



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
COORDINACIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



**EVALUACION DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN LA
PRODUCCION DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.) EN INVERNADERO**

Por:

David Rodríguez Narváez

**Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Producción Agropecuaria**

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Octubre de 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
COORDINACIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



**EVALUACION DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN LA
PRODUCCION DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.) EN INVERNADERO**

Por:

David Rodríguez Narváez

**Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Producción Agropecuaria**

Asesores

M.C. Claudia Delgadillo Barrón

Dra. Catarina Loredó Osti

Dr. Juan Carlos Rodríguez Ortiz

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Octubre de 2013

El trabajo titulado “**Evaluación de Sustratos Orgánicos Alternativos en la Producción de Pepino (*Cucumis sativus* L.) en Invernadero**” fue realizado por: David Rodríguez Narváez como requisito parcial para obtener el Grado de Maestro en Producción Agropecuaria en el área de Sistemas de Producción de Hortalizas, fue revisado y aprobado por el suscrito Comité de Tesis:

M. C. Claudia Delgadillo Barrón

Asesor

Dra. Catarina Loredo Osti

Asesor

Dr. Juan Carlos Rodríguez Ortiz

Asesor

Ejido Palma de la Cruz, municipio de Soledad de Graciano Sánchez, S. L. P. a los 31 días del mes de octubre de 2013.

DEDICATORIA

A TI JESUCRISTO:

Gracias Señor Dios mío y señor mío yo confié en ti.

A MI MADRE:

Señora María Eva Narváez López

Por todo su apoyo brindado, y por estar a mi lado en todo momento.

A MI PADRE:

Señor Antonio Rodríguez Torres

Por haberme dado la seguridad y confianza necesaria para seguir adelante frente a los retos que he tenido a lo largo de mi vida.

A MIS HERMANOS:

Emma y Roberto

Por su amor, cariño y amistad que en difíciles momentos me ayudaron a ser más fuerte.

A MI NOVIA:

Cecilia del Carmen Martínez Acosta por apoyarme y brindarse su cariño y amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

CON GRATITUD

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y a la Facultad de Agronomía y Veterinaria, por su colaboración para la finalización de mis estudios profesionales.

CON AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado (No. 324251) durante todo el transcurso del tiempo que curse mi maestría.

CON RECONOCIMIENTO

A Fundación PRODUCE de San Luis Potosí, A. C. por el patrocinio del proyecto “Evaluación de Sustratos Orgánicos y Diversificación de Cultivares en Especies Hortícolas en Invernadero”

CON GRATIFICACIÓN

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas, Pecuarias (INIFAP-San Luis Potosí) por haberme apoyado en todo momento en mi trabajo de investigación.

CON RESPETO

Al M. C. Claudia Delgadillo Barrón

Una gran amiga y maestra, que por sus valiosos consejos y atribuciones a mi persona me permitieron avanzar un escalón más en mi carrera profesional.

CON AFECTO

A la Dra. Catarina Loredo Osti

La cual es un gran ser humano que dedicó parte de su tiempo y paciencia para concluir este trabajo.

CON RETRIBUCIÓN

Al D. R. Juan Carlos Rodríguez Ortiz

Un gran investigador y distinguida persona que por sus conocimientos me supo encausar de una manera correcta para la culminación de este trabajo.

CON ESTIMACIÓN

Al Señor José Luis Castillo

Por su ayuda desinteresada y apoyo para culminar este trabajo. ¡Muchas gracias!

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS:

Juan Carlos, Isidoro, Salvador, Jorge, Oscar y Mauricio por los buenos momentos que pasamos. Igualmente amigos les deseo mucha suerte.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | página |
|---|--------|
| DEDICATORIAS..... | iii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iv |
| INDICE DE CONTENIDO..... | vi |
| INDICE DE CUADROS..... | viii |
| INDICE DE FIGURAS..... | xi |
| RESUMEN..... | xii |
| SUMMARY..... | xiii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| Objetivos..... | 3 |
| Metas..... | 3 |
| Hipótesis..... | 3 |
| REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| Concepto de Cultivo sin Suelo..... | 4 |
| Clasificación de Cultivos sin Suelo..... | 4 |
| Sustratos de Cultivos: Propiedades y Caracterización..... | 5 |
| Problemática Actual en el Uso de los Sustratos..... | 6 |
| Concepto del Sustrato..... | 8 |
| Características Ideales de un Sustrato..... | 9 |
| Clasificación de los sustratos..... | 12 |
| Clasificación de los Sustratos Basada en el Origen de los Materiales..... | 11 |
| Mezcla y Formulación de los Sustratos de Cultivo..... | 12 |
| Evaluación Agronómica de los Sustratos de Cultivo..... | 14 |
| La Caracterización Física y Química de los Sustratos..... | 14 |
| Bioensayos de Germinación para Evaluar la Calidad de los Sustratos de Cultivo..... | 33 |
| Nuevos Materiales Utilizados como Sustratos o Componentes de los Sustratos sin Cultivo sin Suelo..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| Técnicas para el Mejoramiento de las Propiedades Físicas y Químicas del Sustrato..... | 41 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 44 |
| Tratamientos y Diseño Experimental..... | 44 |
| Procedimiento de Obtención de los Sustratos Orgánicos..... | 45 |
| Análisis de los Sustratos..... | 46 |
| Caracterización de los Sustratos..... | 46 |
| Sitio del Área Experimental..... | 47 |
| Características del Invernadero..... | 47 |
| Colocación de los Sustratos..... | 48 |
| Material Genético..... | 48 |
| Establecimiento del Cultivo..... | 48 |
| Solución Nutritiva para Planta..... | 48 |
| Sistema de Riego..... | 49 |
| Ciclo del Sistema de Producción..... | 50 |
| Variables Evaluadas..... | 50 |
| Análisis Beneficio-Costo del Sustrato..... | 51 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 55 |
| Características Físicas y Químicas de los Sustratos..... | 55 |
| Evaluación Agronómica..... | 58 |
| Análisis Beneficio-Costo..... | 66 |
| Concentración de Nutrientes de Pecíolo y Hoja..... | 69 |
| CONCLUSIONES..... | 71 |
| LITERATURA CITADA..... | 72 |

ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Clasificación de los sistemas de cultivo sin suelo de Larsen..... | 4 |
| 2 | Origen y productos aprovechables en sustratos..... | 12 |
| 3 | Niveles óptimos para las características físicas de sustratos de cultivo de acuerdo a diferentes autores..... | 15 |
| 4 | Niveles óptimos para las características químicas de sustratos de cultivo..... | 17 |
| 5 | Valor límite (ppm) de concentración de los metales pesados para los materiales utilizados como sustratos de cultivo..... | 17 |
| 6 | Interpretación de los niveles de la salinidad de un sustrato de cultivo, expresada como la conductividad eléctrica del extracto de saturación..... | 29 |
| 7 | Solución nutritiva para pepino (<i>Cucumis Sativus L.</i>) en Bagazo de Caña, Paxtle, Bagazo de Maguey, Bagazo de Lechuguilla y Fibra de Coco Comercial..... | 49 |
| 8 | Parámetros físicos de los diferentes sustratos evaluados..... | 54 |
| 9 | Parámetros químicos de los diferentes sustratos evaluados..... | 57 |
| 10 | Altura promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 59 |
| 11 | Altura promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 59 |
| 12 | Diámetro basal del tallo promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 61 |
| 13 | Diámetro basal del tallo promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 61 |
| 14 | Índice de área foliar promedio (cm ²) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 62 |

| | | |
|----|--|----|
| 15 | Índice de área foliar promedio (cm^2) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 63 |
| 16 | Rendimiento promedio (ton ha^{-1}) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 64 |
| 17 | Rendimiento promedio (ton ha^{-1}) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 64 |
| 18 | Volumen de raíz (cm^3) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 66 |
| 19 | Volumen de raíz (cm^3) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha..... | 66 |
| 20 | Relación beneficio-costo de los diferentes tratamientos evaluados..... | 67 |
| 21 | Concentración de nutrientes de N-NO_3 (mg kg^{-1})..... | 69 |
| 22 | Concentración de nutrientes de K^+ (mg kg^{-1})..... | 70 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Distribución de los tratamientos evaluados..... | 44 |
| 2 | Análisis beneficio-costo del sustrato..... | 68 |

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de identificar materiales para ser utilizados como sustrato para el cultivo de pepino en condiciones de invernadero, con características físicas, químicas y biológicas adecuadas y factibilidad técnica y económica, dado que los materiales convencionales tienen costos altos. Se probaron cuatro sustratos a base de bagazo de caña, bagazo de lechuguilla, bagazo de maguey y *Tillandsia* o “paxtle”, con dos tamaños de partícula (< 2 mm y > 2 mm) utilizando como testigo la fibra de coco. El estudio se realizó en un invernadero del Campo Experimental San Luis INIFAP. Los sustratos fueron caracterizados; se molieron, tamizaron y embolsaron en bolis o contenedores de plástico, los cuales fueron distribuidos en el invernadero de acuerdo a un diseño completamente al azar. El 5 de junio de 2012 se estableció por siembra directa el genotipo de pepino Paraíso. La separación entre plantas fue de 20 centímetros con una densidad de 2.70 plantas por m^2 para un área de 252 m^2 . Durante el desarrollo del cultivo se aplicó la solución nutritiva Hochmuth, la cual fue dosificada de acuerdo a la demanda del cultivo considerando 4 etapas fenológicas. Se realizaron 14 cortes. La información se analizó con el sistema SAS (Statistical Analysis System) bajo un diseño factorial con tres factores de prueba: factor A = sustrato; factor B = tamaño de partícula; factor C = fecha de medición. Los sustratos que presentaron parámetros más cercanos al óptimo fueron el bagazo de caña de azúcar, el bagazo de lechuguilla y el paxtle todos ellos con tamaño mayor a 2 mm. La interacción del sustrato con el tamaño de partícula mostró una alta diferencia significativa para altura, diámetro basal de tallo, índice de área foliar y volumen de raíz ($P < 0.0001$). El rendimiento promedio fue de 191.8, 146.5, 131.1 y 128.3 $ton\ ha^{-1}$, para bagazo de caña, bagazo de lechuguilla, paxtle y bagazo de maguey respectivamente comparados con 110.3 $ton\ ha^{-1}$ obtenidos en fibra de coco. No se presentaron diferencias estadísticas entre sustratos, por lo cual los sustratos evaluados en este estudio pueden ser equiparables a la fibra de coco. Los sustratos que presentaron la mejor relación beneficio costo ($B/C > 1.15$) fueron el bagazo de caña con las dos diferentes granulometrías y el bagazo de lechuguilla con granulometría mayor de 2 mm.

SUMMARY

The aim of this study was to identify materials to be used as a substrate for growing cucumber under greenhouse conditions, with physical, chemical and biological properties as well as technical and economic feasibility, since conventional materials have high costs. Four substrates based on sugar cane bagasse, lechuguilla bagasse, maguey bagasse and Tillandsia or "ball moss" were tested with two particle sizes (<2 mm and > 2 mm) and coconut fiber as control. The study was conducted in a greenhouse of the Institute of Agriculture, Livestock and Forest Research in San Luis Potosí, México. The substrates were characterized; were ground, sieved and bagged in plastic containers, which were distributed in the greenhouse according to a completely randomized design. On June 5, 2012 Paradise cucumber genotype was established by direct seeding. The separation between plants was 20 cm with a density of 2.70 plants per m² to 252 m² area. During the crop development a Hochmuth nutrient solution was applied, according to crop demand considering 4 phenological stages. The production was obtained with 14 cuts. Data were analyzed with the SAS (Statistical Analysis System) under a factorial design with three test factors: factor A = substrate; factor B = particle size; C = factor measurement date. The substrates presented closest to the optimum parameters were bagasse sugarcane, bagasse lechuguilla and Paxtle, all with size greater than 2 mm. The interaction of the substrate with the particle size showed a high significant difference for height, basal stem diameter, leaf area index and root volume (P <0.001). The average yields were 191.8, 146.5, 131.1 and 128.3 t ha⁻¹ for sugar cane bagasse, lechuguilla bagasse, ball moss and bagasse maguey respectively, compared with 110.3 t ha⁻¹ obtained of coconut fiber. No statistical differences between substrates were presented, whereby the substrates evaluated in this study may be comparable to coconut fiber. The substrates that presented the best cost-benefit ratio (B / C > 1.15) were bagasse with two different grain sizes and lechuguilla bagasse > 2 mm grain size.

INTRODUCCIÓN

El principal factor que ha influido en la disminución de los rendimientos ha sido el clima a nivel mundial, lo que ha provocado desajustes en la producción agropecuaria por lo cual, cada vez más investigadores realizan experimentos en los cuales pueden aprovecharse recursos naturales de la región, debido a que la producción de hortalizas de invernadero conlleva un alto costo de producción.

Las inversiones actuales en tecnología de alto rendimiento en la producción de invernadero podrían señalar que pronto México opacará la producción de invernadero tanto de Canadá como de los EUA, por lo que es posible reducir algunos componentes tecnológicos para disminuir los costos de producción (Cook y Calvin, 2005).

Actualmente se dispone de una amplia gama de sustratos comerciales convencionales empleados para la producción de hortalizas pero se sabe que éstos elevan los costos iniciales del cultivo, además de que los materiales minerales transformados o tratados industrialmente, y muy especialmente la lana de roca, presentan problemas graves de eliminación de sus residuos, una vez que ha finalizado su vida útil, al no ser biodegradables. Los problemas ambientales originados por la eliminación de los residuos de los sustratos transformados o tratados, han obligado a la búsqueda de nuevos materiales alternativos o sustitutivos, de menor impacto con el medio ambiente, muchos de los cuales son residuos orgánicos biodegradables, no contaminantes (Urrestarazu, 2000).

Por esta razón se busca encontrar materiales que ofrezcan características físicas y químicas favorables para el desarrollo de los cultivos y que tengan además, factibilidad técnica y económica, dado que los materiales convencionales tienen costos altos, además de una fuente de contaminación y no son reutilizables. Los materiales que se producen dentro de las industrias, en este caso los ingenios donde se produce gran cantidad de bagazo de caña pueden ser utilizados debido a que este residuo orgánico los ingenios lo utilizan como una fuente de combustible, el cual representa un problema serio de contaminación al ambiente. Por otro lado, también se tiene el residuo orgánico de empresas que se dedican a la elaboración de mezcal en la zona altiplano como el bagazo de maguey también pudiera ofrecer características adecuadas necesarias para el

desarrollo del cultivo de pepino, o de residuos orgánicos de empresas talladoras de ixtle en este caso que es la fibra de lechuguilla, u otros materiales como la *Tillandsia* o mejor conocido como paxtle, la cual representan un problema serio debido a que esta planta epifita es la principal plaga destructora de huizaches y mezquites. Por lo anterior, este estudio pretende obtener la información necesaria para determinar si los materiales como bagazo de caña, bagazo de lechuguilla, bagazo de maguey y *Tillandsia* o “paxtle”, puede llegar a tener efectos sobre el crecimiento del cultivo de pepino en condiciones controladas, además de evaluar los beneficios en la disminución de los costos de producción, es decir determinar su factibilidad técnica y económica.

Objetivos

Evaluar las características físicas y químicas de bagazo de caña de azúcar, bagazo de lechuguilla, bagazo de maguey y *Tillandsia* o “paxtle” y valorar si ofrecen la factibilidad técnica y económica para utilizarse como sustrato agrícola.

Evaluar el desempeño de los sustratos orgánicos antes mencionados del cultivo de pepino en invernadero.

Metas

Obtener uno o varios sustratos orgánicos alternativos con propiedades físicas y químicas apropiados para el cultivo de pepino.

Hipótesis

El uso de sustratos alternativos como bagazo de caña, bagazo de lechuguilla, bagazo de maguey y *Tillandsia* o “paxtle” ofrecen factibilidad técnica y económica para incorporarlos al proceso de producción de pepino en invernadero.

REVISIÓN DE LITERATURA

Concepto de Cultivo sin Suelo

Los límites de los denominados cultivos sin suelo son bastante amplios. Incluye a todos aquellos métodos y sistemas que hacen crecer a las plantas fuera de su ambiente natural: el suelo (Urrestarazu, 2000).

Clasificación de Cultivos sin Suelo

Las clasificaciones de los cultivos sin suelo se realizan en general atendiendo a los criterios básicos, que enseguida se exponen, dentro de ellos a una serie de modificaciones de los mismos y cuya aplicación genera las diferentes clasificaciones, estos criterios son:

- 1) El medio físico donde crece la raíz de la planta que cultivamos
- 2) La forma de suministro de la solución nutritiva
- 3) La forma, en su caso, de aireación de la solución nutritiva
- 4) La existencia o no de reciclado o recuperación de la solución

Son varias las clasificaciones de cultivos sin suelo que se han publicado basándose en los criterios anteriores (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de los sistemas de cultivo sin suelo de Larsen.

| Cultivos en Agua | Cultivos en sustrato | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| | Orgánicos | Inorgánicos | Mixtos |
| NFT (Nutrient Film technique) | Mezcla de turbas | Grava | Turba-vermiculita |
| Aeroponía | Corteza de pino | Escoria volcánica | Corteza de pino-vermiculita |
| En solución nutritiva | Cascarilla de arroz | Vermiculita | Etc. |
| | Etc. | | |

Fuente: Benton, 1983; Urrestarazu, 2000

Sustratos de Cultivo: Propiedades y Caracterización

Las técnicas culturales aplicadas en la producción vegetal han experimentado cambios rápidos y notables durante las cuatro últimas décadas en Europa, y más recientemente en España.

Unido a estos cambios tecnológicos, se viene produciendo una sustitución gradual del cultivo tradicional en el suelo por el cultivo hidropónico y en sustrato. Las principales razones de esta sustitución, son:

- 1) La necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro.
- 2) La existencia de factores limitantes para la continuidad de los cultivos intensivos en el suelo natural, particularmente salinización, enfermedades y agotamiento de los suelos agrícolas.
- 3) La fuerte intensificación cultural que facilita el cultivo sin suelo.

