



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

**Facultad de Ciencias Agroalimentarias**  
**Escuela de Agronomía**  
**Estación Experimental Agrícola**  
**Fabio Baudrit Moreno**



---

## **Caracterización físico- química de sustratos utilizados en cultivo sin suelo.**

*Freddy Soto Bravo*

*San José, 2016*



---

## 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, desempeñando por tanto un papel de soporte para la planta, además de proteger las raíces y almacenar el aire, agua y nutrientes (Ansorena, 1994).

Uno de los principales factores que determinan el éxito de un cultivo sin suelo es la calidad del sustrato. Esta se puede evaluar determinando sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas.

La granulometría y el tipo de material determinan las características físicas de un sustrato, dentro de las cuales es importante determinar índice de grosor, densidad aparente, densidad real y retención de humedad a diferentes presiones de succión, factores que permiten calcular la porosidad total y la relación aire: agua del sustrato.

Al igual que un suelo, los sustratos se componen de una porción de aire, agua, y una fase sólida (fracción orgánica y/o mineral), con la diferencia de que la parte sólida del sustrato es muy inferior y la fracción ocupada por aire más agua es mucho mayor que en el suelo. Esto hace que las metodologías de análisis agronómico, así como el manejo del riego y la nutrición de cultivos en suelo y en sustrato sean diferentes.

La propuesta del presente trabajo es validar un procedimiento metodológico para la evaluación agronómica de sustratos o medios de cultivo.



---

## Antecedentes y justificación.

Los mercados nacionales e internacionales demandan cada vez más productos sanos e inocuos, libres de residuos químicos y microorganismos nocivos para la salud del consumidor. Esto a su vez exige técnicas de cultivo más precisas, donde sea posible controlar la mayor cantidad de factores involucrados en el proceso de producción. Es esta una de las razones por las que la producción hortícola en ambientes protegidos (invernaderos) a tomado gran auge en el mundo, y más recientemente en Costa Rica.

En la producción en invernadero, el mal manejo nutricional del suelo y la falta de prácticas de prevención de enfermedades, provocan serios problemas de agotamiento y contaminación con patógenos de suelo como *Fusarium* sp, *Ralstonia* y nematodos, entre otros. Esto conlleva un aumento en la aplicación de pesticidas dentro del invernadero que junto con el monocultivo, promueven un círculo vicioso que agrava la problemática y hace imposible la producción de algunos cultivos, entre ellos las solanáceas.

Por lo anterior una de las alternativas de producción con bajos insumos agrotóxicos en ambiente protegido, es el sistema de cultivo sin suelo (CSS). Así, el cultivo sin suelo en invernadero y a la intemperie se ha convertido en una creciente necesidad a causa del agotamiento de la tierra, producto del mal manejo nutricional y la contaminación con fitopatógenos.

En Costa Rica, esta técnica ha tomado gran impulso y se han puesto en práctica proyectos comerciales en producción de hortalizas en el ámbito de pequeñas y medianas empresas familiares. Los sustratos sólidos inertes y orgánicos son abundantes en algunas regiones, ya sea en yacimientos naturales o como subproductos de la actividad agrícola del café y caña, entre otros. Algunas de estas iniciativas han incursionado en el cultivo sin suelo utilizando sustratos inertes u orgánicos, entre ellos las piedras volcánicas, pómez, subproductos del café, caña y estiércoles, entre otros. Por ejemplo, en Llano Grande de Cartago algunos floricultores



---

utilizan mezclas de estiércol compostado con cascarilla de arroz como medio de cultivo para aislar el suelo contaminado con *Fusarium* sp.

Sin embargo, existe grandes problemas técnicos en la evaluación físico-química de estos. En Costa Rica no existen metodologías validadas internacionalmente para la interpretación de los análisis físico y químicos 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, de ahí la necesidad de investigación en este tema.

Uno de los principales factores que determinan el éxito de un cultivo sin suelo es la calidad del sustrato. Esta se puede evaluar determinando sus propiedades microbiológicas, físicas y químicas. El conocimiento de las características físicas nos permite una buena dosificación y programación del agua de riego, mientras las características químicas permiten hacer ajustes o enmiendas químicas y una correcta adecuación de la solución nutritiva según la composición química del sustrato.

En cultivos sin suelo, es muy importante asegurarse antes de sembrar que el sustrato tenga las características físicas óptimas, ya que una vez establecido el cultivo no es posible mejorarlas. Caso contrario sucede con las propiedades químicas, las cuales es posible enmendar en 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 utilizada en el riego.

En cultivos en contenedor, la retención total de agua (**H10**) en el sustrato no es suficiente información acerca de la disponibilidad de agua para la planta, ya que una parte de ella es agua difícilmente disponible (ADD). Por tanto, es importante conocer el agua total disponible (ATD) para la planta, la cual se compone de agua fácilmente disponible para la planta (AFD) y agua de reserva (AR).

La granulometría y distribución del tamaño de partículas en el sustrato, determina la capacidad de retención de humedad y la capacidad de aireación de un sustrato. El parámetro utilizado para expresar la distribución del tamaño de las partículas es el



---

**Índice de Grosor (IG).** Este se define como el porcentaje acumulado en volumen de partículas de diámetro superior a 1 milímetro (Ansorena, 1994).

Debido a que existen diferencias entre las propiedades de los suelos minerales y los sustratos, la dinámica de intercambio y absorción de nutrientes también es diferente. Mientras que en un suelo mineral la mayor parte de los nutrientes esta retenida en el complejo de cambio de las arcillas, en los sustratos la mayor parte de los nutrientes se encuentran disponibles en la solución acuosa. Así, la extracción con agua en pasta de sustrato saturado aportara la mayor parte de nutrientes disponibles para la planta en el corto plazo. En la mayoría de los casos los métodos tradicionales de análisis químico de suelos no resultan adecuados para la determinación de nutrientes minerales en sustratos orgánicos.

Por esto, el método utilizado para determinar el contenido de nutrientes minerales en el sustrato es en el **extracto de saturación en pasta saturada**. Los resultados obtenidos se comparan con un parámetro óptimo (cuadro 2) según Abad y Col. (1992) citados por Ansorena (1994).



## Metodología

En este estudio se recolectaron muestras de sustratos en fincas con actividad hidropónica comercial en la Meseta Central:

- 1- Polvo de piedra Guácima **(PPG)**
- 2- Polvo de piedra + carbón **(PPC)**
- 3- Piedra roja volcán INA **(PRVI)**
- 4- Cascarilla de arroz **(CA)**
- 5- Cascarilla de arroz + fibra de coco (1:1) antes de usar **(CAFAU)**
- 6- Cascarilla de arroz + fibra de coco (1:1) 3 años **(CAF3A)**
- 7- Peat moss commercial **(PMC)**
- 8- Fibra de coco flora y fauna 2006 **(FFF06)**
- 9- Fibra de coco flora y fauna 2006 **(FFF07)**
- 10- Fibra de coco usada 6 meses **(FCU6M)**

## Procedimiento de recolección de muestras

- 1- Definir el lote a muestrear según código, identificación, tipo y naturaleza del material.
- 2- Se calcula el número de submuestras (NS) a tomar según fórmula siguiente:

NS:  $0.5\sqrt{\#M}$  donde #M es la cantidad de m<sup>3</sup> o unidades (empaquete) del lote a muestrear.

- 3- Determinación de la cantidad de material requerido: Cada submuestra debe tener un volumen final  $> 0 = 0.5$  litros. El volumen final se mezcla y se cuartea hasta obtener una muestra final de 20 litros, los cuales se distribuyen de la siguiente forma: 5 L para el análisis químico, 5 L para el análisis físico, 5 L para el análisis microbiológico y 5 litros para densidad aparente.



4- Se identifica el sustrato: Fabricante y marca, descripción, N° de lote, lugar de muestreo, fecha de muestreo, inspector muestreador.

### Determinación de características físicas.

Para determinar los diferentes componentes físicos de un sustrato es necesario mediante análisis respectivos conocer la densidad aparente (dap), la densidad real (dr), y los contenidos de humedad a diferentes presiones de succión.

1- Densidad aparente (dap) experimental: Es la masa seca a 105 °C, a peso constante, de la fracción sólida por volumen de sustrato y generalmente se expresa en gramos / mililitro (g/ml o  $\text{cm}^3$ ).

2- Densidad real (dr): se utilizará el método del picnómetro recomendable tanto para sustratos orgánicos e inorgánicos. La dr o de partícula se define como el cociente entre la masa seca de la fracción sólida a 105 °C y el volumen ocupado por estas partículas sólidas, excluyendo la porosidad total del sustrato, y se expresa en g/ml o  $\text{cm}^3$ .

Con la dap y dr se calcula la porosidad total, la cual se refiere al cociente entre el volumen total de poros y el volumen total del sustrato, e incluye los microporos que son los que retienen el agua (H10) y los macroporos (CA) que alojan el aire.

$$1. \text{Pt} = (1 - \text{da} / \text{dr}) \times 100.$$

3- Determinación de retención de humedad a diferentes presiones de succión: a 10 centímetros de columna de agua (H10), 50 cm.c.a. (H50) y 100 cm.c.a. (H100). Los datos se expresan en porcentaje respecto a volumen de sustrato (%v/v).

4- Calculada la Pt, y con los datos de humedad a diferentes succiones, se puede determinar los componentes físicos del sustrato: fracción sólida, capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD). Así tenemos la distribución de macroporos (CA) y microporos (H10), o sea, las relaciones aire y agua en el sustrato.



5- Con la **Pt** y la capacidad total de retención de agua (**H10**) a una succión de 10 centímetros de columna de agua (10 cm.c.a.), se puede calcular la capacidad de aireación (**CA**) o porosidad de aire (macroporos). según la siguiente fórmula:

$$2- CA = Pt - H10$$

6- Conociendo el porcentaje de sólidos, y la proporción de macroporos (CA) y microporos (H10) en la Pt, se puede desglosar los diferentes tipos de agua (AFD, AR Y ADD) del agua total (H10).

7- El AFD es el agua retenida entre 10 cm.c.a. (H10) y el agua absorbida a 50 cm.c.a (H50).

$$3. AFD = H10 - H50$$

8- El AR es la que se retiene entre 50 cm.c.a. (H50) y 100 cm.c.a. (H100).

$$4. AR = H50 - H100.$$

9- El agua fácilmente disponible (AFD) más el agua de reserva (AR) conforman el agua total disponible (ATD) para la planta cuyo rango óptimo es de 24 a 40 %.

$$5. ATD = AFD + AR$$

10- Las variables físicas obtenidas se comparan con un parámetro óptimo (cuadro 1) según Abad y Col. (1992) citados por Ansorena (1994).

