicionalmente, para verificar si el contenido de θ a ψ_m de 1 kPa correspondió a la θ_{CC} del sustrato, se colocaron seis cilindros con muestras de sustrato dentro de la caja de arena sin ser sometidas a succión, al evitar el contacto de las muestras con la arena sílica.

El ATD almacenada entre θ_{CC} y θ_{PMP} , correspondió a la suma del AFD más AR. El AFD se obtuvo por la resta entre θ_{CC} menos θ_5 , mientras que el AR estimó como la diferencia entre θ_5 menos θ_{PMP} . La sumatoria de AFD más el AR totalizan el ATD para la planta ($ATD = AFD + AR$). Finalmente, la P_t fue obtenida a partir de la D_a y D_r según la fórmula $P_t = (1 - d_a d_r^{-1}) \times 100$. El C_s se obtuvo por la diferencia entre 100 menos la P_t .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Granulometría. Este parámetro se refiere a la distribución de tamaño de partículas, que caracteriza al sustrato como grueso, medio o fino. El tamaño de partícula y la naturaleza del sustrato (orgánico o inorgánico) determinan características físicas tales como densidad aparente, densidad de partículas, componente sólido, porosidad total, retención de humedad, capacidad de aireación y capilaridad. Considerando que la fracción de tamaño de partículas comprendidas entre 0,1 y 1,0 mm es la más determinante en las propiedades físicas de los sustratos, se utiliza el índice de grosor (IG) como una opción práctica y rápida para evaluar, en primera instancia, la calidad física de los sustratos. El IG se define como el porcentaje acumulado de partículas de tamaño superior a un mm de grosor (Ansorena 1994; Vargas-Tapia *et al.* 2008; Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018).

El porcentaje acumulado de partículas gruesas según la escala porcentual del texturómetro basada en volumen (> 2 mm) fue superior ($54,2\% v v^{-1}$) que la distribución basada en peso ($28,1\% p p^{-1}$; Fig 7). Consecuentemente, se presentó un comportamiento similar con el IG (tamaño > 1 mm), siendo mayor con base a volumen ($80\% v v^{-1}$) y menor en base a peso ($55\% p p^{-1}$).

El comportamiento anterior se debe a que el sustrato es una mezcla de partículas granulares y fibras de diferente longitud que como mezcla tiene características propias. Sin embargo, al agitar el material y separar las fibras del material granular, estas por ser más livianas y largas no atraviesan fácilmente los tamices y se quedan en la primera criba. Dichas fibras separadas presentan una menor densidad que las partículas granulares, por lo que

no poseen una masa equivalente al volumen de sustrato como tal en mezcla. Lo anterior sugiere que la distribución de partículas según escala del texturómetro en base a volumen, dependiendo de la naturaleza del sustrato, puede ser una medición subjetiva que puede inducir a interpretaciones erróneas. Por tanto, en este caso particular, sería recomendable utilizar la distribución porcentual en base a peso.