El concepto de cultivo de plantas en sustrato difiere notablemente del cultivo de estas en pleno suelo:

- 1) Cuando se usan contenedores, el volumen del medio de cultivo, del cual la planta debe absorber agua, nutrientes y oxígeno, es limitado y más reducido que el volumen disponible para las plantas que crecen en el suelo. Esto resulta en una baja inercia o capacidad de tamponamiento de los sistemas de cultivo sin suelo.
- 2) En cultivo intensivo, los estomas permanecen comúnmente abiertos durante períodos de tiempo más largos, aumentando así la absorción de agua por la planta y su pérdida por transpiración. Para obtener ventaja de estas condiciones, debe existir una cantidad suficiente de agua fácilmente disponible en la zona radicular. Mientras tal régimen hídrico esté siendo mantenido, pueden surgir problemas de aireación. Como los sustratos de cultivo «artificiales» son usualmente porosos y homogéneos, el control exacto de los contenidos de agua y de aire es fácilmente alcanzable. Por el contrario, los suelos poseen una baja porosidad y su perfil es heterogéneo, y en consecuencia, el control del agua y del aire es difícil de llevar a cabo. Es por esto que los materiales que se utilicen como sustratos deben tener una buena porosidad, y que un buen suelo agrícola se haga inadecuado para el cultivo cuando se coloque en un contenedor.

- 3) Desde el punto de vista hortícola, la finalidad de cualquier sustrato de cultivo es producir un cultivo con cosecha de calidad y abundante en el más corto período de tiempo con los más bajos costos de producción. En adición, la producción y la eliminación del sustrato una vez que ha sido utilizado, no debería ocasionar un impacto ambiental de importancia (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Problemática Actual en el Uso de los Sustratos

De tipo técnico

Manejo

El problema más generalizado en las explotaciones a la hora de utilizar determinado sustrato, bien sea de tipo comercial, bien una mezcla preparada por propio agricultor, es el “manejo”. La experiencia demuestra que cuando se presenten problemas con un sustrato, ello es debido a que el manejo de éste no es el adecuado. Existen entonces dos soluciones:

- 1) El agricultor se adecúa a las características y propiedades del sustrato que se está utilizando, o
- 2) El sustrato se prepara y maneja de acuerdo con las características y la forma cultivar del agricultor.

Como variables más importantes a la hora de preparar y utilizar un sustrato, deben considerarse:

- 1) Aire libre/Invernadero: La evapotranspiración es más elevada en el primer caso, siendo necesario, por tanto, un sustrato con una capacidad de retención de agua superior. Las plantas de exterior deben cultivarse en sustratos más fuertes, con densidades aparentes más elevadas, con objeto de soportar los efectos del viento.

- 2) Climatología de la zona: Un medio ambiente con temperaturas altas y un déficit elevado de saturación de vapor, requiere un sustrato con una elevada capacidad de retención de agua, una velocidad de evaporación más lenta y una mayor resistencia a la descomposición. En condiciones ambientales opuestas, será de interés un sustrato con una buena capacidad de aireación y un buen drenaje.

3) Especie cultivada: Por lo que se refiere a las exigencias específicas, será el medio ambiente natural del área de origen de la especie el que determinará las características óptimas del sustrato. Las especies epífitas y las terrestres (de clima tropical, templado o húmedo) difieren notablemente entre sí en las características hidrofísicas del sustrato. Las especies acidófilas requieren pHs relativamente bajos (4.5-5.0). Las especies sensibles a las sales exigen niveles relativamente bajos de fertilizantes. Las proteas son particularmente sensibles a la toxicidad por fósforo y requieren niveles muy bajos de fósforo soluble en el sustrato de cultivo.

4) Método de riego: Con sistemas de riego de flujo y reflujo, se requieren sustratos fibrosos. Cuando se aplican dosis elevadas de riego, es necesario aumentar las cantidades de fertilizantes. Por el contrario, con sistemas de subirrigación, es recomendable reducir las cantidades de fertilizantes, en comparación con las que se aplican en el riego superficial (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Finalidad

Las características del sustrato han de ser también distintas, según la finalidad con que vaya a ser utilizado. Así varían dependiendo de que se vaya a usar para:

1) Semilleros: Para la germinación de las semillas se requiere un sustrato de fácil preparación y manejo, con el mínimo de perturbación para las raíces, de textura fina, con estructura estable y fluida, con elevada capacidad de retención de agua, que mantenga la humedad constantemente, con escasa capacidad de nutrición, y con un bajo nivel de salinidad.

2) Crecimiento y desarrollo: El crecimiento y el desarrollo de las plantas exigen sustratos de textura media a gruesa, con una mayor capacidad de aireación, un buen drenaje, un nivel óptimo de fertilizantes y una moderada capacidad tampón y de intercambio catiónico, con objeto de controlar el pH y mantener su capacidad de nutrición.

3) Enraizamiento de estacas: El medio de enraizamiento desempeña tres funciones: a) mantener la estaca en su lugar durante el período de enraizamiento, b) proporcionar humedad a la estaca, y c) permitir la penetración de aire a la base de la estaca. El medio

de enraizamiento ideal debe, por tanto, proporcionar suficiente porosidad y tener una alta capacidad de retención de agua, junto con un buen drenaje, para permitir una aireación adecuada (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

De tipo económico

Precio

Particularmente en aquellos materiales cuyos depósitos naturales o reservas se encuentran a gran distancia de los centros de consumo. (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Suministro

Puede ser especialmente en el caso de sustratos cuyo abastecimiento o suministro es dependiente del exterior. La misma situación puede presentarse cuando se utilizan materiales autóctonos, con una disponibilidad local (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Homogeneidad

Con materiales tales como turba, corteza de pino, orujo de uva, mantillo de bosque, etcétera. El origen del material es distinto cada vez; por tanto, el producto será a la vez distinto. Además, en aquellos casos en que se precise compostaje, dicho proceso puede variar de un lote a otro y, consecuentemente, pueden variar también las características del producto final (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Concepto del Sustrato

El término “sustrato” se aplica en horticultura a todo material sólido distinto del suelo, 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

tanto, un papel de soporte para la planta. El sustrato puede intervenir o no en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996).

Características Ideales de un Sustrato

El mejor sustrato de cultivo para cada caso concreto, variará de acuerdo con numerosos factores: tipo de material vegetal con el que se trabaja (semillas, plantas, estacas, etc.), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego y fertilización, aspectos económicos, etc. Las plantas pueden ser sostenidas y cultivadas en diferentes tipos de materiales. De hecho, las plantas pueden ser cultivadas y sobrevivir en cualquier medio de cultivo si las raíces pueden penetrar en el sustrato.

Para obtener buenos resultados durante la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del medio de cultivo:

Propiedades físicas

- A. Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible o asimilable.
- B. Suficiente suministro de aire.
- C. Distribución del tamaño de las partículas que mantenga las condiciones antes mencionadas.
- D. Baja densidad aparente, elevada porosidad total.
- F. Estructura estable, que impida la contracción (o hinchazón) del sustrato.

Propiedades químicas

- A. Baja o apreciable capacidad de intercambio catiónico, dependiendo de que la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente, respectivamente.
- B. Suficiente nivel de nutrientes asimilables.
- C. Baja salinidad.
- D. pH ligeramente ácido y moderada capacidad tampón.
- E. Mínima velocidad de descomposición.

Otras propiedades

- A. Libre de semillas de malas arvenses, nemátodos y otros patógenos, y sustancias fitotóxicas.
- B. Reproducibilidad y disponibilidad.
- C. Bajo costo.
- D. Fácil de mezclar.
- E. Fácil de desinfectar y estabilidad frente a la desinfección.
- F. Resistencia a cambios extremos físicos, químicos y ambientales (Raviv *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1995; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Clasificación de los Sustratos

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, “basados en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación, etcétera”. La clasificación que se presenta a continuación intenta recoger las diferencias más relevantes desde el punto de vista de la utilización hortícola de los sustratos.

Materiales orgánicos

1.1.- De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica (turbas).

1.2.- De síntesis. Son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.).

1.3.- Residuos y subproductos de diferentes actividades de producción y consumo. La mayoría de los materiales de este grupo deben experimentar un proceso de compostaje, para su adecuación como sustratos. Ejemplos de estos materiales, son: orujo de uva, corteza de árboles, serrín y virutas de la madera, residuos sólido suburbanos, lodos de depuración, aguas residuales, cascarilla de arroz, paja de cereales, fibra de coco, etcétera.

Materiales inorgánicos (minerales)

11.1.-De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc.).

11.2.-Transformados o tratados industrialmente. A partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos, y a veces también químicos, más o menos complejos, que modifican notablemente las características de los materiales de partida (perlita, tana de roca, vermiculita, arcilla expandida, etc.).

11.3.- Residuos y subproductos industriales. Comprende los materiales procedentes de muy distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, etc.).

Para cada grupo, se describirán a continuación las características principales de los materiales más utilizados en nuestro país. Una descripción de todos los posibles materiales sería casi inacabable (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Clasificación de los Sustratos Basada en el Origen de los Materiales

Estos se pueden clasificar según su origen y proceso de elaboración de la siguiente forma: Orgánicos químicamente activos: turbas, cortezas de pino, vermiculita, materiales lignocelulósicos, entre otros e inorgánicos químicamente inertes: arena granítica o silícica, grava, perlita, lana de roca, entre otros. En el cuadro 2 se puede observar una clasificación hecha por (Ansorena, 1994) sobre los diferentes tipos de sustratos que se pueden encontrar en la actualidad. La diferencia entre ambos tipos de materiales viene determinada por la capacidad de intercambio catiónico, una propiedad físico-química directamente relacionada con la capacidad de almacenamiento de nutrientes por parte del sustrato. En el caso, el material actúa única y exclusivamente como soporte de la planta interviniendo en el proceso de adsorción y fijación de los nutrientes. Estos han de suministrarse mediante la solución nutritiva, que debe ajustarse al máximo objeto de no crear disfunciones en la planta. El cultivo en este tipo de sustratos es en la práctica un verdadero cultivo hidropónico, exigiendo una avanzada

tecnología de las instalaciones y una elevada especialización del personal. En el segundo sustrato, además de soporte para la planta, actúa como depósito de reserva y nutrientes aportados mediante la fertilización, almacenándolos o cediéndolos a las exigencias del vegetal (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Cuadro 2. Origen y productos aprovechables en sustratos.

| Origen | Productos |
|------------------------|---|
| Industria de la madera | Corteza, aserrín, viruta |
| Residuos urbanos | Hojarasca, lodos de depuradora, residuos de jardinería |
| Industria textil | Residuos de lino, lana y algodón |
| Bioindustria | Gallinaza, estiércol de porcino y ovino, paja |
| Industria alimentaria | Desechos de soja, desperdicios de negro de humo, residuos de frutas |
| Industria del tabaco | Polvos y restos de hoja de tabaco |
| Recursos naturales | Lignito, tierra |
| Industria del papel | Corteza, lodos de depuración |
| Industria siderúrgica | Escorias de fundición |

Fuente: Ansorena, 1994.

Mezcla y Formulación de los Sustratos de Cultivo

Principios de las mezclas

Raramente un material reúne por sí solo las características físicas, químicas y biológicas más adecuadas para determinadas condiciones de cultivo. En la mayoría de los casos, será necesario mezclarlo con otros materiales, en distintas proporciones para adecuarlo a las condiciones requeridas.

Cuando se mezclan materiales con diferente tamaño de partículas, el volumen final es generalmente inferior a la suma de los volúmenes de los materiales originales.

Además, cuanto mayor sea la diferencia entre los tamaños de las partículas, mayor será la reducción del volumen en la mezcla. Al mezclar dos materiales con distinta granulometría, el material con granulometría más fina ocupa los vacíos existentes entre

las partículas del material con granulometría más gruesa, dando lugar a una reducción en el volumen de la mezcla y en su porosidad.

Se denomina «proporción umbral» a aquella proporción de dos o más materiales que hace que la porosidad de la mezcla sea mínima. La existencia de la proporción determina que las propiedades físicas de los sustratos no sigan relaciones lineales al mezclar materiales distintos, no siendo posible determinar «a priori» las propiedades de una mezcla a partir de los materiales originales, tanto más, cuanto mayor sea la diferencia entre los tamaños de sus partículas. Siempre que se mezclen dos o más materiales, deberá prestarse una especial atención a la homogeneidad de la mezcla resultante, con objeto de obtener mezclas lo más homogéneas posibles (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Metodología de la formulación

En primer lugar, los materiales constituyentes de la mezcla deben llevarse hasta una humedad del 50-60% (en peso). Si los materiales son muy hidrofóbicos, se añadirá un mojante (tipo tensoactivo o detergente agrícola).

Se determinará el volumen total necesario del sustrato así como también el volumen de cada uno de los componentes de la mezcla. Conviene incrementar éste último volumen en un 20%, aproximadamente, para evitar los efectos de la reducción del volumen. Se evitará la incorporación de un número elevado de materiales (óptimo de 2 a 4), con objeto de que la mezcla sea homogénea y viable económicamente.

Se realizarán los ajustes de pH necesarios en aquellos materiales que no posean un pH adecuado para el cultivo, alcalinizándolos o acidificándolos, según sea el caso.

A continuación se mezclan los componentes, posteriormente, se añaden los macronutrientes, se vuelve a mezclar, y se incorporan los micronutrientes, finalmente, el sustrato se deberá volver a mezclar.

No es recomendable incorporar abonos de liberación lenta ni urea, si el sustrato ha de almacenarse durante un tiempo prolongado. Durante el período de almacenamiento, estos abonos pueden liberar nutrientes o modificar el pH, pudiendo llegar a crear unas condiciones que se convierten en tóxicas para la planta (fitotoxicidad) (Abad y Noguera,

1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Evaluación Agronómica de los Sustratos de Cultivo

Las características más importantes de un material, para ser utilizado como sustrato o componente de los sustratos de cultivo, se clasifican en: físicas, químicas y biológicas.

La caracterización física permite conocer el reparto de las distintas fases (material sólido, aire y agua) en el entorno radicular y con ello, se pueden establecer los criterios para la aplicación del agua mediante la técnica del riego. La caracterización química estudia los parámetros relacionados con la disponibilidad y el movimiento de los nutrientes en el sustrato, lo que permite establecer los programas de fertilización. La caracterización biológica examina la estabilidad biológica del material, así como también la presencia de componentes con propiedades estimuladoras del crecimiento vegetal, fitotóxicas, etc.

Por último, la caracterización o evaluación agronómica estudia la respuesta de la planta a un sustrato de un cultivo determinado, teniendo en cuenta: 1) Las características específicas del material vegetal utilizado, 2) Las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato, y 3) El manejo de dicho sustrato (contenedor, riego y fertilización). De esta forma, se integra el conjunto sustrato-manejo en la respuesta final de la planta. Se puede decir que los métodos utilizados en la caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sustratos son de tipo analítico, mientras que en el caso de la caracterización agronómica, el procedimiento es de síntesis.

La Caracterización Física y Química de los Sustratos

Las propiedades de los materiales son factores dominantes, que determinan el manejo posterior del sustrato. La metodología analítica para la determinación de las propiedades de los sustratos de cultivo y su discusión, han sido abordadas por otros autores (Ansorena, 1994; Cadahía y Eymar, 1993; Martínez, 1993).

Valores óptimos recomendados para un sustrato

A nivel mundial se ha generado una serie de valores óptimos de algunas de las características de los sustratos; sin embargo, Abad *et al.*, (1993) es el que ha dado un mayor número de parámetros óptimos. En el cuadro 3, 4 y 5, se presentan los valores óptimos para sustratos de cultivo recomendados por algunos autores.

Cuadro 3. Niveles óptimos para las características físicas de sustratos de cultivo de acuerdo a diferentes autores.

| Parámetro | De Boodt y Verdonck (1972) | Bunt (1988) | Handreck Black (1991) | Abad <i>et al.</i> (1993) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Tamaño en partícula (mm) | | | | 0.25-5.0 |
| Densidad aparente, g cm ⁻³ | | | | <0.4 |
| Densidad real, g cm ⁻³ | | | | 1.45-2.65 |
| Espacio poroso total (%) | 85 | 75-85 | 60-80 | >85 |
| Capacidad de aeración (%) | 20-30 | 10-20 | 07-50 | 10-30 |
| Agua fácilmente disponible (%) | 20-30 | | >20 | 20-30 |
| Agua de reserva (%) | 4-10 | | | 4-10 |
| Agua total disponible (%) | | >30 | | 24-40 |
| Capacidad de retención de agua (%) | | | | 550-770 |

Es importante resaltar, especialmente para las características químicas (debido a las diferentes proporciones de sustrato: agua empleada y usando el método de saturación), que al momento de comparar o interpretar los resultados con los niveles obtenidos, se debe definir el método por el que fue analizado, de no ser así los niveles no pueden ser comparados.