11- Obtenida toda la información anterior, se puede representar gráficamente el punto de equilibrio entre aire y agua, así como la curva de liberación aire agua en el sustrato.

12- Granulometría: una muestra de sustrato se pesa y se pasa por un juego de cribas de 16,8,4,2,1,0.5,0.25 y 0.125 milímetros. Se pesa la cantidad retenida en cada tamiz y se calcula los porcentajes respectivos. Se calcula el **INDICE DE GROSOR (IG)** que equivale al porcentaje acumulado de partículas de diámetro superior a 1 milímetro (Ansorena, 1994).

## Marco teórico



Los sustratos pueden clasificarse según su origen en inorgánicos y de origen vegetal, los cuales presentan diferencias en su composición física debido a su granulometría y naturaleza del material.

Similar a un suelo, los sustratos se componen de una porción de aire, agua, y una fase sólida (fracción orgánica y/o mineral), con la diferencia de que la parte sólida del sustrato es muy inferior y la fracción ocupada por aire más agua es mucho mayor que en el suelo. Esto hace que el manejo del riego y la nutrición de cultivos en suelo y en sustrato sean diferentes.

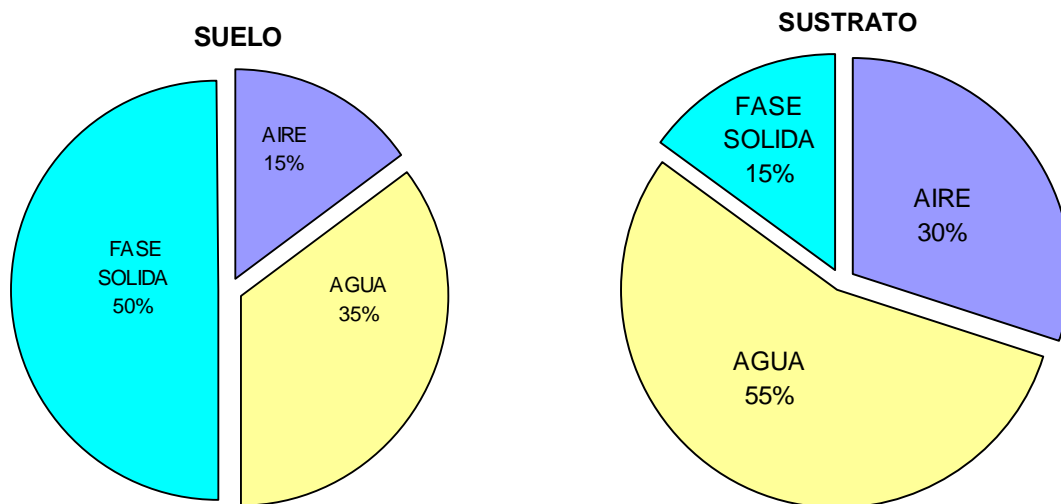


Figura 1. Composición típica de un suelo y un sustrato.

El sustrato tiene un comportamiento similar a una esponja, si se satura completamente el agua desplaza el aire que ocupa los espacios entre partículas, posteriormente al dejarlo drenar, el agua desaloja los macroporos dando lugar al aire. Cuando cesa el drenado, en este punto, el porcentaje de agua retenida por el sustrato corresponde a la capacidad de contenedor (análogo a lo que se conoce en suelos como capacidad de campo) o capacidad total de retención de agua (**H10**),



En cultivos en contenedor, conocer la **H10** del sustrato no es suficiente información acerca de la disponibilidad de agua para la planta, ya que una parte de ella es agua difícilmente disponible (ADD). Por tanto, es importante conocer el agua total disponible (ATD) para la planta, la cual se compone de agua fácilmente disponible para la planta (AFD) y agua de reserva (AR). Las plantas por medio del flujo de transpiración aplican una succión o vacío al sustrato para absorber agua por las raíces. Esta succión se puede medir en centímetros de columna de agua (cm.c.a.). Conforme el sustrato se va secando, la succión con que este retiene el agua aumenta paulatinamente, obligando a la planta a ejercer mayor succión a través de sus raíces para obtener el agua que necesita. Esto implica un mayor gasto de energía en perjuicio de la producción. Así, si no se repone agua se alcanza el punto de marchites permanente (PMP) a una presión de succión de 100 cm.c.a., a partir de la cual el agua es difícilmente disponible (ADD). Esta succión con que las partículas del sustrato retienen el agua es mayor que la ejercida por la planta, que es incapaz de extraer agua del medio de cultivo.

La granulometría y el tipo de material determinan las características físicas de un sustrato, dentro de las cuales es importante determinar la densidad aparente y real, así como la retención de humedad a diferentes succiones, factores que permiten calcular la porosidad total y la relación aire: agua del sustrato.

Las variables físicas evaluadas se comparan con un parámetro óptimo (cuadro 1 y 2) según Abad y Col. (1992) citados por Ansorena (1994).

Sin embargo, no basta determinar cual es la **Pt** en cada sustrato, sino que es importante saber como se distribuye ésta, en macroporos (porosidad de aire) y microporos (retención total de agua).

La **capacidad de aireación** (CA) es una característica muy importante en cultivos sin suelo, ya que el sistema radical al estar confinado a un espacio pequeño y ser un sistema intensivo de producción tiene una alta actividad metabólica y de crecimiento, por tanto, requieren más oxígeno. Además, una alta capacidad de



aireación es lo que permite que un gran volumen de raíces pueda acomodarse en un volumen reducido de sustrato.

La granulometría (distribución del tamaño de partículas) determina la capacidad de retención de humedad y la capacidad de aireación de un sustrato. Los sustratos están compuestos por partículas de diferentes tamaños, sin embargo, según Ansorena, (1994) la fracción más determinante en las propiedades físicas de los sustratos es el tamaño de la partícula comprendido entre 0.1 y 1.0 milímetros. El parámetro utilizado para expresar la distribución del tamaño de las partículas es el **índice de Grosor (IG)**. Este se define como el porcentaje acumulado en volumen de partículas de diámetro superior a 1 milímetro (Ansorena, 1994). Se espera que a mayor IG, o sea, mayor porcentaje de partículas de diámetro mayor a un milímetro en el sustrato, mayor capacidad de aireación y menor retención de humedad. Una mayor proporción de partículas grandes aumenta el contenido de macroporos y disminuyen los microporos, aumentando el drenaje y disminuyendo la retención de humedad.

Por otra parte, un bajo IG, o sea menor porcentaje de partículas gruesas mayor a 1 milímetro y mayor porcentaje de partículas finas menor a 1 milímetro se afecta drásticamente la capacidad de aireación y se aumenta la cantidad de microporos y consecuentemente la retención de agua en el sustrato. Estas propiedades físicas generan condiciones anaeróbicas o ausencia de oxígeno en el medio, ocasionando pérdida de pelos absorbentes y raíces, consecuentemente la planta manifiesta deficiencias nutricionales y por ende disminución de la producción. Esto es lo que sucede cuando se mezcla materiales gruesos con muy finos, ante lo cual se debe tener cuidado, ya que partículas finas se alojan en los espacios entre partículas (macroporos) obstruyéndolos, reduciendo la capacidad de aireación y aumentando la retención de humedad.

Cuando se adquieren materiales que no tienen un tamaño de partícula estándar o conocido y que presentan una gran variabilidad en la proporción de los diferentes



tamaños de partículas, es muy difícil estandarizar las propiedades físicas del sustrato. Por esta razón, si seleccionamos el tamaño de partícula a través de tamices, según el sistema de cultivo, en un rango menor de variación de tamaños y un conocido índice de grosor (IG), por ejemplo, el caso de maceteros, entre 0.25 y 3 milímetros, habrá mayor estabilidad y estandarización de las características físicas. Esto a su vez permite, estandarizar mejor el manejo del riego y la nutrición.

Las determinaciones de laboratorio junto con la experiencia y observación diaria del riego, el sustrato y la planta en el campo de cultivo, nos permiten aproximarnos al paradigma del “**sustrato ideal**”, lo cual no es fácil en la práctica. Este debe alcanzar un punto de equilibrio entre el contenido de microporos (agua) y macroporos (aire) para no tener condiciones extremas de hipoxia o exceso de drenaje, y facilitar el manejo del riego y la nutrición de los cultivos. Según Urrestarazu (2003) el mejor sustrato es aquel material de textura media a gruesa, con una distribución de tamaño de partículas de entre 0.25 y 2.5 milímetros, el cual retiene suficiente agua fácilmente disponible y tiene una adecuada aireación. Abad y col. (1992) citados por Ansorena (1994) definen que el sustrato ideal según sus características físicas óptimas (cuadro 1) es aquel que tiene > 85% de porosidad total, < de 15% fase sólida. Además, después de la saturación total con agua y drenar el exceso, debe retener entre un 55 a 70% de humedad total (H10) y poseer de 15 a 30% de aireación. Del agua total retenida de 24 a 40% debe ser agua fácilmente disponible para la planta.



Cuadro 1. Características físicas óptimas de sustratos

Parámetro	Mínimo	Máximo
Densidad aparente (Dap)	0.15	0.75
Densidad real (Dr) gr/ml	nd	nd
Porosidad total (PT): $1 - (Dap/Dr) \times 100$	85.0	
% Fase sólida (FS): $100 - PT$	15.0	
<b>Capacidad de retención de humedad a:</b>		
10 cm.c.a H10 Es agua total	55	70
50 cm.c.a H50	30	40
100 cm.c.a H100	25	30
<b>Relaciones agua:aire</b>		
Contenido de aire (CAH10)	15	30
Contenido de aire (CAH50)	45	55
Contenido de aire (CAH100)	55	60
Agua fácilmente disponible (AFD)	20	30
Agua de reserva (AR)	5	10
Agua total disponible (ATD)	24	40
Agua difícilmente disponible (ADD)	15	30

Fuente: Ansorena, (1994).

