

Universidad de Costa Rica
Escuela de Agronomía
Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno

**SUSTRATOS. El medio hacia un cultivo sin suelo. Una alternativa para sustituir
suelos enfermos y agotados.**

Por Freddy Soto Bravo

Alajuela, 2014

Resumen: En la producción en ambiente protegido, a mediano plazo el cultivo sin suelo se convierte en una necesidad, producto del agotamiento del suelo por un mal manejo nutricional y a la contaminación con fitopatógenos de suelo por la ausencia de medidas de prevención. La falta de metodologías validadas para la evaluación agronómica de sustratos limita el éxito en el cultivo sin suelo. El análisis detallado de las propiedades físicas es de vital importancia, ya que una vez establecido el cultivo es imposible modificarlas. Al contrario, las propiedades químicas y biológicas pueden ser modificadas durante el ciclo del cultivo.

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).

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 un gran auge en el mundo, y más recientemente en CR.

En la producción en invernadero, el mal manejo nutricional y la falta de medidas de prevención de enfermedades del suelo, provocan serios problemas de agotamiento y contaminación con patógenos como *Fusarium* sp, *Ralstonia* y nematodos, entre otros. Esto conlleva a 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, por ejemplo solanáceas.

Ante esta panorámica, una de las alternativas de producción con bajos insumos agrotóxicos en ambiente protegido, es el sistema de cultivo sin suelo (CSS). En Costa Rica, esta técnica ha tomado impulso y se han iniciado proyectos comerciales en producción de hortalizas en el ámbito de pequeñas y medianas empresas familiares. Muchas de estas han incursionado en el cultivo sin suelo utilizando sustratos inertes o sustratos orgánicos, los cuales son abundantes en algunas regiones y fincas. Algunos ejemplos son las piedras volcánicas, pómez y subproductos del café, caña y estiércoles, entre otros. En Llano Grande de Cartago algunos floricultores utilizan mezclas de estiércol compostado con cascarilla de arroz como medio de cultivo para aislar del suelo contaminado con *Fusarium* sp.

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 y químicas. Sin embargo, la falta de información respecto a metodologías para la caracterización fisicoquímica de sustratos, no permiten optimizar el riego y la nutrición en los sistemas de **cultivo sin suelo**. 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 Costa Rica no existen metodologías validadas para el análisis e interpretación de las características físico - químicas de sustratos, de ahí la necesidad de analizar este tema.

En cultivos sin suelo, es muy importante asegurarse que el sustrato tenga las características físicas óptimas de un buen sustrato, ya que una vez establecido el

cultivo es imposible 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. Por tanto, en este artículo se hace énfasis en el análisis físico de los sustratos.

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

Evaluación agronómica de sustratos.

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 el manejo del riego y la nutrición de cultivos en suelo y en sustrato sean diferentes.

En el cuadro 1, figura 1 y 2 se describen las características físicas de una mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz 1:1. La densidad aparente (dap) y densidad real (dr) se expresan en gramos por mililitro (g/ml), mientras la porosidad total, fase sólida, retención de agua y capacidad de aireación se expresan en porcentaje y volumen (litros) respecto a un saco de cultivo de 40 litros de sustrato. El sistema de cultivo en sacos consta de contenedores plásticos flexibles que miden 1.2 metros de largo por 20 centímetros de diámetro, cultivado con seis plantas de tomate indeterminado, colocadas a dos plantas por sitio de siembra cada 50 cm (Fig.1). Las variables físicas evaluadas se comparan con un parámetro óptimo (Cuadro 1) según Abad y Col. (1992) citados por Ansorena (1994).



Figura 1. Contenedor plástico de 1.2 metros de largo por 20 centímetros de diámetro (28.8 L), cultivado con seis plantas de tomate colocadas a dos plantas por sitio de siembra cada 50 cm

La densidad aparente es la masa seca a 105 °C de la fracción sólida por volumen de sustrato y generalmente se expresa en gramos / mililitro (g/ml o cm^3). La densidad real 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.

La densidad aparente de la mezcla de cascarilla de arroz (0.1 g/ml) es menor al óptimo (0.4 g/ml), lo cual garantiza que es un sustrato liviano, aspecto importante desde el punto de vista del manejo operacional.

La densidad real obtenida (1.04 g/ml) está por debajo del rango óptimo (1.45-2.65 g/ml) lo cual se refleja en la liviana y pequeña fracción sólida (9.6 % = 3.85 L.) respecto a una alta porosidad total del sustrato (90.4 % = 36.15 L.). Tanto la densidad aparente como la densidad real evidencian la ligereza del sustrato dada su alta porosidad total.

La porosidad total (Pt) incluye la capacidad de aireación (macroporos) y de retención de humedad (microporos), y se expresan en porcentaje respecto a volumen de sustrato.

Conociendo la densidad aparente y real del medio se puede calcular la porosidad total:

$$1. Pt = (1 - d_a / d_r) \cdot 100. \longrightarrow Pt = (1 - \frac{0.1g/ml}{1.04 g/ml}) \times 100 = 90.6 \%$$

Esta se refiere al cociente entre el volumen total de poros y el volumen total del sustrato, e incluye los microporos que son los que retiene el agua y los macroporos que alojan el aire en el medio.

La alta porosidad total (90.4 % = 36.15 L. de 40 L. de sustrato) junto a un bajo porcentaje de la fracción sólida en la mezcla (cascarilla de arroz más fibra de coco 1:1) se ajustan al rango óptimo, mayor a 85 % y menor a un 15 %, respectivamente.

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

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

$$2. CA = Pt - H10 = 90.4 \% - 68.85 \% = 21.53 \%$$

Como se observa en el cuadro 1 y Figura 1 y 2 la **capacidad de aireación** (21.53 % = 8.61 L) esta dentro de lo óptimo (15 a 30%), lo cual garantiza buenas condiciones de aireación y drenaje para el sistema radical.

La **capacidad de aireación** es una característica muy importante en cultivos sin suelo, ya que el sistema radical al estar confinado a un volumen 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.

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**), que en nuestro caso es igual a 68.9% o 27.54 L de sustrato en el saco de cultivo de 40 litros.

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 esa agua 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).

Para el cálculo de los diferentes tipos de agua, es necesario determinar en laboratorio el agua retenida en el sustrato a diferentes presiones succión: a 10 centímetros de columna de agua (H10), 50 cm.c.a. (H50) y 100 cm.c.a. (H100). Con esta información y la Pt, ahora se puede determinar la distribución de macro y microporos, o sea, las relaciones aire y agua en el sustrato (cuadro 1, figura 1 y 2)

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

$$3. \text{ AFD} = \text{H10} - \text{H50.} \longrightarrow \text{AFD} = 68.9 \% - 49.3 \% = 19.55 \% \text{ o } 7.82 \text{ litros de sustrato de los } 40 \text{ L que hay en el saco de cultivo.}$$

El AR es la que se retiene entre 50 cm.c.a. (H50) y 100 cm.c.a. (H100) la cual funciona como un agua de abastecimiento o emergencia, en caso de periodos largos de sequía, por algún incidente, tal como un desperfecto en el sistema de riego.

$$1. \text{ AR} = \text{H50} - \text{H100.} \longrightarrow \text{AR} = 49.3 \% - 36.9\% = 12.4 \% \text{ o sea } 4.96 \text{ L de sustrato de } 40 \text{ L en el contenedor de cultivo.}$$

El agua fácilmente disponible (AFD) más el agua de reserva (AR) conforman el agua total disponible (ATD) para la planta (31.95% = 12.78 L de 40 L de sustrato en el contenedor), lo cual se ajusta muy bien al rango optimo que es de 24 a 40 %.

$$5. \text{ ATD} = \text{AFD} + \text{AR} \longrightarrow \text{ATD} = 19.55 \% + 12.4 \% = 31.95 \% \text{ o } 12.78 \text{ litros de sustrato en el contenedor de } 40 \text{ litros.}$$

Al desglosar los diferentes tipos de agua a partir del agua total retenida (H10= 68.9 % o 27.54 L de sustrato) se observa que este se compone de un 19.55 % = 7.82 L de AFD, 12.4 % = 4.96 L de agua de reserva y 36.9 % = 14.76 L de ADD.

Es importante señalar que del agua total retenida (68.9 % = 27.54 L) más del 50 % es agua difícilmente disponible (36.9 % = 14.76 L, lo cual debe ser tomado en cuenta en el manejo del riego, aún cuando el sustrato almacena suficiente agua total disponible.

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 a costa 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 (tamaño y distribución del tamaño de partículas) y el tipo de material determinan la capacidad de retención de humedad y la capacidad de aireación de un sustrato, por lo que es necesario un buen balance de macro y microporos que garanticen una adecuada aireación y retención de humedad, respectivamente.

Los sustratos están compuestos por partículas de diferentes tamaños, sin embargo, según Ansorena, (1994) la fracción mas determinante en las propiedades físicas de los sustratos es el tamaño de 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 > 1 mm y mayor porcentaje de partículas finas < a 1mm se afecta drásticamente la capacidad de aireación y se aumenta la retención de agua en el sustrato. Esto es lo que sucede cuando se mezcla materiales gruesos con materiales 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. Una alta proporción de partículas pequeñas disminuye la aireación, aumentan la cantidad de microporos y consecuentemente la retención de humedad, hasta afectar las raíces por falta de oxígeno.

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 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. 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.

Cuadro 1. Evaluación agronómica de las características físicas de una mezcla

Parametro	Valor	Volumen (L)	% optimo
Volumen contenedor: Saco de cultivo para 6 plantas (L)	40	20	
Densidad aparente (Dap) gr/ml en base seca	0,1		
Densidad real (Dr) gr/ml metodo del picnometro	1,04		
Porosidad total (PT): $1-(Dap/Dr)$	90,4	36,15	> 85%
% Fase solida (FS): $100-PT$	9,6	3,85	< 15%
Total: PT+FS	100,0	40,00	
Porcentaje humedad a:			
10 cm.c.a Es el agua total: H10	68,85	27,54	55-70
50 cm.c.a H50	49,3	19,72	30-40
100 cm.c.a H100	36,9	14,76	25-30
Relación agua:aire			
Contenido de aire (CA) PT-H10	21,53	8,61	15-30
Agua facilmente disponible(AFD) H10-H50	19,55	7,82	20-30
Agua de reserva (AR) H50-H100	12,40	4,96	4,0-10,0
Agua total disponible (ATD) AR + AFD	31,95	12,78	24-40
Agua dificilmente disponible (ADD) H10-AFD-AR	36,90	14,76	

de cascarilla de arroz más fibra de coco 1:1.

Fuente: proyecto de hidroponía, Centro Nacional Especializado Granja Modelo. Núcleo Agropecuario. INA. 2004.

Figura 1 y 2. Distribución de fase sólida, aire, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible en una mezcla de cascarilla de arroz más fibra de coco 1:1

Figura 1. Distribución porcentual de aire, agua y fase sólida en un sustrato de cascarilla de arroz más fibra de coco en mezcla 1:1.

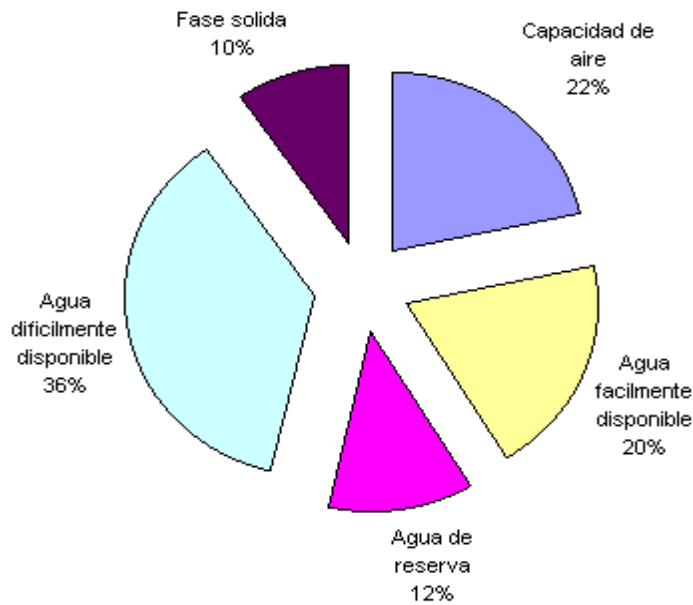
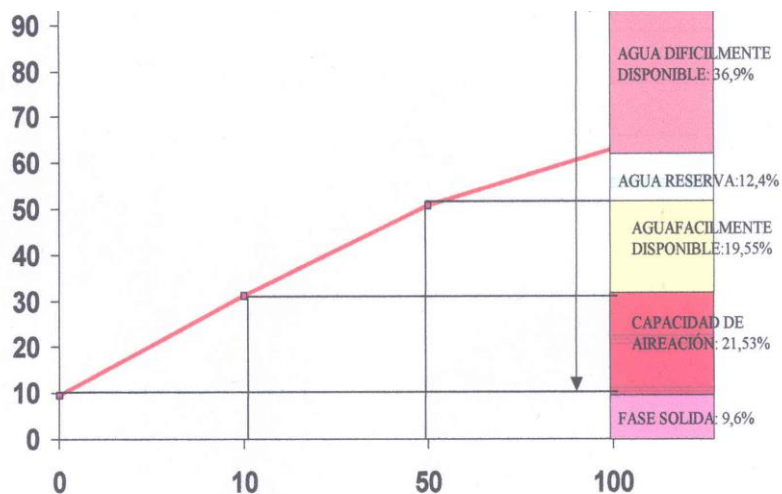
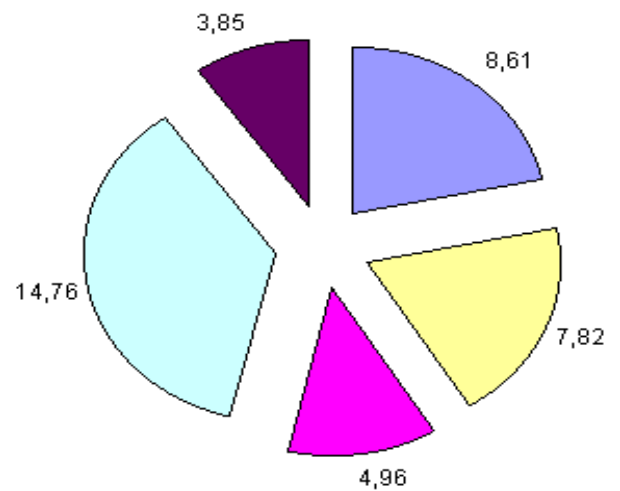


Figura 2. Distribución en litros por saco de cultivo de 40 litros.



Fuente: Proyecto de hidroponía, Centro Nacional Especializado Granja Modelo. Núcleo Agropecuario. INA. 2004.

A continuación, se calcula el riego por tiempos, de acuerdo a las propiedades físicas de la mezcla de cascarilla de arroz más fibra de coco 1:1, caudal del gotero y consumo diario por planta.

1- Según la fórmula 5 se calculo el Agua total disponible (ATD) de 40 litros sustrato por saco de cultivo es 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- 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: $1150 \text{ mililitros} + 115 \text{ mililitros (10\% drenaje)} = 1265$ ml/riego/saco.

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

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

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

$$\frac{422 \text{ ml} \times 60 \text{ min.}}{4025 \text{ ml.}} = 7 \text{ minutos aproximadamente}$$

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 a 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.

El procedimiento anterior constituye 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. Así, en un día nublado, puede ser suficiente uno o dos riegos diarios, mientras que un día de alta luminosidad y temperatura el consumo de agua puede duplicarse. Por tanto, la experiencia y observación diaria del fertiriego en cultivo sin suelo es de vital importancia.

Literatura consultada.

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