Si bien dichos niveles pueden variar en función de las exigencias de la especie vegetal, el medio ambiente, las prácticas de manejo, etc, los intervalos que se presentan en las mencionadas tablas constituyen un excelente punto de referencia a la hora de llevar a cabo la evaluación agronómica de los sustratos (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Cuadro 4. Niveles óptimos para las características químicas de sustratos de cultivo.

| Parámetro | Valor o Rango |
|--|----------------------|
| pH | 5.2-6.3 |
| Conductividad eléctrica(dS m ⁻¹) como indicador de salinidad | 0.75-1.99 |
| Capacidad de Intercambio catiónico (meq 100 g ⁻¹) | |
| Fertirrigación permanente | Nula o muy Baja |
| Fertirrigación intermitente | >20 |
| Cenizas (%) | <20 |
| Materia orgánica total (%) | >80 |
| Relación Carbono Nitrógeno (C/N) | 20-40 |
| Nutrientes asimilables (ppm, extracto de saturación) | |
| Nitratos (N-NO ₃) | 100-199 |
| Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄) | 0-20 |
| Fósforo | 6-10 |
| Potasio | 150-249 |
| Calcio | >200 |
| Magnesio | >70 |
| Fierro | 0.3-3.0 |
| Manganeso | 0.02-3.0 |
| Molibdeno | 0.01-0.1 |
| Zinc | 0.3-3.0 |
| Cobre | 0.001-0.5 |
| Boro | 0.05-0.5 |

Fuente: Abad *et al.* (1993)

Cuadro 5. Valor límite (ppm) de concentración de los metales pesados para los materiales utilizados como sustratos de cultivo.

| Parámetro | Rango |
|------------------|--------------|
| Zinc | 1,000 |
| Cobre | 100 |
| Plomo | 600 |
| Cromo | 150 |
| Níquel | 50 |
| Cobalto | 50 |
| Mercurio | 5 |
| Cadmio | 5 |

Fuente: Abad *et al.* (1993)

Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son de gran importancia. Una vez que el sustrato esté en el contenedor, y la planta esté creciendo en él, no es posible modificar las características físicas básicas de dicho sustrato. Esto contrasta con las características químicas de los sustratos, que pueden ser modificadas mediante técnicas de cultivo apropiadas, realizadas por el propio agricultor. La caracterización física estudia la distribución volumétrica del material sólido, el agua y el aire, así como su variación en función del potencial matricial. Los métodos para la determinación de las relaciones aire-agua de los sustratos difieren de los métodos utilizados en los suelos con idéntico fin. Las curvas de retención de agua de los suelos agrícolas se miden usualmente en un amplio intervalo de succiones (0-1.5 MPa). Por el contrario, las plantas cultivadas en contenedores no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, debido al volumen limitado del sustrato en el que crecen y se desarrollan. Es por esto que, en la determinación de las curvas de liberación de agua de los sustratos, se aplica un intervalo de succiones mucho más estrecho (0-100 cm de columna de agua). La metodología analítica más ampliamente difundida para ello es la desarrollada por De' Boodt *et al.* (1974) (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Granulometría (tamaño de partícula)

La gran mayoría de los sustratos están constituidos por una mezcla de partículas de tamaños diferentes. Las propiedades físicas de estos sustratos varían en función de la distribución del tamaño de estas partículas, por lo que la caracterización granulométrica de los materiales es de vital importancia (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005). El tamaño de las partículas incide directamente sobre el tamaño de los poros, lo que a su vez determina el balance entre el contenido de agua y aire del sustrato, a cualquier nivel de humedad (Raviv *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad

y Noguera, 1997; Bunt, 1998; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Los materiales de textura gruesa, como tamaño de partículas superior a 0.9 mm retienen cantidades muy reducidas de agua y presentan muy buena aireación. Por el contrario, los materiales finos, con partículas inferiores a 0.2 mm retienen grandes cantidades de agua, la cual es fácilmente disponible para la planta y por lo regular tienen aireación deficiente. En cuanto a este parámetro, es recomendable que el sustrato tenga una mezcla de partículas que van de 0.2 a 2.5 mm de diámetro, ya que en este rango se retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta además, una adecuada aireación (Raviv *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

El mejor sustrato se define como aquel material de textura gruesa a media, con una distribución del tamaño de los poros entre 30 y 300 micras, equivalentes a una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 y 2.5 mm, capaz de retener suficiente agua fácilmente disponible y de poseer además, un adecuado contenido de aire (Raviv *et al.*, 1986; Puustjärvi, 1983; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

El tamaño de las partículas del sustrato así como las dimensiones de los poros que éstas determinan, son dos características que van a condicionar el desarrollo de las plantas, puesto que la aireación radical y la retención de agua van a estar en función del tamaño de la partícula (Abad, 1995).

En la práctica esta determinación se expresa como el índice de grosor (IG) definiéndose como el porcentaje del material con un diámetro superior a 1 mm (Richards *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Por otra parte Handreck (1983) estudio de fracciones granulométricas en mezclas de corteza de pino, concluyendo que la fracción menor de 0.5 mm de diámetro presentan la máxima influencia sobre la porosidad y la retención de agua. Por su parte Noguera *et al.*, (1997) indica que la máxima influencia sobre la retención de agua del sustrato de fibra de coco ocurre por debajo de 0.75 mm de diámetro y no de 1 mm como fue considerado por Richards *et al.*, 1986, para establecer el concepto de índice de grosor. Las

propiedades físicas de los sustratos dependen en gran medida de la distribución de tamaños de partícula, así como por ejemplo, una mezcla de tamaños finos y gruesos propicia aumentos en la capacidad de retención del agua, pues las partículas pequeñas ocupan los sitios vacíos que quedan entre las partículas grandes, favoreciendo la capacidad de retención de agua (Ansorena, 1994).

Es importante destacar que la variabilidad que ocurre con la granulometría de los sustratos afecta todas sus propiedades físicas, Noguera *et al.*, 1997, en un estudio donde evaluaron la variabilidad de la fibra de coco, reporta que una fibra de coco con un IG de 22, es decir que el 22% del peso de la retención de agua (CRA) de 64%, mientras que otra muestra con un IG de 43, presenta una CRA de 42% y una tercera muestra que reporto un IG de 62 presento una CRA de solo 25%.

Densidad aparente

Se define como la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del sustrato húmedo, es decir incluyendo el espacio poroso entre las partículas (Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005). La densidad aparente juega un papel importante, ya que los sustratos y los contenedores se transportan durante su manejo y manipulación, consecuentemente, su masa debe ser tomada en cuenta (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Abad y Noguera, 2000; Urrestarazu, 2009; Cadahia, 2005).

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas, debido a la influencia que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate. Por ejemplo, para suelos arenosos una densidad aparente de 1.759 kg m^{-3} limita el crecimiento de las raíces de girasol, mientras que en suelos arcillosos, ese valor crítico es de 1.460 a 1630 kg m^{-3} , para la misma especie (Jones, 1983).

La densidad aparente juega un papel vital sobre la porosidad, ya que junto con la densidad real del material se usan como parámetros para calcular esta variable. Este

parámetro también juega un papel en los costos de transporte y manejo del sustrato, ya que un material de muy baja densidad cuesta mucho su transporte y debe ser compactado hasta el punto en que pueda recuperar sus características originales. Así puede reducir parcialmente el costo de transporte de estos materiales. La densidad aparente de los sustratos que se usan en la agricultura van de 0.03 hasta 0.75 g cm⁻³ (Handreck y Black, 1991; Abad y Noguera, 2000), las más bajas densidades son para los sustratos orgánicos. Los sustratos de muy baja densidad no tiene la resistencia requerida para soportar una planta adulta, pero como en el invernadero de las plantas con tutores, pues esto no tiene mucha importancia, pero cuando se trata de plantas de maceta que se pueden acamar por su peso, es importante tomar esto en cuenta y se recomienda tener densidades aparente superiores a 0.5 g cm⁻³.

Densidad real

La densidad real (DR) es la relación entre la masa del material sólido seco (a 105° C) y el volumen real ocupado por las partículas que lo conforman, excluyendo el espacio poroso entre las misma. La densidad real de los materiales inorgánicos se determinan en forma directa por picnométricos (Ansorena, 1994), mientras que el caso de los materiales orgánicos, esta se estima indirectamente a partir de los contenidos de materia orgánica y su contenido de cenizas (De Bood *et al.*, 1974), de acuerdo a lo siguiente ecuación:

$$Dr = 100 / ((\%MO/1.45) + (\%MM/2.65))$$

Donde, MO es materia orgánica y MM es material mineral o ceniza. Por ello en forma muy general, la densidad real de los materiales minerales se podría considerar alrededor de 2.65 y de los orgánicos alrededor de 1.5 g cm⁻³.

Espacio poroso total

El espacio poroso total, se refiere al volumen total del sustrato de cultivo no ocupado por partículas orgánicas ni minerales, estos espacios se clasifican en porosidad externa e interna, respectivamente. Los espacios porosos que se forman entre las partículas originan la porosidad externa. El nivel óptimo, se sitúa por encima de 85% del volumen

de sustrato (Martínez, 1993; Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 2000; Urrestarazu, 2000).

El total de poros existentes en un sustrato se divide en: 1) Poros “capilares”, de pequeño tamaño (<30mm), que son los que retienen el agua, y 2) Poros no capilares o “macroporos”, de mayor tamaño (>30 mm), que son los que se vacían después que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación. Sin embargo, los poros no drenan completamente y una fina película de agua es retenida alrededor de las partículas del sustrato. Esta película de agua disminuye en espesor a medida que el medio se seca (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988; Abad, 1997; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009).

El espacio poroso, se refiere a la proporción del volumen del sustrato que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar libremente, (Abad *et al.*, 1993).

Por otra parte, la porosidad puede ser intraparticular, cuando se refiere a los poros situados en el interior de las partículas del sustrato, o interparticular, cuando está constituida por los poros existentes entre las diferentes partículas. En adición, si el material presenta porosidad intraparticular, el comportamiento de los fluidos (fase acuosa y fase gaseosa) será distinto, según que esta porosidad sea abierta o cerrada (ocluida). En el caso de porosidad cerrada, no existe comunicación posible entre los poros del interior de las partículas y los que están en el exterior, entre dichas partículas. En consecuencia, aquellos poros internos no influirán sobre la distribución del agua y del aire en el sustrato, siendo su único efecto el proporcionar cierta ligereza a dicho sustrato. Si, por el contrario, la porosidad es abierta, el agua puede circular por el interior de las partículas, pudiendo participar, en consecuencia, en la nutrición hídrica de la planta.

Consecuentemente, una alta porosidad total no indica por sí misma una buena textura y/o estructura del sustrato, sino que es necesario conocer la relación entre la fracción de la porosidad que proporciona el agua y aquella que proporciona la aireación. La porosidad no mantiene un valor constante durante el proceso de cultivo y se puede deber a la compactación del sustrato, a la evolución biológica de los materiales orgánicos o a la separación de las partículas finas arrastradas por el agua de riego a la base del

contenedor (Lemaire *et al.*, 1989; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Capacidad de aireación

La capacidad de aireación, es el porcentaje de volumen del sustrato que contiene aire después de que dicho medio ha sido saturado con agua, y dejado drenar usualmente a 10 cm de tensión. El nivel óptimo de la capacidad de aireación oscila entre el 20 y el 30% en volumen (Abad y Noguera, 1991; Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Este parámetro es de gran importancia, pues es un medio tan dinámico como es el sustrato y con un cultivo trabajando a la máxima capacidad, las raíces requieren de un alto suministro de oxígeno para mantener su actividad metabólica y de crecimiento. Por ello un déficit de oxígeno, aun cuando sea temporal, puede reducir el crecimiento de las raíces, las absorción de agua y nutrientes y afectar el desempeño del cultivo. Sin embargo, condiciones de falta de agua provocan de igual manera un pobre desempeño del cultivo y condiciones de falta y exceso de agua en forma intermitente, suelen provocar la muerte de algunas raíces (Raviv *et al.*, 1986, Bunt, 1988; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

El oxígeno es también requerido por los microorganismos y, por tanto, las plantas cultivadas en sustratos orgánicos, con una elevada población microbiana, requieren el doble o más de oxígeno que las plantas cultivadas en suelos minerales, sin abundante materia orgánica.

El oxígeno es transferido hacia las raíces (mediante difusión) a través de la lámina de agua que las rodea. La velocidad de difusión del oxígeno en el agua es 10 veces más pequeña que en el aire. Así pues, el espesor de la lámina de agua alrededor de las raíces es de marcada importancia. Si la textura y la estructura del sustrato son tales que la mayoría de los poros permanecen llenos de agua después del riego, el suministro de oxígeno se verá reducido de modo severo, el CO₂ se acumulará, se producirá una

liberación de etileno, etc., todo lo cual resultará en una inhibición del crecimiento y, a veces, en el marchitamiento de la planta (Raviv *et al.*, 1986; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005). Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

La distribución del tamaño de los poros es el factor clave en el estado hídrico y aéreo de los sustratos. La altura o profundidad del contenedor tiene un efecto marcado sobre el contenido en aire del sustrato. Cuanto más alto es el contenedor, mayor es el contenido en aire. Cuando se usan contenedores pequeños o poco profundos, son preferibles los sustratos de textura gruesa, que mantienen una aireación adecuada (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2004; Cadahia, 2005). La capacidad de aireación de un sustrato es modificable con el manejo del riego. Riegos de corta duración y frecuentes van a mantener el sustrato en su máxima capacidad de retención de agua, por lo que la capacidad de aireación no se ve incrementada, pero riegos de mayor duración y más espaciados, van a provocar que el espacio poroso sea ocupado por aire, incrementando así, la capacidad de aireación del sustrato (García, 1999; Castellanos, 2009).

Agua fácilmente disponible

Es la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión matricial, y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua. Se requiere una tensión mínima de 10 cm (equivalente a 10 cm de altura del contenedor) para obtener un contenido mínimo de aire. El siguiente punto de importancia se refiere a las condiciones de humedad que no inhibirán el crecimiento vegetal. Muchos experimentos han demostrado que una tensión de agua superior a 50 cm puede afectar desfavorablemente al crecimiento y al desarrollo de las plantas. El valor óptimo para el agua fácilmente disponible oscila entre el 20% y el 30% del volumen (Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Los poros que se mantienen llenos de agua después del drenaje del sustrato son los de menor tamaño. Es necesario, entonces, distinguir entre: 1) El agua retenida por el

sustrato y que es accesible para la planta, y 2) El agua fuertemente retenida por el sustrato y que no es utilizable por la planta, ya que la succión aplicada por las raíces no supera la fuerza con la que el agua es retenida por las partículas del sustrato. Por lo tanto, y en relación con los sustratos, lo que interesa es la capacidad de retención de agua fácilmente disponible y no la capacidad de retención total de agua (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Un sustrato puede tener una baja capacidad de retención de agua fácilmente disponible porque: 1) Su porosidad total es baja; 2) Los poros son grandes y gran parte del agua se pierde por gravedad; 3) Los poros son muy pequeños y la planta es incapaz de extraer una parte importante del agua antes de marchitarse, y 4) Una combinación de las situaciones anteriores. (Bunt, 1988; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2009)

Agua de reserva

Es la cantidad de agua (% en volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua. El nivel óptimo se sitúa entre el 4% y el 10% en volumen (Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2004; Cadahia, 2009).

En el caso de las plantas hortícolas, se pueden alcanzar tensiones de hasta 300 cm de columna de agua sin afectar de modo significativo al crecimiento vegetal. Se define el agua total disponible de un sustrato como la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva. Su valor óptimo varía entre el 24 % y el 40 % del volumen del sustrato (Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005). El agua difícilmente disponible es el volumen de agua retenida por el sustrato a la tensión de 100 cm de columna de agua, esta agua difícilmente disponible puede ser utilizada por la planta en condiciones de estrés hídrico (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Capacidad de retención de agua

En los sustratos se manejan tensiones de 0 a 10 kPa o centibares, en el riego por goteo regularmente se maneja una tensión de humedad de 0 a 30 kPa y en el riego por gravedad se maneja en el rango de 0 a 1000 kPa o alrededor de 10 atmosferas, que es cuando el suelo es bastante seco y muy cercano a que se le proporcione un riego de auxilio. Esta gran variación que se aprecia en los niveles de retención de agua entre el suelo y los sustratos, así como el tamaño del contenedor usado, es lo que determina la frecuencia de riego en estos sistemas. Este gran variación que se aprecia en los niveles de retención de agua entre el suelo y los sustratos, así como el tamaño del contenedor usado, es lo que determina la frecuencia de riego en estos sistemas. Por aparejado a los altos potenciales de rendimiento y problemas que se resuelven con los sustratos estos sistemas exigen una gran precisión en cuanto al suministro de agua y tiempos muy cortos entre riegos. Es por ello que los sistemas hidropónicos requieren un sistema de riego automático y una planta de emergencia en caso de que haya cortes en el suministro de energía eléctrica, pues un día sin riego sería fatal para el cultivo, cuando el tamaño de los contenedores es pequeño (Castellanos, 2009).

Propiedades Químicas

Las propiedades químicas caracterizan las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del sustrato: reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (química), reacciones de intercambio de iones (físico-química) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímica). Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen mayormente a la química de los sustratos, debido a la formación y presencia de las sustancias húmicas, el producto final más importante de la descomposición de la materia orgánica (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2009).

pH

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma asimilable. No obstante, el crecimiento y el desarrollo de las plantas se ven

reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilación de los nutrientes. La capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido. Nivel óptimo en el cultivo sin suelo de hortalizas: pH (disolución del sustrato) = 5.5 – 6.8 (Abad y Noguera, 1991; Escudero, 1993; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

La asimilación de los elementos nutritivos es afectada de modo marcado por el pH. Con pH de 5.0 a 6.5, la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilación. Por debajo de pH = 5.0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, B, etc., mientras que por encima de pH = 6.5 puede disminuir la asimilación de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu. Los óxidos metálicos (de Fe, Mn, Cu, Zn, etc.) se hacen más solubles al bajar el pH (por debajo de 5.0), pudiendo llegar a resultar fitotóxicos. Los materiales orgánicos poseen mayor capacidad tampón (en un amplio intervalo de pH) que los sustratos minerales. Si el pH de un sustrato orgánico está fuera del intervalo recomendado, se debería llevar a cabo el ajuste de dicho pH (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Salinidad (Conductividad eléctrica)

Se refiere a la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. Las causas que originan un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar éste colocado en el contenedor, son: 1) La presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se degradan para producir nitratos o bien, cuando liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas; 2) Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación, y 3) Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes. Todas estas

situaciones pueden ser prevenidas en gran parte, conociendo las cantidades de fertilizantes requeridas por el cultivo y evitando las aplicaciones excesivas de abonos. (Bunt, 1988; Lemaire *et al.*, 1989; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Otras medidas para atenuar los efectos de la salinidad, son: 1) Mantener el sustrato de cultivo permanentemente húmedo; 2) No aplicar fertilizantes en polvo ni soluciones fertilizantes con elevada fuerza iónica cuando el sustrato esté seco; y 3) Reducir el estrés de las plantas mediante sombreado e incremento de la humedad relativa ambiental. La respuesta de las plantas a la salinidad depende de la edad de éstas, de las condiciones ambientales, de las prácticas de manejo del cultivo y de las características de la especie (ASCE, 1990; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Las fases de germinación y crecimiento inicial son más sensibles a las sales que las fases de crecimiento posterior y desarrollo. Las plantas cultivadas en condiciones ambientales frescas y húmedas, o durante las épocas no calurosas del año, son más tolerantes a la salinidad que aquellas cultivadas durante períodos más cálidos, o con baja humedad relativa y temperatura y radiación elevadas.