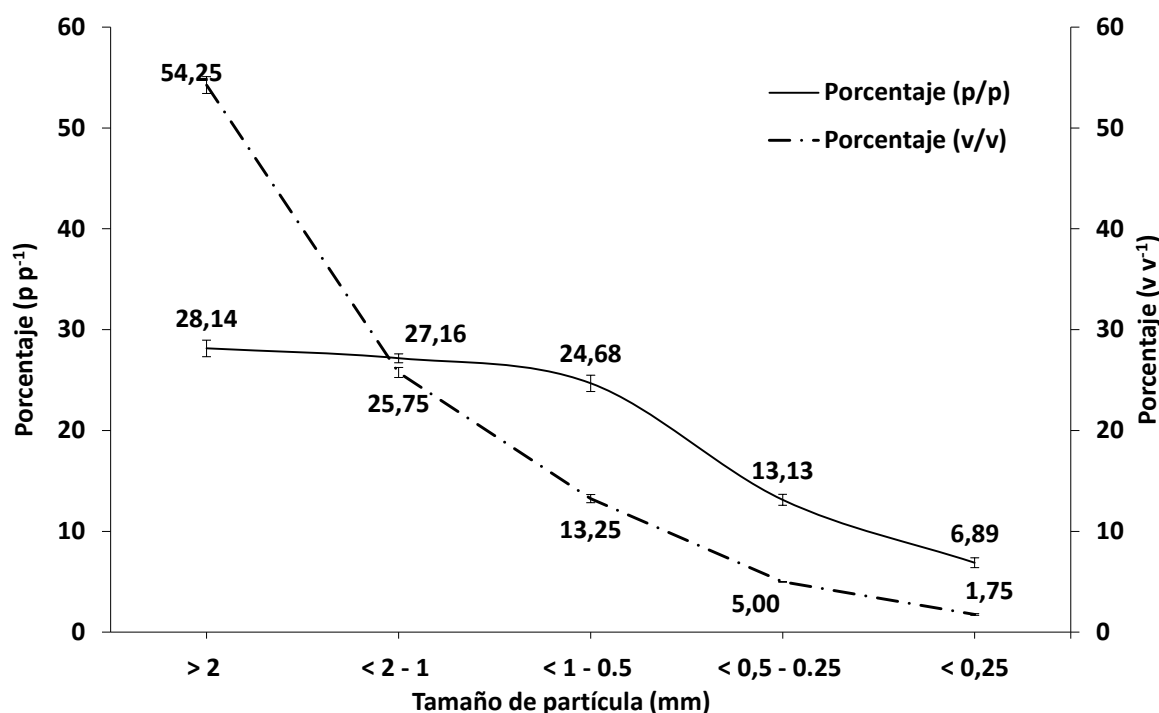


Figura 7. Distribución de tamaños de partículas en base a peso (%p p⁻¹) y según escala del texturómetro (%v v⁻¹) de un sustrato de fibra de coco (n = 15). Alajuela, Costa Rica.

Un IG alto, indica un mayor porcentaje de partículas gruesas que incrementa el contenido de macroporos y disminuye los microporos, lo que consecuentemente aumenta la capacidad de aireación y de drenaje, disminuyendo la retención de humedad. Por otra parte, un bajo IG implica mayor porcentaje de partículas finas afectando drásticamente la capacidad de aireación y aumentando la retención de agua hasta afectar las raíces por hipoxia (Vargas-Tapia *et al.* 2008).

Un IG de 55% (p p⁻¹) en la fibra de coco, evidencia que hay un aceptable contenido de macroporos que le proveen una buena CA, aspecto importante para una adecuada oxigenación y el reacomodo de una gran masa de raíces en un contenedor de volumen reducido de sustrato, característico del sistema de cultivo sin suelo. Simultáneamente, una óptima CA favorece un adecuado drenaje de los aportes excesivos de agua. Sin embargo, aunque el IG permite visualizar la capacidad potencial de aireación y de drenaje del sustrato, este parámetro no permite conocer las cualidades hídrico-físicas tales como la capacidad de retención de agua (cc) y los diferentes tipos de agua (Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018).

Otro parámetro que depende directamente de la granulometría es la capilaridad, la cual favorece el movimiento horizontal y vertical del agua que permite una distribución homogéneamente en todo el volumen del sustrato colocado en el contenedor. Para un sustrato grueso el agua aplicada drena por gravedad sin llegar a humedecer horizontalmente los bordes del sustrato; mientras que, para un sustrato de una granulometría adecuada, la humedad se va a distribuir a lo ancho y profundo del contenedor garantizando una buena uniformidad de humedecimiento y por tanto una buena colonización de las raíces en todo el volumen del sustrato (Martínez y Roca 2011).

Propiedades físico-hídricas. Los tres métodos evaluados para los análisis físicos de sustratos presentaron valores similares ($P < 0.05$) de D_a , CA , CC , Pt y Cs , que a la vez fueron comparados con valores óptimos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores promedio de las variables evaluadas con los tres métodos de análisis de características físicas de sustratos. 2020, Alajuela, Costa Rica.