En la figura 2 se observa que, el punto de equilibrio (PE) para un sustrato ideal se alcanza cuando se entrecruzan las curvas de aire y agua a una presión de succión en el rango de 28 a 45 cm.c.a y de 35% a 50% del volumen de sustrato. Así un sustrato con la máxima capacidad óptima de aireación y mínima retención óptima de humedad, se equilibra el aire y el agua a una presión de succión de 28 centímetros de columna de agua (cm.c.a.). Al mismo tiempo, un sustrato con el rango mínimo óptimo de aireación y máxima retención óptima de humedad logra el equilibrio a 45 cm.c.a.

Cuando se alcanza la capacidad de contenedor, después de drenar el exceso de agua gravitacional, si el agua total (H10) y la aireación están dentro de los rangos óptimos (55 a 70% y 15 a 30% respectivamente), el PE entre microporos (agua) y macroporos (aire)



se obtendrá dentro del área del rombo en el gráfico (succión de 28 a 45 cm.c.a y de 35 a 50% v/v).

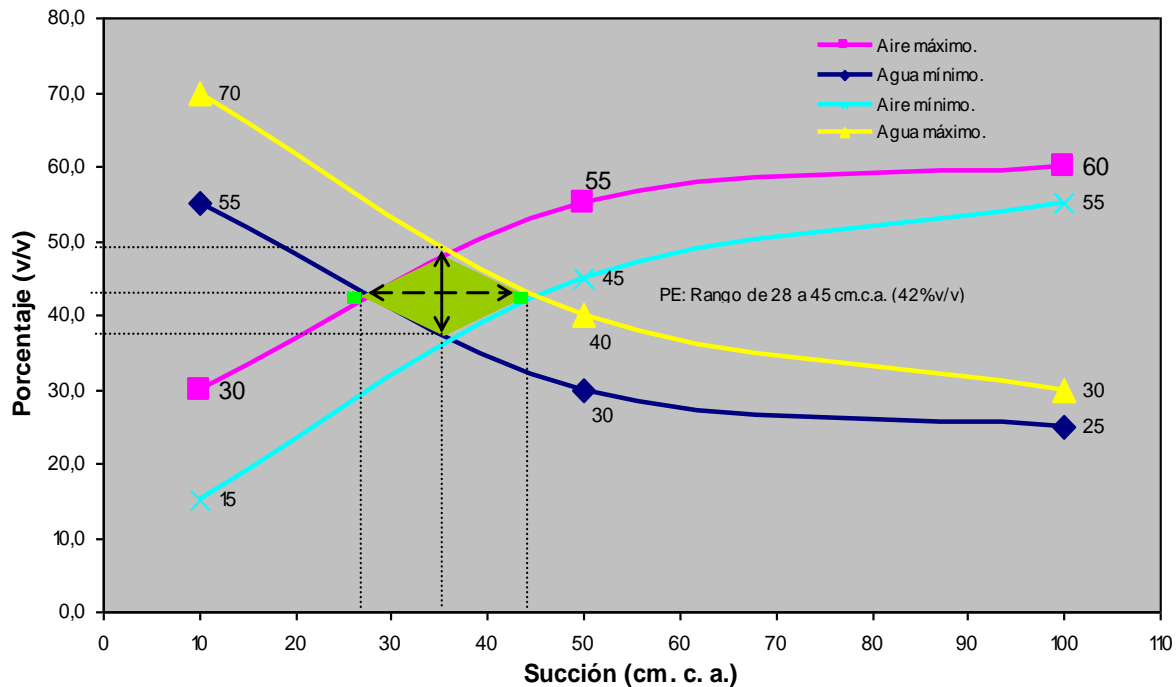


Figura 2. Puntos de equilibrio agua:aire para los rangos mínimos y máximos óptimos en un sustrato ideal.

En casos extremos, sustratos muy gruesos con alta aireación y baja retención de humedad o sustratos muy finos con baja aireación y muy alta retención de humedad no llegan a alcanzar el equilibrio, ya que las curvas de aire y agua no se extrapolan. En el primer caso la curva de aire se ubica en la parte alta del gráfico, mientras que la curva correspondiente al agua, esta en la parte inferior del gráfico muy separado entre sí. En sustratos finos sucede todo lo contrario.

Existen sustratos con características de aireación y humedad intermedias, que aunque están fuera de los rangos óptimos, no son casos extremos, alcanzando el equilibrio fuera del rombo, ya sea a bajas o altas succiones. Por tanto, en la práctica es



---

necesario analizar cada sustrato en particular, y basados en la observación y experiencia realizar un buen manejo del riego que permita compensar algunas características deficientes en el sustrato.

Algunos sustratos con mayor retención de agua y baja aireación alcanzan el equilibrio cuando están muy secos a una succión mayor de 45 cm.c.a. En este punto, aunque mejora la capacidad de aireación por encima del mínimo óptimo (15%), la falta de agua fácilmente disponible será un factor limitante en la producción.

Recordemos que del agua total (H10) retenida un porcentaje es agua no disponible para la planta, el cual puede variar en función de las características propias del sustrato. Un alto porcentaje de polvo hace que gran parte del agua retenida sea difícilmente absorbible, ya que el exceso de partículas finas con gran cantidad de microporos de micras, la retienen con gran fuerza no cediéndola a la planta.



## Evaluación de propiedades físicas de algunos sustratos utilizados en Costa Rica

En los cuadros 1 y 3 y figura 2 se observa la composición física de los diferentes sustratos, a saber; el componente sólido, aire (macroporos) y tipos de agua (microporos).

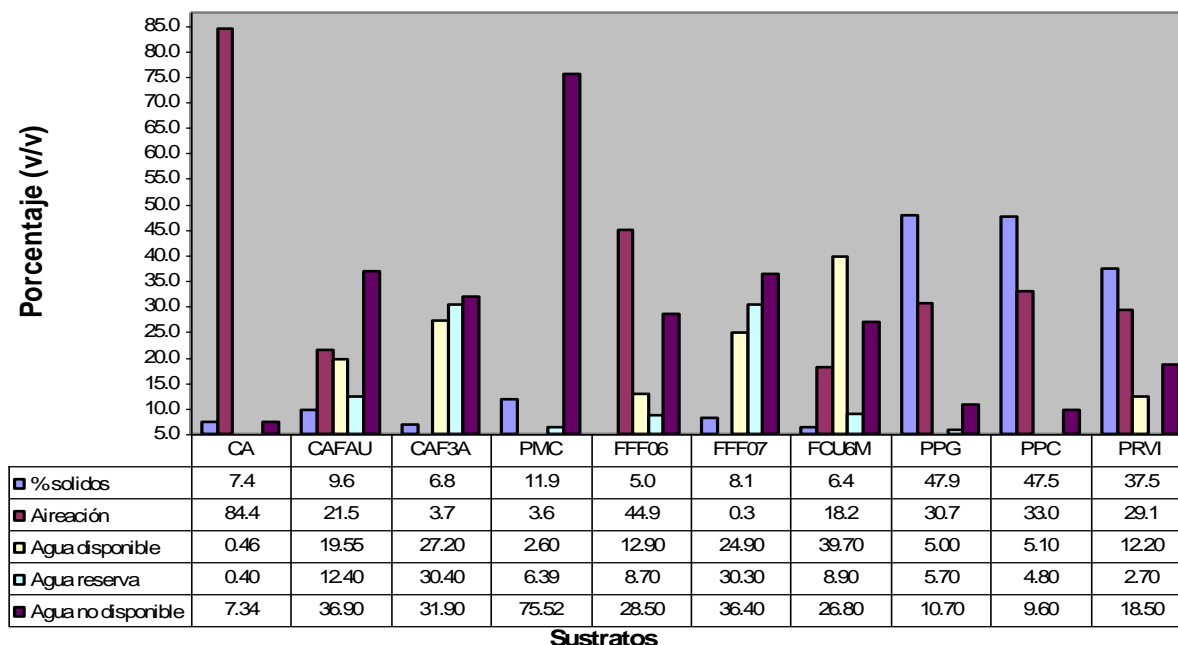


Figura 2. Componente sólido, aire y tipos de agua en diferentes sustratos utilizados en hidroponía.

En la figura 3 y cuadros 1 y 3, se observa la capacidad de aireación de los diferentes sustratos a diferentes contenidos de humedad (H10, H50 Y H100). A medida que estos se secan de H10 a H100 producto de la evapotranspiración la aireación aumenta. Sin embargo, es necesario analizar cada caso en particular, para determinar hasta donde se alcanza el punto de equilibrio aire:agua sin que el agua fácilmente disponible para la planta sea un factor limitante para la producción. Además se presentan situaciones





extremas, por ejemplo, la cascarilla de arroz tiene el mayor capacidad de aireación mientras que en el peat moss la aireación es demasiado baja.

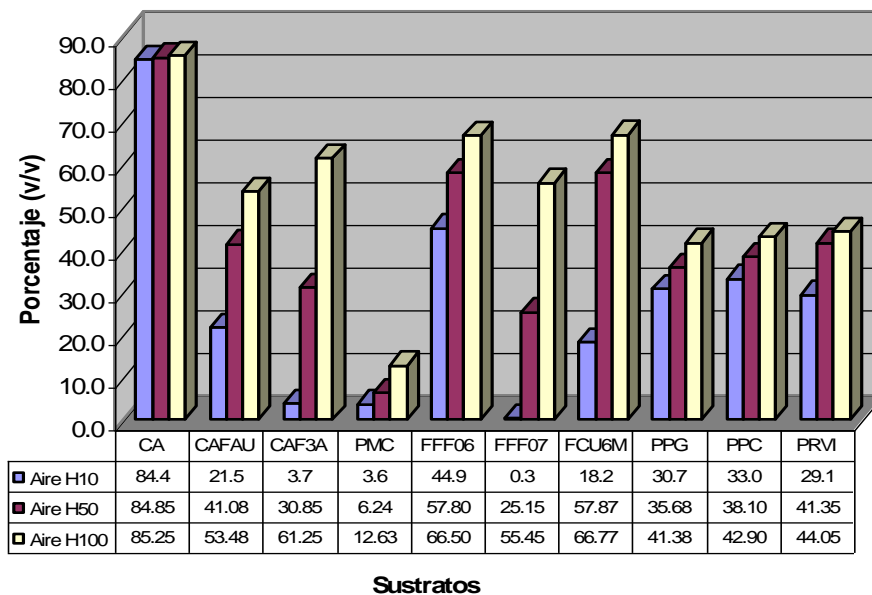


Figura 3. Capacidad de aireación de diferentes sustratos a diferentes contenidos de humedad.

### Sustratos de origen inorgánico

Los sustratos de origen inorgánico, por su granulometría (de 1 a 8 milímetros) presentan una alta porción sólida, alta capacidad de aireación y drenaje, pero muy baja retención de humedad total (H10). Además, la alta densidad aparente y densidad de partículas se manifiestan en un mayor componente sólido y mayor peso del sustrato. Estos materiales son utilizados para la producción en bancales de 10 centímetros de



---

profundidad y área variable. Como se observa en el cuadro 1, son sustratos de granulometría gruesa y amplia, aunque con predominancia de partículas gruesas.

En general la PPG, PPC Y PRVI presentan una alta fracción sólida (de 37.5 a 47.9 % Vs < 15 % óptimo) y baja porosidad total (PT de 52.5 a 62.5% Vs >85% óptimo). De la PT el mayor porcentaje corresponde a macroporos que proveen buena aireación (> a 29%) y drenaje, con una baja proporción de microporos y por tanto una baja capacidad de retención de agua total (H10 de 21.4 a 33.4%). La alta densidad aparente (Dr de 0.94 a 1.15 g/ml) y alta densidad real (Dap de 2.4 a 2.5 g/ml) explican su mayor peso relacionado con una mayor fracción sólida, aspecto importante desde el punto de operacional.

Sin embargo, la alta aireación y drenaje aunado a la baja retención de agua no es un factor limitante para la producción por el sistema de cultivo en que se utiliza. Por su naturaleza y granulometría estos sustratos son aptos para la producción en bancales cuyas dimensiones y profundidad (10 centímetros) hace que el sustrato quede extendido a baja altura y mayor superficie expuesta a la lamina de agua. El bancal está impermeabilizado con plástico con una salida de drenaje colocada de 0.5 a 1.0 centímetro del fondo de la cama, esto no permite que el agua drene inmediatamente acumulando una lámina de agua como reservorio directamente disponible para la planta. Así, el plástico hace la función de retención de agua disponible disimulando la baja capacidad de retención de agua y aprovechando las ventajas de buena aireación y drenaje, aspecto importante en la producción en bancales a la intemperie en periodos de alta precipitación.



Cuadro 1. Características físicas de sustratos de origen inorgánicos.

Parámetro	PPG	PPC	PRVI	% óptimo
Densidad aparente (Dap)	1.15	1.14	0.94	<b>0,15-0,75</b>
Densidad real (Dr) gr/ml	2.4	2.4	2.51	<b>nd</b>
Porosidad total (PT):1-(Dap/Dr)	52.1	52.5	62.5	<b>&gt; 85%</b>
% Fase sólida (FS): 100-PT	47.9	47.5	37.5	<b>&lt; 15%</b>
<b>Total: PT+FS</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	
<b>Porcentaje humedad a:</b>				
10 cm.c.a H10 Es agua 10	21.4	19.5	33.4	<b>55-70</b>
50 cm.c.a H50 50	16.4	14.4	21.2	<b>30-40</b>
100 cm.c.a H100 100	10.7	9.6	18.5	<b>25-30</b>
<b>Relaciones agua:aire</b>				
Contenido de aire (CAH10) 10	30.7	33.0	29.1	<b>15-30</b>
Contenido de aire (CAH50) 50	35.68	38.10	41.35	<b>nd</b>
Contenido de aire (CAH100) 100	41.38	42.90	44.05	<b>nd</b>
Agua fácilmente disponible (AFD)	5.00	5.10	12.20	<b>20-30</b>
Agua de reserva (AR)	5.70	4.80	2.70	<b>4,0-10,0</b>
Agua total disponible (ATD)	10.70	9.90	14.90	<b>24-40</b>
Agua difícilmente disponible (ADD)	10.70	9.60	18.50	<b>nd</b>

**PPG**= Polvo de piedra Guácima

**PPC**= Polvo de piedra + carbón

**PRVI**= Piedra roja volcán INA



## 1- Polvo de piedra Guácima (PPG).

Figura 4. Equilibrio de aire y agua.

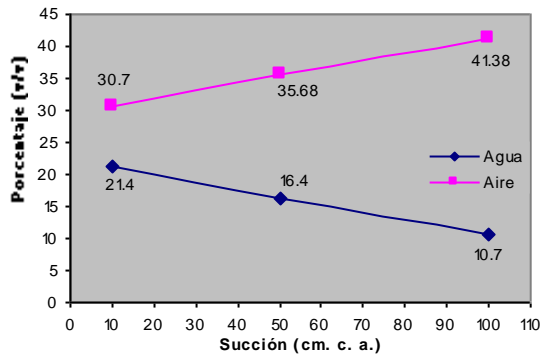
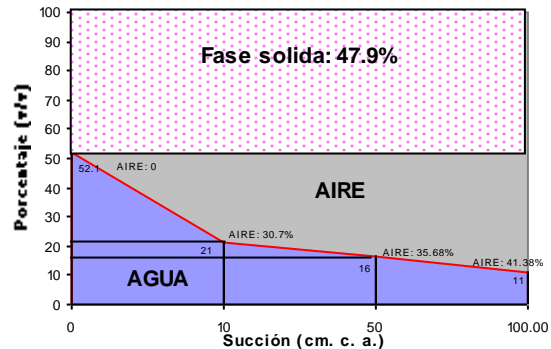


Figura 5. Liberación de aire v aua v fracción sólida.



Es un material de origen volcánico extraído de tajo, que ha sido utilizado por varios años para el cultivo de lechuga en bancales. Es de color grisáceo, una fracción media de partículas pequeñas de 0.25 milímetros hasta una mayor proporción de grano grande de 6 a 7 milímetros.

Después de saturarlo, el agua gravitacional drena hasta alcanzar la capacidad de contenedor a una succión de 10 centímetros de columna de agua (H10). En este punto presenta una buena capacidad de aireación (30.7%) y drenaje y una baja retención de humedad (21.4% Vs 55-70% lo óptimo) debido a la mayor proporción de partículas gruesas. Este no logra alcanzar el punto de equilibrio aire:agua, las curvas están cada vez más separadas conforme el sustrato se seca de H10 hasta H100, mientras el contenido de aire aumenta el contenido de humedad baja.

Como se explicó en el apartado de sustratos inorgánicos, este sustrato presenta una alta fracción sólida (47.9 % Vs < 15 % óptimo) y baja porosidad total (PT de 52.1 Vs > 85% óptimo). De la PT el mayor porcentaje corresponde a macroporos que proveen buena aireación (> a 29%) y drenaje, con una baja proporción de microporos y por tanto una baja capacidad de retención de agua total (H10=21.4%).



La alta densidad aparente ( $D_r = 1.15 \text{ g/ml}$ ) y alta densidad real ( $D_{ap} = 2.4 \text{ g/ml}$ ) explican su mayor mayor fracción sólida, aspecto importante desde el punto de operacional.

Esto también se evidencia en la curva de distribución de aire y agua, donde también se ilustra por áreas gráficas la fracción sólida. Se observa como después de saturar el sustrato ( $H_0$ ), este libera rápidamente el agua alojada en los macroporos, aumentando el área de aireación hasta  $H_{10}$ . A partir de aquí, la cantidad de agua liberada y el incremento en la aireación es poco pronunciado, debido al bajo contenido de microporos y por ende ya el sustrato no tiene mucha agua que liberar.

Lo anterior explica porque un sustrato apto únicamente para el cultivo en bancales donde el contenedor es poco profundo y el sustrato tiene mayor superficie de exposición a la lamina húmeda depositada en el fondo del bancal. Además, es poco recomendable para el cultivo en contenedores individuales de menor volumen y mayor altura, tales como macetas y columnas, donde la capilaridad es un factor muy importante en la buena distribución del agua en todo el volumen del sustrato.

## 2- Hormigoncillo más carbón.

Figura 6. Equilibrio de aire y agua.

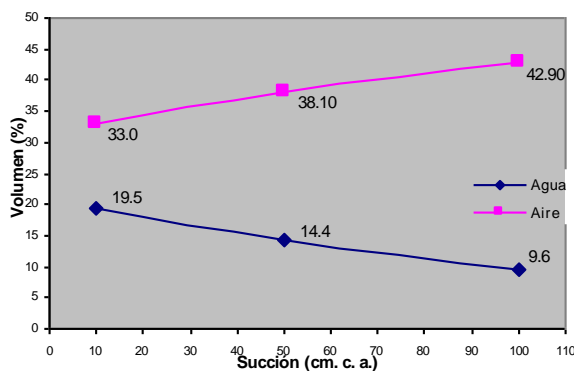
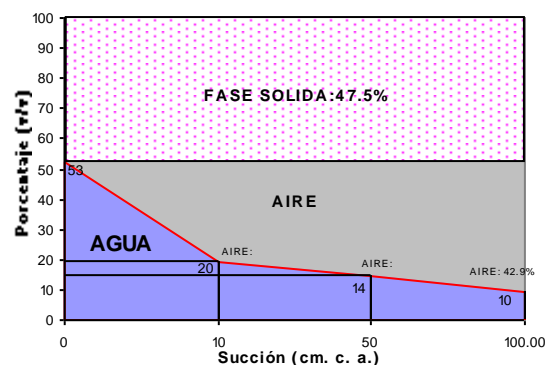


Figura 7. Liberación de aire y agua y fracción sólida





Sustrato usado en producción de lechuga en bancales, es de color grisáceo, de origen volcánico y extraído de tajo, más un componente de carbón vegetal (20%). La granulometría y su forma es variable, con partículas desde 0.25 hasta 5- 6 milímetros con mayor proporción de estas últimas.

El comportamiento en sus componentes físicos y las relaciones aire agua es muy similar al polvo de piedra Guácima por lo que las recomendaciones generales son muy similares. La aplicación práctica del conocimiento de los parámetros físicos se observa en el cuadro 3 mediante un programa de riego para la producción de lechugas en bancales. Se calcula el volumen de riego a aplicar (cuanto regar) en función del agua total disponible en el sustrato, el volumen de drenaje deseado, características del sistema de riego y dimensiones del bancale (volumen de sustrato). Así, en un bancale de 23 x 1.05 x 0.1 metros lleno de 2415 litros de sustrato con 239 litros de agua útil (9.9% ATD) se desea un 10% de agua drenada. El sistema de riego consta de cinta con goteros cada 20 centímetros con un caudal de 1.7 litros hora. En cultivo de lechuga de 4 a 5 semanas, en condiciones de luminosidad media se requiere aplicar seis litros por metro cuadrado diario. Bajo estas características se deben realizar aproximadamente seis riegos de 1,5 minutos cada uno. Este procedimiento permite determinar **cuanto regar** durante el día, pero no la frecuencia de riego (**cuando regar**), por lo que a falta de equipo y sensores de humedad en el sustrato el agricultor debe recurrir a la observación y experiencia en las condiciones particulares de clima y cultivo.



Cuadro 2. Programa de riego para un cultivo de lechuga en bancales en hormigoncillo más carbón (3:1).

	DATOS	VALORES
<b>EL CONTENEDOR (unidad básica)</b>		
Largo (m)		23
Ancho (m)		1.05
Alto (m)		0.1
Área de unidad básica (m <sup>2</sup> )		24.15
Numero de unidades básicas		10
Área total sembrada (m <sup>2</sup> )		241.5
<b>EL SUSTRATO</b>		
Volumen de unidad básica (L)		2415
Agua total disponible (%)	9.90	239.085
<b>SISTEMA DE RIEGO (Cinta de goteo c/20 cms)</b>		
Caudal del gotero (L/h)		1.7
Goteros por m <sup>2</sup> (1 gotero / lechuga a 20 x 20 cms.)	1 m <sup>2</sup>	25
Goteros por área de riego		603.75
Caudal total / unidad básica (L/h)		1026.375
Area de riego / unidad básica (m <sup>2</sup> )		24.15
Requerimiento agua: L/m <sup>2</sup> /día		6
Requerimiento agua / unidad básica (L/día)		144.9
<b>PLAN DE RIEGO</b>		
Porcentaje de agotamiento (% y L)	9	21.5
Porcentaje de drenaje (% y L)	10	2.15
Volumen/riego/unidad básica (L)	1 m <sup>2</sup>	23.7
Numero de riegos/día		6.1
Duración por riego (minutos)	Min.	1.4
Tiempo total de riego/día		8.5
Volumen de riego / unidad básica/día (L)		144.9
Volumen de riego/area total sembrada/día (L)		1449

### 3- Piedra roja volcánica.

Figura 8. Equilibrio de aire y agua.

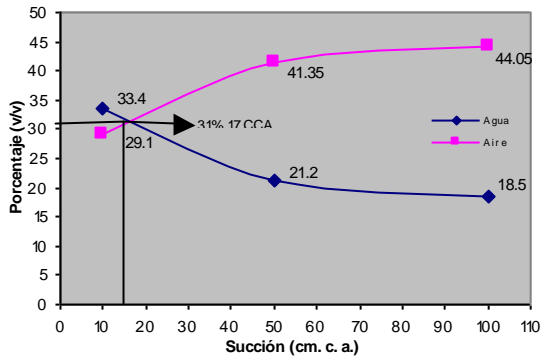
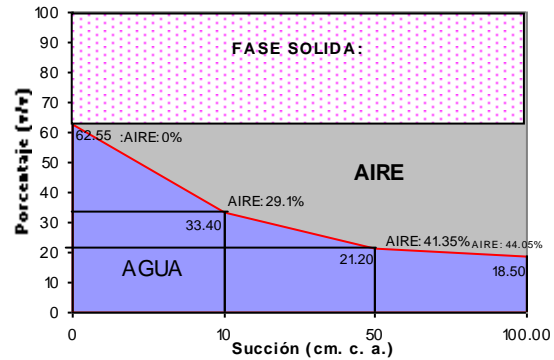


Figura 9. Liberación de aire y agua y fracción sólida



Es un material de color rojo, extraído de yacimientos naturales con una mayor proporción de partículas de entre 3 y 7 milímetros. La densidad aparente (0.94) y la densidad real (2.51) son características de sustratos inorgánicos, con alto componente sólido y pesados.

A pesar de tener una granulometría ligeramente más gruesa que el PPG y PPC, presenta un mayor porcentaje de microporos. Esto hace que las curvas de aire y agua alcancen el punto de equilibrio a 31% de humedad a una succión de 17 cm. c. a. y tenga una ligera ventaja en liberación de agua hasta una humedad de 50 cm, c. a. (H50) respecto a los sustratos anteriores (grafico ). Sin embargo, el agua liberada a bajas succiones no esta dentro de los rangos óptimos de un buen sustrato lo cual se evidencia en la baja agua total disponible (ver cuadro 1). Por lo que su uso esta limitado al cultivo en bancales por las razones explicadas en los sustratos anteriores.





---

## Sustratos de origen vegetal

Por su naturaleza orgánica son susceptibles a la biodegradación, por lo que tienen una mayor riqueza microbial, que si bien le provee la ventaja de una mayor capacidad tampón ante posibles contaminaciones con patógenos, también son mas susceptibles a la contaminación por ser fuente de carbono disponible para la alimentación microbial conforme el sustrato se degrada en el tiempo.

La mayoría de los sustratos analizados, excepto la cascarilla de arroz, peat moss comercial y cascarilla de arroz mas fibra de coco, por sus características son aptos para la producción en contenedores individuales tales como maceteros, cultivo en columnas, bolsa de vivero y canaletas entre otros para el cultivo de tomate, chile dulce, pepino, berenjena y melón, ya que poseen una adecuado balance de aire:agua y buena capilaridad para la formación del bulbo húmedo en riego por goteo. Algunos materiales como la fibra de coco y el peat moss tienen buena capacidad de almacenar e intercambiar cationes, factor a tomar en cuenta en la fertirrigación permanente, ya que son más susceptibles a la acumulación de sales.

La fibra de coco se perfila como un sustrato alternativo de gran potencial a nivel mundial por sus características propias y por ser un subproducto degradable de la industria del coco (*Cocus nucífera*) que no implica ningún impacto ambiental a diferencia del peat moss. Se obtiene de la cáscara (mesocarpo) y está compuesto de una fracción granular polvosa y fibras cortas. Dependiendo de su origen y proceso de preparación, pueden contener ciertos minerales como por ejemplo cloro o potasio, y consecuentemente altos niveles de salinidad.

Los sustratos de origen vegetal en general se comportan diferente dada la naturaleza del material, excepto la cascarilla de arroz (CA) que se comporta similar a los orgánicos desde el punto de vista físico. Esta tiene muy alta aireación y una baja



capacidad de retención de agua, pero a diferencia tiene una baja densidad aparente y consecuentemente un bajo componente sólido que la hace más liviana. La cascarilla arroz más fibra de coco antes de usar (CAFAU) presenta adecuadas propiedades físicas, pero se deterioran con el uso tal como sucede después de tres años de uso (CAF3A). El peat moss (PMC) tiene muy pobre aireación, poca agua disponible y una alta retención de agua que no es disponible para la planta por ser un material tan fino.

En las fibras de coco flora y fauna (FFF) hay variabilidad según el lote comprado, el año y el tiempo de uso. La FFF año 06 tiene muy buenas características físicas, que disminuyen con 6 meses de uso (FFFU6M) aunque se mantiene dentro del óptimo. El lote del 2007 (FFF07) presenta serios problemas tales como alta retención de humedad, que aunque provee suficiente agua disponible tendrá problemas de oxigenación de raíces

Cuadro 3. Características físicas de sustratos de origen vegetal.

	CA	CAFAU	CAF3A	PMC	FFF06	FFF07	FCU6M	% óptimo
<b>Índice de grosor</b>	88.5			18.5				?
Densidad aparente (Dap)	0.103	0.1	0.10	0.16	0.08	0.11	0.09	0,15-0,75
Densidad real (Dr) gr/ml	1.39	1.04	1.46	1.35	1.6	1.35	1.4	?
Porosidad total (PT): 1-(Dap/Dr)	92.6	90.4	93.2	88.1	95.0	91.9	93.6	> 85%
% Fase sólida (FS): 100-PT	7.4	9.6	6.8	11.9	5.0	8.1	6.4	< 15%
<b>Total: PT+FS</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	
<b>Porcentaje humedad a:</b>								
10 cm.c.a H10 Es agua total	8.2	68.85	89.5	84.51	50.1	91.6	75.4	55-70
50 cm.c.a H50	7.74	49.3	62.3	81.91	37.2	66.7	35.7	30-40
100 cm.c.a H100	7.34	36.9	31.9	75.52	28.5	36.4	26.8	25-30
<b>Relaciones agua:aire</b>								
Contenido de aire (CAH10)	84.4	21.5	3.7	3.6	44.9	0.3	18.2	15-30
Contenido de aire (CAH50)	84.85	41.08	30.85	6.24	57.80	25.15	57.87	
Contenido de aire (CAH100)	85.25	53.48	61.25	12.63	66.50	55.45	66.77	
Agua fácilmente disponible (AFD)	0.46	19.55	27.20	2.60	12.90	24.90	39.70	20-30
Agua de reserva (AR)	0.40	12.40	30.40	6.39	8.70	30.30	8.90	4,0-10,0
Agua total disponible (ATD)	0.86	31.95	57.60	8.99	21.60	55.20	48.60	24-40
Agua difícilmente disponible (ADD)	7.34	36.90	31.90	75.52	28.50	36.40	26.80	?

**CA:** Cascarilla de arroz, **CAFAU:** Cascarilla de arroz + fibra de coco (1:1) antes de usar, **CAF3A:** Cascarilla de arroz + fibra de coco (1:1) 3 años, **PMC:** Peat moss commercial, **FFF06:** Fibra de coco flora y fauna 2006, **FFF07:** Fibra de coco flora y fauna 2006, **FCU6M:** Fibra de coco usada 6 meses



#### 4- Cascarilla de arroz.

Figura 10. Equilibrio de aire y agua.

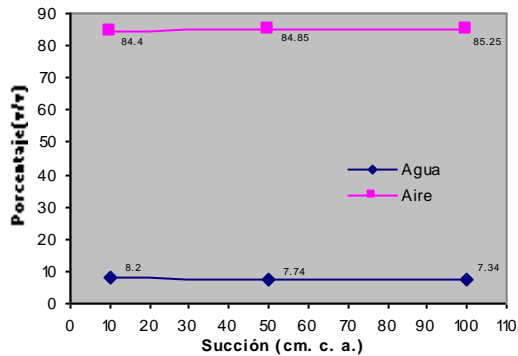
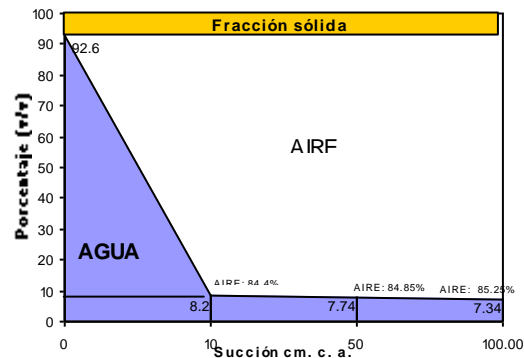


Figura 11. Liberación de aire y agua y fracción sólida



Es un residuo industrial del arroz, abundante en algunas zonas, de baja densidad aparente (0.1 g/ml) y densidad real (1.39) típico de sustratos orgánicos de bajo peso y alta porosidad total (92.6%), de la cual la mayor parte corresponde a macroporos (aire:84.4%) y una muy baja porción de microporos (0.86% de ATD). Esto se observa en los gráficos 10 y 11, donde las curvas de aire y agua están totalmente separadas, mientras la de aireación se ubica en lo alto, el agua esta muy por debajo del optimo (55-70%). Cuando el sustrato se satura con agua al 92.6% correspondiente ala porosidad total y luego se deja drenar libera agua muy rápidamente hasta alcanzar la máxima capacidad de aireación a 10 cm.c.a. A partir de aquí ya no libera más agua ni aumenta la aireación dada el bajo contenido de microporos que posee (H10=8.2%). Este sustrato podría utilizarse únicamente para la producción en bancales para mitigar la desventaja de requerir riegos cortos y frecuentes con el consecuente aumento en los costos de producción. Además, la vida útil en el bancal es relativamente corta en los trópicos y rápidamente en menos de un año se convierte en materia orgánica descompuesta con problemas de contaminación y aireación.



## 5- Fibra de coco más cascarilla de arroz (1:1) sin usar.

Figura 12. Equilibrio de aire y agua.

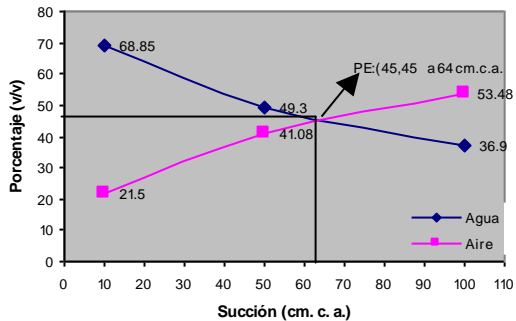
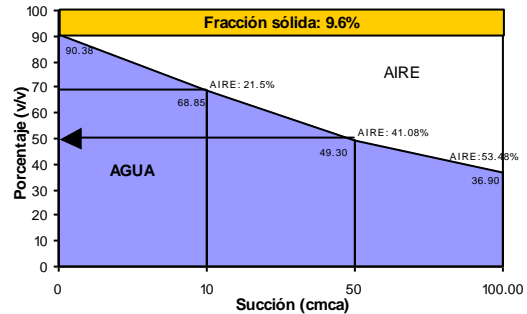


Figura 13. Liberación de aire y agua y fracción sólida



Fuente: Instituto Nacional de aprendizaje. Núcleo Agropecuario. Proyecto hidroponía. Centro Nacional Especializado Granja Modelo. INA. 2007

En el cuadro N° 3 y figuras 12 y 13 se observan las características físicas de una mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz 1:1. La densidad aparente (0.1 g/ml) y la densidad real (1.04 g/ml) están bajo el rango óptimo (0.4 g/ml y 1.45 g/ml respectivamente), mientras que porosidad total alta (90.4%) y la baja fracción sólida (9.6%) se ajustan al rango óptimo, mayor a 85 % y menor a un 15 %, respectivamente. Todos estos factores hacen que sea un sustrato liviano, aspecto importante desde el punto de vista del manejo operacional.

Luego de saturar el sustrato, cuando cesa el drenado se alcanza la capacidad de contenedor (**H10=68.9%**). De esta agua total retenida un 19.55 % es agua fácilmente disponible (AFD), 12.4 % es agua de reserva (AR) y 36.9 % es agua no disponible (ADD). El AFD más el AR conforman el agua total disponible (ATD) para la planta (31.95%), lo cual se ajusta muy bien al rango óptimo que es de 24 a 40 %.

Es importante señalar que del agua total retenida (68.9 %) más del 50 % es agua difícilmente disponible (36.9%), lo cual debe ser tomado en cuenta en el manejo del riego, aún cuando el sustrato almacena suficiente agua total disponible.

El punto de equilibrio, donde se entrecruzan las curvas de agua y aire (PE: 45%:45% v/v), se alcanza a una succión de 67 cm.c.a., aquí ya se presentarían problemas de



disponibilidad de agua puesto que el sustrato esta muy seco. Sin embargo, hay que rescatar que a capacidad de contenedor (H10) hay suficiente agua disponible (31.95%) y una adecuada aireación (21.5%) y el hecho de que el equilibrio se logre a altas succiones pierde importancia. Por tanto, alcanzar un punto de equilibrio a bajas succiones (mayores porcentajes de humedad) es muy importante en sustratos con problemas de baja aireación y alta retención de humedad

Las determinaciones de laboratorio junto con la experiencia y observación diaria del comportamiento de los sustratos en el campo de cultivo nos permiten aproximarnos al paradigma del “sustrato ideal”, lo cual no es fácil en la práctica. A continuación, se calcula el riego por tiempos para un cultivo en sacos de 40 litros de de la mezcla de cascarilla de arroz más fibra de coco 1:1, en función de sus propiedades físicas, caudal del gotero y consumo diario por planta.

- 1- El agua total disponible (ATD) saco de cultivo 40 litros sustrato es 31.95% o 12.78 litros de agua.
- 2- De esta ATD se permite un % de agotamiento de un 7 a 10% (Urreztarazu, 2003) =  $12.78 \text{ L} \times 0.09 = 1.15$  litros es lo que se permite evapotranspirar del saco de 40 litros para efectuar el siguiente riego.
- 3- Según Casanova *et. al.* (2003) el consumo promedio diario de agua para una planta de tomate en la etapa II (inicio floración al tercer racimo) en condiciones de verano normal es de 0.6 a 0.7 litros:

El consumo diario para 6 plantas por saco de 40 litros:  $0.7 \text{ litros} \times 6 \text{ plantas} = 4.2$  litros por saco por día.

- 4- La cantidad de riegos por día es:  $\frac{4.2 \text{ litros}}{1.15 \text{ Litros}} = 3.65$  riegos diarios = 4 riegos.
- 5- El volumen de riego aplicado es la suma del % de agotamiento del ATD + % de drenaje establecido. Este depende de la calidad del agua de riego, y oscila entre 10 y 30%. Suponiendo que el agua es de buena calidad, se utilizara un drenaje de 10%:



---

Por saco de cultivo: 1150 mililitros + 115 mililitros (10% drenaje)= 1265 ml/riego/saco.

Por gotero: cada saco tiene tres goteros, uno por cada dos plantas:

$$\frac{1265 \text{ ml}}{3} = 422 \text{ ml}$$

3 goteros

6- Duración del riego según volumen de agua a aplicar por gotero por riego (422 ml) y el caudal del gotero (4025 ml/hora):

$$422 \text{ ml} \times 60 \text{ minutos} / 4025 \text{ ml} = 7 \text{ minutos aproximadamente}$$

En condiciones normales de luz solar, para un cultivo de tomate en su etapa II, con un consumo medio diario de 700 ml/ planta, se aplicarán 4 riegos diarios de 7 minutos. De acuerdo con las características físicas del sustrato, 40 litros de este colocado en un contenedor, almacena 12.78 litros de agua total disponible. De esta se permite evapotranspirar 1.15 litros, momento en el cual se procede a efectuar el riego para reponer el agua gastada.

Este procedimiento es un ejemplo de programación del riego a tiempos asociado al sustrato, con 4 riegos diarios de 7 minutos cada uno, es un programa fijo que generalmente se ejecuta con un programador de riego. Hasta aquí conocemos cuanto regar, (volumen a aplicar por riego), pero no se sabe con exactitud cuando volver a regar (frecuencia de riego). Esto último se debe a que la cantidad de agua evapotranspirada por la planta depende del clima (radiación solar, humedad ambiental, temperatura y vientos) y de la etapa fenológica del cultivo. Por tanto, la experiencia y observación diaria del fertiriego en cultivo sin suelo es de vital importancia.

## 6- Fibra de coco más cascarilla de arroz con tres años de uso.

Figura 14. Equilibrio de aire y agua.

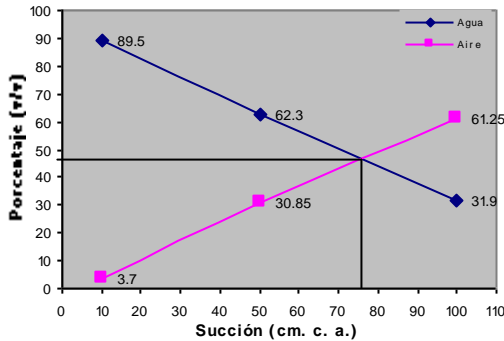
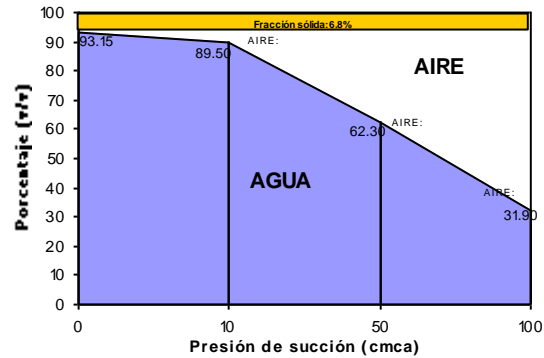


Figura 15. Liberación de aire y agua y fracción sólida



Después de tres años de uso las características físicas de la mezcla fibra de coco más cascarilla de arroz se han deteriorado visiblemente (cuadro 2). El efecto de compactación producto de la descomposición y reacomodo de las partículas, se evidencia en una mayor densidad real (1.46 g/ml), en una disminución de la fase sólida, un aumento en la porosidad total con un balance a favor de los microporos ( $H_{10}=89.5\%$ ) y una marcada disminución de la capacidad de aireación ( $CA=3.7\%$ ).

Lo anterior se observa en las figuras 13 y 14, aunque el sustrato alcanza el punto de equilibrio aire y agua ( $PE=48\%$ ), lo hace con el sustrato muy seco a una succión de unos 77 cm.c.a. donde podría tener problemas de falta de disponibilidad de agua para la planta, aun teniendo una buena aireación.

En la figura 13 se observa que el sustrato saturado de agua ( $P_t=93.2\%$ ) drena lentamente hasta  $H_{10}$  y luego libera agua más rápido hasta  $H_{100}$ , mejorando las condiciones de aireación a  $H_{50}$  ( $CA=30.85\%$ ) y  $H_{100}$  ( $CA=61.25\%$ ).

Este sustrato para otro ciclo de cultivo presenta problemas de hipoxia y excesos de retención de humedad, y requiere de un manejo muy cuidadoso del riego, por lo que lo mas recomendable es desecharlo después de tres años de uso.

## 7- Peat moss

Figura 16. Equilibrio de aire y agua.

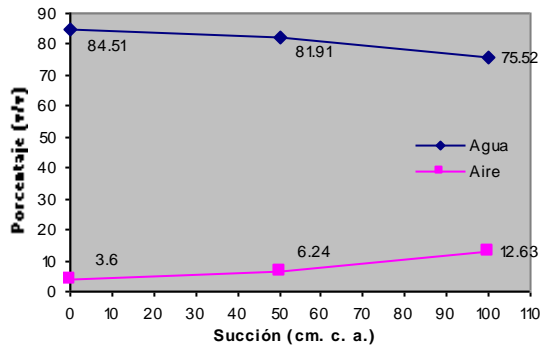
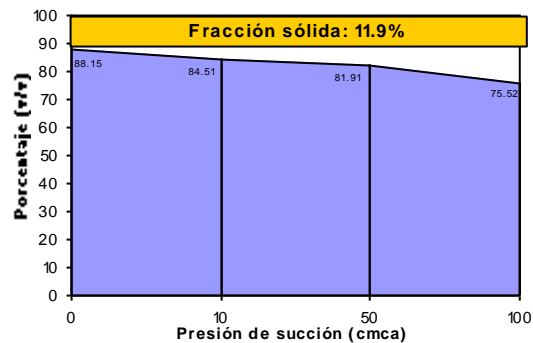


Figura 17. Liberación de aire y agua y fracción sólida



Como se puede observar en los gráficos, este sustrato representa el caso totalmente opuesto a la cascarilla de arroz, mientras la curva de aire esta muy baja, la de agua esta muy por encima de lo optimo. Posee una alta porosidad total (88.5%) junto a un bajo porcentaje de la fracción sólida (11.5%) que se ajustan al rango optimo, mayor a 85% y menor a un 15%, respectivamente. Sin embargo, de la Pt la mayor proporción corresponde a la capacidad total de retención de agua o microporos (H10=84.5%) muy superior al optimo (55-70%). La granulometría representa un alto porcentaje de partículas finas (mayor a 80%) de tamaño menor a 1 milímetro y un bajo índice de grosor (18.5%). Las partículas finas se alojan en los pocos espacios entre partículas (macroporos) obstruyéndolos, reduciendo la aireación y aumentando la retención de humedad, hasta afectar las raíces por falta de oxigeno. Esto se observa en el cuadro N° 1, donde los porcentajes de humedad retenidos (H10, H50 Y H100) son muy altos (84.5, 81.9 y 75.5% respectivamente) y están por encima de los valores óptimos establecidos, mientras que la aireación (3.6%) esta bajo el optimo (15 a 30%).

Estas propiedades físicas generan condiciones anaeróbicas o ausencia de oxigeno en el medio en que se desarrollan las raíces, ocasionando pudrición de las raíces absorbentes y consecuentemente deficiencias nutricionales con un efecto en los rendimientos.



## 8- Fibra de coco Flora y fauna recién usada

Figura 18. Equilibrio de aire y agua.

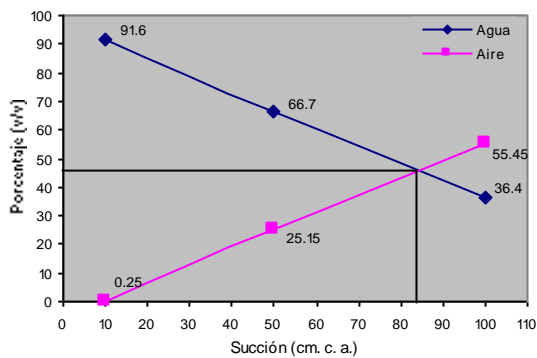
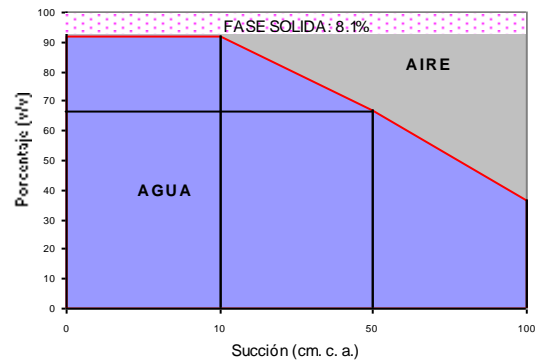


Figura 19. Liberación de aire y agua y fracción sólida



La falta de metodologías validadas para el control de calidad de los diferentes sustratos, permite que se comercializan en el país, materiales que no cumplen con los requerimientos óptimos de un buen sustrato para el cultivo. Esta fibra de coco, al igual que los dos sustratos anteriores, presenta de falta de capacidad aireación y excesos de retención de humedad generando los mismos problemas que ya se discutieron antes. Aunque alcanza el punto de equilibrio entre agua y aire, lo hace cuando el sustrato esta muy seco (presiones de succión mayores a 80 cm.c.a.) lo cual afectaría por falta de agua fácilmente disponible para la planta. Como se observa en las figuras anteriores, a H50 presenta un buen contenido de humedad (66.7%) y una buena aireación (25.15%), lo que hace suponer que con un manejo esmerado del riego el sustrato puede ser utilizable. Sin embargo, a pesar de tener suficiente agua fácilmente disponible (24.9%) para el cultivo, la pésima capacidad de aireación y el exceso de agua reserva limita su uso. Además, en la práctica esto es difícil de controlar por muchas razones, a saber, la falta de equipos y sensores de que permitan monitorear con precisión la humedad, falta de experiencia en cultivo sin suelo y sedimentación del polvo en la parte media e inferior del sustrato, entre otros. Ante esto, es mejor no correr el riesgo de hipoxia y



podrición radical y asegurarse de que el sustrato posea unas adecuadas propiedades físicas para el cultivo.

9- Fibra de coco flora y fauna de 1 año

Figura 20. Equilibrio de aire y agua.

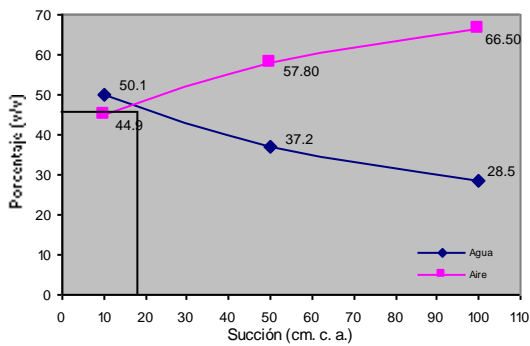
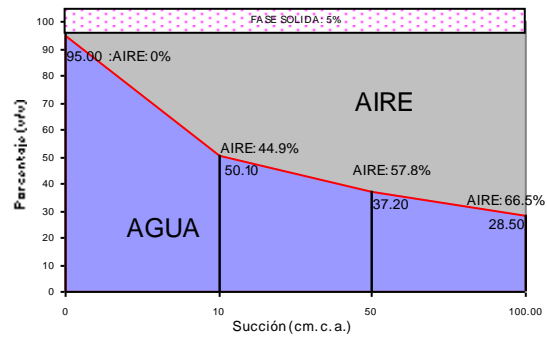


Figura 21. Liberación de aire y agua y fracción sólida



Analizando los gráficos anteriores, este sustrato inicialmente presenta características óptimas para el cultivo. Alcanza el balance entre aire y agua a bajas presiones de succión (18 cm.c.a), con muy buenas condiciones de aireación (48% v/v) pero el agua total retenida (H10) esta por debajo del mínimo optimo (55%), lo cual limita la cantidad de agua fácilmente disponible (12.9%) para la planta (ver cuadro 3).

En la curva de liberación aire y agua se observa que después de drenar el exceso de agua, a 10 centímetros de columna de agua, el sustrato tiene muy buena aireación (44.9%) y suficiente humedad (H10=50.1%) de la cual el 21.6%) es agua útil para la planta.

En los gráficos 22 y 23 se observa el comportamiento de este mismo sustrato después de seis meses de uso. Observando las curvas de liberación aire y agua, nótese el ensanchamiento del área del agua y disminución del área de aire. Así, a capacidad de contenedor (H10) la capacidad de aire disminuye a 18.2% y el contenido de humedad (H10) aumenta a 75.4%, que aunque presenta buena aireación, el exceso



de retención de humedad ya es un problema. El agua total disponible (48.6%) esta muy por encima del optimo (24-40%). Así el punto de equilibrio se desplaza hacia un sustrato mas seco (succión de 38 cm.c.a.), donde a pesar de tener buena aireación, el agua fácilmente disponible es limitante (11.3%) porque esta por debajo del optimo (20-30%).

El Índice de grosor (IG) de la fibra de coco lote 2006 antes de sembrar el cultivo es 58.60% y un 41.40% de partículas finas, lo cual no varía mucho a los seis meses de cultivo, el IG es de 56.4% mientras que tiene un 43.6% de partículas finas. Sin embargo, como se discutió anteriormente, al analizar los componentes de aire y tipos de agua en el sustrato se observa un deterioro de estas características.

Estas características se deteriorarán aún más con el tiempo, dado el proceso de compactación natural que experimenta el sustrato en el contenedor, producto de la degradación, fraccionamiento, reacomodo de partículas y al efecto del peso del agua.

Esto se demostró en el cultivo de chile dulce y tomate en este sustrato, donde al cabo de un año se observó muerte de un alto porcentaje del sistema radical, manifiesto en deficiencias nutricionales como clorosis en brotes nuevos, una evidente disminución del rendimiento y deterioro del cultivo.

10- Fibra de coco seis meses de uso.

Figura 22. Equilibrio de aire y agua.

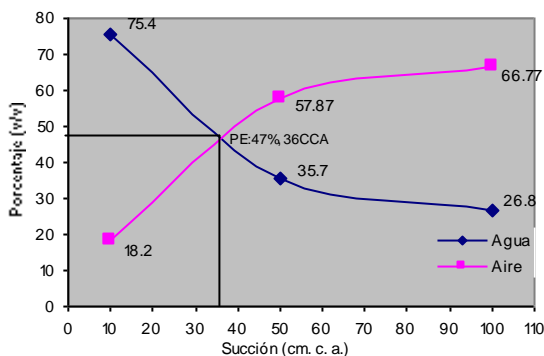
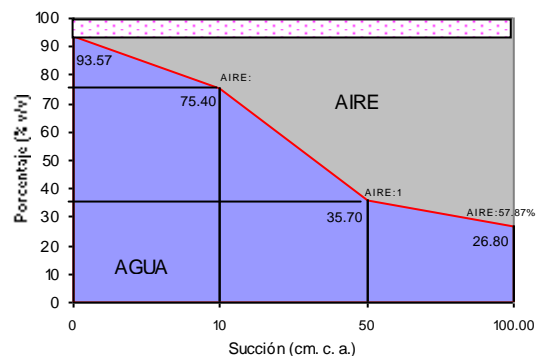


Figura 23. Liberación de aire y agua y fracción sólida





La aplicación práctica del conocimiento de las propiedades físicas del sustrato se resume en el cuadro 4. En condiciones normales de luz solar para un cultivo de tomate al inicio de la producción el consumo medio diario por planta es de 700 ml. El agua total disponible de un macetero 1200 con 12 litros de fibra de coco es de 5.83 L. (48.6%). De esta ATD se permite evapotranspirar 580 ml (9% de agotamiento + 10 % drenaje) momento en el cual se procede a realizar el siguiente riego para reponer el agua absorbida por las dos plantas del macetero. Para abastecer el requerimiento diario de dos plantas por maceta (1.4 L) se requieren 3 riegos/ día de 7- 8 minutos cada uno para un tiempo total aproximado de riego diario de 21 a 24 minutos. Este es un procedimiento que permite calcular el volumen de riego (cuanto regar) pero no permite determinar la frecuencia de riego (cuando regar).

Cuadro 4. Programa de riego para un cultivo de tomate en macetas # 1200 en fibra de coco con 6 meses de uso.

Diseño agronómico	DATOS	VALORES
Largo (m)		21
Ancho (m)		5.65
Área de invernadero (m <sup>2</sup> )		118.65
Numero de maceteros		146
Numero plantas/maceta		2
Distancia de siembra: Hilera		1.35
Macetas		0.5
Densidad de plantas por m <sup>2</sup>		2.96
Total de plantas		292
<b>EL SUSTRATO</b>		
Volumen de unidad básica (L)		12
Agua total disponible (%)	48.60	5.832
<b>Diseño hidráulico</b>		
Caudal del gotero (L/h)		3.8
Goteros por maceta		1
Goteros por área de riego		292
Caudal total/unidad básica (L/h)		1109.6
Requerimiento agua: L/planta/día	0.7	0.7
Requerimiento agua/maceta (L/día)	2	1.4
<b>PLAN DE RIEGO</b>		
Porcentaje de agotamiento (% y L)	9	0.525
Porcentaje de drenaje (% y L)	10	0.052
Volumen/riego/maceta (L)	1 m <sup>2</sup>	0.58
Numero de riegos/día		2.4
Duración por riego (minutos)	Min.	9.1
tiempo total de riego /día		22.1
Volumen/riego (L)		84.295728
Volumen de riego/area total sembrada/día (L)		204.4



---

## Análisis de propiedades químicas

Para la evaluación agronómica de sustratos desde el punto de vista químico, se debe considerar que estos se clasifican en químicamente inertes y activos. Las diferencias entre ambos tipos de sustratos vienen determinadas por la capacidad de intercambio catiónico o la capacidad de almacenar nutrientes. Dentro de los químicamente inertes están la mayoría de los sustratos de origen mineral, tales como la grava, perlita, lana de roca, arenas, piedras volcánica y quintilla, entre otros. Los sustratos químicamente activos generalmente son de tipo orgánico, incluyendo componentes ligno-celulósicos, tales como la turba, serrín y fibra de coco, entre otros.

En cultivos sin suelo, es importante conocer las características químicas del sustrato, ya que esto influye en el manejo del fertiriego del cultivo. En algunos casos, es posible realizar enmiendas o algunas prácticas de manejo previo al cultivo. Por ejemplo, un exceso de salinidad se puede corregir mediante lavado; mientras que altos o bajos niveles de algún nutriente puede solucionarse ajustando las concentraciones en la solución nutritiva aplicada en el riego.

Dentro de las características químicas a evaluar están las siguientes:

- pH
- Conductividad eléctrica
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- Materia orgánica
- Relación carbono/nitrógeno (C/N)
- Macronutrientes
- Micronutrientes
- Metales pesados dependiendo del origen del material.



---

El pH indica las necesidades de enmiendas previas al cultivo, ya que valores bajos requieren de encalado. Los valores adecuados oscilan entre 5.5 y 6.0. En el caso de pH altos puede utilizarse sulfato ferroso para bajar el pH.

La relación C/N es un indicador de la estabilidad o estado de degradación del sustrato. En general, en cultivo sin suelo se prefieren sustratos muy estables con alta relación C/N para asegurar una mayor vida útil en producción.

La CE es un indicador del grado de salinidad del sustrato, o sea del contenido global de nutrientes minerales, aunque no indica el contenido de los diferentes nutrientes en el sustrato. Dependiendo del origen, algunos sustratos como la fibra de coco de las costas pueden contener altos niveles de cloruro de sodio y potasio, entre otros, que contribuyen a incrementar la CE del sustrato. En estos casos, se recomienda realizar riegos abundantes de lavado, previo al cultivo. En el caso de tener altas concentraciones de  $\text{NaCl}_2$  se recomienda aplicar riegos de lavado con una solución de nitrato de calcio. Esta práctica permite desplazar el sodio por el catión potasio y además, en sustratos con alta relación C/N (altos contenidos de lignina) permite bajar dicha relación favoreciendo la disponibilidad inicial del nitrógeno.

Existen diferencias entre las propiedades de los suelos minerales y los sustratos, por lo cual la dinámica de intercambio y absorción de nutrientes es diferente. Mientras que en un suelo mineral la mayor parte de los nutrientes esta retenida en el complejo de cambio de las arcillas, en los sustratos orgánicos la mayor parte de los nutrientes se encuentran disponibles en la solución acuosa. Por tanto, la extracción con agua, aportará la mayor parte de nutrientes disponibles para la planta en el corto plazo.

Consecuentemente, los métodos tradicionales de análisis químicos de suelos no resultan satisfactorios para la determinación de nutrientes minerales en sustratos.



Cuadro 5. Características químicas de la fibra de coco fico.

<b>CE (mS/m)</b>	0,7-1,5
<b>pH</b>	5,7-6,5
<b>C.I.C. (meq/100 gr)</b>	66-67
<b>Relación C/N</b>	70-80
<b>MACROELEMENTOS (mmol/L)</b>	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> < 0,1	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> = 2,6
K <sup>+</sup> = 3,3	Cl <sup>-</sup> = 3,2
Na <sup>+</sup> = 2,1	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> = 0,1
Ca <sup>+2</sup> = 0,2	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> < 0,1
Mg <sup>+2</sup> = 0,1	P < 0,01
<b>MICROELEMENTOS (μmol/L)</b>	
Si = 0,17	B = 4,1
Fe = 3,2	Cu = 0,1
Mn = 0,2	Mo < 0,1
Zn = 0,2	***

Resultados obtenidos en el extracto de una suspensión 1:1,5 v/v, (laboratorio Bligg Naaldwijk-Holanda)

Existen diferentes métodos para determinar la concentración de nutrientes minerales disponibles en la solución de sustrato. Entre estos está el método de **de pasta saturada**, del cual se obtiene un extracto de saturación, donde se medirá pH, salinidad, Macro y micronutrientes. Los resultados obtenidos se comparan con un parámetro óptimo según Abad y Col. (1992) citados por Ansorena (1994).



Por otra parte están las suspensiones de sustrato en agua en diferentes proporciones, tales como 1:1.5, 1:2, 1:5 y 1:6 de sustrato:agua. Los valores de los diferentes parámetros químicos obtenidos varían según la proporción utilizada, por lo cual es importante utilizar los criterios o guías adecuados para su interpretación (Ansorena, 1994).

Cuadro 5. Niveles óptimos para las propiedades químicas de un sustrato de cultivo.

Propiedad	Rango óptimo
pH (extracto de saturación)	5.2 – 6.3
CE (extracto de saturación) ms/m	0.75 – 3
CIC (Meq7L)	
% cenizas	< 20
% materia orgánica (MO)	>80
Relación C/N	20 – 40
Nutrientes asimilables (ppm)	
NO <sub>3</sub>	100 – 199
NH <sub>4</sub>	0 – 20
P	6 – 10
K	150 – 250
Ca	> 200
Mg	> 70
Fe	0.3 – 3.0
Mn	0.02 – 3.0
Mo	0.01 – 0.1
Zn	0.3 – 3.0
Cu	0.001 – 0.5
B	0.005 – 0.5

Fuente: Abad y Col. (1992) citados por Ansorena (1994).





---

## LITERATURA CONSULTADA.

- ABI SADE. 1997. Cultivo bajo condiciones forzadas. Tel Aviv, Israel. Editorial Imprenta Rehak. 144pp.
- ALARCON, A. L. 2000. Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Murcia, España. Novedades agrícolas S.A. 460 pp.
- ANSORENA, M. J. Sustratos, propiedades y caracterización. 1994. Madrid, España. Editorial Mundi-prensa. 170 p.
- CADAHIA L. C. Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales. 2000. Madrid – España. Ediciones Mundi-prensa. 475 pp.
- CASANOVA, A. et. al. 2003. Manual para la producción protegida de hortalizas. La Habana, Cuba. Editorial Liliana. 113 pp.
- URRESTARAZU G. M. Manual de cultivo sin suelo. 2000. Almería - España. Editorial Mundi – Prensa
- HOWARD M. RESH. 2001. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. 5ª Edición. Madrid, España. Ediciones Mundi – Prensa. 558 p.