En la práctica del riego en el cultivo hidropónico de hortalizas, el agua se maneja de manera excedentaria con objeto de evitar, por lavado, la acumulación de sales. Este exceso varía en función de la época del año, el estado de desarrollo de la planta y la calidad del agua de riego. Por último, ejemplos de especies con distinto grado de tolerancia a las sales, son: 1) Muy sensibles: Azalea, Camellia, fresa, Gardenia, Rosa, etc.; 2) Sensibles: Aphelandra, Erica, Ficus benjamina, lechuga, pimiento, etc.; 3) Tolerantes: Clavel, crisantemo, Dieffenbachja, melón, pepino, tomate, etc.; y 4) Muy tolerantes: Acacia, Atriplex, Yucca, etcetera (Bunt, 1988; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Handreck y Black, 1991; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

En el cultivo de hortalizas sin suelo, el nivel óptimo de la salinidad, determinada en la solución del sustrato, oscila entre 3 dS m^{-1} y 5 dS m^{-1} (Escudero, 1993; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Cuadro 6. Interpretación de los niveles de la salinidad de un sustrato de cultivo, expresada como la conductividad eléctrica del extracto de saturación.

| Extracto de saturación (dS m ⁻¹) | Interpretación |
|---|---|
| < 0.74 | Muy baja |
| 0.75-1.99 | Adecuada para plántulas y sustratos ricos en materia orgánica. Demasiado baja si el sustrato es pobre en materia orgánica |
| 2.00-3.49 | Satisfactoria para la mayoría de las plantas. Reducción del crecimiento de algunas especies sensibles |
| 3.5-5.0 | Ligeramente elevada para la mayoría de las plantas. Adecuada únicamente para especies vigorosas |
| > 5.0 | Reducción del crecimiento, plantas enanas, marchitamiento y quemadura de los bordes de la hoja |

Fuente: Bunt, 1988; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005.

Capacidad de intercambio catiónico

Se define como la suma de los cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Dichos cationes quedan así retenidos frente al efecto lixivante del agua y están disponibles para la planta.

El valor óptimo de la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de la fertirrigación (Lemaire *et al.*, 1989). Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de adsorción de los cationes no constituye ninguna ventaja, siendo recomendable en este caso la utilización de materiales inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será conveniente la utilización de sustratos con moderada a elevada capacidad de intercambio catiónico, en todo caso superior a 20 meq 100 g⁻¹ (Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

Los materiales orgánicos poseen una elevada capacidad de intercambio catiónico y una alta capacidad tampón frente a cambios rápidos en la disponibilidad de los nutrientes y en el pH. Una capacidad de intercambio catiónico elevada supone un depósito de reserva para los nutrientes, mientras que los materiales con baja capacidad de cambio, como la mayoría de los sustratos minerales, retienen cantidades reducidas de nutrientes y requieren una aplicación frecuente y regular de los fertilizantes. Por otra parte, se pueden prevenir los cambios rápidos en la acidez o la alcalinidad de los sustratos, usando materiales orgánicos en las mezclas de cultivo (Puustjärvi, 1994; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

La materia orgánica, especialmente las sustancias húmicas, contiene grupos funcionales cargados negativamente (carboxílico, fenólico, enólico, etc.), que son los responsables de la capacidad de los materiales orgánicos para retener los cationes en forma no lixiviable. Durante el proceso de intercambio catiónico, los iones orgánicos cargados negativamente son capaces de adsorber cationes (NH_4^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , etcétera) en proporciones variables, en función de la afinidad del catión por los centros de adsorción y de su concentración en la solución. La capacidad de los sustratos orgánicos para adsorber cationes metálicos depende del pH: cuanto más alto es el pH más elevada es la capacidad de intercambio catiónico. Ciertos sustratos minerales de naturaleza arcillosa (vermiculita) tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente, mediante sustituciones catiónicas o isomorfias en los cristales del mineral (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Algunos autores han indicado que los sustratos para el cultivo hidropónico de hortalizas deberían presentar una bajísima o nula capacidad de intercambio catiónico, es decir deberían ser químicamente inertes, con objeto de permitir un mejor control nutricional de las plantas (Martínez y García, 1993; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1996; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2004; Cadahia, 2005), o bien, de evitar problemas de salinización del sustrato (Lemaire *et al.*, 1989; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2004; Cadahia, 2005).

Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

La relación C/N se usa tradicionalmente como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y de su estabilidad. Los daños que aparecen sobre las plantas cultivadas en materiales orgánicos inmaduros, son debidos tanto a una inmovilización del nitrógeno como a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizosfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos, que descomponen los materiales orgánicos frescos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares. El oxígeno es también consumido por la población microbiana. Una relación C/N entre 20 y 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato, y es un índice de un material orgánico maduro y estable (Abad *et al.*, 1993; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Disponibilidad de nutrientes

La mayoría de los sustratos minerales no se descomponen química ni biológicamente y, desde un punto de vista práctico, se pueden considerar desprovistos de nutrientes. Por el contrario, los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre sí en el contenido en nutrientes asimilables. Así, algunos (turba *Sphagnum rubia*, mantillo de bosque, etc.) poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables, mientras que otros (composta) presentan niveles elevados, dependiendo dicho nivel del origen del compost y del proceso de compostaje. En cualquier caso, y para un crecimiento óptimo de las plantas, deberían añadirse siempre nutrientes adicionales como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo (fertilización de cobertera) (Raviv *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2004; Cadahia, 2005).

Se alcanza frecuentemente un crecimiento óptimo de las plantas sobre sustratos orgánicos, cuando una aplicación moderada de abonos de liberación lenta o progresiva es complementada con una fertilización a través del riego (fertirrigación) (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Propiedades biológicas

Un diagnóstico detallado de las propiedades de los sustratos de cultivo no debe finalizar sin el estudio de sus propiedades biológicas.

Velocidad de descomposición

Todos los sustratos orgánicos incluso los más estables, son susceptibles de degradación biológica viéndose favorecida esta situación por las condiciones ambientales que prevalecen en los invernaderos. La población microbiana es la responsable de dicho proceso, pudiendo resultar finalmente su actividad biológica en deficiencias de oxígeno y de nitrógeno, liberación de sustancias fitotóxicas y contracción del sustrato. Así pues, la descomposición de la materia orgánica en los medios de cultivo considerada de modo global, es desfavorable desde el punto de vista hortícola, debiéndose tomar precauciones con objeto de minimizar sus efectos sobre las plantas. La disponibilidad de compuestos biodegradables (carbohidratos, ácidos grasos y proteínas) determina la velocidad de descomposición. Por otra parte, las condiciones de cultivo deberían ser también consideradas: si el cultivo se prolonga durante largos períodos de tiempo, resulta recomendable el uso de materiales estables (turberas negras o cortezas de tamaño grueso), mientras que si las plantas son de crecimiento rápido, pueden prosperar en materiales menos resistentes a la degradación (Raviv *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Efectos de los productos de descomposición

Muchos de los efectos biológicos de los sustratos orgánicos son directamente atribuibles a los ácidos húmicos y fúlvicos, que son los productos finales de la degradación de la lignina y la hemicelulosa. Una gran variedad de funciones vegetales, tanto a nivel de célula como de órgano, son afectadas positivamente por los ácidos húmicos y fúlvicos. Las sustancias húmicas actúan, asimismo, como transportadoras de los micronutrientes para las plantas (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Actividad reguladora del crecimiento

Es conocida la existencia de actividad auxínica (que controla el crecimiento celular y la iniciación de raíces) en los extractos de muchos materiales orgánicos utilizados en los medios de cultivo de las plantas. Ya que dicha actividad hormonal no ha podido ser relacionada directamente con las sustancias húmicas, se ha atribuido a un efecto sinérgico entre las auxinas (bien producidas naturalmente por la planta, bien aplicadas exógenamente) y los compuestos fenólicos que están presentes en dichos materiales como consecuencia de la degradación de los compuestos orgánicos, especialmente lignina (Raviv *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Actividad enzimática

Se libera la actividad enzimática después de la descomposición de la materia orgánica. Se han identificado diferentes actividades enzimáticas (celulasas, proteasas, ureasa, etc.) en los sustratos orgánicos, todas ellas, con efectos muy positivos sobre la nutrición vegetal (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Bioensayos de Germinación para Evaluar la Calidad de los Sustratos de Cultivo

Estos ensayos biológicos son de gran utilidad en la evaluación agronómica de los sustratos, ya que existe una estrecha relación entre los resultados obtenidos y la potencialidad hortícola de los mencionados sustratos de cultivo. La utilización de materiales inadecuados, con propiedades físico-químicas desfavorables para el crecimiento vegetal, resulta en la inhibición de la germinación de las semillas y la reducción del crecimiento de la radícula. Un buen bioensayo debe reunir las siguientes características: a) ser simple, sencillo y fácil de manipular con una instrumentación elemental; b) ser repetible, reproducible; c) ser rápido; y, d) mostrar una sensibilidad elevada. El modo de operar de estos bioensayos de germinación consiste básicamente en obtener un extracto acuoso del material en estudio, incubar las semillas con dicho extracto, y evaluar el proceso de la germinación, controlando diferentes parámetros

(número de semillas germinadas, longitud de la radícula, etcétera (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Nuevos Materiales Utilizados como Sustratos o Componentes de los Sustratos en el Cultivo Sin Suelo

Entre los diferentes materiales empleados en la formulación de los medios de cultivo, las turbas han sido los más importantes y más ampliamente utilizados durante muchos años. Sin embargo, se ha emprendido una activa búsqueda de materiales alternativos y/o sustitutivos de estas turbas en numerosas partes del mundo, siendo sus principales razones: 1) El elevado precio de la turba hortícola de calidad, particularmente en países sin recursos locales de turba, y 2) Su cuestionable disponibilidad futura por motivos ecológicos, ya que las reservas de turba no son renovables e intervienen, además, como potentes centros sumidero del CO₂ atmosférico. Esto ha conducido a la utilización de materiales orgánicos alternativos y/o sustitutivos de las turbas, particularmente autóctonos y con una disponibilidad local. En este contexto, y con objeto de proceder a la transformación ecológica y al reciclado de los materiales de desecho, numerosos residuos y subproductos agrícolas y agropecuarios, forestales, industriales, urbanos, etc., están siendo utilizados con éxito como componentes de los sustratos de cultivo. Como han demostrado múltiples investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años, el sector profesional de los sustratos de cultivo es capaz de aprovechar muchos materiales que son residuos o subproductos de nulo o escaso valor económico, facilitando así una demanda creciente de materiales de desecho y revalorizando, a la vez, dichos productos. Dentro de estos productos que se han evaluado en México son principalmente *bioensayos de germinación* en plántula pero ninguna en referencia a un establecimiento de un cultivo. Dentro de los sustratos locales podemos mencionar los siguientes:

Bagazo de caña (*Saccharum officinarum*)

Durante el año 2009 se reportó la molienda de 40'944,741 toneladas de caña en México, provenientes de 663,057 hectáreas, lo que produjo un total de 4'962,495

toneladas de azúcar comercializable, así como 59,651 toneladas de cachaza como residuo del proceso de extracción (SAGARPA, 2009).

El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Se obtiene como subproducto o residuo en los centrales azucareros después de la extracción del jugo de caña de azúcar y representa aproximadamente entre el 25 y 40 % del total de materia procesada, dependiendo del contenido de fibra de la caña y la eficiencia en la extracción del jugo. (MPC, 2001; Pernalet *et al.*, 2008). Está formado por un conjunto de partículas de diferentes tamaños cuyo promedio oscila alrededor de 2 a 2.5mm el resto consta de sólidos solubles e insolubles. Es utilizado normalmente como combustible en las calderas que le dan energía a los ingenios (Leeson y Summers, 2000).

Su composición varía con las características agroecológicas de la zona, cosecha, eficiencia de fábrica, método de clarificación empleado, entre otros factores. La cachaza representa un problema en los ingenios por las grandes áreas que se requieren para su almacenamiento, además que genera mal olor y en muchas ocasiones, es un foco de infección y un riesgo para la conservación del ambiente (Arreola *et al.*, 2004). Este residuo orgánico agroindustrial consiste en dos fracciones principales: una fracción de fácil descomposición pero pobre en nitrógeno y carbono; y una segunda fracción concentrada en nitrógeno pero mezclada con material orgánico recalcitrante.

Es generalmente rica en fósforo, calcio y nitrógeno, y pobre en potasio debido a la gran solubilidad de éste elemento, el cual se pierde en los jugos y en el separado de la melaza. Los altos contenidos de nitrógeno se deben a la alta cantidad de materia orgánica. Su contenido de micronutrientes se deriva parcialmente de las partículas que se adhieren a la caña; también es fuente importante de magnesio y zinc (Torres *et al.*, 2005). Presenta un alto contenido de humedad oscilando entre un 70 y un 80%; el pH es variable (de 7 a 8) y depende del origen del material, así como de su proceso de obtención; la conductividad eléctrica que presenta es baja (0.8 dS m^{-1}); su contenido de materia orgánica es alto (de 30 a 70%); la relación C:N oscila de 12 a 30 (Arreola *et al.*, 2004; Torres *et al.*, 2005; Torres *et al.*, 2007).

Sus características nutrimentales varían en función del proceso de producción industrial del azúcar y la zona geográfica. La cachaza genera calor intenso (65°C)

durante su compostaje, un olor de fuerte fermentación y toma mucho tiempo para su descomposición natural. Contiene una significativa fracción de materia orgánica y es un material rico en proteínas y nitrógeno (Sangwan *et al.*, 2008). Este subproducto ha sido usado como fuente de energía, pero también como fuente de nutrientes y como enmienda de suelos (Rasul, 2007). Fernández *et al.*, (2006) encontraron en un experimento de germinación de semilla de tomate que el tratamiento con la mayor posibilidad de sustituir el uso de turba (peat moss), era la compost de cachaza y aserrín de coco en proporción 2:1; pero en el estudio solamente se cubre la parte de germinación de semillas hasta 10 días posteriores a la siembra, sin tocar aspectos relacionados con la caracterización física y química de sustratos o la calidad de plántula. Elsayed *et al.* (2008) probaron el efecto de la cachaza en la germinación de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), maíz (*Zea mays*), cacahuete (*Arachis hypogaea*) y ajonjolí (*Sesamum indicum*) en proporciones de 1:1, 3:1, 1:1, 1:3 y 0:1 (cachaza: suelo), encontrando que la cachaza no mostro efectos adversos en la germinación y obtuvo estadísticamente el mayor porcentaje de germinación. Las mezclas de vermicompost con cachaza en diferentes proporciones, así como mezclas de vermicompost de cachaza y turba en proporciones donde la turba no era mayor del 25%, presentaron una germinación en un periodo de 14 días mayor que aquellas mezclas a base de vermicompost y turba. También observaron que las plántulas con mayor calidad fueron producidas en sustratos a base de vermicompost, cascarilla de arroz y cachaza (en proporción 2:1:1 respectivamente), además observaron que la mezcla de sustratos con una proporción mayor del 50% de vermicompost producían un desbalance entre la altura y el desarrollo foliar; pero en el estudio no se hacen determinaciones a los sustratos de carácter físico, químico o biológico (Peña *et al.*, 2007).

Paxtle (*Tillandsia recurvata*)

Es una planta epífita que gradualmente ha invadido las ramas de los árboles de mezquite en zonas áridas y semiáridas hasta llegar en muchos casos a secarlos. Los bosques de mezquite tienen una amplia distribución en San Luis Potosí (340,000 has) y tiene una función muy importante dentro de estos ecosistemas, ya que sirve como fuente de leña, madera, alimento y refugio a fauna silvestre, además de ser una especie

melífera, el paxtle ocasiona un serio problema ya que los arboles al ser cubiertos por esta planta dejan de fotosintetizar y mueren, también es de consistencia fibrosa. Lo cual ha merecido un interés particular de estudio.

Bagazo de maguey (*Agave salmiana*)

Sedano (1998) reporta que el bagazo no es un problema grave de contaminación, sin embargo propone buscar nuevas alternativas para el manejo, tratamiento y aplicación del mismo. En este sentido, los usos y aplicaciones del bagazo de maguey han sido como combustible para calderas, como forraje para aves y ganado, en la fabricación de ladrillos y adobes, como relleno en muebles y colchones, y como composta.

Bagazo de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.)

Es un recurso fundamental en la economía de numerosas familias de las poblaciones áridas del altiplano mexicano, ya que por lo menos durante un tercio del año se explota para la obtención de la fibra denominada ixtle; la cual debido a sus características abrasivas y su alto índice de retención de agua (65%) se utiliza en las industrias de la fabricación de cepillos y de construcción, además en jarcería y cestería. La fibra se consigue por el tallado de la hoja, constituida por un 15 por ciento de fibra y un 85 por ciento de pulpa (Castillo *et al.*, 2005), en respecto a lechuguilla no hay datos de superficie pero igualmente representa una cantidad considerable en el estado de San Luis Potosí. Este cultivo, al ser procesado desecha una gran cantidad de fibra, la cual representa una cantidad considerable que puede ser utilizada y aprovechada como sustrato orgánico para la producción de hortalizas bajo invernadero, pero de los cuales se desconoce su comportamiento como sustrato.