Característica física	Contenedor "in situ"	Porómetro	Caja de arena	Óptimo
Densidad aparente (D_a : g ml ⁻¹)	0,083	0,063	0,096	0,4 ¹
Densidad real (D_r : gr/ml)	1,45	1,45	1,45	1,4-1,9 ¹
Capacidad de aireación (CA : %)	16,33	15,46	15,13	15 – 30% ²
Capacidad de contenedor (CC : %)	74,99	75,93	78,34	55 – 70 ²
Porosidad total (Pt : %)	91,32	91,39	93,47	> 85% ²
Componente sólido (Cs : %)	8,68	8,61	6,61	< 15% ²

¹Abad *et al.* (1993); ²Ansorena (1994).

Únicamente, el método de caja de arena obtuvo una θ_{cc} ligeramente superior ($\pm 2,9\%$) a los otros métodos, lo cual desde el punto de vista práctico no tendrían mayor efecto sobre el manejo del riego del cultivo. Las variaciones observadas pueden ser atribuidas a una mayor evaporación desde la superficie húmeda y expuesta de las muestras de sustrato en el porómetro y contenedor in "situ" donde la evaporación no es totalmente controlable. En la caja de arena al ser un sistema cerrado con tapa, la pérdida de agua por evaporación es mínima.

Por otra parte, deben tenerse en cuenta i- la forma y tamaño del contendor y ii- la alteración de la estructura del sustrato al recolectar la muestra, ya que el potencial hídrico total (ψ_t) de un sustrato es la suma de ψ matricial de las partículas sólidas (ψ_m), ψ osmótico

(ψ_o), ψ de presión (ψ_p) y ψ gravitacional (ψ_g). En un sustrato estabilizado después de cesar el drenaje, bajo condiciones atmosféricas y calidad de agua equivalente, el ψ_o y el ψ_p es similar en todas las muestras independiente de la forma del recipiente; mientras que, por el contrario, el ψ_g incrementa a mayor altura del contenedor (Fonteno 1993; Cannavo y Michel 2013).

Diferentes estudios han demostrado que la morfología del recipiente puede afectar la θ_{cc} , debido al efecto de la gravedad sobre el contenido de agua en el perfil del sustrato conforme varía la forma del contenedor. Para un mismo tipo y volumen de sustrato, hay un mayor ψ_g conforme incrementa la altura del sustrato en el contenedor, lo anterior se evidencia en un gradiente de mayor humedad desde el estrato superior hacia las capas inferiores, hasta alcanzar una zona saturada en el estrato más bajo (Arguedas *et al.* 2006; Gómez *et al.* 2019).

Dicha saturación ocurre debido a que, en el cultivo en contenedor, a diferencia de suelo, se corta la columna de agua al tener un límite del contenedor en la parte inferior. La altura del perfil saturado es prácticamente constante, por lo que al pasar de un contenedor alto y angosto a otro más bajo y ancho, el contenido de agua almacenada incrementa (Handreck y Black 2002).

En este estudio, este factor tuvo poco efecto ya que la proporción entre altura y ancho de los contenedores usados en los tres métodos se mantuvo constante en 1:1. Sin embargo, es un factor esencial por considerar al evaluar un sustrato, ya que puede inducir a errores apreciables cuando al renovar el cultivo se cambia el tipo de contenedor.

Por otra parte, es imprescindible tener un protocolo definido para la toma de la muestra, ya que una fuerte manipulación del sustrato puede afectar los parámetros físicos del sustrato. En el método de caja de arena al utilizar cilindros estándar (Eijkelpamp 2019), la recolección y posterior colocación de muestra en los cilindros, implica mayor manipuleo, lo que podría alterar la estructura del sustrato. En el caso del contenedor in situ, la tabla de coco comprimida se colocó entera en el contenedor y se hidrató sin manipular el sustrato. Asimismo, se debe establecer la cantidad mínima de muestras para evaluar un sustrato (n óptimo), para lo cual se puede utilizar el procedimiento de la norma europea UNE-EN 12579 (2000).