Fibra de Coco (*Cocos nucifera*)

Este es un sustrato muy prometedor para la horticultura protegida en México, dado a su bajo costo, su facilidad de manejo, su sanidad y la excelente respuesta agronómica que ha mostrado en los cultivos en que se ha evaluado. En México, prácticamente no hay estudios formales sobre su caracterización detallada. Posadas (1999) en base a una

recopilación de trabajos de caracterización fisicoquímica de la fibra de coco indica que esta presenta una densidad media de 0.07 g cm^{-3} , con un rango de 0.05 a 0.08 g cm^{-3} ; una capacidad de retención de agua promedio de 54% con un rango que va de 45 a 68% ; una capacidad de aireación media de 46% , con un rango que va de 37 a 61% ; un porcentaje de agua fácilmente disponible de 20% con un rango que va de 15 a 28% ; un porcentaje de agua difícilmente disponible de 25% , con un rango que va de 18 a 34% ; y con un porcentaje de agua de reserva de 4.1% con un rango que va de 3 a 5.7% , y con un índice de grosor promedio de 32 , con un rango que va de 22 a 39 . La variación que se aprecia en el estudio de recopilación de datos de arriba se debe esencialmente a esta variación en el índice de grosor. En cuanto a las propiedades químicas de la fibra de coco, en condiciones vírgenes contiene una alta salinidad que puede ir de 4 a 7 dS m^{-1} en el extracto saturado.

Esta salinidad corresponde principalmente a cloruro de potasio y de sodio, pero con un lavado esta se elimina en el mismo saco de cultivo. Presenta una capacidad de intercambio catiónico de 60 a $117 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$. Es un material muy estable, pues puede durar hasta 3 años en explotación, solo haciendo la desinfección previa a cada cultivo, como en el caso de la lana de roca. La fibra de coco se comercializa en México en varios sitios, pero destaca la región de Colima, y en particular la región de Armería, donde se producen grandes cantidades de este sustrato. Esta se comercializa lavada, en sacos de cultivo de 1.2 m de largo por 30 cm de diámetro y a un precio de $\$ 16.00$ pesos por saco o boli de 30 L . Teniendo en cuenta que se usan $125,000 \text{ L ha}^{-1}$ de este sustrato, si se compra en esta presentación se requieren 4166 sacos, lo que representa un valor de $\$66,660$ pesos ha^{-1} , más $10,000$ pesos de transporte de Colima a Celaya, por tratarse de un material de muy baja densidad.

Esto significa un costo de este sustrato del orden de $\$ 7.73$ pesos m^{-2} de invernadero, un costo muy elevado, prácticamente igual al de la lana de roca, por lo que está no es la presentación más recomendable. Es más conveniente comprar la fibra de coco en pacas, las cuales vienen en presentaciones $68 \times 44 \times 38 \text{ cm}$ con un peso de 38 kg y una humedad de 30% y de $60 \times 45 \times 37 \text{ cm}$, con peso de 25 kg y una humedad del 34% , ambas presentaciones vienen compactadas $2:1$, similar al peat most (turba). Estas se

desempacan y se recupera su volumen original rindiendo 300 y 214 L paca⁻¹, respectivamente.

Con este material se llenan los sacos de cultivo que se mandan hacer con polietileno bicolor, negro por dentro y blanco por fuera. Si adquiere esta presentación, teniendo en cuenta que hay que comprar el saco, considerar el costo del llenado y empacado esta tiene un costo total aproximado de \$3.51 y \$3.89 pesos m⁻² de invernadero, respectivamente. Por otro lado se debe considerar que a estos se hace el lavado previo a la plantación mediante el uso de agua sola, este debe ser hasta que el lixiviado tenga una conductividad eléctrica menor a 2 dS m⁻¹. Es recomendable llenar los sacos de cultivo hasta un volumen de 30 L, pues con las raíces de la planta se expandirá el contenido del saco.

En general se usan de 3500 a 4000 sacos de cultivo por ha, dependiendo de la densidad de plantación, usando 5-6 plantas por saco. Se dan riegos de 3 a 4 minutos en cada ocasión y teniendo en cuenta que hay 6 goteros por saco de 6 plantas, entonces se están aplicando unos 800 cm³ por riego en cada saco. Los riegos de 3 minutos son para goteros de 3 L h⁻¹ y los de 4 minutos son para goteros de 2 L h⁻¹.

En un principio bastaran unos 2 riegos diarios, aunque en algunos casos se puede prescindir del riego durante varios días y se irán incrementando conforme se desarrolla el cultivo, hasta llegar a una demanda pico de 5 o 6 L m⁻² de invernadero por día en la época de máximo desarrollo durante la primavera en los meses más calientes y en la hora pico se darán riegos cada 20 minutos o menos. El indicador de la demanda de agua en volumen y frecuencia nos lo ira diciendo la charola de drenaje. En general la frecuencia de riego se planea para reponer agua cuando se haya consumido el 5 o 10% del agua fácilmente disponible. Así por ejemplo para una fibra de coco con un 20 % de agua fácilmente disponible y 4% de agua de reserva, se tendrá un valor de 0.24 L de agua por litro de sustrato. Si tenemos 30 L de capacidad en el saco de cultivo.

Entonces 0.24 x 30 7.2 litros de agua. El 10% de esta significa 720 cm³. Para dar un riego de 720 cm³ con 6 goteros de 2 L h⁻¹ por saco de cultivo, se requieren dar riegos de 3.6 minutos, a esto hay que agregar el factor de drenaje. Si el porcentaje de drenaje es de 30%, el tiempo de riego será de 4.7 minutos. Si se usan goteros de 3 L h⁻¹, entonces estamos hablando de 2.4 minutos para dar los 720 cm³ y 3.1 minutos para incluir el 30%

de drenaje. En la época de máximo calibre de los frutos, que es la mayor parte del cultivo, es recomendable usar el valor de 5% en lugar del 10%. Eso significa menor volumen de riego, pero con el doble de frecuencia, de esta manera el cultivo hace un menor esfuerzo para extraer el agua del sustrato (Posadas, 1999). La fibra de coco también se usa en contenedores o macetas de polietileno de alta densidad de forma rectangular en dimensiones de 70 x 15 x 14 cm, en donde se pueden colocar tres plantas. En general se usan contenedores de 5 L planta⁻¹, que es el mínimo necesario para tener un buen desempeño del cultivo. La altura máxima del contenedor con este sustrato es de alrededor de 14-16 cm para conseguir las óptimas condiciones en las relaciones de agua y aire. En México no se ha caracterizado la fibra de coco a un nivel de detalle.

Sin embargo se han realizado las pruebas más fundamentales desde el punto de vista físico. Una de estas pruebas se realizó en el Campo Experimental Bajío del INIFAP, preparando mezclas de polvo de coco con fibra corta y los resultados se presentan en él es notorio que a medida que se incrementa el contenido de polvo en la mezcla, se reduce la densidad aparente, y el espacio poroso total, y también se incrementa la retención de agua, pero se reduce la capacidad de aireación. En base a estos datos se podría concluir que la mejor combinación de las 5 estudiadas es aquella que contiene 75% de polvo con 25% de fibra corta, la cual nos permite tener un 72% de retención de agua y una capacidad de aireación de 30%. Situación que no ocurre con el 100% de polvo, pues se reduce drásticamente la capacidad de aireación y ya no se consigue un aumento importante en la capacidad de retención de agua (Castellanos, 2009).

Técnicas para el Mejoramiento de las Propiedades Físicas y Químicas del Sustrato

En aquellos casos en que las propiedades del material se desvíen significativamente de los valores estándar u óptimos, y las técnicas de manejo aplicables no llegasen a resultar en un comportamiento óptimo del sustrato, se debería proceder a la mejora de dichas propiedades, por lo cual hay varias correcciones que se pueden utilizar para el manejo de los sustratos dentro de las cuales destacan:

Compostaje

La utilización directa de muchos materiales orgánicos frescos, es decir sin tratar, presentan diferentes inconvenientes: fitotoxicidad (por sustancias orgánicas, por metales pesados, etc.), inmovilización del nitrógeno, deficiencia de oxígeno a nivel de las raíces, etc. Entre los diferentes métodos de adecuación de los materiales orgánicos para fines hortícolas destaca el compostaje, que permite su transformación en un material orgánico maduro y estable, denominado compost, el cual puede ser utilizado en Horticultura sin efectos negativos sobre la planta (Abad *et al.*, 1997; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Cadahia, 2005).

Lixiviación de sales

Si el material a utilizar como sustrato mostrase una salinidad inicial elevada, debida a la presencia de sales solubles en exceso, debería someterse a lixiviación controlada. La lixiviación con agua de calidad, aplicando un volumen aproximadamente igual a 1.5 o 2 veces la cantidad de agua retenida por el sustrato, corrige el problema de la salinidad (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Corrección del pH

Si el pH del material estuviera fuera del intervalo recomendado, debería llevarse a cabo la corrección de dicho pH. En el caso de los sustratos ácidos, se requiere la adición de cal, caliza, dolomita, etc., con objeto de provocar un incremento en el pH. El pH neutro o alcalino de los sustratos básicos puede reducirse mediante la adición de azufre u otros compuestos azufrados (sulfato de aluminio, sulfato ferroso, etc.). Las cantidades de cal o azufre a añadir al sustrato dependen, entre otros factores, de: a) su pH original; b) el pH final deseado; y, c) su capacidad de intercambio catiónico, siendo las necesidades de enmienda tanto más elevadas cuanto mayor es la capacidad de cambio del material (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

Mezcla con otros materiales

Raramente un material reúne por sí solo las características requeridas para unas determinadas condiciones de cultivo. En la mayoría de los casos, será necesario recurrir

a mezclas de varios materiales, en distintas proporciones, con objeto de adecuarlos a las condiciones requeridas. La mezcla de un componente (sustrato) con otros materiales naturales, de síntesis o residuales, orgánicos o minerales, tiene un efecto marcado sobre las propiedades físicas y químicas de aquél (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Cadahia, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Tratamientos y Diseño Experimental

Los tratamientos que se evaluaron en este estudio fueron los siguientes:

T1. Bagazo de caña de azúcar menor de 2mm

T2. Bagazo de caña de azúcar mayor de 2mm

T3. Paxtle (*Tillandsia recurvata*) menor de 2mm

T4. Paxtle (*Tillandsia recurvata*) mayor de 2mm

T5. Bagazo de maguey menor de 2mm

T6. Bagazo de maguey mayor de 2mm

T7. Bagazo de lechuguilla menor de 2mm

T8. Bagazo de lechuguilla mayor de 2mm

T9. Fibra de coco comercial mayor de 2mm (testigo)

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con 9 tratamientos; para valorar efecto de partícula se realizó un análisis factorial (factor A = sustrato); (factor B = tamaño de partícula) y (factor C = fecha de medición). Se utilizó el sistema SAS (Statistical Analysis System) (SAS, Inst., 1993). En la Figura 1 se muestra la distribución de los tratamientos en invernadero.

| R1 | R2 | R3 | R4 |
|----|----|----|----|
| T1 | T1 | T1 | T1 |
| T2 | T2 | T2 | T2 |
| T3 | T3 | T3 | T3 |
| T4 | T4 | T4 | T4 |
| T5 | T5 | T5 | T5 |
| T6 | T6 | T6 | T6 |
| T7 | T7 | T7 | T7 |
| T8 | T8 | T8 | T8 |
| T9 | T9 | T9 | T9 |

Figura 1. Distribución de los tratamientos evaluados.

Procedimiento de Obtención de los Sustratos Orgánicos

Identificación de los materiales. Se buscaron materiales que pudieran ofrecer características físicas y químicas para evaluar su desempeño en cultivo de pepino, además de que ofrecieran la factibilidad técnica y económica para utilizarse como un sustrato agrícola.

Recolección del material. Se colectaron los materiales que se emplearon para su evaluación en diferentes áreas del estado, para el caso del bagazo de caña de azúcar este se obtuvo del Ingenio Alianza Popular ubicado en la localidad de Tambaca perteneciente al municipio de Tamasopo, para el bagazo de maguey este fue adquirido en Mezcalera la Pendencia ubicada en la localidad de la Pendencia del municipio de Pinos, Zacatecas, para el bagazo de lechuguilla este se consiguió con las talladoras de ixtle (Compañía Mexicana del Desierto S.A. de C.V., y Productores de Fibras del Semidesierto Potosino S.P.R. de R.L.) ubicadas en el municipio de Matehuala, mientras que para el paxtle este se recolecto en el mismo Campo INIFAP-San Luis.

Limpieza del material. Una vez que se colectaron estos sustratos se hizo su limpieza quitando ramas, o alguna otra impureza que pudiera estar afectando la molienda.

Secado del material. Una vez que se colecto el material se puso a secar al sol para que el material estuviera lo más seco posible para su molienda.

Molienda del material. Para moler los materiales se utilizó un molino forrajero del número 18 como implemento con acople para toma de fuerza directa con el tractor, del cual se utilizó una malla de molienda que se utiliza para granos y forrajes.

Tamizado del material. Una vez que estaba limpio el material, se pasó por un tamiz de 2 mm para darle la granulometría adecuada.

Empaquetado del material en bolsas de plástico. Una vez tamizado los sustratos se llenaron las bolsas de polietileno coextruido bicolor blanco/negro de las cuales se ajustaban al ancho de la canaleta (30 centímetros) y con un largo de cada bolsa de un metro, cada bolsa se llenó con un volumen de 30 litros para los sustratos de paxtle (*Tillandsia recurvata*), bagazo de caña, fibra de lechuguilla, mientras que para el bagazo de maguey se llenaron las bolsas con un volumen de 20 litros. La fibra de coco utilizada ya estaba empacada de manera comercial.

Análisis de los Sustratos

Se mandaron las muestras de sustratos para determinar las variables físicas:

- Espacio poroso total
- Densidad aparente
- Capacidad de aireación
- Agua fácilmente disponible
- Agua de reserva
- Agua total disponible
- Capacidad de retención de agua

Y químicas que posteriormente serán analizadas para su discusión:

- pH, Conductividad eléctrica (CE), N-NO₃, N-NH₄, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Mo, Zn, Cu, B.

Caracterización de los Sustratos

Se caracterizaron física y químicamente los sustratos hechos a partir de los siguientes materiales: paxtle (*Tillandsia recurvata*), bagazo de maguey, bagazo de caña, fibra de lechuguilla y fibra de coco.

La caracterización física incluyó: 1) Densidad aparente (Da), por la Norma UNE-EN 13040:1999; 2) Densidad real (Dr) y espacio poroso total (EPT) (UNE-EN 13041:1999); 3) Capacidad de retención de agua (CRA), mediante el método descrito por Ansorena (1994); y 4) Curva de liberación de agua, por el método descrito por De Boodt *et al.* (1974) y las modificaciones de Martínez (1993) que incluyen capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua total disponible (ATD) y agua difícilmente disponible (ADD).

Para la caracterización química se consideró: 1) Materia orgánica (MO), por calcinación a 550 °C (Ansorena, 1994); 2) pH, conductividad eléctrica (CE) y elementos solubles, en extracto de saturación (Warncke, 1986), donde el pH se determinó en el extracto, y la CE del filtrado (Conductronic PC45); N-NO₃ y N-NH₄ por destilación con arrastre de vapor, Cl por valoración con nitrato de plata (Johnson y Fixen, 1990); K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu y Zn por absorción atómica (Thermo Serie M), y P y B con ICP-

AES (PerkinElmer 3000 SCR); y 3) Capacidad de intercambio catiónico (CIC), con BaCl_2 según el método descrito por Ansorena (1994).

Sitio del Área del Experimental

El presente trabajo se realizó en un invernadero del Campo Experimental INIFAP San Luis Potosí, el cual se encuentra ubicado en el km. 14.5 de la carretera 57, tramo San Luis-Matehuala, en el ejido Palma de la Cruz, municipio de Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, el cual se encuentra a una longitud oeste $100^\circ 56' 00''$ latitud norte $22^\circ 11' 00''$ y a una altitud de 1882 msnm.

El clima se considera según Köppen y modificado por García (1973) como BS o KW (w) (i'), que equivale a un clima seco estepario frío con temperaturas medianas anuales de 18°C siendo 7.5°C la mínima y 35° la máxima, siendo los meses más calurosos de mayo, junio y julio presentando heladas desde principios de abril. Y cuando se presentan lluvias con mayor frecuencia y abundancia es en los meses de mayo y septiembre, con una precipitación anual de 374 mm. La dirección de los vientos varía de Noreste a Sureste que son vientos moderados a débiles del Golfo de México.

Características del Invernadero

El invernadero es modelo 1-2 W-576, con dimensiones de 16 m de ancho por 36 m de longitud, con altura de cuatro metros de pared más dos metros de arco para una altura total de seis metros, automatizado, equipado con ventilación por circulación de aire, mediante la utilización de nueve ventiladores y dos extractores distribuidos uniformemente en el invernadero, cuatro calentadores marca centinela 250 de combustión directa de gas, con encendido electrónico y termostato de alta sensibilidad y presión, para calentar el ambiente dentro del invernadero, sensores de temperatura y de lluvia, cuenta con control automático para la apertura de ventanas laterales y cenitales, sistema de nebulización, pantalla térmica interna y camas hidropónicas elevadas.

Para la aplicación de la solución nutritiva, se tiene un fertirrigador automático con sensores de pH y C.E. para el control de la solución nutritiva, riego por espagueti y electroválvulas para derivar la solución nutritiva a las diferentes secciones del cultivo.

Colocación de los Sustratos

Una vez que se embolsaron los materiales de los diferentes sustratos se acomodaron en todo el área del invernadero de acuerdo a un diseño experimental planeado, posteriormente se lavó varias veces el material hasta eliminar completamente las sales que pudiera contener cada sustrato además se desinfectó con Previcure para eliminar cualquier hongo o enfermedad que pudiera transmitirle a la planta.

Material Genético

Se utilizó el híbrido de pepino comercial denominado Paraíso, este híbrido es tipo americano 100% ginoico para invernadero, plantas vigorosas, excelente amarre de frutas de 20-22 cm, color verde oscuro brillante, ligeramente con espinas, muy firme, alto rendimiento, adaptable a diferentes climas, madurez a cosecha temprana.

Establecimiento del Cultivo

El genotipo denominado Paraíso se sembró directamente en el sustrato, utilizando como base el peat moss. La fecha de siembra fue el día 5 de Junio del 2012 con fecha de germinación del 10 de Junio del 2012. El periodo de la primera floración del pepino fue el 23 de Junio del 2012, es decir 45 días después de la germinación.

La separación entre las canaletas era de 1.70 metros y el ancho de cada canaleta era de 1 metro, lo que corresponde con la elaboración del boli que fueron hechos con una longitud de un metro. La separación entre plantas fue de 20 centímetros por boli, lo cual nos dan un total de 5 plantas por metro lineal, dando una densidad de 2.70 plantas por m² para un área de 252 m².

Solución Nutritiva para Planta

Después del trasplante, la nutrición de las plantas se llevó a cabo utilizando la solución nutritiva, esta solución permitió dosificar la nutrición en 4 etapas fenológicas de acuerdo a la demanda del cultivo.

La solución se preparó a base de Nitrato de Potasio (KNO₃), Sulfato de Magnesio (MgSO₄), Cloruro de Potasio (KCl), Nitrato de Magnesio (MgNO₃), Fosfato

MonoPotásico (KH_2PO_4), Ácido Fosfórico (H_3PO_4), Ácido Nítrico (HNO_3), Sulfato de Manganeso (MnSO_4), Sulfato de Zinc (ZnSO_4), Sulfato de Cobre (CuSO_4), Molibdato de Sodio [$\text{Na}_2(\text{MO}_4)$] y Quelato ácido etilendiaminotetracético de hierro [Fe-EDTA (Fe-330 quelatado)] (Cuadro 7).

Cuadro 7. Solución nutritiva para pepino en bagazo de caña, paxtle, bagazo de maguey, bagazo de lechuguilla y fibra de coco comercial.

| Fertilizantes | Plántula a primer corte | Primer corte al corte 4 | Del corte 5 al corte 10 | Del corte 11 al 14 |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Ácido fosfórico | 1.23 L | 410.00 ml | 820.00 ml | 820.00 ml |
| Ácido nítrico | - | 444.00 ml | 888.00 ml | 640.00 ml |
| Nitrato de potasio | 3.64 kg | 1.110 kg | 2.220 kg | 3.240 kg |
| Nitrato de magnesio | - | 3.580 kg | 7.160 kg | 5.880 kg |
| Sulfato de magnesio | 3.44 kg | - | - | 1.240 kg |
| Fosfato monopotásico | - | 1.360 kg | 2.720 kg | 2.720 kg |
| Sulfato de potasio | - | 2.350 kg | 4.700 kg | 4.700 kg |
| Cloruro de potasio | 0.3 kg | 0.150 kg | 0.300 kg | 0.300 kg |
| Sulfato de manganeso | 25.0 g | 25.0 g | 50.00 g | 50.00 g |
| Sulfato de zinc | 8.7 g | 8.70 g | 17.40 g | 17.40 g |
| Ácido bórico | 40.0 g | 40.0 g | 80.00 g | 80.00 g |
| Molibdato de sodio | 1.30 g | 1.30 g | 2.60 g | 2.60 g |
| Sulfato de cobre | 7.8 g | 7.80 g | 15.60 g | 15.60 g |
| Nitrato de calcio | 5.1 kg | 6.100 kg | 12.20 kg | 14.20 kg |
| Quelato de hierro | 311.00 g | 311.100 g | 622.22 kg | 622.22 kg |

Hochmuth y Hochmuth (1996), modificado por Jasso (2010).

Sistema de Riego

Sistema automatizado de riego hidropónico con todos los aditamentos principales, más dos depósitos para la solución madre: Tanque A para cloruros, ácidos, sulfatos, nitratos y molibdatos; tanque B para el calcio y los quelatos. Computadora de riego para controlar las características de la solución (CE, pH), y el tiempo de riego (timer).

La distribución de la solución nutritiva fue mediante tuberías de plástico que terminaban en microtubos y un gotero por planta con gasto de 2 L h^{-1} , el control del gasto en los goteros se realizó por válvulas eléctricas desde el cabezal del sistema. La

frecuencia de los riegos se calculó en base al volumen del lixiviado, este se mantuvo entre el 15 y el 20% en todos los sustratos; el criterio para la aplicación del agua de riego se fundamentó en tiempo y volumen, de acuerdo al gasto nominal de los goteros, cuidando estar dentro del rango lixiviado.

Ciclo del Sistema de Producción

El sistema de cultivo se desarrolló como un ciclo de producción largo de 6 meses que abarco desde el día 5 de Junio del 2012, fecha en que se llevó a cabo la siembra directa del pepino, hasta el 5 de Noviembre del 2012, fecha en que se llevó acabo el último corte. En todo el ciclo se realizaron 14 cortes.

Variables Evaluadas

Altura de planta

Para medir la altura se eligieron un total de 20 plantas por tratamiento, la medición se realizó a partir de la base del tallo hasta el ápice de cada planta en centímetros (cm), para esto se utilizó una cinta métrica marca CADENA (5m 16´) modelo TFA5020.

Diámetro del tallo

Para medir el diámetro se eligieron un total de 20 plantas por tratamiento, la medición se tomó en la base del tallo de cada planta, en centímetros, para esto se utilizó un calibrador vernier marca Caliper (150 mm-6 in).

Índice de área foliar

Para medir el índice de área foliar se eligieron un total de 20 plantas por tratamiento, la medición se tomó en la hoja, esto de acuerdo con la metodología de Favaro y Vinicius, 2003 con la formula $[(AF = 0.851 (L*A)]$ de cada planta en centímetros cuadrados (cm^2), para esto se utilizó una cinta métrica marca CADENA (5m 16´) modelo TFA5020.

Rendimiento

Para medir esta variable se eligieron 16 bolis de los diferentes tratamientos, una vez que había frutos con crecimiento mayor a 18 centímetros (esto de acuerdo con la calidad comercial que se exige para su exportación) se procedía para iniciar el corte, para medir el rendimiento se utilizó una báscula digital TORREY (5 kilogramos).

Concentración de nutrientes de peciolo y hoja

Se midieron las concentraciones en partes por millón (ppm) de nitratos y de potasio (N-NO_3 y K^+) de las hojas en un muestreo al azar de los distintos tratamientos durante el ciclo de cultivo de pepino. Para medir esta variable se utilizaron cardys marca HORIBA de nitratos y de potasio (N-NO_3 y K^+). Para extraer la savia se utilizó una prensa de mano.

Volumen de raíz

Para medir el volumen de la raíz (cm^3) de las diferentes plantas de cada uno de los sustratos se realizó al finalizar el ciclo del cultivo, para eso se eligió un boli del cual se cortaron las cinco plantas hasta su base, posteriormente se lavaban para eliminar todo el sustrato que contuvieran, una vez limpias se introducían en una probeta graduada de a un litro, la cual estaba aforada a medio litro (500 ml) de ahí se observaba en la probeta el espacio del agua que desplazaba la raíz y ese era el dato que se anotaba.

Análisis Beneficio-Costo del Sustrato

Para este análisis se tuvo que incluir los siguientes gastos que fueron: flete y comisión para el acarreo de los diferentes sustratos, molienda, tamizado y asimismo el precio de las bolsas (la bolsa bicolor que se empleó fue de un tamaño de 120 cm x 35 cm), de todos los gastos anteriormente mencionados, estos representan los costos variables. Del mismo modo, se determinaron los costos fijos para la producción de pepino que incluyen: semilla, labores culturales, trabajadores, fertilizantes, pesticidas, gas, energía eléctrica, anillos, ganchos y otros gastos. De la misma manera para obtener

el volumen de rendimiento de cada tratamiento se hizo el análisis estadístico para obtener el rendimiento promedio por tonelada. En cuanto al precio por tonelada esta información se obtuvo del SNIIM - Centrales de Abasto del Estado de San Luis Potosí, donde el precio máximo para el ciclo de producción del año 2012 fue de \$7,400.00. Para obtener la relación beneficio-costo se dividieron los ingresos brutos totales entre los costos totales por hectárea.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Físicas y Químicas de los Sustratos

De acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización física acorde a los parámetros óptimos (Abad *et al.*, 1993), en relación a la densidad aparente y espacio poroso total todos los sustratos estuvieron dentro del parámetro, en cuanto a la capacidad de aireación los sustratos que presentaron mayor uniformidad fueron el bagazo de lechuguilla menor de 2 mm y el bagazo de caña de azúcar menor de 2 mm, en lo que se refiere al agua fácilmente disponible el sustrato que estuvo dentro del parámetro solo fue la fibra de coco comercial, por otro lado en lo que respecta al agua de reserva ninguno de los sustratos caracterizados presento valores de acuerdo al parámetro, y finalmente para la capacidad de retención de agua los sustratos que se situaron dentro del óptimo fueron el bagazo de caña mayor de 2 mm, paxtle menor y mayor de 2 m, bagazo de maguey menor de 2 mm y bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm.

De manera general, las características físicas de los diferentes sustratos fueron muy variables, aunque como se puede observar en el Cuadro 8 los sustratos que presentan parámetros más cercanos al óptimo fue el bagazo de caña de azúcar mayor de 2 mm, el paxtle mayor de 2 mm y el bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm.

De acuerdo con los resultados que se observan en el Cuadro nueve, para las características químicas en lo que corresponde al pH, los sustratos que presentaron valores situados dentro del óptimo fueron el bagazo de caña de azúcar mayor de 2 mm, bagazo de lechuguilla menor de 2 mm y la fibra de coco comercial, mientras que para la conductividad eléctrica los sustratos que se ubicaron dentro del óptimo fue solo el bagazo de caña menor de 2 mm, por otro lado en lo que respecta a la materia orgánica total los sustratos que se encontraron dentro de este parámetro fueron el bagazo de caña de azúcar menor de 2 mm y el bagazo de maguey menor de 2 mm.

Cuadro 8. Parámetros físicos de los diferentes sustratos evaluados.

| Parámetro | Optimo (*) | Caña <2mm | Caña >2mm | Paxtle <2mm | Paxtle > 2mm | Magu ey <2mm | Magu ey>2 mm | Lechu -guilla <2mm | Lechu -guilla >2mm | Fibra de Coco >2mm |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Tamaño en partícula | 0.25-5.0 | <2mm | >2mm | <2mm | >2mm | <2mm | >2mm | <2mm | >2mm | >2mm |
| Densidad aparente | <0.4 | 0.10 | 0.08 | 0.20 | 0.13 | 0.29 | 0.31 | 0.33 | 0.26 | 0.17 |
| Espacio poroso total | >85 | 96.2 | 93.3 | 92.4 | 84.2 | 89.0 | 80.6 | 87.5 | 83.8 | 88.3 |
| Capacidad de aeración | 10-30 | 32 | 25.4 | 46 | 32.1 | 42 | 40.1 | 58 | 18.9 | 9.8 |
| Agua fácilmente Disponible | 20-30 | ND | 45.6 | ND | 28.7 | ND | 28.1 | ND | 37.1 | 11.6 |
| Agua de reserva | 4-10 | ND | 3.13 | ND | 1.82 | ND | 3.63 | ND | 1.37 | 2.31 |
| Agua total disponible | 24-40 | ND | 19.1 | ND | 21.6 | ND | 8.7 | ND | 26.4 | 64.6 |
| Capacidad de retención de agua | 550-770 | 1200 | 679 | 550 | 521 | 700 | 404 | 350 | 649 | 785 |

*Abad *et al.* (1993)

En el caso de los nutrientes asimilables, para los nitratos ($N-NO_3$) los sustratos que presentaron valores cercanos al óptimo solo fue el bagazo de lechuguilla menor de 2 mm, por otro lado para los valores de amonio ($N-NH_4$) y fósforo (P) ninguno de los sustratos estuvo dentro del parámetro. Para el elemento de potasio (K) el sustrato que se situó dentro del óptimo fue el paxtle mayor de 2 mm, mientras que para el elemento de Calcio (Ca) y magnesio (Mg) todos los sustratos estuvieron dentro del parámetro.

Por otro lado para el elemento de hierro (Fe) los sustratos que se encontraron dentro del parámetro fueron el bagazo de caña menor de 2 mm, paxtle mayor de 2 mm, bagazo de maguey mayor de 2 mm, bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm y la fibra de coco comercial, del mismo modo para el elemento de manganeso (Mn) los sustratos que estuvieron dentro del parámetro fueron el bagazo de caña de azúcar mayor de 2 mm, bagazo de maguey mayor de 2 mm, bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm y la fibra de coco comercial, asimismo para el elemento de zinc (Zn) los sustratos con valores hallados dentro del óptimo fueron el bagazo de maguey mayor de 2 mm, bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm y la fibra de coco comercial, y finalmente para el elemento de cobre (Cu) los sustratos encontrados dentro del óptimo fueron el bagazo de caña de azúcar menor de 2 mm, paxtle mayor de 2 mm, bagazo de maguey mayor de 2 mm, bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm y la fibra de coco comercial.

En cuanto a las características químicas de todos los sustratos en nutrientes asimilables presentaron diferencias muy marcadas. De modo particular para las características químicas los sustratos que presentaron características químicas más cercanas a los parámetros deseables fueron el paxtle mayor de 2 mm y el bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm.

Cuadro 9. Parámetros químicos de los diferentes sustratos evaluados.

| Parámetro | Optimo (*) | Caña <2mm | Caña >2mm | Paxtle <2mm | Paxtle > 2mm | Maguey <2mm | Maguey >2mm | Lechu- guilla <2mm | Lechu- guilla >2mm | Fibra de Coco >2mm |
|---|------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| pH | 5.2-6.3 | 4.91 | 5.08 | 6.57 | 6.54 | 4.82 | 5.11 | 6.25 | 6.78 | 5.59 |
| Conductividad eléctrica(dS m ⁻¹) | 0.75-1.99 | 0.62 | 0.53 | 2.83 | 2.90 | 3.21 | 5.60 | 3.88 | 4.25 | 4.95 |
| Materia orgánica total (%) | >80 | 85.9 | ND | 68.3 | ND | 82.1 | ND | 78.9 | ND | ND |
| N-NO ₃ | 100-199 | 96.5 | 12.2 | 56.3 | 26.1 | 83.8 | 54.4 | 112 | 20.7 | 12.7 |
| N-NH ₄ | 0-20 | ND | 3.19 | ND | 24.17 | ND | 2.85 | ND | 1.94 | 0.56 |
| Fósforo | 6-10 | 162 | ND | 278 | 1.21 | 151 | 24.7 | 1,894 | 7.78 | 24.3 |
| Potasio | 150-249 | 105 | 74.3 | 2,988 | 201 | 7,215 | 935 | 10,525 | 481 | 954 |
| Calcio | >200 | 11,532 | 44.8 | 43,747 | 530 | 45,432 | 682 | 89,451 | 809 | 7.54 |
| Magnesio | >70 | 2,179 | 14.3 | 1,709 | 41.8 | 6,572 | 214 | 7,366 | 135 | 14.4 |
| Fierro | 0.3-3.0 | 29.3 | 0.988 | 32.2 | 1.579 | 25.1 | 0.85 | 5.90 | 0.41 | 0.19 |

Evaluación Agronómica

Altura de planta

Para los resultados obtenidos en este estudio, al analizar las interacciones del sustrato, tamaño de partícula y fecha de medición en las distintas semanas en la altura de planta, el análisis estadístico mostró una alta diferencia significativa del sustrato con el tamaño de partícula ($P < 0.0001$), esto pudo deberse a factores tales como el tamaño de partícula, distribución de los poros, dimensiones de los poros, y principalmente la capacidad de aireación. El tamaño de partícula incide directamente en el balance en el contenido de agua y aire (oxígeno) del sustrato, el tamaño de partícula se afecta por la porosidad y la retención de agua, sin embargo la capacidad de aireación influye sobre el sustrato, dado que las raíces de las plantas necesitan oxígeno para mantener su actividad metabólica y de crecimiento.

Del mismo modo mostró una alta diferencia significativa del sustrato y la fecha de medición, debido a que la porosidad de los diferentes sustratos, pudieron haber tenido un cambio en la evolución biológica de los materiales orgánicos utilizados, que como sabemos la porosidad va estar en función con la capacidad de aireación del sustrato (Raviv *et al.*, 1986, Bunt, 1988; Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2009; Cadahia, 2005).

De acuerdo a la altura promedio de la planta en cada sustrato (Cuadro 10), el tratamiento donde las plantas tuvieron un mejor crecimiento fue la fibra de coco comercial (Testigo) con una altura promedio de 226.27 cm, seguido por el bagazo de caña con altura promedio de 213.83 cm, les sigue el bagazo de lechuguilla con altura promedio de 184.10 cm, mientras tanto el crecimiento de las plantas con los otros sustratos mostraron menores crecimientos como el bagazo de maguey que presentó una altura promedio de 173.52 cm y el paxtle mostró un altura promedio de 149.26 cm, estos resultados si tuvieron diferencia significativa y corresponden al factor principal que es el sustrato y al tamaño de partícula, además hubo una interacción entre el sustrato y el tamaño de partícula ($P \geq 0.05$), también los análisis de estos sustratos muestran que todas las características físicas y químicas están la mayoría dentro de los parámetros que marca Abad *et al.*, 1993.