La densidad real o de partículas, relaciona el peso seco con el volumen del componente sólido del sustrato, excluyendo el volumen total de poros (macroporos, microporos y ultramicroporos). El valor obtenido ($1,45 \text{ g ml}^{-1}$) fue similar a los reportados en otros estudios y además concuerda con el óptimo reportado (Abad *et al.* 1993; Vargas-Tapia *et al.* 2008).

La densidad aparente (D_a) representa la relación entre el peso seco y el volumen total del sustrato que incluye la P_t y el C_s . Los valores de D_a de la fibra de coco evaluada fueron bajos, variando levemente ($P > 0.05$) desde $0,062 \text{ g ml}^{-1}$ con el porómetro hasta $0,092 \text{ g ml}^{-1}$ con la caja de arena (Cuadro 1). Por tanto, indistintamente del método, los bajos valores de D_a afectaron directamente la proporción entre P_t y C_s , favoreciendo un incremento del contenido de macroporos ($>$ aireación) y una reducción en el C_s . Además, valores bajos de D_a , representan una ventaja desde el punto de vista práctico, ya que está directamente relacionada con un menor peso del sustrato, lo que facilita su manipulación durante el establecimiento del cultivo (Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018), sobre todo cuando son grandes áreas de cultivo. Cabe mencionar que la D_a obtenida mediante los tres métodos fue muy similar a la reportada en otros estudios para este tipo de material orgánico (Rhie y Kim 2017).

Como consecuencia de ser un material liviano con baja D_a , no hubo diferencias estadísticas ($P > 0.05$) entre métodos en los valores de P_t , CA y C_s , con variaciones $< 1\%$ entre CA y de $< 2\%$ en P_t (Cuadro 1). Esto demuestra que los tres métodos son muy fiables para evaluar dichas variables.

La porosidad total comprende el volumen total de poros (macroporos, mesoporos, microporos y ultramicroporos) correspondientes a los componentes de aire y agua en el sustrato. Cuando un sustrato se satura con agua, el aire que ocupa los poros grandes entre partículas es desplazado por el agua, que posteriormente drena por efecto de la gravedad. Conforme el agua drena y va desalojando progresivamente los macroporos, nuevamente al aire pasa a ocupar dichos poros, hasta cesar el drenaje. En ese momento, el agua que queda almacenada ocupa los mesoporos, microporos y ultra microporos. Los mesoporos almacenan el AFD para la planta, los microporos el AR que puede funcionar como buffer para periodos cuando hay falta de agua, y finalmente los ultramicroporos que almacenan el agua con alta succión que la hacen no disponible para la planta. Este último ocurre en sustratos muy finos, que, a pesar de retener mucha agua, no es disponible para la planta, aunado a la condición de hipoxia que induce a la muerte de las raíces (Drzal *et al.* 1999; Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018).

Para realizar un buen manejo del riego es importante un buen equilibrio entre capacidad de aireación y retención de agua, ya que facilita el manejo del riego y minimiza los efectos de aplicaciones deficientes o excesivas de agua. Para determinar esta relación aire:agua en el sustrato, se utilizan las curvas de liberación de agua y aire, las cuales relacionan la succión de retención del agua (kPa) con el contenido de humedad (%) en el sustrato (Soto 2018).

El conocer la θ_{cc} de un sustrato, no es suficiente información para realizar un manejo eficiente del riego. En este caso, el método de caja de arena comparado con los otros

métodos permitió construir la curva de desorción de agua y de aire del sustrato desde θ_{CC} hasta θ_{PMP} y con ello determinar los diferentes tipos de agua en el sustrato (Fig. 2).