Estos crecimientos que se exhiben son parecidos a los que reporta Lino *et al.*, 2007 donde se evaluaron diferentes porcentajes de fertilización mineral (100, 75, 75, 75 y 75%) con diferentes cantidades de aplicación de estiércol bovino (0, 7.5, 15, 22.5 y 30 kg/m²) en un invernadero con suelo de tipo ferralítico para un cultivo de pepino (Hibrido HA 436), durante un periodo experimental de 50 días, donde el promedio de la altura de la planta de los diferentes tratamientos fueron de 181.5, 170.5, 183.0, 194.1 y 199.0 cm, respectivamente.

Cuadro 10. Altura promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Altura (cm) | |
|---|----------------------------------|----------|
| Fibra de Coco Comercial (Testigo) | 226.97 a | |
| Bagazo de Caña | 213.83 a | |
| Bagazo de Lechuguilla | 184.10 b | |
| Bagazo de Maguey | 173.52 b | |
| Paxtle | 149.26 c | |
| <i>DMS (Tukey =0.05)</i> | 15.86 | |
| <i>Características del ANVA (valor de Pr>F y CV)</i> | <i>Sustrato (S)</i> | < 0.0001 |
| | <i>Tamaño de partícula (T)</i> | 0.0026 |
| | <i>Fecha de medición (F)</i> | < 0.0001 |
| | <i>S x T</i> | < 0.0001 |
| | <i>T x F</i> | 0.9911 |
| | <i>S x F</i> | 0.7196 |
| | <i>Coefficiente de variación</i> | 25.53% |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

Cuadro 11. Altura promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Altura (cm) |
|----------------------------|--------------------|
| Tamaño 2 (> 2 mm) | 193.95 a |
| Tamaño 1 (< 2 mm) | 174.60 b |

P < 0.05 Nivel de significancia

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

Diámetro basal de tallo

Para los resultados obtenidos en este estudio, al analizar las interacciones del sustrato, tamaño partícula y fecha de medición en las distintas semanas para el diámetro basal de tallo, el análisis estadístico mostró una alta diferencia significativa para el sustrato, tamaño de partícula y fecha de medición, asimismo una alta diferencia significativa del sustrato con el tamaño de partícula ($P < 0.0001$), esta diferencia significativa en el diámetro también está ligada con factores como el tamaño de partícula, distribución de los poros, dimensiones de los poros, y la capacidad de aireación debido a que todos estos factores van a afectar el desarrollo y crecimientos de las plantas, lo cual también corresponde con las diferencias estadísticas mencionadas para altura de planta.

En lo que corresponde a los promedios de diámetro basal del tallo (Cuadro 12), las plantas que mostraron mayor diámetro son las que corresponden al tratamiento de fibra de coco comercial (testigo) con un diámetro promedio de 9.17 cm seguidas por las de bagazo de caña con un diámetro promedio de 8.68 cm, los otros tratamientos presentaron diferentes diámetros basales como el bagazo de lechuguilla con un diámetro promedio de 8.24 cm y el bagazo de maguey con diámetro promedio de 8.15 cm, mientras que para el tratamiento de paxtle el diámetro fue de 6.89 cm este valor muy abajo del resto de los tratamientos.

Los resultados que se exhiben son afectados por factores como lo es el sustrato, y principalmente el tamaño de partícula además de una interacción entre el sustrato y el tamaño de partícula ($P \geq 0.05$), como lo menciona (Urrestarazu, 2005) donde el destaca que entre mayor sea la variabilidad en la granulometría de los sustratos, afecta toda sus propiedades físicas. Estos resultados son parecidos a lo que reporta Sánchez del Castillo *et al.*, 2006 donde el evaluó la mejor edad para trasplantar plántulas de pepino, la variedad que se utilizó fue la variedad Kalunga, el lugar de trasplante fue en un invernadero de vidrio donde el sustrato utilizado fue arena de tezontle rojo, los tratamientos que se evaluaron fueron: siembra directa como testigo, y días después de la siembra (dds) (20, 25, 30, 35, 40 y 45 días), donde el periodo experimental varió de acuerdo a los días de trasplante en este caso fueron de 100, 85, 78, 73, 70, 63 y 58 días a fin de cosecha, donde los resultados indican que los mejores tratamientos fueron de

siembra directa como testigo y del tratamiento de 20 días después de la siembra presentando diámetros basales de 9.5 y 9.5 cm, y los demás tratamientos de 25 y 30 días después de la siembra (dds) presentaron menores diámetros basales a los del primer bloque que fueron de 7.9 y 8.0 cm respectivamente.

Cuadro 12. Diámetro basal del tallo promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Diámetro basal de tallo (cm) | |
|---|-------------------------------------|----------|
| Fibra de Coco Comercial (Testigo) | | 9.17 a |
| Bagazo de Caña | | 8.68 a |
| Bagazo de Lechuguilla | | 8.24 b |
| Bagazo de Maguey | | 8.15 b |
| Paxtle | | 6.85 c |
| <i>DMS (Tukey =0.05)</i> | | 0.43 |
| <i>Características del ANVA (valor de Pr>F y CV)</i> | <i>Sustrato (S)</i> | < 0.0001 |
| | <i>Tamaño de partícula (T)</i> | < 0.0001 |
| | <i>Fecha de medición (F)</i> | < 0.0001 |
| | <i>S x T</i> | < 0.0001 |
| | <i>T x F</i> | 0.9996 |
| | <i>S x F</i> | 0.9966 |
| | <i>Coefficiente de variación</i> | 15.98% |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas.

Cuadro 13. Diámetro basal del tallo promedio (cm) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Diámetro basal de tallo (cm) |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Tamaño 2 (>2mm) | 8.46 a |
| Tamaño 1 (<2mm) | 7.68 b |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas
P < 0.05 Nivel de significancia

Índice de área foliar

Para los resultados obtenidos en este estudio (Cuadro 14), al analizar las interacciones del sustrato, tamaño partícula y fecha de medición en las distintas

semanas, el análisis estadístico mostró una alta diferencia significativa para el sustrato, tamaño de partícula y fecha de medición, asimismo una alta diferencia significativa del sustrato con el tamaño de partícula, y del sustrato con la fecha de medición ($P < 0.0001$), estas interacciones también están ligadas con las diferencias mencionadas anteriormente como altura y diámetro basal de tallo en lo que corresponde a factores físicos del sustrato (el tamaño de partícula, distribución de los poros, dimensiones de los poros, y la capacidad de aireación).

Se puede deducir que los mejores índices de área foliar del primer grupo de los tratamientos fueron para fibra de coco comercial (testigo) con un promedio de 155.61 cm^2 , y bagazo de caña con un promedio de 154.64 cm^2 , el segundo grupo que se formó fue bagazo de lechuguilla con un promedio de 119.21 cm^2 y bagazo de maguey con un promedio de 103.39 cm^2 , mientras que para el tratamiento de paxtle fue el que presentó el menor índice con un promedio de 83.04 cm^2 , esta diferencia entre los tratamientos se debe principalmente a los sustratos y al tamaño de la partícula, asimismo hubo una interacción del sustrato con el tamaño de la partícula ($P \geq 0.05$).

Cuadro 14. Índice de área foliar promedio (cm^2) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Área foliar (cm^2) |
|---|---|
| Fibra de coco comercial (testigo) | 282.93 a |
| Bagazo de caña | 280.97 a |
| Bagazo de lechuguilla | 216.75 b |
| Bagazo de maguey | 187.99 c |
| Paxtle | 150.99 d |
| <i>DMS (Tukey = 0.05)</i> | <i>20.81</i> |
| <i>Características del ANVA</i> <i>(valor de Pr > F y CV)</i> | |
| <i>Sustrato (S)</i> | <i>< 0.0001</i> |
| <i>Tamaño de partícula (T)</i> | <i>< 0.0001</i> |
| <i>Fecha de medición (F)</i> | <i>< 0.0001</i> |
| <i>S x T</i> | <i>< 0.0001</i> |
| <i>T x F</i> | <i>0.0063</i> |
| <i>S x F</i> | <i>< 0.0001</i> |
| <i>Coefficiente de variación</i> | <i>21.13%</i> |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

Cuadro 15. Índice de área foliar promedio (cm²) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Índice de área foliar cm ²) |
|---------------------|---|
| Tamaño 2 (>2mm) | 127.86 a |
| Tamaño 1 (<2mm) | 109.11 b |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas
P < 0.05 Nivel de significancia

Rendimiento

Al analizar las interacciones del sustrato, tamaño partícula y fecha de medición en las distintas semanas, el análisis estadístico no mostró ninguna interacción del sustrato, del tamaño de la partícula y la fecha de medición (P>0.0001).

En cuanto al rendimiento obtenido entre los diferentes tratamientos no se encontraron diferencias significativas (P≤0.05). En los resultados de cada tratamiento (Cuadro 16), se puede observar que el tratamiento que obtuvo mayor rendimiento fue el bagazo de caña con un promedio de 191.88 ton ha⁻¹, siguiéndole el bagazo de lechuguilla con un promedio 146.54 ton ha⁻¹, posteriormente el paxtle con un promedio 131.12 ton ha⁻¹, bagazo de maguey con un promedio de 128.32 ton ha⁻¹ y bagazo de lechuguilla con un promedio de 110.38 ton ha⁻¹. Estos resultados son superiores a los que reporta Rodríguez-Fernández *et al.*, 2010 en estudio que se llevó a cabo en una invernadero de tipo A-12 con suelo de tipo pardo rojizo, donde los tratamientos que se evaluaron fueron dos bioproductos foliares, humus de lombriz y un testigo, en dosis de 2 mililitros por hectárea de BIOBRASS, 2 mililitros por hectárea de ENERPLANT, 10 kilogramos por hectárea de humus de lombriz y el testigo sin aplicación de ninguno de ellos, en un híbrido de pepino (SARIG 454), el cual para cada uno de los tratamientos se hizo la fertirrigación mineral acorde al nivel productivo de 150 toneladas por hectárea, donde reporta rendimientos para los tratamientos de dos bioproductos foliares, humus de lombriz y un testigo, de 60.8, 56.52, 54.75 y 53.97 toneladas por hectárea, respectivamente. Son igualmente a los que reporta Sánchez del Castillo *et al.*, 2006 donde el evaluó la mejor edad para trasplantar plántulas de pepino, el lugar de trasplante fue en un invernadero de vidrio donde el sustrato utilizado fue arena de tezontle rojo, la

variedad que se utilizó fue Kalunga, los tratamientos que se evaluaron fueron: siembra directa como testigo, y días después de la siembra (dds) (20, 25, 30, 35, 40 y 45 días), donde el periodo experimental varió de acuerdo a los días de trasplante en este caso fueron de 100, 85, 78, 73, 70, 63 y 58 días a fin de cosecha, donde los resultados indican que los mejores tratamientos fueron de siembra directa como testigo y del tratamiento de 20 días después de la siembra presentando rendimientos 139.3 y 149.4 toneladas por hectárea, mientras que los demás tratamientos de 25 días en adelante fueron de 130.7, 124.10, 116.7, 90.6, 85.5 y 42.3 toneladas por hectárea. Por lo que también Grijalva *et al.*, 2011 en estudio que consistió en la evaluación de cuatro híbridos de pepino europeo (Lukaza, Marumba, Borja y Beluga) en un invernadero de plástico en suelo, y una fertirrigación mineral de acuerdo a la etapa de crecimiento, los rendimientos que reporta son de 103.0, 103.0, 85 y 98 toneladas por hectárea para las variedades de Lukaza, Marumba, Borja y Beluga respectivamente.

Cuadro 16. Rendimiento promedio (ton ha⁻¹) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Rendimiento (ton/ha) | |
|---|--------------------------------|----------|
| Bagazo de Caña | | 191.88 a |
| Bagazo de Lechuguilla | | 146.54 a |
| Paxtle | | 131.12 a |
| Bagazo de Maguey | | 128.32 a |
| Fibra de Coco Comercial (testigo) | | 110.38 a |
| <i>DMS (Tukey =0.05)</i> | | 92.63 |
| <i>Características del ANVA (valor de Pr>F y CV)</i> | <i>Sustrato (S)</i> | 0.1058 |
| | <i>Tamaño de partícula (T)</i> | 0.3225 |
| | <i>Fecha de corte (Fc)</i> | 0.9701 |
| | <i>S x T</i> | 0.1319 |
| | <i>S x Fc</i> | 0.5735 |
| | <i>CV</i> | 29.21% |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

Cuadro 17. Rendimiento promedio (ton ha⁻¹) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Rendimiento (ton/ha) |
|----------------------------|-----------------------------|
| Tamaño 2 (>2mm) | 148.95 a |
| Tamaño 1 (<2mm) | 140.34 a |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

En cuanto a los resultados para volumen de raíz de los diferentes tratamientos si se encontraron diferencias significativas, y hubo interacción del sustrato con el tamaño de la partícula ($P < 0.0001$), esta interacción puede deberse a factores como el tamaño de partícula y del sustrato mismo dado que para algunos tratamientos el volumen fue de 20 litros por boli a excepción del bagazo de caña que fue el volumen de 30 litros respectivamente. Y otros factores tales como la altura y profundidad del contenedor o del boli tienen un efecto muy marcado sobre el contenido de aire en el sustrato, por lo cual a mayor altura del contenedor mayor es la capacidad de aireación, donde la capacidad de aireación va a ser modificable en función del programa de riego suministrado (Abad y Noguera, 1991; Abad y Noguera, 1997; Abad y Noguera, 1998; Urrestarazu, 2000; Castellanos, 2004; Cadahia, 2005).

Pero como se puede observar en el cuadro 18, los tratamientos que tiene mayores porcentajes promedios de volumen de raíz es el bagazo de maguey con 25.00 cm^3 , bagazo de lechuguilla con el 25.00 cm^3 y el bagazo de caña con 24.00 cm^3 , mientras que los demás tratamientos presentaron volúmenes promedio como el paxtle de 22.00 cm^3 y la fibra de coco comercial de 14.00 cm^3 .

Cuadro 18. Volumen de raíz (cm³) del pepino de diferentes sustratos durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Volumen de raíz (cm ³) | |
|---|------------------------------------|--------|
| Bagazo de Maguey | 25.00 a | |
| Bagazo de Lechuguilla | 25.00 a | |
| Bagazo de Caña | 24.00 ab | |
| Paxtle | 22.00 ab | |
| Fibra de Coco Comercial (testigo) | 14.00 c | |
| <i>DMS (Tukey =0.05)</i> | <i>10.10</i> | |
| <i>Características del ANVA (valor de Pr>F y CV)</i> | <i>Sustrato (S)</i> | 0.0644 |
| | <i>Tamaño de partícula (T)</i> | 0.0715 |
| | <i>S x T</i> | 0.0781 |
| | <i>CV</i> | 31.40% |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

Cuadro 19. Volumen de raíz (cm³) del pepino de diferentes sustratos por granulometría durante un periodo experimental de 101 días de siembra directa a final de cosecha.

| Fuente de Variación | Volumen de raíz (cm ³) |
|---------------------|------------------------------------|
| Tamaño 2 (>2mm) | 26.32 a |
| Tamaño 1 (<2mm) | 20.39 b |

Medias con la misma literal entre filas no presentan diferencias estadísticas significativas

Análisis Beneficio-Costo del Sustrato

Para este análisis se tuvo que incluir los siguientes gastos que fueron: flete y comisión para el acarreo de los diferentes sustratos, molienda, tamizado y asimismo el precio de las bolsas (la bolsa bicolor que se empleó fue de un tamaño de 120 cm x 35 cm), de todos los gastos anteriormente mencionados, estos representan los costos variables.

Cuadro 20. Relación beneficio-costo de los diferentes tratamientos evaluados.

| Tratamiento | Costos fijos (\$) | Costos variables (\$) | Costos totales (\$) | Beneficios brutos totales (\$) | Relación B/C (\$) |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| B. de caña < 2 mm | 901,915 | 216,599 | 1,118,514 | 1,393,938 | 1.25 |
| B. de caña > 2 mm | 901,915 | 216,599 | 1,118,514 | 1,445,812 | 1.29 |
| Paxtle < 2 mm | 901,915 | 153,145 | 1,055,060 | 749,546 | 0.71 |
| Paxtle < 2 mm | 901,915 | 153,145 | 1,055,060 | 1,149,590 | 1.09 |
| B. de maguey < 2mm | 901,915 | 190,612 | 1,092,527 | 1,172,382 | 1.07 |
| B. de maguey > 2mm | 901,915 | 190,612 | 1,092,527 | 768,194 | 0.70 |
| B. de lechuguilla < 2mm | 901,915 | 205,422 | 1,107,337 | 838,272 | 0.76 |
| B. de lechuguilla > 2mm | 901,915 | 205,422 | 1,107,337 | 1,330,520 | 1.20 |
| Fibra de coco > 2mm | 901,915 | 576,180 | 1,478,095 | 816,812 | 0.55 |

Del mismo modo, se determinaron los costos fijos para la producción de pepino que incluyen: semilla, labores culturales, trabajadores, fertilizantes, pesticidas, gas, energía eléctrica, anillos, ganchos y otros gastos. De la misma manera para obtener el volumen de rendimiento de cada tratamiento se hizo el análisis estadístico para obtener el rendimiento promedio por tonelada. En cuanto al precio por tonelada está información se obtuvo del SNIIM - Centrales de Abasto del Estado de San Luis Potosí, donde el precio máximo para el ciclo de producción del año 2012 fue de \$7,400.00. Para obtener la relación beneficio-costo se dividieron los ingresos brutos totales entre los costos totales por hectárea. (Figura 2).