La θ_{CC} de la fibra de coco (78,3%) fue superior al rango óptimo (50 - 70%) según Ansorena (1994). El contenido de agua total disponible (ATD= 25,9%) para la planta, almacenada entre θ_{CC} (1 kPa) y θ_{PMP} (10 kPa) se distribuyó en AFD (23,6%= $\theta_{CC} - \theta_5$) y AR (2,37%= $\theta_5 - \theta_{10}$).

A continuación, se describe la dinámica de agua en La interacción sustrato-planta-atmósfera según una curva de liberación de humedad y aire obtenido por el método de caja de arena (Fig. 8). Durante el proceso de saturación del sustrato, el agua desplazó el aire que ocupa los espacios entre partículas (macroporos) hasta alcanzar la saturación completa. En este punto, el contenido de agua es equivalente a la Pt (93,39%) ocupando la totalidad de poros (macro, meso y microporos y ultramicroporos), por lo que la CA es 0% mientras que el Cs (6,61%) se mantiene constante.

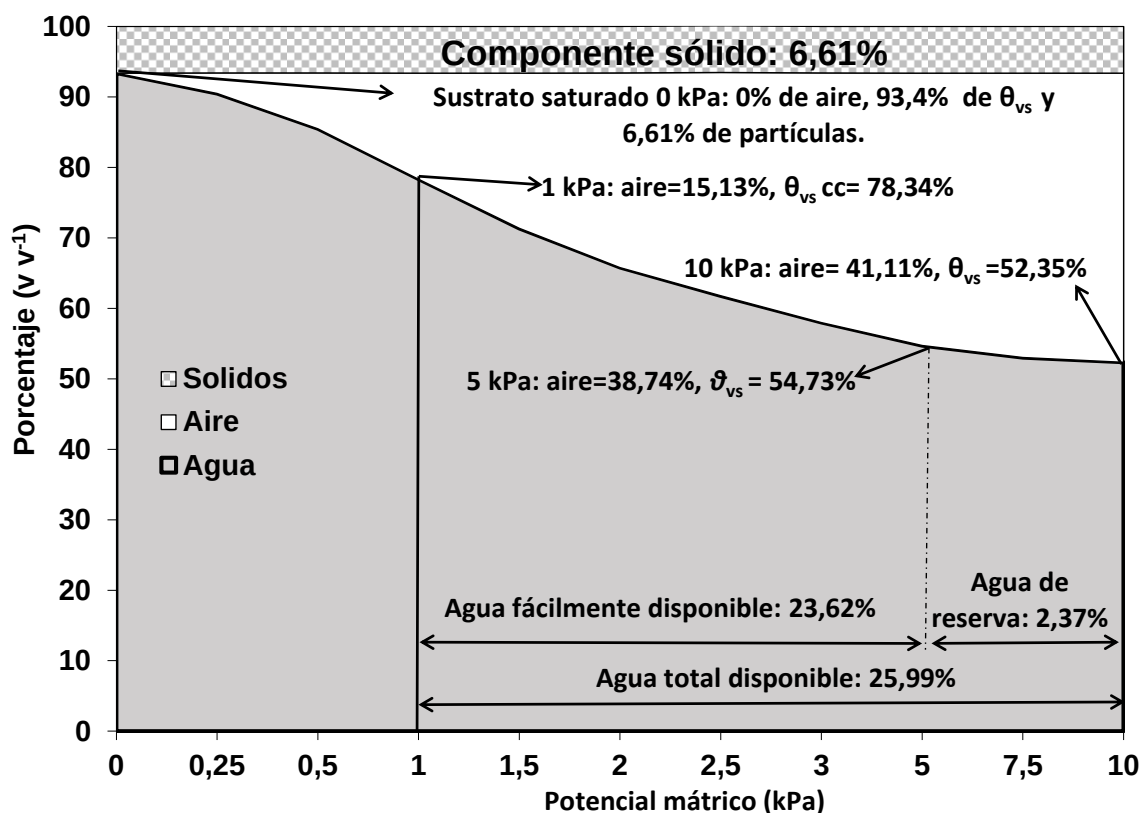


Figura 8. Curva de liberación de agua y aire de un sustrato de fibra de coco, evaluado mediante el método de "caja de arena". Alajuela, Costa Rica, 2020.

Posteriormente, inició el proceso de drenado por efecto del potencial gravitacional (ψ_g), el cual cesó a un ψ_m de 1 kPa, donde el total de agua que quedó almacenada

corresponde a la θ_{cc} (78,34%) con una CA de 15,12%. La θ_{cc} del sustrato obtenida (78,3%) fue corroborada colocando cuatro muestras testigo dentro de la caja de arena, que drenaron libremente sin ser sometidas a succión al aislarlas del contacto directo con el lecho de arena sílica. Dichas muestras mantuvieron un contenido de humedad ligeramente constante (78,9%) al final de los 10 días de evaluación, el cual fue muy similar al contenido de θ_{cc} obtenido en la fibra de coco (78,3%) con el método de caja de arena (Fig. 9).

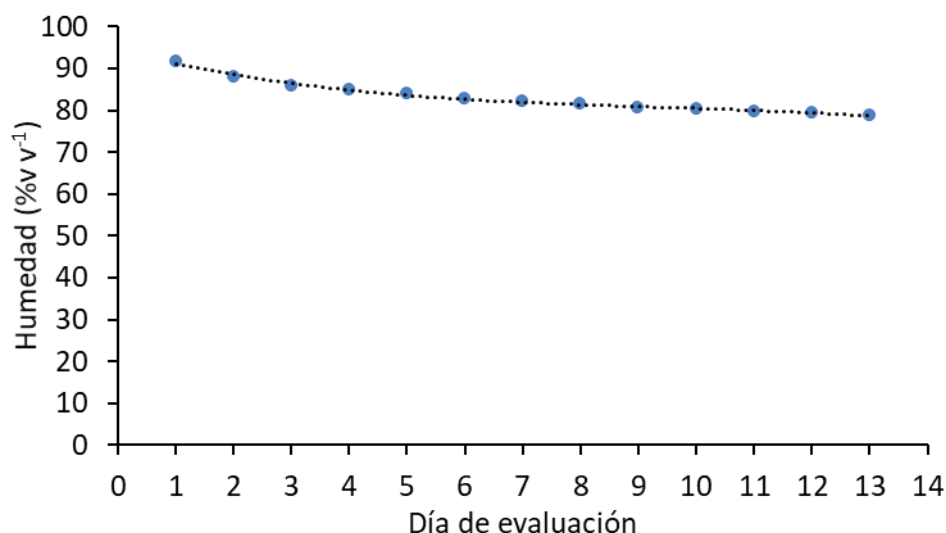


Figura 9. Evolución del contenido de humedad de muestras de sustrato de fibra de coco después de saturación y drenaje, sin someter a succión en el método de caja de arena (n= 6).

Continuando con la descripción de la dinámica del agua según la Figura 8, una vez que el drenaje cesa y se estabiliza el contenido de humedad en el sustrato a θ_{cc} (78,3%), las plantas para extraer agua al sustrato aplican una succión por medio del flujo de transpiración desde las raíces hasta las hojas. Después del amanecer, conforme incrementa la radiación solar aumenta progresivamente la demanda hídrica del cultivo y simultáneamente el sustrato se va secando producto de la extracción que realiza la planta. Conforme este proceso de transpiración y secado avanza durante el día, la planta paulatinamente tiene que ejercer cada vez mayor succión para abastecer el flujo de transpiración requerido. Sino se repone agua mediante el riego, el ψ_m con que las partículas sólidas retienen el agua aumenta gradualmente hasta alcanzar el PMP en el cual el agua no es disponible para la planta (AND), ya que el ψ_m con que las partículas sólidas retienen el agua es superior al que la planta es capaz de ejercer para extraer agua del sustrato (Noguera *et al.* 2000; Martínez y Roca 2011; Gohardoust *et al.* 2020).

En el presente estudio, la θ_{cc} del sustrato (78,34%) fue ligeramente superior al máximo valor dentro del rango óptimo (70%) según Ansorena (1994), del cual una alta

proporción es AND (52,35%). Esto probablemente estuvo relacionado con el hecho de que este sustrato posee casi un 45% de partículas de tamaño inferior a 1 mm, de las cuales hay un 20% de partículas finas < a 0,5 mm. La fracción de tamaño de partículas comprendidas entre 0,1 y 1,0 mm es la más determinante en las propiedades físicas de los sustratos, lo cual consecuentemente se reflejó en una retención de humedad ligeramente superior al óptimo (Prasad y Chualáin 2004; Anicua *et al.* 2009).

No obstante, aunque la θ_{cc} de la fibra de coco evaluada fue alta (78,3%), al mismo tiempo la CA a capacidad de contenedor fue optima (17,4%), ya que se mantuvo dentro de los rangos recomendados (15 a 30%) por Ansorena (1994). La CA (macroporos) es una característica esencial en un sistema de cultivos sin suelo, ya que el sistema radical tiene una alta demanda de oxígeno debido a una alta actividad metabólica y de crecimiento. Además, dicha propiedad es lo que permite que un gran volumen de raíces de una planta pueda acomodarse en un pequeño volumen de sustrato confinado en un pequeño espacio en contenedor (Abad *et al.* 2004; Chamindu Deepagoda *et al.* 2013b).

De acuerdo con lo anterior, cabe destacar que el paradigma de “sustrato ideal” es difícil de obtener, sin embargo, es aceptable afirmar que “no hay sustrato malo”, ya que, si se conocen sus características físicas, se puede implementar una adecuada estrategia de manejo del riego adaptada a las características del sustrato, y así evitar problemas derivados del déficit o excesos de riego.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, cualquiera de los métodos desarrollados permite evaluar con suficiente confiabilidad la D_a , la CA, la θ_{cc} , la P_t y el C_s del sustrato de fibra de coco, para ser utilizados como criterios técnicos en la toma de decisiones para el manejo del riego en cultivo sin suelo.

Los métodos de porómetro y contenedor “in situ” son sencillos, prácticos y confiables para utilizar a nivel de finca, y si no se dispone de una estufa al menos permite determinar la CA por volumen en un sustrato. Dicho parámetro junto al IG determinado con el texturómetro, son criterios muy útiles para implementar estrategias para el adecuado manejo del riego en cultivos en sustrato.

El método de caja de arena tiene la ventaja adicional de que permite construir la curva característica de desorción de agua y de aire del sustrato, y así determinar los diferentes tipos de agua incluyendo el ATD desglosada en AFD y AR, y el AND para la planta. Adicionalmente, dicho método permite determinar el volumen de riego aplicando un

porcentaje de agotamiento del ATD, y con ello programar el riego por tiempos de acuerdo con el caudal de los goteros por m⁻².

Agradecimientos. Al técnico especializado Julio Vega por su valioso apoyo en el proceso de investigación.

LITERATURA CITADA

Abad, M; Martínez, P; Martínez, M; Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas Hort.* 11:141-154.

Abad, M; Noguera, P; Carrión, B. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. In: *Tratado de Cultivo Sin Suelo* (Ed. Urrestarazu M). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 113-158.

Ansorena, MJ. 1994. *Sustratos. Propiedades y caracterización.* Madrid, España, Mundi Prensa. 167 p.

Arguedas, F; Lea-Cox, J; Méndez, CH. 2006. Calibration of ECH20 Probe Sensors to Accurately Monitor Water Status of Traditional and Alternative Substrates for Container Production. *SNA Research Conference: Water Management* 51:501–505.

Bracho, J; Pierre, F; Quiroz, A. 2009. Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el (online). s.l., s.e. Consultado 23 Oct. 2021. Available at <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85714162006>.

Cannavo, P; Michel, JC. 2013. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae* 151:11–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.021>.

Castro, S; Aldrete, A; López, J; Ordaz, V. 2019. Physical and chemical characterization of substrates based on pine bark and dust. *Madera y Bosques* 25(2). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb/2019.2521520>.

Carlile, WR; Cattivello, C; Zaccheo, P. 2015. Organic Growing Media: Constituents and Properties. *Vadose Zone Journal* 14(6): 2014.09.0125. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125>.

Chamindu Deepagoda, TKK; Chen Lopez, JC; Møldrup, P; de Jonge, LW; Tuller, M. 2013a. Integral parameters for characterizing water, energy, and aeration properties of soilless plant growth media. *Journal of Hydrology* 502:120–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.031>

Chamindu Deepagoda, TKK; Moldrup, P; Tuller, M; Pedersen, M; Chen Lopez, JC; Wollesen de Jonge, L; Kawamoto, K; Komatsu, T. 2013b. Gas Diffusivity-Based Design and Characterization of Greenhouse Growth Substrates. *Vadose Zone Journal* 12(3): vzj2013.03.0061. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2013.03.0061>.

Drzal, MS; Fonteno, WC; Cassel, DK. 1999. PORE FRACTION ANALYSIS: A NEW TOOL FOR SUBSTRATE TESTING. s.l., s.e.

Eijkelkamp, Soil & Water. 2019. Sandbox for pF-determination, User manual. s.l., s.e. Available at www.eijkelkamp.com.

Fonteno, WC. 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta Horticulture* 342:197–204.

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

Gohardoust, MR; Bar-Tal, A; Effati, M; Tuller, M. 2020. Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy* 10(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>.

Gómez, A; Reyes, J; García, E; Pimentel, J; Silos, H. 2019. Efecto de la orientación y forma de contenedor sobre el crecimiento y desarrollo de chile ancho cultivado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1857>.

González, L; Solía, N; Oses, M. 2015. Situación Actual del cultivo de fresa en la región Central Occidental. San Pedro de Poás de Desarrollo Rural.

Gayosso, S; Borges, L; Villanueva, E; Estrada, MA; Garruña, R. 2018. Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. s.l., s.e.

Martínez, P; Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. *Materiales, propiedades y manejo*. (online). 1 ed. s.l., Editorial Universidad Nacional de Colombia. 37–77 p. Consultado 23 oct. 2021. Available at <https://www.researchgate.net/publication/237100771>.

Noguera, P; Abad, M; Noguera, V; Puchades, R; Maquieira, A. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically friendly peat substitute. *Acta Hort*. 517:279-288.

Ortega, M. L; Martínez, V. C; Ocampo, M. J; Sandoval, C. E; Pérez, A. B. 2016. Efficiency of substrates in soil and hydroponic system for greenhouse tomato production. s.l., s.e.

Prasad, M; Chualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Hort.* 648: 161-166. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.19>

Quesada, RG; Méndez, SC. 2005. Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana* 16(2):171–183.

Rhie, YH; Kim, J. 2017. Changes in physical properties of various coir dust and perlite mixes and their capacitance sensor volumetric water content calibrations. *HortScience* 52(1):162–166. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11362-16>.

Rivière, LM; Caron, J. 2001. Research on substrates: state of the art and need for the coming 10 years. 548. s.l., s.e.

Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42(2):59–73. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v42i2.33779>.

UNE-EN-12579 (Una Norma Española -European Norm). 2000. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Toma de muestras. Madrid, España, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 11p.

UNE-EN-13041 (Una Norma Española-European Norm). 2007. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. Madrid, España, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 24 p.

Vargas-Tapia, P; Castellanos-Ramos, JZ; Sánchez-García, P; Tijerina-Chávez, L; López-Romero, RM; Ojodeagua-Arredondo, JL. 2008. Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(4):375. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.375>.