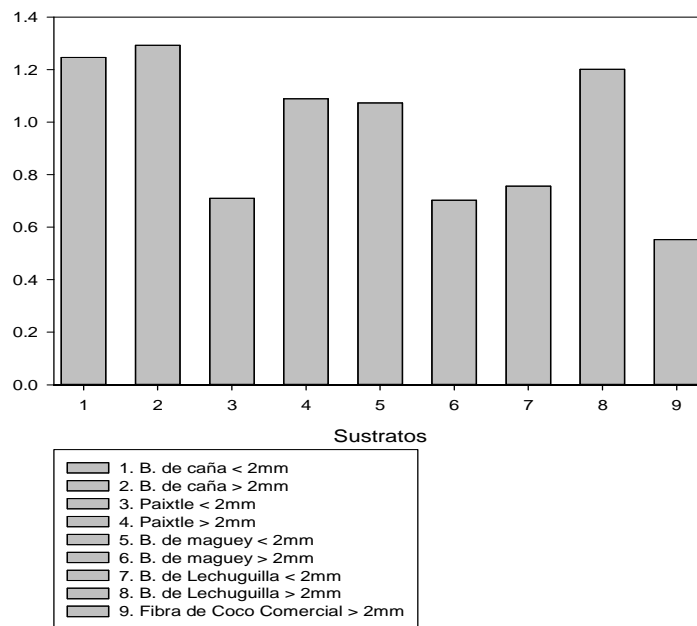


Figura 2. Relación Beneficio-Costo del Sustrato

El sustrato que tuvo la mejor relación beneficio-costo fue el bagazo de caña con granulometría mayor de 2 mm con una relación de \$1.29, mientras que el bagazo de caña con granulometría menor de 2 mm mostró una relación de \$1.25, igualmente el bagazo de lechuguilla con granulometría mayor de 2 mm exhibió una relación de \$1.20, por otro lado los demás sustratos como el paxtle con granulometría mayor de 2 mm presentó una relación de \$1.09 estando a la par con el bagazo de maguey con granulometría menor de 2 mm que presenta una relación de \$1.07, en tanto los demás sustratos como el paxtle con granulometría menor de 2 mm presento una relación de \$0.71, siguiéndole el bagazo de maguey con granulometría mayor de 2 mm con una relación de 0.76, equivalentemente el bagazo de lechuguilla con granulometría menor de 2 mm mostrando una relación de \$ 0.76, y finalmente la fibra de coco comercial (testigo) donde su relación fue de \$0.55.

Concentración de Nutrientes de Pecíolo y Hoja

La fertirrigación permite realizar un uso más eficiente de los fertilizantes al aplicarlos en la zona de raíces de los cultivos, sin embargo, factores tales como la fertilidad, capacidad de intercambio catiónico, pH, textura del suelo, condiciones climatológicas, y salinidad del cultivo influyen sobre la cantidad de fertilizante que la planta toma del suelo. Lo anterior puede ocasionar una deficiencia nutrimental aun cuando se está aplicando la cantidad adecuada de una recomendación específica de fertilización, afectando negativamente el desarrollo del cultivo y la calidad y la cantidad de la cosecha (Martínez y Jasso, 2006).

Por lo que en este estudio, se muestra las concentraciones de N-NO₃ y K⁺ durante diversas fechas durante un ciclo de cultivo (Cuadro 21 y 22). En base a estos resultados obtenidos no hubo un punto de comparación dado que ningún autor ha realizado un diagnóstico nutrimental de campo para un cultivo de pepino.

Como se puede observar en las concentraciones de nitratos (N-NO₃) para los tratamientos de bagazo de caña de azúcar y paxtle con las dos diferentes granulometrías menor y mayor de 2 mm se aumentan a los 77, 91, 126 y 150 después de la siembra, mientras que los otros tratamientos como el bagazo de maguey a los 91 días después de la siembra hay una disminución en la concentración de nitratos (N-NO₃), y para los tratamientos bagazo de maguey menor de 2 mm y bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm hay un aumento hasta los 126 días después de la siembra.

Cuadro 21. Concentración de nutrientes de N-NO₃ (mg kg⁻¹)

| Tratamiento | Días después de siembra directa | | | |
|-------------------|---------------------------------|--------|---------|---------|
| | 77 dds | 91 dds | 126 dds | 150 dds |
| Caña < 2mm | 600 | 870 | 1,900 | 3,600 |
| Caña > 2mm | 450 | 960 | 2,300 | 3,500 |
| Paxtle < 2mm | 750 | 760 | 1,400 | 3,300 |
| Paxtle > 2mm | 570 | 830 | 910 | 4,400 |
| Maguey < 2mm | 830 | 1,300 | 460 | 1,100 |
| Maguey > 2mm | 1,300 | 830 | 3,200 | 4,700 |
| Lechuguilla < 2mm | 870 | 870 | 2,400 | 1,200 |
| Lechuguilla > 2mm | 430 | 1,200 | 920 | 6,200 |
| F. de Coco > 2mm | 1,000 | 1,700 | 1,400 | 5,600 |

Para las concentraciones de potasio (K^+) en los diferentes tratamientos como se puede observar en el cuadro 22, las concentraciones de potasio a los 126 y 150 días después de la siembra disminuyen, a excepción de los tratamiento de fibra de coco comercial del tratamiento de bagazo de maguey que a los 150 días después de la siembra se mantiene en $4,200 \text{ mg kg}^{-1}$.

Cuadro 22. Concentración de nutrientes de K^+ (mg kg^{-1})

| Tratamiento | Días después de siembra directa | | | |
|-------------------|---------------------------------|--------|---------|---------|
| | 77 dds | 91 dds | 126 dds | 150 dds |
| Caña < 2mm | 1,400 | 2,500 | 860 | 1,300 |
| Caña > 2mm | 1,100 | 2,200 | 950 | 1,200 |
| Paxtle < 2mm | 1,100 | 2,600 | 900 | 1,200 |
| Paxtle > 2mm | 1,000 | 2,500 | 1,200 | 1,400 |
| Maguey < 2mm | 1,000 | 2,800 | 910 | 4,200 |
| Maguey > 2mm | 1,200 | 2,600 | 840 | 1,000 |
| Lechuguilla < 2mm | 1,300 | 3,400 | 910 | 4,200 |
| Lechuguilla > 2mm | 1,100 | 2,800 | 900 | 1,300 |
| F. de Coco > 2mm | 1,100 | 2,700 | 1,200 | 1,000 |

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio se concluye lo siguiente:

Las características físicas de los diferentes sustratos fueron muy variables. Los sustratos que presentaron características físicas más cercanas al óptimo fueron el bagazo de caña de azúcar mayor de 2 mm, el paxtle mayor de 2 mm y el bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm.

Los sustratos que presentaron características químicas más cercanas a los parámetros deseables fueron el paxtle mayor de 2 mm y el bagazo de lechuguilla mayor de 2 mm.

En cuanto a la interacción del sustrato con el tamaño de partícula mostró una alta diferencia significativa para altura, diámetro basal de tallo, índice de área foliar y volumen de raíz ($P < 0.0001$).

En lo que se refiere a la evaluación agronómica, los cuales comprenden altura de planta, diámetro basal de tallo, e índice de área foliar, los tratamientos para las plantas de pepino que tuvieron un mejor desarrollo fueron la fibra de coco comercial (testigo), el bagazo de caña y el bagazo de lechuguilla, y posteriormente el bagazo de maguey y el paxtle.

El rendimiento no fue estadísticamente diferente. Los sustratos alternativos que evaluados en este estudio pueden ser equiparables a la fibra de coco comercial.

En lo que se refiere al análisis beneficio-costo, los sustratos que presentaron una relación beneficio costo óptima ($R B/C > 1.15$) fue el bagazo de caña con las dos diferentes granulometrías y el bagazo de lechuguilla con granulometría mayor de 2 mm.

Finalmente se puede concluir que los sustratos evaluados en este estudio pueden incorporarse a un proceso de producción de pepino en invernadero; el bagazo de caña de azúcar y el bagazo de lechuguilla fueron las opciones más viables que hasta el momento tuvieron un mejor desempeño en cuanto a potencial productivo y de relación beneficio-costo se refiere.

LITERATURA CITADA

- Abad, M. 1991. Los sustratos hortícolas y las técnicas de cultivo sin suelo. En: La Horticultura Española en la C.E. Eds. L. Rallo y F. Nuez. Ediciones de Horticultura, S.L., Reus, pp. 270-280.
- Abad, M. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivos. Actas de Horticultura (11). pp. 141 – 154
- Abad, M. 1993. Sustratos para el cultivo sin suelo: inventario y características, in: curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo. Ed. I.E.A/F.I.A.P.A. Almería, España. pp. 63-80
- Abad, M. 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. En: El Cultivo de Tomate. Coord. F. Nuez. pp. 131-166. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Abad, M; Noguera, P. 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Coord. C. Cadahia. pp. 287-342. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Abad, M; Noguera, V.; Roig, A.; Cegarra J., y Paredes, C. 1997. Reciclado de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. Actas de Horticultura, 19, pp. 92-109.
- Ansorena, J. 1994 Sustratos: propiedades y caracterización ediciones Mundi-Prensa. Almería, España. p.172
- Arreola, E. J., Palma, L. D. J., Salgado G. S., Camacho C. W., Obrador, O. J. J., Juárez, L. J. F. y Pastrana, A. L. 2004. Evaluación de abono órgano mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar. Terra Latinoamericana. (México) 22(3): 351-357.
- Benton, J. J. Jr. 1982. Hydroponic: Its History and Use in Plant Nutrition Studies. Journal of Plant Nutrition. 5, 1003-1030.
- Bunt, A. 1988. Media and mixes for container grow-plants. 2^a Ed. London. Unwin Hyman. Ltd., London. 309 pp.
- Cadahia, C.; Eymar, E. 1993. Caracterización química y físico-química de sustratos. Actas de Horticultura, 11, 19-25.
- Cadahia, L. C. 2005. Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Impreso en España. pp. 301-352.
- Castellanos J. Z. 2009. Manual de producción de tomate en invernadero. Editorial Ocma. Hecho en México. pp. 105-129.
- Castillo, Q.D.; Berlanga, R.C.A.; y Cano, P.A. 2005. Recolección, extracción y uso de la fibra de lechuguilla (agave lechuguilla torr.) en el estado de Coahuila. Centro de Investigación Regional del Noreste Campo Experimental Saltillo. Publicación No. 6. México.

- Cook, R. y Calvin, L. 2005. Greenhouse tomatoes change the dynamics of the North American fresh tomato industry. ERR-2 Economic Research Services/USDA, April 2005.
- De Boodt, M., Verdonk, O. Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, 2.054-2.062
- Elsayed M. T., Babiker M. H., Abdelmalik M. E., Mukhtar O. N. and Montange D. 2008. Impact of filter mud applications on germination of sugarcane and small-seeded plants on soil and sugarcane nitrogen contents. *Bioresource Technology* (Great Britain) 99: 4164-4168.
- Favaro, B. F., and Vinicius, F. M. 2003. A new method for estimating the area index of cucumber and tomato plants. *Hortic. Brass.* Vol. 2, No. 4.
- Fernández, B. C., N. Urdaneta, W. Silva, H. Poliszuk y M. Marín. 2006. Germinación de semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv `Río Grande sembradas en bandejas plásticas, utilizando distintos sustratos. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* (Venezuela) 23(2): 188-195.
- García, E., 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Segunda edición, UNAM, México D.F. 246 p.
- Grijalva, C. R. L., Macías, D. R., Grijalva, D. S. A., y Robles C. F. 2011. Evaluación del efecto de fecha de siembra en la productividad y calidad de híbridos de pepino europeo bajo condiciones de invernadero en el noreste de Sonora. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud.* Volumen XIII, Número 1. pp. 29-36
- Handrek, K. y Black, N. 1991. Growing media ornamental plants and turf/South Wales University Press.
- Hochmuth, G. J. and Hochmuth, R. C. 1996. Nutrient Solution Formulation for Hydroponic (Perlite, Rockwool, NFT) Tomatoes in Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu/cv216>
- Horiba. 2008. Compact ion meter. <http://www.wq.hii.horiba.com/pdf/CardyInstrMan.pdf>. [Fecha de acceso: 16 de Junio de 2008].
- Jasso Ch. C., M. A. Martínez G., A.G. Alpuche S., y E. Garza U. 2009. Evaluación de sustratos e híbridos de jitomate en condiciones de invernadero. *Campo Experimental San Luis.* Folleto Científico Núm. 4 SAGARPA-INIFAP-CIRNE. San Luis Potosí, México. p. 29
- Jones, C. 1983. Effect of Soil Texture on Critical Bulk Density for Root Growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47.pp.1.208–1.211
- Leeson, S. y Summers, J. 2000. *Nutrición Aviar Comercial.* Editorial Le'Print Club Express Ltda. Bogotá, Colombia. 43-45p.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Riviére, L.M. Charpeinter, S. 1989. *Cultures en Pots et Conteneurs.* INRA-PHM Revue-Horticole, París-Limoges. 184 pp.
- Lino, B. A., Arozarena, D. N. J., Dibut A. B., Ríos, R. Y., Croche, A.G., Fernández A. J., Ramos, C. H., y Creagh B. 2008. Cultivo Protegido sobre suelo ferralítico rojo. II Alternativas nutrimentales de menor impacto ambiental para los cultivos

de Tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) y Pepino (*Cucumis sativus* L.).
http://www.actaf.co.cu/revistas/agrotecnia_05_2008/agrot2006-2/17.pdf

- Martínez, F. X. 1993. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*, 11. pp. 55-66.
- Martínez-Gamiño, M.G. y Jasso-Cheverria, C. 2006. Diagnostico Nutritional para ajustar dosis de fertilizantes en Chile y jitomate con fertirriego. INIFAP-Fundación PRODUCE. Desplegable para productores No. 25.
- MPC (Ministerio de Producción y Comercio). 2008. Estadísticas agrícolas Caracas, Venezuela.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R. Noquera, V. Maquieira, A.; Martínez, J. 1997. Physical and chemical properties of coir waste and their relation to plant growth. *Acta Horticulturae*, 450: 365-373.
- Peña T. E., Companioni C. N., González B. R. y A. A. Navarro. 2007. El humus de lombriz: su impacto en la producción de posturas orgánicas en cepellón para la agricultura urbana en Cuba. *Rev. Bras. Agroecología*, (Brasil) 2(1):459-462.
- Pernalet, Z.; Piña, F.; Suarez, M.; Ferrer, A.; y Aiello, C. 2008. Fraccionamiento del bagazo de caña mediante el tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco. *Bioagro* 20(1): 3-10.
- Posadas, S.F. 1999. Propiedades y características de los sustratos. Turba y fibra de coco. En: cultivos sin suelo II, En: Curso Superior de Especialización. M. Fernández y I.M. Cuadrado (Eds). Almería España. 47-63 pp.
- Puustjärvi, V. 1983. Nature of changes in peat properties during decomposition. *Peat and Plant Yearbook*. Helsinki. p.1983
- Rasul, G. 2007. Salinity-induced changes in the microbial use of sugarcane filter cake added to soil. Doctoral Tesis. Department of Soil Biology and Plant Nutrition. Faculty of Organic Agricultural Sciences University of Kassel. Witzenhausen. Pakistan. p. 87
- Raviv, M., Chen, Y., and Inbar, Y. 1986. Peat substitutes as growth media for container-grown plants. In: *The role of organic matter in modern Agriculture*. London: Dordrecht S.L. pp. 257-287
- Richards, D., Lane M. y Beardsell, D. V. 1986. The influence of particle-size distribution in pinebark: sand: brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Scientia Horticulturae*, 29:1-14.
- Rodríguez, F. P., y Castillo, C. J. 2010. Producción local de Pepino (*Cucumis sativus* L.) Híbrido SARIG 454 y su impacto sobre el crecimiento y productividad del cultivo en dependencia de la biofertilización foliar en un agrosistema santiaguero. Centro de Información y Gestión Tecnológica Cuba. *Ciencia en su PC* Num. 2. pp. 114-124.
- Sánchez Del Castillo, F., Moreno, P. E. de C., Contreras, M. E., y Vicente, G. E. 2006. Reducción del ciclo de crecimiento en pepino europeo, mediante trasplante tardío. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 29. Núm. Es2. pp. 87-90

- Sangwan P., Kaushik C.P., and Garg V. K. 2008. Feasibility of utilization of horse dung spiked filter cake in vermicomposters using exotic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology* (Great Britain) 99: 2442–2448.
- SAS Institute. 1993. SAS/STAT user's guide, release 9.0. SAS inst., Cary, N.C.
- Sedano, M. A. (1999); Bagazo de agave en la fábrica de tequila Tres Magueyes. Memorias del Foro de vinculación retos y oportunidades para el aprovechamiento del bagazo de maguey. 12 y 13 de julio Guadalajara Jalisco, México; Edita Gilberto Iñiguez Covarrubias., pp. 2
- Torres L. P., Escobar J. C., Pérez V. A., Imery V. R., Nates P., Sánchez G., Sánchez M. y A. Bermúdez. 2005. Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). *Revista Ingeniería e Investigación* (Colombia) 25(2): 53-61.
- Torres P., Pérez A., Escobar J. C., Uribe I. E. y R. Imery. 2007. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Eng. Agríc.* (Jaboticabal, Brasil) 27(1): 267-275.
- Ulises Durany, C. 1984. Hidroponía. Cultivo de plantas sin tierra. Biblioteca del Agricultor. 5ª ed. Ed. Sintesis S.A. Barcelona.
- UNE-EN 13040:1999 Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Preparación de Muestras para Ensayos Químicos y Físicos, Determinación del Contenido de Materia Seca, Contenido de Humedad y Densidad Aparente Compactada en Laboratorio. AENOR. Madrid, España. 19 p.
- UNE-EN 13041:1999 Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de Propiedades Físicas, Densidad Aparente Seca, Volumen de Aire, Volumen de Agua, Valor de Contracción y Porosidad Total. AENOR. Madrid, España. 25 p.
- Urrestarazu, G. M. 2000. Manual de Cultivo sin Suelo. Grupo Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 137-160
- Warncke, D. D. 1986. Analyzing greenhouse growth media by the saturation extraction method. *HortScience* 21:223-225.
- Winsor, G.W.; Schwars, M. 1990. Soilless culture for horticultural crop production. Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma