



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y
SERVICIO EN FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

VARIACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN SUSTRATOS
REUTILIZADOS Y SU INFLUENCIA EN CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE
FRESA

TESIS

Que como requisito parcial
Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

EDUILKAR AMETH SALDAÑA YANGÜEZ

Bajo la dirección de: JOEL PINEDA PINEDA, Dr



Instituto de Horticultura



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2017.

**VARIACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN SUSTRATOS
REUTILIZADOS Y SU INFLUENCIA EN CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE
FRESA**

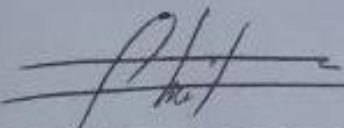
Tesis realizada por Eduilkar Ameth Saldaña Yangüez, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

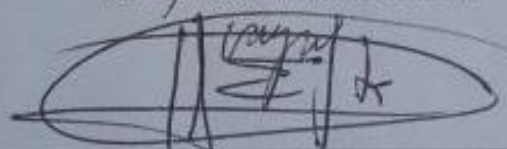
DIRECTOR:


Dr. Joel Pineda Pineda

ASESOR:


Dr. Edilberto Avitia García

ASESOR:


Dr. Mateo Vargas Hernández

ASESOR:


Dr. Roberto Rivera del Rio

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
DEDICTORIA.....	ix
AGRADECIMIENTOS.....	x
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
RESUMEN GENERAL	xii
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1.1. Descripción de la fresa	4
1.2. Cultivar Albión	5
1.3. Sistemas de producción de fresa	5
1.4. Sustratos	7
1.5. Propiedades físicas de los sustratos	8
1.5.1. Granulometría (G).....	9
1.5.2. Espacio poroso total (EPT)	10
1.5.3. Capacidad de aireación (CA).....	10
1.5.4. Agua fácilmente disponible (AFD)	11
1.5.5. Agua de reserva (AR)	12
1.5.6. Agua total disponible (ATD)	12
1.5.7. Agua difícilmente disponible (ADD)	12
1.5.8. Densidad aparente (Dap).....	13
1.6. Propiedades químicas	13
1.6.1. Capacidad de intercambio catiónico	14
1.6.2. Disponibilidad de nutrimentos	15
1.6.3. Salinidad	15
1.6.4. pH	16
1.6.5. Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	17

1.7. Propiedades biológicas	18
1.7.1. Velocidad de descomposición	18
1.7.2. Actividad enzimática	18
1.7.3. Actividad reguladora de crecimiento	19
1.7.4. Actividad supresora frente a patógenos.....	19
1.8. Clasificación de sustratos.....	19
1.8.1. Por propiedades químicas	19
1.8.2. Por su naturaleza.....	20
1. 9. Fibra de coco.....	21
1.10. Perlita	22
1.11. Tezontle.....	23
1.12. Literatura citada.....	24
 2. VARIACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS EN SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA	 28
2.1. Resumen	28
2.2 Abstract	29
2.3. Introducción.....	30
2.4. Materiales y métodos	31
2.4.1. Ubicación y características del área experimental	31
2.4.2. Diseño de tratamiento y diseño experimental	31
2.4.3. Desarrollo del experimento	32
2.4.4. Propiedades físicas de sustratos	32
2.4.5. Análisis de datos.....	33
2.5. Resultados y discusión.....	33
2.5.1. Distribución de tamaño de partículas.....	33
2.5.2. Índice de grosor (lg).....	36
2.5.3. Diámetro medio ponderando de partículas (DMP).....	38
2.5.4. Densidad aparente (Dap).....	39
2.5.5. Capacidad de aireación (CA).....	40
2.5.6. Capacidad de retención de humedad (CHR)	41
2.5.7. Curva de retención de Humedad	45

2.6. Conclusiones	46
2.7. Literatura citada.....	46
3. VARIACIÓN EN PROPIEDADES QUÍMICAS EN SUSTRATOS	
REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA	50
3.1. Resumen	50
3.2. Abstract	51
3.3. Introducción	52
3.4. Materiales y métodos	53
3.4.1. Ubicación y características del área experimental	53
3.4.2. Diseño de tratamiento y diseño experimental	54
3.4.3. Desarrollo del experimento	54
3.4.4. Propiedades químicas de sustratos	55
3.4.5. Análisis de datos.....	55
3.5. Resultados y Discusión	56
3.5.1. pH	56
3.5.2. Conductividad eléctrica (CE)	58
3.5.3. Nitrógeno	60
3.5.4. Fósforo.....	61
3.5.5. Potasio.....	63
3.5.6. Calcio.....	63
3.5.7. Magnesio	65
3.6. Conclusiones	66
3.7. Literatura citada	66
4. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICA DE	
SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA	70
4.1. Resumen	70
4.2. Abstract	71
4.3. Introducción	72
4.4. Materiales y métodos	73
4.4.1. Ubicación y características del área experimental	73
4.4.2. Diseño de tratamiento y diseño experimental	73

4.4.3. Desarrollo del experimento	74
4.4.4. Variables medidas	75
4.4.4.1. Biomasa	75
4.4.4.2. Concentración mineral en tejido vegetal	75
4.4.4.3. Calidad de frutos	76
4.4.5. Análisis de datos.....	76
4.5. Resultados y discusión.....	77
4.5.1. Producción de biomasa, rendimiento y su relación con características de los sustratos.....	77
4.5.2. Contenido nutrimental en plantas de fresa ‘Albión’	79
4.5.2.2. Fósforo	81
4.5.2.3. Potasio	82
4.5.2.4. Calcio	83
4.5.2.5. Magnesio.....	84
4.5.2.6. Hierro	85
4.5.3. Calidad de fruta	88
4.6. Conclusiones.....	90
4. 7. Literatura citada.....	91

LISTA DE CUADROS

2. VARIACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS EN SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

Cuadro 1. Distribución (%) del tamaño de partículas (mm) de tres sustratos después de cuatro ciclos de uso con fresa en sistema hidropónico.	37
Cuadro 2. Índice de grosor y diámetro medio ponderado de partículas de fibra de coco, perlita y tezontle, después de cuatros ciclos de cultivo con fresa en sistema hidropónico.	38
Cuadro 3. Propiedades físicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de usos al final de cultivo de fresa.	43

3. VARIACIÓN EN PROPIEDADES QUÍMICAS EN SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

Cuadro 1. Composición de macronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevo y reutilizados.	54
Cuadro 2. Composición de micronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevo y reutilizados.	55
Cuadro 3. Propiedades químicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de usos al final de cultivo de fresa.	64

4. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICA DE SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

Cuadro 1. Composición de macronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevo y reutilizados.	74
Cuadro 2. Composición de micronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevos y reutilizados.	75

Cuadro 3. Peso fresco de raíz, corona, hoja, estolones, frutos verdes, frutos rojos y rendimiento total de fresa por m ² , cultivada en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	78
Cuadro 4. Concentración (%) de nitrógeno (N) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	80
Cuadro 5. Concentración (%) de fósforo (P) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	81
Cuadro 6. Concentración (%) de potasio (K) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	82
Cuadro 7. Concentración (%) de calcio (Ca) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	83
Cuadro 8. Concentración (%) de magnesio (Mg) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	84
Cuadro 9. Concentración (mg·kg ⁻¹) de hierro (Fe) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	86
Cuadro 10. Calidad de fruto: peso fresco, longitud, diámetro ecuatorial, porcentaje de ácido cítrico, pH y sólidos solubles totales (°Brix), de fresas cultivada en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.	89

LISTA DE FIGURAS

2. VARIACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS EN SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

Figura 1. Distribución acumulada del tamaño de partículas en fibra de coco (a), perlita (b) y tezontle (c), al inicio del cultivo (nuevos), al final del ciclo del cultivo I, II, III y IV. Los valores se expresan en porcentajes con respecto a 100 g de muestra tamizada.	35
Figura 2. Propiedades físicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de uso: a) Densidad aparente (Dap , $g \cdot cm^3$); b) Capacidad de retención de humedad (CRH, %); c) Espacio poroso total (EPT, %); d) Capacidad de aireación (CA, %); e) Agua fácilmente disponible (AFD, %); f) Agua de reserva (AR, %); g) Agua difícilmente disponible (ADD, %); h) Agua total disponible (ATD, %).	44
Figura 3. Curva de retención de humedad de fibra de coco (a), perlita (b) y tezontle (c) con 4 ciclos de uso. Los valores se expresan en porcentaje del peso de agua retenida respecto al total de la muestra seca, a cuatro niveles de succión (0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua).....	45

DEDICTORIA

A mi adorada Karina

A mis padres Norma Eredys Yangüez Gonzáles y Dimas Saldaña Serrano, por darme la vida, por sus consejos y su confianza, pero sobre todo por ser un ejemplo de perseverancia.

A mis hermanas Yanessis y Yariseth, por apoyarme en todo momento.

A mis sobrinos Yanelisy y Mateo

A todos las grandiosas personas que conocí en esté hermoso país, en especial a Nora y Samanta que me motivaron a seguir adelante con sus buenos consejos.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para las realización de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Instituto de Horticultura del Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Fitotecnia por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

Al Dr. Joel Pineda Pineda por sus valiosas enseñanzas, sus acertados consejos y principalmente por el apoyo incondicional y confianza brindada durante el proceso de investigación.

A mis asesores Dr. Edilberto Avitia García, Dr. Mateo Vargas Hernández, Dr. Roberto Rivera del Rio por sus observación, sus recomendaciones y apoyo académico en la conducción y desarrollo del trabajo de investigación, así como en la redacción del presente documento.

A todos los profesores del instituto de Horticultura y compañeros por compartir sus conocimientos y experiencias académicas conmigo y enriquecer mi acervo profesional.

A la Dr. Mila de Pereira Batinovich e Ing. Roberto Rodríguez por haberme brindado la oportunidad de continuar con mi formación profesional y por su apoyo y consejos.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	Eduilkar Ameth Saldaña Yangüez.
Fecha de nacimiento	4 de enero de 1990.
Lugar de nacimiento	David, Chiriquí, Panamá.
Profesión	Ingeniero Agrónomo en Cultivos Tropicales.

Desarrollo académico

Colegio primer ciclo: 2002-2004	Telebásica de Caizán Fuertes Caminos, Renacimiento, Chiriquí.
Colegio segundo ciclo: 2005-2007	Colegio Instituto David, David, Chiriquí Ingeniería Agronómica en Cultivos Tropicales.
Licenciatura: 2008-2012	Departamento de Fitotecnia, Facultad de Ciencias Agropecuaria, Universidad de Panamá. Maestro en Ciencias en Horticultura.
Maestría: 2016-2017	Instituto de Horticultura, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio, Universidad Autónoma Chapingo.

Campo Laboral

2013-2016	Cultivos Selectos, Cerro Punta, Chiriquí, Panamá.
-----------	---

RESUMEN GENERAL

Variación en propiedades físico-químicas en sustratos reutilizados y su influencia en crecimiento y desarrollo de fresa

Para disminuir efectos negativos por el desecho de sustratos, está la alternativa de reutilizarlos durante varios ciclos de cultivo. La posibilidad de reutilizar los sustratos sin ningún daño a los cultivos, depende de las propiedades físicas, químicas y biológicas del material, así como de la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y/o biótico. El objetivo de este trabajo fue evaluar el cambio de las propiedades físicas y químicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, después de cuatro ciclos de reutilización y su influencia en el crecimiento y desarrollo del cultivo de fresa. El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizó un diseño de tratamientos factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso), generando 12 tratamientos, arreglados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en canaletas de PVC con 12 plantas de fresa del cv. Albión. Las propiedades físicas y químicas evaluadas en los sustratos fueron: distribución de tamaño de partículas, índice de grosor, diámetro medio ponderado, densidad aparente, capacidad de retención de humedad, espacio poroso total, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible y agua total disponible, pH, conductividad eléctrica, contenido nutrimental (N, P, K, Ca y Mg) al inicio y al final del ciclo de cultivo; en planta se evaluó producción y calidad de fruto, peso fresco de planta y contenido nutrimental en hoja. A los datos se les realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias (Tukey $p=0.05$). Las propiedades físicas y químicas de los sustratos evaluados presentaron cambios significativos a medida que pasan los ciclos de reutilización, pero estos cambios no tuvieron influencia en el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de fresa.

Palabras claves: agua disponible, capacidad de aireación, conductividad eléctrica, contenido nutrimental, *Fragaria x ananassa* Duch, pH.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Eduilkar Ameth Saldaña Yangüéz
Director de Tesis: Dr. Joel Pineda Pineda

GENERAL ABSTRACT

Variation in physical-chemical properties in reused substrates and their influence on growth and development of strawberry

To reduce negative effects due to the disposal of substrates, an alternative is to reuse them during several growing cycles. The possibility of reusing the substrates without any damage to the crops depends on the physical, chemical and biological properties of the material, as well as on the tolerance of plants to abiotic and biotic stress. The objective of this work was to evaluate the change in the physical and chemical properties of the coconut-fiber substrates, perlite and tezontle, after four cycles of reuse and their influence on the growth and development of the strawberry crop. The experiment was carried out in greenhouses at the *Universidad Autónoma Chapingo*. A 3x4 factorial treatment design (substrate, cycles of use) was used, generating 12 treatments, arranged in a randomized complete block design with three repetitions. The experimental unit consisted of PVC gutters with 12 strawberry plants of the Albion cv. The physical and chemical properties evaluated in the substrates were: particle size distribution, thickness index, weighted average diameter, bulk density, moisture retention capacity, total porous space, aeration capacity, readily available water, reserve water, hardly available water and total available water, pH, electrical conductivity and nutritional content (N, P, K, Ca and Mg) at the beginning and at the end of the crop cycle. Fresh weight, nutritional content in leaf, and fruit production and quality were evaluated in live plants. An analysis of variance and multiple comparison of means (Tukey $p=0.05$) were performed on the data. The physical and chemical properties of the substrates evaluated showed significant changes as the cycles of reuse passed, but these changes had no influence on the growth, development and production of the strawberry crop.

Keywords: available water, aeration capacity, electrical conductivity, nutritional content, *Fragaria x ananassa* Duch, pH.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Eduilkar Ameth Saldaña Yangüéz

Thesis Director: Dr. Joel Pineda Pineda [subir a la página anterior](#)

INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción hidropónica bajo invernadero se ha incrementado en diversas partes del mundo y en particular en México (Rivera, 2016). Debido al incremento de los sistemas de producción agrícola bajo ambiente protegido y a las limitantes físicas (profundidad, textura, pedregocidad, compactación), químicas (salinidad, alcalinidad, acidez, inmovilización y fijación nutrimental) y biológicas (contaminación con patógenos y nematodos) que presentan muchos suelos en el país, se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos hidropónicos (Pineda, 2010).

El término "sustrato" que se aplica en la producción de sistemas de cultivo sin suelo, se refiere a todo material sólido diferente del suelo, natural o sintético, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor de forma pura o mezclado, permite el anclaje de las plantas a través de su sistema radical y puede o no participar en el suministro de nutrimentos (Abad *et al.*, 2004; Abad *et al.*, 2005). Los sustratos mejoran la eficiencia de uso de insumos como agua y fertilizantes, además se obtienen mejores rendimientos y calidad de los productos obtenidos; en tales condiciones los sustratos adquieren especial importancia, pues constituyen el medio de desarrollo del sistema radical con todos sus efectos intrínsecos (Abad *et al.*, 2004).

Lemaire (1995) y Lemaire *et al.* (2005) mencionan que, para el buen desarrollo de las plantas, se debe tener un sustrato estable, que puede ser definido desde una perspectiva física, química o biológica. La estabilidad física de un sustrato significa que la estructura de las partículas no cambia y por lo tanto, la porosidad, la capacidad de aireación y la capacidad de retención de humedad no se modifican significativamente con los tiempos de uso; por otra parte, la estabilidad química se refiere al amortiguamiento en pH y en la concentración de cationes y aniones, los cuales pueden ser influenciados por la degradación o descomposición del sustrato; la estabilidad biológica se refiere principalmente a la degradación de la materia orgánica. Siempre que la materia orgánica sea

descompuesta, causará una inmovilización de N, pérdida de la estructura física de las partículas y cambios en el comportamiento químico (Raviv *et al.*, 2002; Raviv & Lieth, 2008). La adición de solución nutritiva al sustrato aumenta la actividad microbiana, además las raíces de la planta durante su crecimiento rompen mecánicamente al sustrato (Domeño *et al.*, 2011) y segregan exudados radicales que incrementan la descomposición del material (Jackson & Wright, 2009).

El reúso de sustratos representa una importante opción de manejo ambiental en los sistemas de cultivo sin suelo, que aplicado de manera adecuada puede contribuir a incrementar la productividad y la calidad de frutos (Dekker *et al.*, 1995; Rivera, 2016). Parsossi *et al.* (2011) mencionan que el número de ciclos de cultivo en que un sustrato puede ser reutilizado, depende de su naturaleza, el tipo de cultivo y su manejo.

Diversos estudios refieren la modificación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de las sustratos y sus posibles efectos sobre el desarrollo de los cultivos. Giuffrida y Consoli (2015) encontraron que, durante los tiempos de reutilización de perlita en el cultivo de tomate, había una reducción general del diámetro de partícula, con la consiguiente disminución en la cantidad de partículas gruesas (≥ 2.00 mm de diámetro) y un aumento en el número de partículas más finas (diámetros de 0.5 a 2 mm). La distribución de partículas de perlita en los contenedores es variable, en el primer año de uso se pierde la mayor parte de partículas finas, especialmente aquellas con un diámetro inferior a 0.5 mm (Acuña *et al.*, 2013); ésta pérdida es causada por lixiviación de partículas finas menores de 0.5 mm de diámetro y por el drenaje en el agua de riego (Orozco & Marfá, 1995; Acuña *et al.*, 2013; Giuffrida & Consoli, 2015; Rivera, 2016). Las partículas de tezontle que estaban entre 2 y 6 mm disminuyeron sus proporciones y partículas menores de 2 mm de diámetro mostraron un aumento significativo con la reutilización, especialmente las que estaban entre 0.42 y 0.84 mm (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2013).

Silber y Raviv (1996) y Morel y Hinsinger (1999) indican que las modificaciones de las propiedades químicas de la perlita pueden estar directamente relacionadas con el crecimiento de la planta en la perlita reutilizada. Pineda (2010) encontró que la acumulación de sales en mezclas de aserrín/tezontle en diferentes proporciones y tamaños de partículas, se debió a un desequilibrio entre la aplicación de nutrimentos con el fertirriego, la absorción por la planta y el porcentaje de drenaje para lixiviar el exceso de sales. Rivera (2016) reportó que el tezontle y la perlita reutilizadas, generaron mayor acumulación de materia fresca y rendimiento de fruto, en relación a la fibra de coco, debido a que ésta presentó cambios en sus propiedades químicas (inmovilización nutrimental).

El presente documento contiene cuatro partes para abordar el tema principal sobre la reutilización de sustratos; en la primera se presenta una revisión de literatura, en donde se describe brevemente el cultivo de fresa, las características del c.v Albión y los diferentes sistemas para producir fresa; además se define qué es un sustrato, cómo se clasifican y cuáles son sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En la segunda parte se presenta un estudio que tuvo como objetivo evaluar los cambios en las propiedades físicas de sustratos de fibra de coco, perlita y tezontle, después de cuatro ciclos de reutilización con el cultivo de fresa. En la tercera parte se evaluaron algunas propiedades químicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, después de cuatro ciclos de reutilización en el cultivo de fresa. En la cuarta parte se evaluó el desarrollo, crecimiento, producción y calidad de fruto en fresa influenciada por el cambio de las propiedades físicas y químicas de los sustratos de fibra de coco, perlita y tezontle, después de cuatro ciclos de reutilización.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Descripción de la fresa

La fresa pertenece al género *Fragaria* (*Fragaria* sp, del latín *fragans*, oloroso) de la familia *Rosaceae* (Bonet-Gigante, 2010); es un híbrido octaplóide reconocido como *Fragaria x ananassa* Duch, producto de la cruce de *F. virginiana* L., nativa del norte de México y norteamérica y *F. chiloensis* Duch. Nativa de Suramérica (Bringhurst *et al.*, 1960). La fresa está distribuida en su mayor parte en las zonas cálidas y templadas del hemisferio norte (Bonet-Gigante, 2010), aunque también tiene una amplia adaptación, se cultiva en latitudes bajas de los trópicos y altas de los subtrópicos (Hancock, 1999).

La fresa es una planta dicotiledónea, autógama, perenne (Dávalos-González *et al.*, 2011), que posee un sistema radical superficial, con un tallo corto comprimido en una roseta basal, denominado corona, del cual se originan yemas axilares, estolones, ejes florales y coronas laterales (Brazanti, 1989; Hancock, 1999). Las hojas están dispuestas en espiral, son pinnadas y generalmente trifoliadas, crecen en roseta, tienen peciolo largos y son trifoliadas con bordes aserrados, presentan tricomas en el envés, flores y frutos (Brazanti, 1989), sólo tienen estomas en el envés (Dávalos-González *et al.*, 2011). Las hojas de la mayoría de las especies viven sólo unos pocos meses y mueren después de la exposición a heladas fuertes en el otoño (Hancock, 1999).

Las coronas poseen meristemas axilares que, dependiendo de las condiciones ambientales y nutrimentales, pueden permanecer aletargadas, desarrollar estolones o inflorescencias. Los estolones son tallos rastreros que producen raíces adventicias, a partir de las cuales se puede desarrollar una nueva planta (Hancock, 1999).

Se reproduce sexualmente a partir de la formación de la inflorescencia en tipo cima dicasial o monocasial con flores hermafroditas (Hancock, 1999),

generalmente se propaga de forma asexual, ya sea por división de coronas, lo cual no es muy común, o por estolones, que es el método más fácil y rápido que permite conservar las características del clon que se desea cultivar y representa la base de su producción (Brazanti, 1989). El fruto se deriva de una modificación del receptáculo floral donde se encuentran los aquenios, desde el punto de vista botánico el fruto es un poliaquenio (Hancock, 1999; Sánchez, 2008).

1.2. Cultivar Albión

El cultivar de fresa Albión se desarrolló en Estado Unidos, a partir de un cruce entre el cultivar Diamante y una selección avanzada denominada Cal 94,16-1, posteriormente fue nombrada Albión para su introducción en muchos países (Ornelas-Paz *et al.*, 2013).

El cultivar Albión es de día neutro muy similar al cultivar Diamante, pero su fruto cónico es de mayor calidad, firme y de buen sabor, además presenta una mejor resistencia a *Phytophthora cactorum*. Sus hojas son ligeramente cóncavas y pubescentes, en tanto que los peciolo son densamente pubescentes y tienen una longitud promedio de 105 mm y un diámetro de 4.1 mm (Shaw & Larson, 2006).

1.3. Sistemas de producción de fresa

Los sistema de producción de fresa son clasificados en función de la colocación de la fruta en el campo, uso de insumos, tecnología, sistema de aprovisionamiento de agua, calidad de la fruta, mercado al que va dirigido; estos se clasifican en Pimentel y Velázquez (2008) y CONAFRE (2011):

Sistema tradicional: se caracteriza por el aprovechamiento de agua superficial para riego y no se utilizan cubiertas protectoras. La fruta se desarrolla sobre la tierra y por lo tanto tiene contacto con el agua de riego; en el aspecto de inocuidad es muy limitado. El rendimiento promedio es de 26 t·ha⁻¹.

Sistema de mediana tecnología: se caracteriza por el uso de riego tecnificado por goteo y sistema de fertirriego utilizando aguas superficiales o aguas subterráneas. Se utilizan cubiertas plásticas para el acolchado, con lo que hay un mejor uso de la radiación solar y protección a la planta de fresa, así como menor presencia de malezas, se utiliza menor cantidad de herbicidas, se obtiene un ahorro de agua de un 60 % en comparación con el riego superficial y se logra un mejor aprovechamiento de los nutrimentos a través del fertirriego. En este caso, la fruta se desarrolla sobre el acolchado, existe menor riesgo de que tenga contacto con el agua de riego. El rendimiento promedio en este sistema de producción es de $32 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Sistema de alta tecnología: en este sistema se utilizan principalmente aguas subterráneas o agua superficial limpia de manantial o de río y presas acondicionadas con algún desinfectante; su aplicación es mediante el fertirriego, se emplea el acolchado y la totalidad de la superficie está cubierta con películas plásticas. La fresa se desarrolla sobre la superficie con acolchado, nunca toca el suelo y no entra en contacto con el agua de riego. Mediante este sistema se mejora extraordinariamente el rendimiento, al obtener entre 70 y 90 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Sistema hidropónico: la producción de fresa en sistemas hidropónicos, a pesar de no estar considerado, de manera explícita, en la clasificación antes descrita, se puede decir que reúne las características de alta calidad de fruta e inocuidad, además permite un uso más eficiente del agua y menor consumo de fertilizantes (Rivera, 2016).

Se consideran sistemas de cultivo hidropónico, aquellos que se desarrollan en una solución nutritiva o en sustratos totalmente inertes, y a los sistemas que cultivan en sustratos orgánicos, como cultivo sin suelo (Baixauli & Aguilar, 2002), aunque Abad *et al.* (1997) los clasifica como cultivos hidropónicos a los desarrollados en agua o sobre materiales inertes más nutrimentos, y cultivos en sustrato a los desarrollados sobre materiales químicamente activos con capacidad de intercambio catiónico. Los sistemas hidropónicos se pueden

establecer en zonas donde se tiene una problemática como: suelos infectados, erosionados, salinizados o contaminados, lo que no permite la implementación de algún cultivo (Cadahía, 2005).

Algunas de las ventajas que tienen los sistemas hidropónicos son (Baixauli & Aguilar, 2002):

- a) Se obtiene una óptima relación aire/agua en el sistema radical de la planta, favoreciendo por tanto el desarrollo del cultivo.
- b) La nutrición está mucho más controlada que en los sistemas de cultivo en suelo, puesto que no existen interacciones.
- c) En sistemas cerrados, en donde el drenaje es reutilizado, se puede conseguir un ahorro de agua y fertilizantes.
- d) Generalmente se obtiene en los cultivos una buena uniformidad que facilita las labores culturales, por ejemplo en la fresa, existe la posibilidad de montar el sistema en altura, que facilita la poda de hoja y recolección.
- e) Se puede conseguir una mayor precocidad y mayor potencial productivo debido a que la planta consume menos energía para su desarrollo. Se obtiene una mejor calidad de cultivo y de producción.

1.4. Sustratos

El termino sustrato se aplica en horticultura a todo material sólido distinto al suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que se coloca en un contenedor, en forma puro o de mezcla, permite el anclaje del sistema radical, desempeña lo por tanto un papel de soporte de la planta (Abad *et al.*, 2005). El sustrato puede intervenir o no en el complejo proceso de la nutrición de la planta. Burés (1997) define a un sustrato como cualquier medio que se utilice para cultivar plantas en un contenedor.

Lemaire (1995) y Lemaire *et al.* (2005) mencionan que el sustrato está formado por tres fases: sólida, constituida por las partículas; líquida, constituida por el agua y nutrimentos; gaseosa, responsable del transporte del oxígeno y dióxido de carbono entre las raíces. Desde el punto de vista hortícola, el objetivo de cualquier sustrato en un cultivo es producir una cosecha elevada y de calidad en el más corto período de tiempo, con los más bajos costos de producción (Abad *et al.*, 1993). Cuando se va a elegir un sustrato hay que tener en cuenta numerosos factores como: tamaño y forma del contenedor o saco, condiciones climáticas, sistemas de riego y fertilización, aspectos económicos, experiencia en su utilización, etc. (Abad *et al.*, 2004).

1.5. Propiedades físicas de los sustratos

Las propiedades físicas de los sustratos son las más importantes ya que una vez que el sustrato esté en el contenedor, y la planta esté creciendo en él, no es posible modificarlas, lo que contrasta con las características químicas de los sustratos, que pueden ser modificadas mediante técnicas de cultivo apropiadas, realizadas por el propio agricultor (Ansorena, 1994). Las propiedades físicas más importantes son aquellas relacionadas con los poros, como la granulometría, la porosidad y el reparto de las fases sólida y gaseosa (Peñuelas & Ocaña, 2000). Según Ansorena (1994), para que un sustrato cumpla las funciones de suministro adecuado de agua y aire, deben poseer una elevada porosidad y capacidad de retención de agua, unidas a un drenaje rápido y una buena aireación. Por su parte Burés (1997), afirma que las características hídricas de los sustratos dependen de la distribución de poros en el sustrato y que las partículas de distintos materiales se comportan de modos diferentes de acuerdo con su composición, densidad, compresibilidad, rugosidad, estructura interna, forma, características superficiales, isotropía y tamaño. Por otra parte, Raviv y Lieth (2008) mencionan que las partículas son las propiedades físicas más importantes, ya que los tamaños presentes y su abundancia relativa tienen una influencia significativa en la mayoría de sus propiedades físicas; el análisis del tamaño de partículas consiste en aislar las fracciones de diferentes tamaños

y luego medir la abundancia en cada uno de ellos. El tamaño de partícula y la composición mineral determinan en gran medida la naturaleza y el comportamiento del medio: porosidad, interacciones con fluidos y solutos, así como su compresibilidad y resistencia.

1.5.1. Granulometría (G)

Los sustratos suelen clasificarse en granulares y fibrosos desde el punto de vista de las partículas que lo integran. La distribución del tamaño de partículas que componen a un material se expresa mediante la granulometría. La importancia de conocer el tamaño de las partículas reside en que éstas definen a su vez el tamaño de los poros (Ansorena, 1994), determinando así el balance entre el contenido de agua y aire del sustrato, lo que influye en el crecimiento de las plantas (Abad *et al.*, 2004).

Los materiales de textura gruesa, con tamaño de partícula superior a 0.9 mm, con poros grandes, superiores a 100 μm , retienen cantidades reducidas de agua y están bien aireados. Los materiales finos, con partículas inferiores a 0.25 mm y tamaño de poros inferior a 30 μm , retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible y están mal aireados. El mejor sustrato se define como aquel material de textura media a gruesa, con una distribución de tamaño de poros entre 30 y 300 μm , equivalente a una distribución de tamaño de las partículas entre 0.25 y 2.5 mm que retiene suficiente agua fácilmente disponible y posee, además, un adecuado contenido de aire (Puustjärvi, 1983; Abad *et al.*, 2004). Ansorena (1994) indica que tanto la porosidad como la cantidad de agua retenida varían poco si las partículas están entre 1 y 10 mm; sin embargo, al pasar a partículas de tamaño inferior a 1 mm, se observa un brusco descenso de la porosidad y aumento de la retención de agua. Pero no todas las partículas menores de 1 mm tienen la misma influencia en las propiedades físicas. Al respecto, Handreck (2008) estudió mezclas de corteza de pino y concluyó que la fracción de partículas menor de 0.5 mm, en particular la de 0.1 a 0.25 mm, presentó la máxima influencia en la porosidad de aire y en la retención de agua.

1.5.2. Espacio poroso total (EPT)

Es el volumen total del medio de cultivo no ocupado por partículas orgánicas o inorgánicas. Su nivel óptimo se sitúa por encima del 85 % del volumen del sustrato (Abad *et al.*, 2005). Además de los poros que quedan entre las partículas (porosidad interparticular), algunos materiales pueden tener poros internos (porosidad intraparticular), que podrán estar conectados con el exterior o ser cerrados (ocluido) (Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 2004, 2005). Si el material presenta porosidad intraparticular, el comportamiento de los fluidos (fase acuosa y fase gaseosa) será distinto, según sea porosidad abierta o cerrada (Abad *et al.*, 2004). Los poros cerrados no son efectivos, ya que la raíces no tendrán acceso a ellos, y por lo tanto no podrán tomar el agua y aire que contengan (Ansorena, 1994); este tipo de porosidad le proporciona al sustrato una cierta ligereza; si la porosidad es abierta, el agua puede circular por el interior de las partículas, pudiendo participar, en consecuencia, en la nutrición hídrica de las plantas (Lemaire *et al.*, 1989, 2005).

El total de poros existentes en un sustrato se divide en: 1) poros capilares de tamaño pequeño ($< 30 \mu\text{m}$), que son los que retienen agua, y 2) poros no capilares o macroporos, de mayor tamaño ($>30 \mu\text{m}$), que son los que se vacían después que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988). Sin embargo, los poros no drenan completamente, quedando una fina película de agua retenida alrededor de las partículas del sustrato. Esta película de agua disminuye en espesor a medida que el medio se seca (Abad *et al.*, 2004).

1.5.3. Capacidad de aireación (CA)

La capacidad de aireación es la proporción de volumen de sustrato que contiene aire después que este ha sido saturado con agua y dejado drenar libremente o aplicando una tensión 10 cm de columna de agua. El valor optimo se sitúa entre el 20 y 30 %, esta propiedad es la responsable de suministrar aire y, por lo tanto, oxígeno a las raíces de la planta (Abad *et al.*, 2004, 2005). La CA

depende de la altura del contenedor, un mismo volumen de sustrato retendrá más agua cuanto menor sea la altura del contenedor (Baixauli & Aguilar, 2002).

La disponibilidad de oxígeno en las raíces depende de la tasa de intercambio gaseoso entre la atmosfera y el medio de cultivo (Raviv & Lieth, 2008). El oxígeno es transferido hacia las raíces (mediante difusión) a través de la lámina de agua que las rodea. La velocidad de difusión de oxígeno es 10^4 veces más pequeña en el agua que el aire. Así que el espesor de la lámina de agua alrededor de las raíces es muy importante. Si la granulometría y 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 CO_2 se acumulará y se producirá una liberación de etileno, lo que resultará en una inhibición del crecimiento y a veces, en le marchitamiento de la planta (Raviv *et al.*, 1986).

Según Abad *et al.* (2004, 2005), las raíces requieren oxígeno para mantener su actividad metabólica y su crecimiento. Un déficit temporal de oxígeno puede reducir el crecimiento de las raíces y la parte aérea, pero condiciones de anaerobiosis durante varios días pueden llegar a provocar la muerte de algunas raíces. El oxígeno es también requerido por los microorganismos y, por tanto, las plantas cultivadas en sustratos orgánicos, con elevada población microbiana, requieren el doble o más de oxígeno que las plantas cultivadas en suelos minerales o sustratos sin abundante materia orgánica.

1.5.4. Agua fácilmente disponible (AFD)

El AFD es la diferencia entre la cantidad de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a tensión de 10 cm de columna de agua y la cantidad de agua presente en dicho sustrato después de una succión de 50 cm de columna de agua, lo que representa una succión de bajo esfuerzo por las plantas en el proceso de absorción de agua. Muchos experimentos han demostrado que a una tensión de agua superior a 50 cm puede afectar desfavorablemente al crecimiento y desarrollo de las plantas

(Baixauli & Aguilar, 2002). El valor óptimo para el agua fácilmente disponible oscila entre el 20 y 30 % del volumen (Abad *et al.*, 2004, 2005).

Los poros que se mantienen llenos de agua después del drenaje del sustrato son los de menor tamaño ($\leq 30 \mu\text{m}$). Es necesario 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, lo que interesa en la capacidad de retención de agua, es la fracción fácilmente disponible (Abad *et al.*, 2004, 2005).

Según Bunt (1988) los sustratos pueden tener una baja capacidad de retención de agua fácilmente disponible ya que: 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.

1.5.5. Agua de reserva (AR)

El AR 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 de sitúa entre 4 y 10 % en volumen (Baixauli & Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004, 2005).

1.5.6. Agua total disponible (ATD)

El agua total disponible de un sustrato se define como la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva. Su valor optimó varía entre 24 y 40 % del volumen del sustrato (Baixauli & Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004, 2005).

1.5.7. Agua difícilmente disponible (ADD)

E ADD se define como el volumen de agua retenida por el sustrato a la tensión de 100 cm de columna de agua. Esta agua puede ser utilizada por las plantas

en condiciones de estrés hídrico (Baixauli & Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004, 2005).

1.5.8. Densidad aparente (Dap)

La densidad aparente es la relación entre la masa o peso seco de las partículas y el volumen aparente que ocupan. El volumen aparente es el volumen que ocupa un sustrato incluyendo la materia sólida y los poros internos o externos, tanto los abiertos como los cerrados (Burés, 1997). La densidad aparente juega un papel importante ya que los sustratos y los contenedores se transportan durante su manejo y manipulación, en consecuencia, su peso debe tenerse en cuenta el anclaje de las plantas, cuanto más alta sea la planta, mayor Dap deberá tener el sustrato (Abad *et al.*, 2004, 2005).

Cuando aumenta la Dap, la porosidad disminuye. Al comprimirse una muestra de sustrato, se observa un aumento de la densidad aparente y una disminución de la porosidad (Burés, 1997). La reducción del tamaño de los poros que se produce al aumentar la compactación hace que disminuya la porosidad ocupada por aire y aumente la retención de agua (Ansorena, 1994).

En los invernaderos donde el viento no es factor limitante, la densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como $0.15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Abad *et al.*, 2004). Las plantas que crecen al aire libre deben ser cultivadas en sustratos con densidades aparentes comprendidas entre 0.50 y $0.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Abad *et al.*, 2005).

1.6. Propiedades químicas

Un sustrato está formado por una fase sólida que alberga un espacio de poros que pueden estar llenos de aire o de agua. La fase sólida, líquida y gaseosa, pueden generar sustancias químicas reactivas que se transforman entre ellas y actúan e interaccionan con el ambiente que circula al sustrato (Burés, 1997). Las superficies de partículas y otros sólidos en los sustratos hortícolas soportan cargas eléctricas permanentes y/o variables. Las propiedades de carga

superficial y las características de disolución de los sólidos del sustrato son importantes, ya que afectan a la composición iónica de la solución nutritiva. Las propiedades químicas de los sustratos se determinan antes de establecer las plantas, al tratar la fase sólida y líquida, hasta quedar homogéneas. Sin embargo, a lo largo del período de crecimiento se acumulan en el sustrato compuesto orgánicos excretados a partir de la raíces de las plantas o resultantes de proceso de descomposición. De este modo, las superficies de los sólidos recién formados se vuelven heterogéneas y las propiedades químicas pueden ser significativamente diferentes a las que se definió y caracterizó antes de su uso (Raviv & Lieth, 2008). Abad *et al.* (2004, 2005) indican que los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen mayormente a la química de los sustratos, debido a la formación y presencia de sustancias húmicas, el producto final más importante de la descomposición de la materia orgánica.

1.6.1. Capacidad de intercambio catiónico

Es la capacidad de un sustrato de adsorber e intercambiar cationes. Se expresa generalmente en miliequivalentes por 100 gramos de sustrato o por volumen de sustrato. Los cationes divalentes generalmente están adsorbidos con más fuerza que los monovalente y se intercambian con más dificultad, excepto el H^+ (Burés, 1997).

La capacidad de intercambio catiónico depende del pH. Los materiales muy ácidos, o que tienen el complejo de cambio saturado de H^+ liberan al mismo que se intercambia con los iones de la solución, se puede saturar el complejo de cambio de un sustrato con iones determinados mediante su titulación (Burés, 1997). El valor óptimo de la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de fertirrigación (Lemaire *et al.*, 1989). Si la fertirrigación se aplica frecuentemente, la capacidad de adsorción de 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, superior a 20 meq/100 g (Abad *et al.*, 1993).

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 (Puustjärvi, 1983). Las húminas, contienen grupos funcionales cargados negativamente, son los responsables de retener cationes en formas no lixiviables, en proporciones variables, en función de la afinidad del catión por los centros de adsorción y de su concentración en la disolución. Ciertos sustratos minerales de naturaleza arcillosa, tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente, mediante sustitución catiónica o isomorfias en los cristales del mineral (Abad *et al.*, 2004).

1.6.2. Disponibilidad de nutrientes

La mayoría de los sustratos minerales no se descomponen química ni biológicamente y, desde un punto de vista práctico, se puede considerar desprovisto de nutrientes. Los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre sí, algunos poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables, mientras que otros presentan niveles elevados (Abad *et al.*, 2004). En cualquiera de los casos, y para un crecimiento óptimo de las plantas, deberían adicionarse siempre nutrientes como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo (Raviv *et al.*, 1986).

Cuando se elige un sustrato orgánico como medio para desarrollar un cultivo, será conveniente realizar un análisis de extracto de saturación, para ajustar la solución nutritiva, al menos durante las primeras semanas de cultivo. Como ejemplo se tiene la fibra de coco que inicialmente puede ser rica en potasio (Baixauli & Aguilar, 2002).

1.6.3. Salinidad

A consecuencia del volumen reducido del medio de cultivo que disponen las raíces de las plantas cultivadas en contenedor, la concentración de nutrientes

en la solución suele ser elevada, muy superior a la habitual en cultivos de campo en suelos minerales. Con ello aumenta el riesgo de acumulación de niveles excesivos de sales disueltas, lo que se conoce como salinidad. Cuando el nivel de la salinidad se eleva excesivamente, la planta puede llegar a padecer un déficit hídrico, semejante al que se produce en condiciones de sequía (Ansorena, 1994).

Según Abad *et al.* (2004, 2005) las causas que provocan un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar en el contenedor, son:

- a) La presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se mineralizan para producir nitratos o bien cuando liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas.
- b) Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución nutritiva es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación.
- c) Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.

La salinidad de una solución acuosa se mide por su contenido en sales disueltas (mg/L^{-1}), más comúnmente, por su capacidad para conducir la corriente eléctrica o conductividad (en miliSiemens por cm, mS/cm , microSiemens por cm, $\mu\text{S/cm}$). Cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad de la solución. Para controlar la salinidad de un medio de cultivo, se mide la conductividad en un extracto acuoso del mismo (Ansorena, 1994).

1.6.4. pH

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando los nutrientes se

suministren en forma asimilable. No obstante, el crecimiento y el desarrollo de las plantas se ven reducido de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas (Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 2004).

El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intenso, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido (Abad *et al.*, 2004, 2005). El nivel óptimo del pH en cultivo sin suelo de hortalizas es 5.5-6.8. Con valores de 5.0 a 6.5, la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo de 5.0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg y B, mientras que por encima de 6.5 puede disminuir la disponibilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu. Los óxidos metálicos se hacen más solubles al bajar el pH por debajo de 5.0, pudiendo llegar a ser tóxicos (Baixauli & Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004).

Si en un sustrato orgánico el pH está fuera del intervalo, se debe llevar a cabo un ajuste del pH. En el caso de tener un pH ácido, se requiere la adición de cal o dolomita para incrementar el pH, se tratará simplemente de neutralizar el exceso de hidrogeniones, sin necesidad de aportar iones de calcio al complejo de cambio. En el caso de tener un pH alcalino, este se puede reducir con la adición de azufre. Las cantidades de cal o azufre a añadir al sustrato dependen de su pH original, del pH final a alcanzar y de su capacidad e intercambio catiónico (Bunt, 1988; Handreck & Black, 2005; Ansorena, 1994).

El pH alcalino de algunos sustratos minerales inertes puede ser neutralizado por la solución nutritiva, ya que su poder tampón es prácticamente nulo (Abad *et al.*, 2005).

1.6.5. 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, puesto que su valor depende del material y decrece a medida que fermenta la materia orgánica (Burés, 1997;

Abad *et al.*, 2004). Los daños que aparecen sobre las plantas cultivadas en materiales orgánicos inmaduros, son debido a la inmovilización de nitrógeno, así como a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizósfera. Esta situación es 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 también es consumido por la población microbiana (Abad *et al.*, 2004).

Una relación de C/N entre 20 y 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato, y un índice de madures y estabilidad del material orgánico (Abad *et al.*, 1993). Para compostas la relación C/N varía entre 5 y 30 (Burés, 1997).

1.7. Propiedades biológicas

1.7.1. Velocidad de descomposición

Todos los sustratos orgánicos son susceptibles a la degradación biológica, situación que se ve favorecida por las condiciones ambientales que prevalecen en el invernadero. La población microbiana es la responsable de dicho proceso, pudiendo resultar finalmente su actividad biológica en deficiencias de oxígeno y nitrógeno, liberación de sustancias fitotóxicas y contracción del sustrato (Abad *et al.*, 2004). Las condiciones de cultivo deberían ser consideradas, ya que si el cultivo se prolonga durante un largo período de tiempo, resulta recomendable el uso de materiales estables, mientras que si las plantas son de crecimiento rápido, pueden prosperar en materiales menos resistentes a la degradación (Raviv *et al.*, 1986).

1.7.2. Actividad enzimática

Las enzimas se liberan después de la descomposición de la materia orgánica, las cuales están adsorbidas al humus o a las partículas de arcilla no ligadas a las fracciones vivas, se han identificado diferentes actividades enzimáticas (celulasa, proteasa, ureasa), que contribuyen a hidrolizar moléculas de cadena

larga, haciendo disponible para plantas algunos elementos resultantes de la hidrólisis (Burés, 1997; Abad *et al.*, 2005).

1.7.3. Actividad reguladora de crecimiento

Algunos productos derivados de la descomposición de la materia orgánica, como los derivados fenólicos, afectan el balance hormonal inhibiendo o favoreciendo la actividad de las hormonas vegetales. Existen algunas hormonas ligadas a la materia orgánica, como las auxinas o el etileno que se libera por condiciones reductoras, debido al exceso de agua o falta de oxígeno (Burés, 1997; Cadahia, 2005).

1.7.4. Actividad supresora frente a patógenos

Inhiben el desarrollo de determinados agentes fitopatógenos, especialmente hongos. Esta propiedad se ha encontrado en materiales orgánicos compostados, particularmente corteza de árboles, con marcados efectos supresivos sobre diferentes hongos: *Fusarium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Pythium* (Abad *et al.*, 2005; Handreck y Black, 2005).

1.8. Clasificación de sustratos

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, su capacidad de degradación, su naturaleza y sus propiedades (Abad *et al.*, 2004, 2005).

1.8.1. Por propiedades químicas

Desde el punto de vista químico los sustratos se pueden clasificar en (Burés, 1997; Abad *et al.*, 2004, 2005;):

a) Sustratos químicamente inertes: son aquellos que no se descomponen química o bioquímicamente, no liberan elementos solubles de forma notable ni tienen capacidad de adsorber elementos añadidos a la solución del sustrato. En

los sustratos inertes no existe transferencia de materia entre el material sólido y la solución.

b) Sustratos activos químicamente o no inertes: reaccionan liberando elementos debido a la degradación, disolución o reacción de los compuestos que forman el material sólido del sustrato o bien adsorbiendo elementos en su superficie que pueden intercambiar con los elementos disueltos en la fase líquida.

1.8.2. Por su naturaleza

Materiales orgánicos: estos a su vez se pueden dividir en (Abad *et al.*, 2004, 2005):

De origen natural: se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica.

De síntesis: son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtiene mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.).

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. Ejemplo de estos materiales son: corteza de árboles, aserrín, y virutas de la madera, residuos sólidos urbanos, lodo de depuración de aguas residuales, cascarilla de arroz, paja de cereales, fibra de coco, etc.

Materiales inorgánicos (minerales) (Abad *et al.*, 2004, 2005):

De origen natural: se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamiento físicos sencillo. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc.)

Transformados o tratados industrialmente. A partir de roca o minerales, mediante tratamiento físico y veces también químicos, más o menos complejos, que modifican notablemente las características de los materiales de partida (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida etc.)

Residuos y subproductos industriales. Comprende los materiales de muy distintas actividades industriales (escoria de horno alto, estériles de carbón, etc.)

1. 9. Fibra de coco

La fibra de coco es un subproducto de la industria, que se obtiene del mesocarpio del fruto del coco *Cocos nucifera* L., está constituida principalmente por lignina y celulosa (Meerow, 1994). Los subproductos resultantes del desfibrado de la nuez de coco proceden del mesocarpio de la misma, consisten en fibra largas, más restos de fibra y polvo; son generalmente estos restos de fibra, de longitud inferior a 2 mm, los que suelen utilizarse en mezclas como sustratos y se presentan generalmente prensadas en ladrillos que deben deshacerse y rehumedecerse previamente a su uso. Las fibras largas, de longitud superior a 16 mm, se utilizan como sustratos para el cultivo hidropónico (Burés, 1997).

La fibra de coco presenta cualidades como: alta retención de agua (puede llegar a retener más de 9 veces su peso en agua) excelente drenaje, hidrofílico, buena mojabilidad, ausencia de malezas y patógenos y es un recurso renovable con bajo impacto ambiental (Meerow, 1994). El rango de pH de la fibra de coco es de 5.5 a 6.8, contiene de 6 a 60 ppm de fósforo, de 170 a 600 ppm de potasio (Robbins & Evans, 2008). Tiene bajo contenido de nutrientes asimilables, particularmente nitrógeno, calcio y magnesio (Burés, 1997; Abad *et al.*, 2005). El principal problema que se presenta es que tiene un alto contenido de Na, K, Cl (Aendekerk *et al.*, 2000).

1.10. Perlita

Es básicamente un aluminosilicato de origen volcánico y de composición variable, que depende de las características de la roca volcánica original (Abad *et al.*, 2004). La perlita procede de rocas volcánicas vítreas, que se han formado por enfriamiento rápido, constituyendo un material amorfo, que contiene un 2-5 % de agua combinada. En su tratamiento industrial, este material se fragmenta en partículas de pequeños tamaños, se precalienta a 300-400 °C y se deposita en hornos a 1000-1100 °C durante un corto periodo de tiempo (5 minutos). El agua combinada se evapora rápidamente, expandiéndose el producto (hasta 20 veces su volumen inicial) para formar un material con agregados ligeros, con una densidad aproximada de 128 kg/m³, cuando la roca original pesaba 1500 kg/m³ (Urrestarazu-Gavilán, 2004).

La perlita conforma una estructura celular cerrada. Su superficie es rugosa y contiene numerosas indentaciones, lo que proporciona una gran área superficial y le permite retener agua en su superficie. Debido a esta estructura celular cerrada, el agua es retenida solamente en la superficie de las partículas o en los poros existentes dentro de ellas, siendo liberadas a muy bajas tensiones (Jackson, 1974). En consecuencia, las mezclas de sustratos con elevada proporción de perlita están usualmente bien aireadas y no retiene cantidades altas de agua (Verdonck, 1984; Verdonck *et al.*, 1984). Esta condición determina que la perlita se utilice ampliamente como componente de aireación en los medios de cultivos (Bunt, 1988). Abad *et al.* (2004) mencionan que las características físicas de la perlita se ven afectada por el tamaño y la densidad de sus partículas.

Bunt (1988) menciona que el tipo de perlita que se destaca en el comercio es la B-12, formada por fracciones finas, medidas y gruesas (0-5 mm), que tiene una densidad 105-125 kg/m³, es inerte, con pH neutro o ligeramente alcalino (7.0-7.5) y posee una capacidad de intercambio catiónico muy baja (0.15 meq/00 g).

Urrestarazu-Gavilán (2004) menciona que la perlita es un material inerte que no se descompone biológicamente ni químicamente. Está compuesta por SiO_2 (73-75 %) y Al_2O_3 (11-13 %) y desde el punto de vista práctico, se puede considerar desprovista de nutrientes. Sin embargo, la utilización de soluciones nutritivas medianamente ácida, en todo caso con pH menor o igual a 5 puede resultar con problema de fitotoxicidad, debido a una excesiva solubilidad de aluminio. La perlita puede degradarse durante el ciclo, perdiendo su estabilidad granulométrica, lo que puede favorecer condiciones de anegamiento en la parte superior del saco, con la consiguiente reducción de la aireación, experimenta una reducción en su inercia térmica después de los primeros riegos.

1.11. Tezontle

El tezontle, arena volcánica o escoria volcánica, es un material procedente de la erupción volcánica, constituida por silicato de aluminio, formada por fragmento y partículas de lava porosa y poco pesada, redondeados o irregulares, de 2 a 50 mm, que se formaron al ser emanados por la lava y enfriamiento rápido, constituyendo el manto piroclástico (Burés, 1997; Miranda-Velázquez *et al.*, 2012). Es un material económico que se encuentra en grandes depósitos presentes en todos aquellos lugares donde existen volcanes (Miranda-Velázquez *et al.*, 2012).

El tezontle puede ser de color rojo, negro o amarillo, los tres pueden emplearse como sustrato en la hidroponia, presenta partículas de varios tamaños, mismas que pueden separarse con un tamaño de malla apropiado, para obtener diferentes tamaños de arena y grava (Miranda-Velázquez *et al.*, 2102).

El tezontle negro está ligeramente erosionado y consiste en brechas piroclásticas, el amarillo es un producto de la erosión del tezontle negro y el rojo que procede de otro tipo de erupción volcánica, cuyo color es debido a la presencia de hierro en forma férrica (Burés, 1997). En México, el tezontle rojo es uno de los materiales inorgánicos más usados en la producción de hortalizas

y ornamentales, debido principalmente a su bajo costo y disponibilidad (Anicua, 2008).

El tezontle tiene una elevada densidad aparente (470 a 900 kgm³), por lo que es un material relativamente pesado, tiene elevada capacidad de aireación (45 a 65 % en volumen) y poca capacidad de retención de agua fácilmente disponible (Burés, 1997).

Las partículas de tezontle forman poros de empaquetamiento simple y vesículas, la formación de mesoporos se presenta en partículas mayores a 0.25 mm. A medida que el tamaño de las partículas disminuye los poros vesiculares tienden a desaparecer. Los poros son de tipo irregular, conectados y no conectados con la porosidad intraparticular (Anicua, 2008).

1.12. Literatura citada

- Abad, B. M., Martínez, P. F., & Martínez, J. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivos. *Acta de Horticultura*, 11, 141-154.
- Abad, B. M., Noguera, P., Noguera, V., Roig, A., Cegarra, J., & Paredes C. (1997). Reciclados de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 19, 92-109.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2004). Los Sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. G. Urrestarazu (3ª Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). España: Mundi-Prensa.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2005). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In C. Cadahía (3ª Ed), *Fertirrigación: Cultivos hortícolas y ornamentales* (pp. 299-352). España: Mundi-Prensa.
- Acuña, R., Bonachela, S., Magán, J., Marfá, O., Hernández, J., & Cáceres, R. (2013). Reuse of rockwool slabs and perlite grow-bags in a low-cost greenhouse: Substrates physical properties and crop production. *Scientia Horticulturae*, 160, 139-147.
- Aendekerk, G. J.L., Cevat, H., Dokmans, N., Vanelderen, C., Kipp, J. A., Dekreij, C., Werer, G. (2000). *International substrate manual*. Nertherlnds Elservier International. 94 p.
- Anicua, S. R. (2008). Caracterización física y micromorfológica de materiales orgánicos e inorgánicos para la generacón de mezclas de sustratos en la producción de *Lisianthus (Eustoma gradilorum)*. (Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.)
- Ansorena, M. J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. España, Madrid: Mundi-Prensa. 172 p.

- Baixauli, C., & Aguilar, J. M. (2002). *Cultivos sin Suelos de Hortalizas, Aspectos Prácticos y Experiencias*. España, Valencia: Generalitat Valenciana. 110 p.
- Bonet-Gigante, J. (2010). *Desarrollo y caracterización de herramientas genómicas en fragaria diploide para la mejora del cultivo de fresa*. (Tesis de Doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España). 241 p.
- Brazanti, E. C. (1989). *La Fresa*. España, Madrid: Mundi-Prensa. 386 p.
- Bringhurst, R. S., Voth, V., & Hook, V. D. (1960). Relationship of root starch content and chilling history to performance of California strawberries. *Proceeding American Society for Horticultural Science*, 75, 373-381.
- Bunt, A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants*. London, England: Unwin Hayman Ltd. 301 p.
- Burés. S. (1997). *Sustratos*. España, Madrid: Agrotécnicas. 342 p.
- Cadahía, C. (2005). *Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales*. España, Madrid: Mundi-Prensa. 681 p.
- CONAFRE. (2011). *Sistema Producto Fresa: Plan Rector Nacional 2012*. Zamora, Mich: Consejo Nacional de la Fresa A. C. Comité de la Agroindustria y Productores de la Fresa A. C. 43 p.
- Dávalos-González, P. A., Aguilar-García, R., Jofrey-Garfias, A. E., Hernández-Razo, A.R., & Vázquez-Sánchez, M. N. (2011). *Tecnología para sembrar viveros de fresa* (3ª Ed). México, Celaya, Gto.: INIFAP. 158 p.
- Dekker, A., Houx, N. W., & Runia, W. T. (1995). Behaviour of oxamil and propamocarb in two rockwool cultivation systems: open drainage and recirculating of nutrient solution excess. *Acta Horticulturae*, 382, 278-287
- Domeño, I., Irigoyen, I., & Muro J. (2011). Comparison of traditional and improved methods for estimating the stability of organic growing media *Scientia Horticulturae*, 130, 335–340. Doi:10.1016/j.scienta.2011.07.012
- Giuffrida, F., & Consoli, S. (2015). Reusing Perlite substrates in soilless cultivation: Analysis of Particle size, Hydraulic Properties, and Solarization Effects. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000968.
- Hancock, J. F. (1999). *Strawberries*. Crop production science in horticulture 11 London, UK: International Publishing. 236 p.
- Handreck, K. A., & Black, N. (2005). *Growing media for ornamental plant and turf*. Australia Kensington: New South Wales University Press. 544 p.
- Handreck, K. A. (2008). Particle size analysis and the physical properties of growing media for containers. *Commun. Soil science and plant analysis*, 14(3), 209-222. Doi.org/10.1080/00103628309367357
- Jackson, D. K. (1974). Some characteristics of perlite as an experimental growth médium. *Plant and Soils*, 40, 161-167.
- Jackson, B. E., & Wright, R. D., (2009). Changes in chemical and physical properties of pine tree substrate and pine bark during long-term nursery crop production. *HortScience*, 44, 791–799.
- Lemaire, F., Datigues, A., Riviere, L. M., & Charpentier. S. (1989). *Cultures en Pots et Conteneurs*. Francia, Paris-Lomoges: Institut national de la recherche agronomique. 189 p.

- Lemaire, F. (1995). Physical Chemical and Biological Properties of Growing Medium. *Acta Horticulturae*, 396, 273-284. doi:10.17660/ActaHortic.1995.396.33.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Riviere, L. M., Charpenter, S., & Model, P. (2005). *Cultivos en Maceta y Contenedores. Principios Agronómicos y Aplicaciones*, (2ª Ed). España, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 232 p.
- Meerow, A. W. (1994). Growth of two subtropical ornamentals using coir (coconut mesocarp pith) as a peat substitute. *Hortscience*, 29 (12), 1484-1486.
- Miranda-Velázquez, I., Gil-Vázquez, I., Morales-Parada, J. T., & Navarro-López, E. R. (2012). *Introducción a la hidroponía*. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola. México- Texcoco, Chapingo. p 105.
- Morel, C., & Hinsinger, P., (1999). Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. *Plant and Soil*, 211, 103-110.
- Ornelas-Paz, J. De. J., Yahia, E. M., Ramírez-Bustamante, N., Pérez-Martínez, J. D., Escalante-Minakata, M. Del. P., Ibarra-Junquera, V., Ochoa-Reyes, E. (2013). Physical attributes and chemical composition of organic strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Albion) at six stages of ripening. *Food Chemistry*, 138, 372-381.
- Orozco, R., & Marfá, O. (1995). Granulometric alteration, air-entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. *Acta Horticulturae*, 408, 147-161. Doi:10.17660/ActaHortic.1995.408.15
- Pardossi, A., Carmassi, G., Diara, C., Incrocci, L., Maggini, R., & Massa, D. (2011). *Fertigation and substrate Management in closed soilless culture*. Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie, Università di Pisa, Pisa. Consultada en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.501.28&rep=rep1&type=pdf>
- Peñuelas, J., & Ocaña, L. (2000). *Cultivo de plantas forestales en contenedor*, (2ª Ed). España, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 190 p.
- Pimentel, J. L., & Velázquez, M. (2008). *Impacto socioeconómico de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Duero y su importancia en la producción de fresa; Informe técnico*. Zamora, Mich. : SAGARPA-CONAFRE A.C. 120 p.
- Pineda J. (2010). *Caracterización del aserrín de pino como sustrato hidropónico durante cinco ciclos de cultivo con jitomate*. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura). 138 p.
- Puustjärvi, V. (1983). Nature of change in peat properties during decomposition. *Peat and Plant Yearbook*, 5-20.
- Raviv, M., Chen, Y., & Inbar, Y. (1986). Peat and substitutes as growth media for container-grown plants. In: Chen, Y., Avnimelech, Y. *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture* (pp. 257-287). Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., & Bar-Tal, A. (2002). Substrates and their analysis, In: D. Savvas and H. Passam (eds.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals* (pp. 25–101). Athens: Em- bryo Publ.

- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soiless Culture: Theory and Practice*. United States of America: Editorial Elsevier. 625 p.
- Rivera, R. (2016). Propiedades físicas de sustratos y sus efectos en la nutrición de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), en sistemas hidropónico. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura). 107 p.
- Robbins, J. A. & Evans, M. R. (2008). *Greenhouse and nursery series, Growing for container production in a greenhouse or nursery part I components and mixes*. United States of America, University of Arkansas: Division of agriculture. 4 p. Consultado en <https://www.uaex.edu/publications/PDF/FSA-6097.pdf>
- Rodríguez-Díaz, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macias, R., González-Eguiarte, D. R., & Mena-Munguía, S. (2013). Reúso del tezontle: Efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra Latinoamericana*, 31, (4), 275-284. Consultado en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57329629002>
- Sánchez, R. (2008). *El Cluster Agroindustrial de Zamora. La Red de Valor Fresa*, (1ª ed). México, Michoacán, Morelia: Fundación Produce. 152 p.
- Shaw, D. V., & Larson, K. D. (2006). *Strawberry plant named 'Albión' US Patent PP16 228 P3*. Consultado en <file:///Users/Eduilkar/Downloads/USPP16228.pdf>
- Silber, A., & Raviv, M., (1996). Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant and Soil* 186, 353–360.
- Urrestarazu-Gavilán, M. (2004). *Tratado de cultivo sin suelo* (3ª ed). España, Madrid: Editorial Mundi-Prensa. 914 p.
- Verdonck, O. (1984). New developments in the use of graded perlite in horticultural substrates. *Acta Horticulturae*, 150, 575-581.
- Verdonck, O., Penninck, R., & De Boodt, M. (1984). The physical properties of different horticultural substrates. *Acta Horticulturae*, 150, 155-160.

2. VARIACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS EN SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

2.1. Resumen

La eliminación de los sustratos al final del cultivo es una amenaza potencial para el ambiente. Para disminuir efectos negativos, está la alternativa de reutilizar los sustratos durante varios ciclos de cultivo, además de aumentar su rentabilidad. La posibilidad de reutilizar los sustratos sin ningún daño a los cultivos, depende de las propiedades físicas, químicas y biológicas del material, así como de la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y/o biótico. Se evaluaron los cambios en las propiedades físicas de tres tipos de sustratos después de cuatro ciclos de reutilización en el cultivo de fresa. El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizó un diseño de tratamientos factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso), generando 12 tratamientos, arreglados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en canaletas de PVC con 12 plantas de fresa del cv. Albión. Se evaluaron las propiedades físicas: distribución de tamaño de partículas, índice de grosor, diámetro medio ponderado, densidad aparente, capacidad de retención de humedad, espacio poroso total, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible y agua total disponible, al inicio y al final del ciclo de cultivo. A los datos se les realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias (Tukey $p=0.05$). Los cambios en los tres sustratos se dieron principalmente durante el primer ciclo de uso, solo en fibra de coco y perlita se incrementó significativamente la densidad aparente y capacidad de retención de humedad, pero disminuyó la capacidad de aireación. Los resultados obtenidos demostraron que las propiedades físicas cambian en la fibra de coco y perlita y se mantienen estables en tezontle, después de cuatro ciclos de cultivo de fresa en un sistema hidropónico.

Palabras clave: capacidad de retención de humedad, capacidad de aireación, agua disponible, agua difícilmente disponible, densidad aparente, *Fragaria x ananassa* Duch.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Eduilkar Ameth Saldaña Yangüéz
Director de Tesis: Dr. Joel Pineda Pineda

VARIATION IN PHYSICAL PROPERTIES ON REUSED SUBSTRATES ON STRAWBERRY CULTIVATION

2.2 Abstract

The elimination of substrates at the end of the crop is a potential threat to the environment. To reduce negative effects caused by substrates, an alternative is to reuse them during several growing cycles, which will also increase its profitability. The possibility of reusing the substrates without any damage to the crops depends on the physical, chemical and biological properties of the material, as well as on the tolerance of plants to abiotic and / or biotic stress. Changes in the physical properties of three types of substrates were evaluated after four cycles of reuse in the strawberry crop. The experiment was carried out in greenhouses at the *Universidad Autónoma Chapingo*. A 3x4 factorial treatment design (substrate, cycles of use) was used, generating 12 treatments, arranged in a randomized complete block design with three repetitions. The experimental unit consisted of PVC gutters with 12 strawberry plants of the Albion cv. The physical properties evaluated in the substrates were: particle size distribution, thickness index, weighted average diameter, bulk density, moisture retention capacity, total porous space, aeration capacity, readily available water, reserve water, hardly available water and total available water, at the beginning and at the end of the cultivation cycle. An analysis of variance and multiple comparison of means (Tukey $p=0.05$) were performed on the data. The changes in the three substrates occurred mainly during the first cycle of use; only coconut fiber and perlite significantly increased the bulk density and moisture retention capacity, but the aeration capacity decreased. The results obtained showed that the physical properties change in the coconut fiber and perlite but they remain stable in tezontle, after four cycles of strawberry cultivation in a hydroponic system.

Key words: moisture retention capacity, aeration capacity, available water, hardly available water, apparent density, *Fragaria x ananassa* Duch.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Eduilkar Ameth Saldaña Yangüéz
Thesis Director: Dr. Joel Pineda Pineda

2.3. Introducción

El sustrato es un factor clave para la producción de hortalizas, plántulas y flores en invernadero. Existe gran variedad de materiales que pueden ser adecuados como sustratos de cultivo, pero se deben considerar sus características físicas, químicas y biológicas, las necesidades del cultivo, así como la compleja interacción de procesos y fenómenos que se suscitan en la relación contenedor-sustrato-planta-ambiente (Pineda *et al.*, 2012).

Abad *et al.* (2004) y Blok *et al.* (2008) mencionan que, de todas las propiedades de un sustrato, las físicas son las más importantes, ya que una vez establecido el cultivo, difícilmente se pueden manipular, y deben permanecer estables durante el ciclo del cultivo.

Pineda *et al.* (2012) mencionan que, en los materiales orgánicos, la resistencia o facilidad que ofrecen a la descomposición microbiana (bioestabilidad) es un aspecto muy importante que influirá en el mantenimiento de las propiedades físicas durante el crecimiento de las plantas.

En los cultivos de invernadero la eliminación de los sustratos al final del cultivo es una amenaza potencial para el ambiente (Dekker *et al.*, 1995). Para disminuir efectos negativos, está la alternativa de reutilizar los sustratos, con ello se fomenta la reducción de volumen de sustrato aplicado por planta, y se reduce al mínimo el impacto ambiental. La posibilidad de reutilizar sustratos, sin ningún tipo de daño a los cultivos, depende de las propiedades físico-químicas y biológicas del material, así como de la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y/o biótico a la reutilización (Fonteno, 1993; Lemaire & Marfá, 1998).

Varios autores investigaron la respuesta de cultivos en sustratos reutilizados en comparación con sustratos nuevos. Algunos de ellos encontraron una reducción de la calidad y rendimiento del cultivo con sustratos reutilizados (Abd-Elmoniem & El-Beairy, 2004), mientras que otros no encontraron diferencias entre los

sustratos nuevos y reutilizados (Celikel & Caglar, 1999; Urrestarazu *et al.*, 2008; Acuña *et al.*, 2013).

La reutilización de sustratos representa una opción importante para la gestión ambiental, además, su uso permite aumentar la rentabilidad de un cultivo. El objetivo de esta investigación fue identificar los cambios en las propiedades físicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle por efecto de su reutilización durante cuatro ciclos de cultivo con fresa.

2.4. Materiales y métodos

2.4.1. Ubicación y características del área experimental

El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, ubicada a una altitud de 2,250 m, 19° 29' de Latitud Norte, y 98° 53' de Longitud Oeste. Se utilizaron plantas de fresa del cv. Albión. Se usaron los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, en un sistema hidropónico tipo torre, con canaletas de PVC de 3 metros de largo, colocadas en tres niveles, el primero a una separación de 30 cm del piso y 50 cm entre los siguientes dos niveles. Se utilizó un sistema de riego por goteo automatizado, el pH se mantuvo entre 6.0 a 6.5 y la CE a 2.0 dS·m⁻¹, con un 30 ± 5 % de drenaje y sin recirculación de solución nutritiva.

2.4.2. Diseño de tratamiento y diseño experimental

Los tratamientos se formaron a partir de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, cada uno con cuatro estados de uso: nuevo, con I, II, y III ciclos de cultivo de fresa. Para el diseño de tratamientos se utilizó un factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso) generándose 12 tratamientos, los cuales se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió de 12 plantas por canaleta.

2.4.3. Desarrollo del experimento

El ciclo del cultivo se inició en septiembre del 2016 y finalizó en abril de 2017; diariamente se aplicaron 5-6 riegos (130 ml/planta/día) con la solución nutritiva Steiner (1984) con carga iónica de 20 meq·L⁻¹; a partir de los 60 días después de trasplante se realizó un ajuste a la solución nutritiva en donde se aplicó 1.5 meq·L⁻¹ de H₂PO₄⁻ y 6.5 meq·L⁻¹ SO₄⁼. El manejo de plagas y enfermedades se hizo con el uso preventivo de fitosanitarios, Extracto de Canela, Oberon®, Abamectina 1.8 EC, Amistar® y Bellis®. Las prácticas culturales realizadas fueron podas de flores (durante el primer mes de floración), eliminación de estolones y hojas viejas o enfermas durante el ciclo de cultivo.

2.4.4. Propiedades físicas de sustratos

La distribución de tamaño de partículas se determinó colocando 100 g de cada sustrato sobre una serie de tamices (números 4, 8, 10, 18, 20, 30, 40, 50 y 100), conforme a la Norma American Standard Test Sieve Series. Se tamizaron durante 5 minutos con un agitador Geo-laboratorio CL 392-B, las porciones de cada muestra que quedaron en cada tamiz se pesaron y se expresaron en porcentaje respecto al peso total de la muestra. Se determinó el índice de grosor (Ig), un parámetro que define la distribución del tamaño de partículas con un único valor y se expresa como el porcentaje acumulado en peso de todas las fracciones con un diámetro mayor de 1 mm (Ansorena, 1994; Richards *et al.*, 1986). Mediante los métodos del porómetro propuesto por Handreck & Black (2005) y la curva de liberación de humedad según De Boodt *et al.* (1974), se determinó el diámetro medio ponderando de partículas (DMP). Mediante el método propuesto por De Boodt *et al.* (1974) se determinó densidad aparente (Dap), capacidad de retención de humedad (CRH), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y agua total disponible (ATD). Se realizó el análisis de las propiedades físicas antes de la siembra y finalizando el ciclo cultivo.

2.4.5. Análisis de datos

Para evaluar los resultados se realizó un análisis de varianza y comparación múltiples de medias mediante la prueba de Tukey con nivel de significancia $p=0.05$; para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS, 2016).

2.5. Resultados y discusión

2.5.1. Distribución de tamaño de partículas

Las propiedades físicas de los sustratos dependen del material utilizado, de la distribución del tamaño de partículas y de las características de empaquetamiento de las mismas (Burés *et al.*, 1993a, 1993b; Abad *et al.*, 2005a); el tamaño de partículas define a su vez el diámetro de los poros del sustrato (Ansorena, 1994), determinando así el balance entre el contenido de agua y aire en el medio, lo que influye en el crecimiento de las plantas (Evans & Stamps 1996; Raviv *et al.*, 1986; Raviv *et al.*, 2002; Abad *et al.*, 2004). De acuerdo con el análisis granulométrico (Cuadro 1), se observaron cambios significativos en los sustratos fibra de coco y perlita, hubo una reducción general en el diámetro de partículas, con la consiguiente disminución en la cantidad de partículas más gruesas y un aumento en la proporción de partículas más finas.

En el Cuadro 1 se muestra que la fibra de coco presentó el mayor contenido (33.98 %) inicial de partículas ≥ 4.75 mm de diámetro, pero se dio una degradación significativa al final de los ciclos I y II, ya que pasó a 21.92 y 14.79 % de partículas ≥ 4.75 mm de diámetro, respectivamente; al final de los ciclos III y IV, no hubo cambios significativos en el diámetro de estas partículas. Todas las fracciones ≤ 4.74 mm de diámetro mostraron una redistribución diferente e incrementaron su proporción, especialmente en los ciclos I y II, y se mantuvieron estables al final de los ciclos III y IV. Estos resultados coinciden con los reportados por Rivera (2016), quien encontró que las partículas de fibra de coco ≥ 4.75 mm de diámetro presentaron una rápida degradación en los

ciclos I y II, pero en ese caso, solo a partir de las fracciones ≤ 1.99 mm de diámetro se incrementó su proporción.

En perlita (Cuadro 1), las fracciones con partículas ≥ 4.75 y entre 4.74 a 2.36 mm de diámetro, disminuyeron significativamente durante los cuatro ciclos de cultivo, llegando a valores mínimos al final de los ciclos III y IV, mientras que la fracción entre 2.35 y 2.00 mm no se modificó. Por el contrario, las fracciones de partículas entre 1.99 a 0.6 mm aumentaron significativamente, lo que se explica por la degradación de las partículas de diámetros superiores antes descrita. Finalmente, partículas con diámetro entre 0.59 y 0.425 mm mantienen su proporción, pero partículas menores a 0.424 mm disminuyeron significativamente su fracción al final del IV ciclo de cultivo, lo que podría atribuirse a la pérdida de estas partículas finas en el agua de drenaje. También Giuffrida y Consoli (2015) encontraron que, durante los tiempos de reutilización de perlita, había una reducción general del diámetro de partícula, con la consiguiente disminución en la cantidad de partículas gruesas (≥ 2.00 mm de diámetro) y un aumento en el número de partículas más finas (diámetros de 0.5 a 2 mm). Giuffrida y Consoli (2015), mencionan que en los sustratos se da un arrastre de las partículas más finas a la parte inferior del contenedor, por la manipulación en el trasplante. La distribución de partículas en bolsas de perlita varía, en el primer año de uso se pierde la mayor parte de partículas finas, especialmente aquellas con un diámetro inferior a 0.5 mm (Acuña *et al.*, 2013), esta pérdida es causada por lixiviación de partículas finas, menores de 0.5 mm de diámetro, por el drenaje del agua de riego (Orozco & Marfá, 1995; Acuña *et al.*, 2013; Giuffrida & Consoli, 2015; Rivera, 2016).

El tezontle no mostró cambios significativos en la distribución del tamaño de partículas. Sin embargo, se observó que partículas ≥ 4.75 mm disminuyen su proporción a medida que pasan los ciclos de uso; partículas ≤ 2.35 mm mostraron una tendencia a incrementar sus proporciones en los diferentes ciclos de uso. Rivera (2016) observó que partículas de tezontle con diámetros ≥ 4.75 mm disminuyen con los ciclos de uso del sustrato en el cultivo de fresa;

por otro lado, Rodríguez-Díaz *et al.* (2013) ya no percibieron en tezontle partículas mayores a 6 mm de diámetro después de su primer reuso con cultivo de tomate, y en fresa las partículas finas ≤ 0.60 mm no mostraron un incremento (Rivera, 2016), mientras que las partículas que estaban entre 2 y 6 mm disminuyeron sus proporciones y partículas menores de 2 mm de diámetro mostraron un aumento significativo con el reuso del tezontle, especialmente las que estaban entre 0.42 y 0.84 mm (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2013).

La distribución del tamaño de partículas en sustratos orgánicos se ve afectada por el proceso de mineralización de la materia orgánica (Lemaire, 1995; Lemaire *et al.*, 2005), ya que la adición de solución nutritiva al sustrato aumenta la actividad microbiana, además las raíces de la planta durante su crecimiento rompen mecánicamente al sustrato (Domeño *et al.*, 2011) y segregan exudados radicales que incrementan la descomposición del material (Jackson & Wright, 2009). En la Figura 1 se exhibe la distribución acumulada de tamaños de partículas, destacan la fibra de coco y perlita que mostraron la mayor alteración durante los ciclos de reuso, mientras que tezontle no muestra cambios importantes.

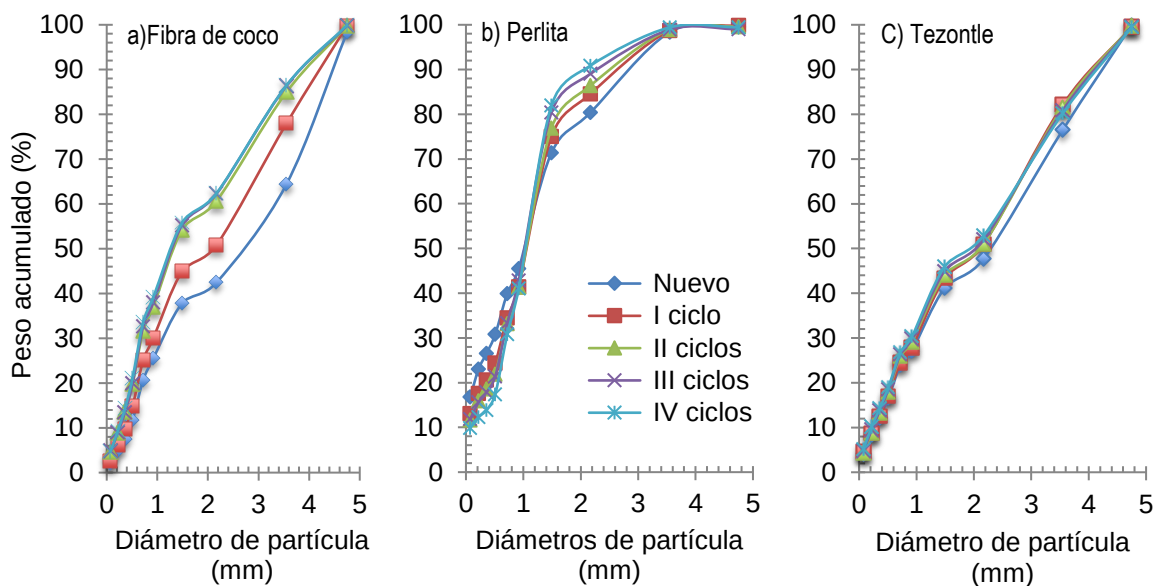


Figura 1. Distribución acumulada del tamaño de partículas en fibra de coco (a), perlita (b) y tezontle (c), al inicio del cultivo (nuevos), al final del ciclo del cultivo I, II, III y IV. Los valores se expresan en porcentajes con respecto a 100 g de muestra tamizada.

2.5.2. Índice de grosor (Ig)

El índice de grosor se define como el porcentaje en volumen de partículas mayores a 1 mm de diámetro y se utiliza para establecer correlaciones entre la distribución de partículas de un sustrato con sus propiedades físicas (Burés, 1997), tales como porosidad total, capacidad de retención de humedad, agua total disponible y capacidad de aireación (Abad *et al.*, 2005a); cuando el valor es cercano a 100 indica que el sustrato tendrá una escasa retención de agua y una alta capacidad de aireación (Ansorena, 1994; Wallach, 2008).

El índice de grosor en la fibra de coco mostró cambios significativos (Cuadro 2), el sustrato nuevo con 72.85 %, 65.14 % y 25.78 % de índice de grosor, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación, respectivamente, presentó una rápida degradación de partículas en el ciclo II, alcanzando un 62.72 % de índice de grosor, lo que se relaciona con aumento de la capacidad de retención de humedad y una disminución de la capacidad de aireación de 80.38 % y 16.27 %, respectivamente; para los ciclos III y IV se mantiene en 61.88 % y 60.78 % los índices de grosor, respectivamente. Estos resultados son congruentes con los reportados por Rivera (2016) quien encontró que la fibra de coco tiene una disminución del índice de grosor en el segundo ciclo de reúso, disminución que se relacionó con un aumento en la capacidad de retención de humedad y una disminución en la capacidad de aireación. La fibra de coco nueva y de un ciclo de reúso, están fuera de los valores óptimos reportados por Abad *et al.* (2005b) y Vargas-Tapia *et al.* (2008b). Los sustratos perlita y tezontle no mostraron cambios significativos en el índice de grosor (Cuadro 2). La perlita mostró un ligero cambio en su índice de grosor, de 54 % (nueva) aumentó a 58 % en el ciclo I, y se mantuvo durante los ciclos II, III y IV, esto se debe a que disminuyó la proporción de partículas finas menores de 0.59 mm. Rivera (2016) encontró un aumento en los Ig de 62.17 % a 66.26 % en sustratos de perlita nueva y dos ciclos de reúso, respectivamente. Anicua-Sánchez *et al.* (2009) reportan Ig con valores de 57.58 % en perlita.

Cuadro 1. Distribución (%) del tamaño de partículas (mm) de tres sustratos después de cuatro ciclos de uso con fresa en sistema hidropónico.

Sustrato	Ciclo de uso	Diámetro de partículas (mm)									
		≥4.75	4.74-2.36	2.35-2.0	1.99-1.0	0.99-0.85	0.849-0.60	0.59-0.425	0.424-0.30	0.299-0.15	≤0.149
Fibra de coco	Nuevo	33.98 a	21.91 c	4.62 b	12.34 b	4.83 a	8.99 b	4.22 c	2.50 c	2.92 a	2.01 b
	Ciclo I	21.92 b	27.11 a	5.89 a	14.91 ab	4.92 a	10.31 b	5.00 bc	3.74 b	3.39 a	2.63 b
	Ciclo II	14.79 c	24.27 b	6.41 a	17.20 a	5.25 a	12.04 a	6.05 ab	4.70 ab	4.37 a	4.56 a
	Ciclo III	13.39 c	24.11 b	6.96 a	17.42 a	5.29 a	12.76 a	6.40 a	4.48 ab	4.16 a	4.80 a
	Ciclo IV	13.48 c	24.06 b	6.56 a	16.68 a	5.53 a	12.50 a	6.77 a	4.97 a	4.63 a	4.73 a
	DMSH	5.09	1.88	1.27	3.07	1.65	1.39	1.34	1.08	1.84	1.55
	CV (%)	9.24	2.75	7.38	6.93	11.33	4.34	8.37	9.38	16.76	14.64
Perlita	Nuevo	1.16 a	17.96 a	9.02 a	25.85 c	5.55 c	9.14 c	4.24 a	3.53 a	6.23 a	16.81 a
	Ciclo I	1.14 a	14.12 b	9.55 a	33.59 b	6.93 bc	10.09 bc	3.80 a	3.01 ab	4.50 ab	13.08 ab
	Ciclo II	0.64 b	12.55 bc	9.52 a	35.57 b	8.15 abc	11.27 bc	3.28 a	2.66 ab	4.30 ab	11.65 ab
	Ciclo III	0.07 c	9.89 cd	8.60 a	37.57 ab	9.48 ab	12.0 ab	3.50 a	2.22 bc	3.78 b	11.86 ab
	Ciclo IV	0 c	8.55 d	8.89 a	40.88 a	10.25 a	13.46 a	3.50 a	1.56 c	2.44 b	9.87 b
	DMSH	0.21	3.16	1.32	4.30	2.63	2.19	1.14	0.91	2.37	5.21
	CV (%)	12.57	8.89	5.14	4.40	11.54	6.93	10.99	12.37	19.82	14.61
Tezontle	Nuevo	23.36 a	28.83 a	6.53 b	14.10 a	3.13 a	7.46 a	4.30 a	3.93 a	4.13 a	4.10 a
	Ciclo I	17.37 a	31.22 a	7.54 a	15.58 a	3.31 a	7.51 a	4.46 a	3.81 a	4.14 a	4.56 a
	Ciclo II	18.10 a	30.61 a	6.96 ab	14.83 a	3.25 a	7.98 a	4.77 a	4.39 a	4.43 a	4.36 a
	Ciclo III	18.65 a	28.98 a	6.95 ab	15.21 a	3.39 a	7.90 a	4.70 a	4.31 a	4.70 a	4.74 a
	Ciclo IV	19.19 a	27.36 a	6.94 ab	15.60 a	3.53 a	7.82 a	4.63 a	4.23 a	4.98 a	5.12 a
	DMSH	6.13	4.39	0.81	2.15	0.70	2.57	1.74	1.86	1.67	1.60
	CV (%)	11.23	5.29	4.09	5.05	7.49	11.75	13.46	15.97	13.23	12.35

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p=0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

El tezontle presentó un índice de grosor de 72.83 % y disminuyó a 71.71, 70.51, 69.81 y 69.10 % al final de los ciclos I, II, III y IV, respectivamente, lo que es congruente con Rivera (2016), quien reporta, que el tezontle no mostró cambios en su Ig, después de dos ciclos de cultivo de fresa se mantuvo en 71.6 %. Ojodeagua *et al.* (2008) reportan un Ig de 77 % para tezontle rojo.

Cuadro 2. Índice de grosor y diámetro medio ponderado de partículas de fibra de coco, perlita y tezontle, después de cuatro ciclos de cultivo con fresa en sistema hidropónico.

Nivel	Índice de grosor (Ig)			Diámetro medio ponderado (DMP)		
	Fibra de coco	Perlita	Tezontle	Fibra de coco	Perlita	Tezontle
Nuevo	72.85 a	54.00 a	72.83 a	2.84 a	1.56 a	2.64 a
Ciclo I	69.83 a	58.41 a	71.71 a	2.54 b	1.53 a	2.49 a
Ciclo II	62.72 b	58.28 a	70.51 a	2.18 c	1.49 ab	2.48 a
Ciclo III	61.88 b	56.13 a	69.81 a	2.14 c	1.40 b	2.46 a
Ciclo IV	60.78 b	58.33 a	69.10 a	2.12 c	1.40 b	2.44 a
DMSH	5.73	7.47	8.84	0.23	0.14	0.35
CV (%)	3.10	4.64	4.43	3.52	3.24	4.90

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p=0.05$). Ig: porcentaje en peso de partículas con diámetro > 1 mm; DMP: diámetro medio ponderado de partículas; DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

2.5.3. Diámetro medio ponderando de partículas (DMP)

Se observó que la fibra de coco y perlita mostraron diferencias significativas para el DMP. La fibra de coco con un DMP de 2.84 mm mostró una disminución a 2.54 mm en el ciclo I, y se mantuvo con un promedio de 2.15 para los ciclos II, III y IV; estos resultados concuerdan con los reportados por Rivera (2016) quien encontró una disminución del DMP conforme el tiempo de reúso. La perlita obtuvo un DMP de 1.56 mm, se mantuvo estable hasta final de los ciclos I y II con 1.53 y 1.49 mm, respectivamente, pero al final del ciclo III hubo un cambio significativo a 1.4 mm que se mantuvo hasta el final del ciclo IV. Las partículas de tezontle mostraron estabilidad durante los diferentes ciclos de reúso, no

hubo diferencias significativas en la variación del diámetro de partículas, lo cual concuerda con Ojodeagua *et al.* (2008).

Ansorena (1994) menciona que el tamaño medio de partícula de los sustratos no es suficiente para predecir sus propiedades físicas, sino que debe conocerse la distribución de tamaños de partículas. Al respecto, Abad *et al.* (2004) indican que el rango de variación adecuado está entre 0.25 y 2.5 mm, pudiendo existir pequeñas fracciones con diámetros inferiores o superiores a este intervalo.

2.5.4. Densidad aparente (Dap)

La Dap se incrementó para todos los sustratos (Figura 2a), pero solo se mostró diferencia significativa para fibra de coco y perlita (Cuadro 3) que incrementaron de 0.08 (nuevo) a 0.13 g·cm⁻³ (ciclo IV), y de 0.17 (nuevo) a 0.23 g·cm⁻³ (ciclo IV), respectivamente; mientras que el tezontle aumento de 1.13 (nuevo) a 1.18 g·cm⁻³ en el IV ciclo de reúso. Esto comprueba lo obtenido por Rivera (2016), quien reporta solo un aumento de 0.05 (nuevo) a 0.08 g·cm⁻³ (ciclo II), de 0.15 (nuevo) a 0.18 g·cm⁻³ (ciclo II) y de 1.02 (nuevo) a 1.11 g·cm⁻³ (ciclos II), en sustratos de fibra de coco, perlita y tezontle, respectivamente.

Acuña *et al.* (2013) encontraron que la perlita pierde partículas finas (menor de 0.5 mm) por el drenaje del agua de riego en su primer año de uso, disminuyendo la densidad aparente y manteniéndose estable hasta el quinto año de uso. Por otra parte, varios autores mencionan que a medida que disminuye el tamaño de partícula, la densidad aparente aumenta (Wallach *et al.*, 1992; Noguera *et al.*, 2003; Vargas-Tapia *et al.*, 2008a; Anicua-Sánchez *et al.*, 2009; Pineda *et al.*, 2012). Giuffrida y Consoli (2015) utilizaron perlita nueva, perlita de uno, dos, tres y cuatro ciclos de reúso en el cultivo de tomate, encontraron un aumento en la densidad aparente de 0.12 g·cm⁻³ a 0.14 g·cm⁻³ para la perlita nueva y 4 ciclos de uso, respectivamente, debido a la producción progresiva de raíces durante el cultivo. El incremento de la densidad aparente en un sustrato, podría estar relacionado con la distribución de las raíces a lo largo del sustrato (Leonardi *et al.*, 2003) ya que la acumulación de raíces puede

afectar la uniformidad de las propiedades físicas dentro de los sustratos nuevos y reutilizados (Cannavó & Michel, 2013). Anicua-Sánchez *et al.* (2009) tamizaron muestras de perlita para seleccionar partículas de 0.13 mm, 0.5 mm y >1.00 mm, fracciones que presentaron una densidad aparente de 0.32, 0.22 y 0.15 g·cm⁻³, respectivamente.

Vargas-Tapia *et al.* (2008a) encontraron que el tezontle con granulometría mayor a 4 mm no aumentó la densidad aparente, sin embargo, la granulometría menor a 4 mm presentó incremento significativo. Domeño *et al.* (2009), reportaron que la fibra de coco aumentó su densidad aparente de 0.07 a 0.08 g·cm⁻³ en 6 meses, cuando se cultivó con tomate, debido a una importante presencia de partículas finas causadas por la descomposición del material. La Dap de fibra de coco y perlita (Figura 2a) son consideradas ideales, ya que están por debajo de 0.4 g·cm⁻³, valor óptimo establecido por Abad *et al.* (2005a) y Blok *et al.* (2008); la densidad aparente del tezontle está fuera del ideal, típico de materiales minerales con porosidad media (Cuadro 3) (Raviv *et al.*, 2002; Vargas-Tapia *et al.*, 2008a).

2.5.5. Capacidad de aireación (CA)

La CA muestra una tendencia a disminuir en los sustratos de fibra de coco y perlita, específicamente en el ciclo I (Cuadro 3); la fibra de coco, que inicialmente tenía 51.58 %, disminuyó en el ciclo I a 25.74 % y se mantuvo durante los ciclos II, III y IV alrededor de 16 %; la perlita nueva tenía 37.93 % de CA y disminuyó a 22.34 % en el ciclo I y se mantuvo similar durante los ciclos II, III y IV; el tezontle se mantuvo con una CA alrededor de 33 % de inicio a final en los cuatro ciclos de cultivo (Cuadro 3). La tendencia general a disminuir la CA en función del tiempo de reutilización (Figura 2d), es similar a lo encontrado por Giuffrida & Consoli (2015), debido a que se da una degradación de las partículas más gruesas (Anicua-Sánchez *et al.*, 2009). Noguera *et al.* (2003) y Vargas-Tapia *et al.* (2008a, 2008b) mencionan que partículas mayores a 0.5 mm presentaron los más altos porcentajes de CA en fibra de coco, mientras que

fracciones menores de 0.5 mm disminuyeron la CA, como lo observado en este trabajo (Cuadro 2 y Figura 2d).

La CA en los sustratos se mantuvo dentro del rango establecido por Bunt (1988) y Abad *et al.* (2005a), quienes recomiendan un intervalo de 10 a 30 % para favorecer el desarrollo de las raíces, mientras que Verhagen (2009) señala que un sustrato con una CA de 20 a 25 % provee una difusión óptima de oxígeno, ya que un buen suministro de oxígeno en la zona de la raíz propicia efectos inmediatos sobre la forma y crecimiento de la misma, así como también incrementa la actividad metabólica, absorción de agua y nutrimentos (Raviv *et al.*, 2004).

2.5.6. Capacidad de retención de humedad (CRH)

En la Figura 2c se aprecia la tendencia de CRH a incrementarse a través de los ciclos de reúso. Se observan cambios significativos en los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle (Cuadro 3), los cuales incrementaron la CRH de 33.24 (nuevo) a 80.80 (IV ciclo), de 31.82 (nuevo) a 54.36 % (IV ciclo) y 20.11 (nuevo) a 22.2 % (IV ciclo), respectivamente. El aumento de CRH es atribuible al efecto de la degradación de fibras y partículas ($\leq 1\text{mm}$) que aumentan la formación de microporos (Lemaire, 1995; Lemaire *et al.*, 2005), lo que da como resultado una disminución en la capacidad de aireación, incrementando las diferentes propiedades asociadas a la retención de agua: AFD, AR, ATD y ADD (Rivera, 2016), quien también menciona que los sustratos en el primer ciclo agrícola tienen un espacio poroso homogéneo, distribuido en todo el espacio del contenedor y a medida que se aplican riegos se da un reacomodo o empaquetamiento y estratificación en función del tamaños de partículas, lo que explica el incremento gradual del volumen de agua contenida y de manera inversa el volumen ocupado por aire (Wallach, 2008).

La CRH de fibra de coco nueva, perlita y tezontle en todos los ciclos (Cuadro 3), no cumplen con los parámetros establecido por Abad *et al.* (2005a) y Handrek y Black (2005), ya que un sustrato con más del 90 % de porosidad, debe tener

una retención de humedad mínima de 70 %, mientras que en sustratos con porosidad de 70 a 85 %, la retención de humedad mínima debe de estar entre 55 y 70 %. Riviere (1999) indica que el contenido aire-agua está influenciado por la descomposición de la materia orgánica, en la mayoría de los casos se da una reducción de la aireación y en un aumento de la retención de agua, que puede ser ventaja cuando la reducción de la capacidad de aire no es demasiado alta.

Respecto al AFD se observaron cambios significativos en los sustratos (Cuadro 3), en fibra de coco aumento (Figura 2e) de 2.74 % a 14.97, 16.24, 16.60 y 17.45 %, para sustrato nuevo, ciclo I, ciclos II-III y ciclo IV, respectivamente. En perlita (Figura 2e) el AFD aumento de 8.27 (nueva) a 14.68 % en el ciclo I y se mantuvo sin diferencias significativas durante los ciclos II, III y IV. En tezontle se mantuvo con un 8 % en promedio durante todos los ciclos (Cuadro 3). Este comportamiento está relacionado con un aumento de partículas entre 0.25 y 0.50 mm, que influyen en el porcentaje de agua fácilmente disponible (Noguera *et al.*, 2003; Vargas-Tapia *et al.*, 2008a, 2008b; Anicua-Sánchez *et al.*, 2009). Según Zapata *et al.* (2005), los valores óptimos van de 20 a 30 %; De Boodt *et al.* (1974) mencionan que un sustrato con un AFD inferior al 15 % debe regarse con más frecuencia, de lo contrario se puede producir déficit hídrico en las plantas.

Con relación al agua de reserva (AR), en tezontle no se observan cambios significativos; sin embargo, en fibra de coco y perlita hubo un aumento gradual significativo (Cuadro 3, Figura 2f) durante los ciclos de cultivo. Rivera (2016), no reporta en fibra de coco, perlita y tezontle diferencias significativas en el AR, pero observó una tendencia a incrementarse a través del tiempo de reúso. Los valores de dicha propiedad son congruentes con lo reportado en diferentes sustratos con un intervalo de variación de 4-10 % (Bunt, 1988; Abad *et al.*, 1993; Abad *et al.*, 2004; Maher *et al.*, 2008). El cambio en las relaciones aire-agua está relacionado con la variación en la distribución porcentual hacia

Cuadro 3. Propiedades físicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de uso al final de cultivo de fresa.

Sustrato	Ciclo de uso	Dap (g·cm ⁻³)	CRH	EPT	CA	AFD	AR	ADD	ATD
			%						
Fibra de coco	Nuevo	0.08 c	33.24 c	84.83 b	51.58 a	2.74 b	1.71 d	28.79 c	4.45 d
	Ciclo I	0.11 b	65.14 b	90.88 ab	25.74 b	14.97 a	4.54 c	45.63 b	19.51 c
	Ciclo II	0.12 a	77.40 a	93.77 a	16.37 c	16.24 a	6.70 b	54.46 a	22.94 bc
	Ciclo III	0.13 a	80.38 a	96.65 a	16.27 c	16.60 a	9.92 a	53.85 a	26.52 ba
	Ciclo IV	0.13 a	80.80 a	97.41 a	16.61 c	17.45 a	10.29 a	53.05 a	27.74 a
	DMSH	0.01	5.56	6.86	3.88	3.65	1.67	1.86	4.73
	CV	4.58	2.93	2.62	5.43	9.51	8.94	1.40	8.29
Perlita	Nuevo	0.17 c	31.82 b	69.75 a	37.93 a	8.27 b	3.76 b	19.78 c	12.04 a
	Ciclo I	0.20 b	48.60 a	70.94 a	22.34 b	14.68 a	8.41 ab	25.50 b	23.09 a
	Ciclo II	0.24 a	52.70 a	73.70 a	20.99 b	12.16 ab	9.50 a	31.03 a	21.67 a
	Ciclo III	0.23 a	53.53 a	74.23 a	20.69 b	11.96 ab	10.04 a	31.53 a	21.60 a
	Ciclo IV	0.23 a	54.36 a	74.76 a	20.39 b	11.75 ab	10.58 a	32.03 a	21.52 a
	DMSH	0.02	8.83	7.83	10.59	6.33	5.09	3.22	11.47
	CV	2.78	6.49	3.82	15.33	19.07	21.34	4.07	20.33
Tezontle	Nuevo	1.13 a	20.11 b	53.99 a	33.87 a	8.11 b	2.58 a	9.42 b	10.69 a
	Ciclo I	1.17 a	20.59 b	54.04 a	33.45 a	8.09 b	2.81 a	9.69 b	10.90 a
	Ciclo II	1.17 a	22.28 a	55.57 a	33.29 a	8.68 a	3.29 a	10.30 a	11.97 a
	Ciclo III	1.17 a	22.26 a	55.44 a	33.17 a	8.52 ab	3.32 a	10.33 a	11.85 a
	Ciclo IV	1.18 a	22.20 a	55.31 a	33.06 a	8.36 ab	3.52 a	10.35 a	11.89 a
	DMSH	0.07	1.50	2.57	3.48	0.54	1.46	0.37	1.51
	CV	2.15	2.48	1.66	3.70	2.31	16.60	1.32	4.66

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey p=0.05). Dap: densidad aparente; CRH: capacidad de retención de humedad; EPT: espacio poroso total; CA: capacidad de aireación; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible; DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación. Los valores en porcentaje se expresan respecto al volumen total de la muestra de cada sustrato.

partículas con menor diámetro y la presencia de materia orgánica (Marfá *et al.*, 1993). Abad *et al.* (2004) y Maher *et al.* (2008), mencionan que el incremento de las partículas <1 mm, aumenta la superficie específica de contacto con el agua, que a su vez incrementa la mojabilidad del sustrato, lo que da como resultado una reducción de aire.

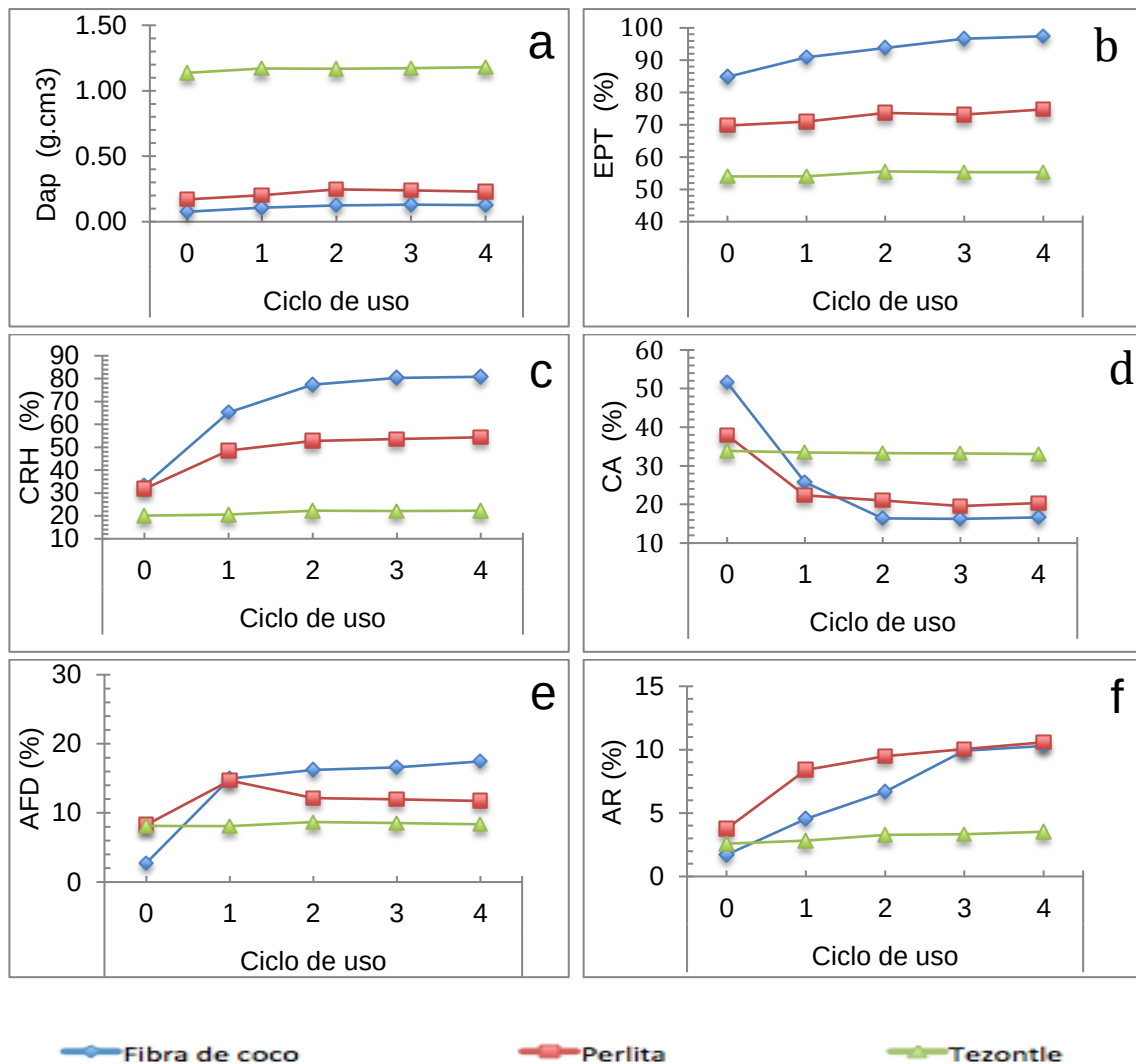


Figura 2. Propiedades físicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de uso: a) Densidad aparente (Dap, g·cm³); b) Capacidad de retención de humedad (CRH, %); c) Espacio poroso total (EPT, %); d) Capacidad de aireación (CA, %); e) Agua fácilmente disponible (AFD, %); f) Agua de reserva (AR, %); g) Agua difícilmente disponible (ADD, %); h) Agua total disponible (ATD, %).

2.5.7. Curva de retención de Humedad

En las Figuras 3 (a, b, c) se observan las curvas de retención de humedad para cada sustrato en cinco estados de reúso (nuevo, ciclos I, II, III y IV), se aprecia que la fibra de coco y perlita a través del tiempo, fueron los que presentaron el mayor cambio significativo en la retención de humedad, mientras que el tezontle no mostro cambios significativos, lo que se atribuye a la estabilidad relativa de las partículas de este sustrato (Ojodeagua *et al.*, 2008).

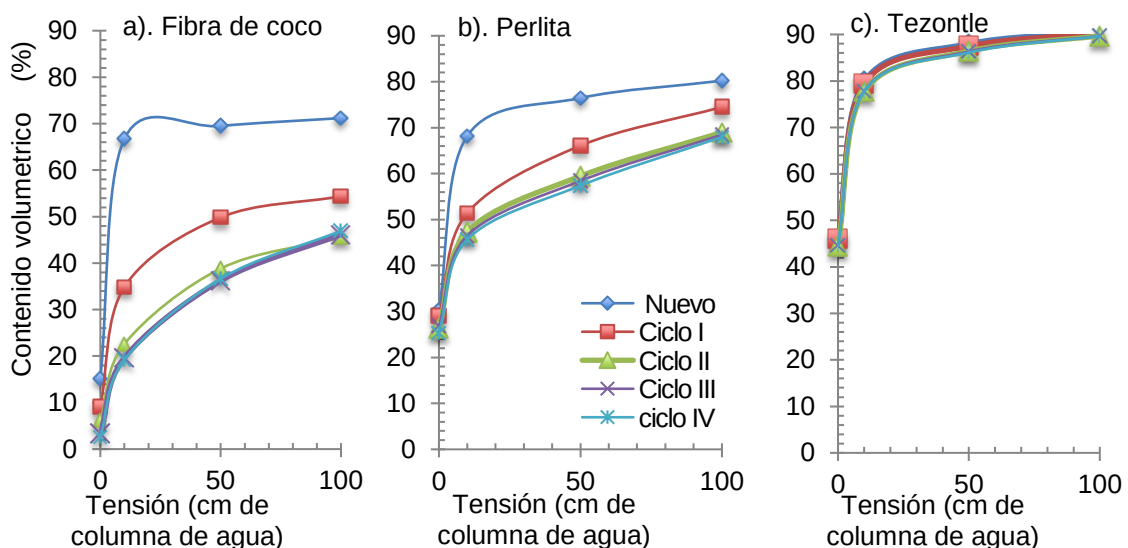


Figura 3. Curva de retención de humedad de fibra de coco (a), perlita (b) y tezontle (c) con 4 ciclos de uso. Los valores se expresan en porcentaje del peso de agua retenida respecto al total de la muestra seca, a cuatro niveles de succión (0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua).

El principal cambio en la fibra de coco se observó a una tensión de 10 cm, en donde el sustrato nuevo presentó una capacidad de retención de 33.24 %, aumentó a 65 y 77 % en los ciclos I y II, respectivamente, en los ciclos II y IV se mantuvo en 80 %, estos aumentos se relacionan con el incremento de partículas ≤ 1 mm de diámetro, disminuyendo el índice de grosor. La degradación de las fibras de los sustratos orgánicos se da por la descomposición biológica (Lemaire *et al.*, 2005). La perlita inicialmente a una tensión de 10 cm presentó una capacidad de retención de humedad de 31.82 % y aumentó a 54.36 % en el ciclo IV.

2.6. Conclusiones

En los sustratos fibra de coco y perlita se modificaron significativamente las variables físicas capacidad de retención de humedad, capacidad de aireación, agua de reserva, agua difícilmente disponible y densidad aparente, principalmente al final del segundo ciclo de cultivo con fresa.

El incremento de la capacidad de liberación de humedad de los tres sustratos se relacionó directa y positivamente con un aumento del agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible.

El sustrato tezontle no mostro cambios en su distribución de tamaños de partículas y propiedades físicas, confirmando así la estabilidad del mismo durante cinco ciclos de cultivo con fresa.

2.7. Literatura citada

- Abad, B. M., Martínez, P. F., & Martínez, J. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivos. *Acta de Horticultura*, 11, 141-154.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2004). Los Sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. G. Urrestarazu (3ª Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). España: Mundi-Prensa.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2005a). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In C. Cadahía (3ª Ed), *Fertirrigación: Cultivos hortícolas y ornamentales* (pp. 299-352). España: Mundi-Prensa.
- Abad, M., Fornes, F., Carrión C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, A., & Puchades R. (2005b). Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat. *Hortscience*, 40 (7), 2138–2144.
- Abd-Elmoniem, E. M., & El-Behairy, U.A. (2004). Effect of reusing perlite and pumice as a substrate on yield and Mineral composition of strawberry plants. Egypt. Egipto. *Journal Horticultural*, 31: 13-21.
- Acuña, R., Bonachela, S., Magán, J., Marfá, O., Hernández, J., & Cáceres, R. (2013). Reuse of rockwool slabs and perlite grow-bags in a low-cost greenhouse: Substrates physical properties and crop production. *Scientia Horticulturae*, 160, 139-147
- Anicua-Sánchez, R., Gutiérrez-Castorena, M., Sánchez-García, P., Ortiz-Solorio, C., Volke-Halle, V. H., & Rubiños-Panta, J. E. (2009). Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agricultura Técnica en México*, 35 (2)147-156. Consultada en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60812688002>

- Ansorena, M. J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. España, Madrid: Mundi-Prensa. 172 p.
- Blok, C., De Kreijl C., Baas, R., & Wever, G. (2008). Chapter 7. Analytical Methods Used in Soilless Cultivation. In: Raviv, M., & Lieth J. H. (Eds.). *Soilless Culture: Theory and Practice* (pp. 245-290). United States of America: Editorial Elsevier.
- Burés, S., Pokorny, F.A., Landau, D.P., & Ferrenberg, A.M. (1993a). Computer simulation of volume shrinkage after mixing container media components. *J. Amer. Society for Horticultural Science*, 118, 757–761.
- Burés, S., Pokorny, F. A., Landau, D. P., & Ferrenberg, A. M. (1993b). Monte Carlo computer simulation in horticulture: a model for container media characterization. *HortScience*, 28, 1074–1078.
- Burés, S. (1997). *Sustratos*. España, Madrid: Agrotécnicas. 342 p.
- Bunt, A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants*. London, England: Unwin Hayman Ltd. 301 p.
- Cannavó, P., & Michel, J. C. (2013). Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae*, 151, 11–21.
- Celikel, G., & Caglar, G. (1999). Los efectos de la reutilización de diferentes sustratos en el rendimiento y la precocidad de pepino en periodo de crecimiento de otoño. *Acta de Horticultura*, 492, 259-264.
- De Boodt, M., Verdonck, O., & Cappaert, I. (1974). The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta de Horticultura*, 26, 37-44.
- Dekker, A., Houx, N. W., & Runia, W. T. (1995). Behaviour of oxamil and propamocarb in two rockwool cultivation systems: open drainage and recirculating of nutrient solution excess. *Acta de Horticultura*, 382, 278-287.
- Domeño, I., Irigoyen, I., & Muro J. (2009). Evolution of organic matter and drainages in wood fibre and coconutfibre substrates. *Scientia Horticulturae*, 122, 269–274. Doi:10.1016/j.scienta.2009.05.006
- Domeño, I., Irigoyen, I., & Muro J. (2011). Comparison of traditional and improved methods for estimating the stability of organic growing media *Scientia Horticulturae*, 130, 335–340. Doi:10.1016/j.scienta.2011.07.012
- Evans, M. R., & Stamps, R. H. (1996). Growth of bedding plants in sphagnum peat- and coir dust-based substrates. *Journal Environmental Horticulture*, 14, 187–190.
- Fonteno, W.C. (1993). Problemas y consideraciones en la determinación de las propiedades físicas de horticultural substrates. *Sustratos hortícolas. Acta de Horticultura*, 342, 197-204.
- Giuffrida, F., & Consoli, S. (2015). Reusing Perlite substrates in soilless cultivation: Analysis of Particle size, Hydraulic Properties, and Solarization Effects. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000968.
- Handreck, K. A. & Black, N. (2005). *Growing media for ornamental plant and turf*. Australia Kensington: New South Wales University Press. 544 p.

- Jackson, B. E., & Wright, R. D., (2009). Changes in chemical and physical properties of pine tree substrate and pine bark during long-term nursery crop production. *HortScience*, 44, 791–799.
- Lemaire, F. (1995). Physical Chemical and Biological Properties of Growing Medium. *Acta Horticulturae*, 396, 273-284. doi:10.17660/ActaHortic.1995.396.33.
- Lemaire, F., & Marfá, O. (1998). Consecuencias de la biodegradabilidad de materia orgánica en los parámetros físico-químicas de los sustratos. *Acta Horticulturae* 469, 129-138.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Riviere, L.M., Charpenter, S., & Model, P. (2005). *Cultivos en Maceta y Contenedores. Principios Agronómicos y Aplicaciones*, (2ª Ed). España, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 232 p.
- Leonardi, C., Vasquez, G., & Giuffrida, F. (2003). Tomato root growth in relation to dripper position in substrate cultivation. *Acta Horticulturae*, 614, 217–222.
- Maher, M., Prasad, M., & Raviv, M. (2008). Organic Soilless Media Components. In: M. Raviv & J. H. Lieth. *Soilless Culture: Theory and Practice*(Eds.). *Soilless Culture: Theory and Practice* (pp. 459-494). United States of America: Editorial Elsevier.
- Marfá, O., Martínez, M., Orozco, R., Serrano, L., & Martínez, F. X. (1993). The use of fine grade perlites in lettuce bag cultures. II Physical properties, rheologic effects and productivity. *Acta Horticulturae*, 342, 339-347.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Maquieira, A., & Noguera, V. (2003). Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34, 593-605.
- Orozco, R., & Marfá, O. (1995). Granulometric alteration, air-entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. *Acta Horticulturae*, 408, 147-161. Doi:10.17660/ActaHortic.1995.408.15
- Ojodeagua, A. J. L., Castellanos, R. J. Z., Muñoz, R. J. L., Alcántar, G. G., Tijerina, Ch. L., Vargas, T.P., & Enríquez, R. S. (2008). Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31 (4), 367-374.
- Pineda, J., Sánchez, F., Ramírez, A., Castillo, A. M., Valdez, L. A., & Del Cid, E. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18 (1), 71-88.
- Raviv, M., Chen, Y., & Inbar, Y. (1986). Peat and substitutes as growth media for container-grown plants. In: Chen, Y., Avnimelech, Y. *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture* (pp. 257-287). Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., & Bar-Tal, A. (2002). Substrates and their analysis, In: D. Savvas and H. Passam (eds.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals* (pp. 25–101). Athens: Em- bryo Publ.
- Raviv, M., Wallach, R., & Blom, T. J. (2004). The effect of physical properties of soilless media on plant performance, a review. *Acta Horticulturae*, 644, 251-259.

- Richards, D., Lane, M., & 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.
- Rivera, R. (2016). Propiedades físicas de sustratos y sus efectos en la nutrición de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), en sistemas hidropónico. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura).
- Riviere, L. M., (1999). La Estabilidad de los Sustratos. *Actas de Horticultura*, 23, 113–125.
- Rodríguez-Díaz, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macias, R., González-Eguiarte, D. R., & Mena-Munguía, S. (2013). Reúso del tezontle: Efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra Latinoamericana*, 31, (4), 275-284. Consultado en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57329629002>
- SAS. (2016). Statistical Analysis System 9.3 TS1M2 (1-7). Cary, N.C., USA.
- Steiner, A. (1984). The Universal Nutrient Solution. ISOC. Netherlands.
- Urrestarazu, M., Mazuela, P. C., & Martínez, G. A. (2008). Efecto de la reutilización sustrato sobre el rendimiento y propiedades de los cultivos de melón y tomate. *Journal Plant Nutricional*, 31, 2031-2043.
- Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J. Z., Muñoz-Ramos, J., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López-Romero, R. M., ... Ojodeagua-Arredondo, J. L. (2008a). Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México *Agricultura Técnica en México*, 34 (3), 323-331. Consultada en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60811116007>
- Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J. Z., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López-Romero, R., & Ojodeagua-Arredondo, J. L. (2008b). Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31 (4), 375-381. Consultada en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61031410>
- Verhagen, J. B. (2009). Stability of growing media from a physical, chemical and biological perspective. *Acta Horticultrae*, 819.
- Wallach, R., Da Silva, F. F., & Chen, Y. (1992). Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of America Society of Horticultural Science*, 117, 415-421.
- Wallach, R. (2008.) Physical Characteristics of Soilless Media. Chapetr 3. In: M. Raviv & J. H. Lieth. Soilless Culture: *Theory and Practice*(Eds.). *Soilless Culture: Theory and Practice* (pp. 41-107). United States of America: Editorial Elsevier.
- Zapata, N., Guerrero, F., & Polo, A. (2005). Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de sustratos de cultivo. *Agricultura Técnica en México*, 65, 378-387.

3. VARIACIÓN EN PROPIEDADES QUÍMICAS EN SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

3.1. Resumen

La eliminación de los sustratos al final del cultivo es una amenaza potencial para el ambiente. Para disminuir efectos negativos, está la alternativa de reutilizar los sustratos durante varios ciclos de cultivo, además de aumentar su rentabilidad. La posibilidad de reutilizar los sustratos sin ningún daño a los cultivos, depende de las propiedades físicas, químicas y biológicas del material, así como de la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y/o biótico. Se evaluaron los cambios en las propiedades químicas de tres tipos de sustratos después de cuatro ciclos de reutilización en el cultivo de fresa. El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizó un diseño de tratamientos factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso), generando 12 tratamientos, arreglados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en canaletas de PVC con 12 plantas de fresa del cv. Albión. Se evaluaron las propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica (CE), contenido nutrimental: NO₃, P, K, Ca y Mg al inicio y al final del ciclo de cultivo. A los datos se les realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias (Tukey p=0.05). Al finalizar el ciclo de cultivo los sustratos mostraron un incremento en la CE, lo que indica acumulación de sales. Las concentraciones de P disminuyeron significativamente cuando el pH en el extracto de saturación se incrementó a valores mayores de 7.0. Los niveles óptimos de las propiedades químicas establecidas para los sustratos, indican que después de IV ciclos de cultivo de fresa existen limitantes de pH y concentración alta de sales, por lo que su reutilización estará condicionada a rehabilitar dichas propiedades.

Palabras clave: pH, Conductividad eléctrica, extracto de saturación, macronutrientes.

VARIATION IN CHEMICAL PROPERTIES ON REUSED SUBSTRATES ON STRAWBERRY CULTIVATION

3.2. Abstract

The elimination of substrates at the end of the crop is a potential threat to the environment. To reduce negative effects caused by substrates, an alternative is to reuse them during several growing cycles, which will also increase its profitability. The possibility of reusing the substrates without any damage to the crops depends on the physical, chemical and biological properties of the material, as well as on the tolerance of plants to abiotic and / or biotic stress. Changes in the chemical properties of three types of substrates were evaluated after four cycles of reuse in the strawberry crop. The experiment was carried out in greenhouses at the *Universidad Autónoma Chapingo*. A 3x4 factorial treatment design (substrate, cycles of use) was used, generating 12 treatments, arranged in a randomized complete block design with three repetitions. The experimental unit consisted of PVC gutters with 12 strawberry plants of the Albion cv. The chemical properties evaluated in the substrates were: pH, electrical conductivity (EC), nutritional content: NO₃, P, K, Ca and Mg at the beginning and end of the crop cycle. An analysis of variance and multiple comparison of means (Tukey p=0.05) were performed on the data. At the end of the cultivation cycle the substrates showed an increase in the EC, which indicates accumulation of salts. The concentrations of P decreased significantly when the pH in the saturation extract increased to values higher than 7.0. The optimal levels of the chemical properties established for the substrates indicate that after 4 cycles of strawberry cultivation there are limitations of pH and high concentration of salts, so that to reuse them it is necessary to first rehabilitate these properties.

Key words: pH, electrical conductivity, saturation extract, macronutrients.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Eduilkar Ameth Saldaña Yangüéz
Thesis Director: Dr. Joel Pineda Pineda

3.3. Introducción

El término sustrato se refiere a todo material sólido diferente del suelo, natural o sintético, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor de forma pura o en mezcla, permite el anclaje de las plantas a través de su sistema radical y puede o no participar en el suministro de nutrimentos (Abad *et al.*, 2004, 2005). Un sustrato está formado por una fase sólida que alberga un espacio de poros que pueden estar llenos de aire o de agua; la fase sólida, líquida y gaseosa, pueden generar sustancias químicas reactivas que se transforman entre ellas y actúan e interaccionan con el ambiente que circula al sustrato (Burés, 1997).

Las propiedades químicas de los sustratos caracterizan las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del sustrato, dándose reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (química), reacciones de intercambio de iones (físico-químico) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímicas) (Abad *et al.*, 2004, 2005). La composición elemental y la fijación a la matriz del material determinan el contenido de nutrimentos y de elementos fitotóxicos, como los metales pesados, así como las actividades de intercambio de iones. También el pH, la capacidad tampón y el contenido de sales del sustrato se derivan de la actividad química del material (Burés, 1997).

Las propiedades químicas de los sustratos se acondicionan o regulan antes de establecer las plantas, se trata la fase sólida, hasta quedar homogénea. Sin embargo, a lo largo del período de crecimiento se acumulan en el sustrato compuestos orgánicos excretados a partir de la raíces de las plantas o resultantes de proceso de descomposición.

De este modo, las superficies de los sólidos recién formados se vuelven heterogéneas y las propiedades químicas pueden ser significativamente diferentes a las que se definió y caracterizó antes de su uso (Raviv & Lieth, 2008). Abad *et al.* (2004, 2005), mencionan que los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen mayormente a la química de los sustratos,

debido a la formación y presencia de sustancias húmicas, el producto final más importante de la descomposición de la materia orgánica.

Desde el punto de vista químico los sustratos se clasifican en (Burés, 1997): químicamente inertes (perlita, lana de roca, roca volcánica, otros) y químicamente activos (turbas, corteza de pino, aserrín, fibra o polvo de coco, entre otros). Los primeros actúan en la retención de agua y como soporte para la planta, mientras que los segundos intervienen en procesos de adsorción, fijación, inmovilización y mineralización de nutrimentos (Lemaire, 1995; Lemaire *et al.*, 2005). Por ello, los sustratos de cultivo tienen un papel determinante en el éxito o fracaso del desarrollo de un cultivo, requiriéndose un sustrato adecuado para cada sistema particular de producción (Pineda *et al.*, 2012).

Con base en lo anterior, el objetivo que se estableció fue evaluar la variación en las propiedades químicas, como son el pH, la conductividad eléctrica, contenido nutrimental de N, P, Ca, K, y Mg de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle por efecto de su reutilización durante cuatro ciclos de cultivo con fresa.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Ubicación y características del área experimental

El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, ubicada a una altitud de 2,250 m, 19° 29' de Latitud Norte y 98° 53' de Longitud Oeste. Se utilizaron plantas de fresa del cv. Albión. Se usaron los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, en un sistema hidropónico tipo torre, con canaletas de PVC de 3 metros de largo, colocados a tres niveles, con una separación de 30 centímetros del piso al primer nivel y 50 centímetros en los siguientes dos niveles. Se utilizó un sistema de riego por goteo automatizado, el pH y CE se manejaron de 6.0 a 6.5 y 2.0 dS·m⁻¹, respectivamente, con un 30 ± 5 % de drenaje y sin recirculación de la solución nutritiva.

3.4.2. Diseño de tratamiento y diseño experimental

Los tratamientos se formaron a partir de tres clases de sustratos (fibra de coco, perlita y tezontle), cada uno con 4 estados de uso: nuevo, con I, II, y III ciclos, después de haber sido utilizados con cultivo de fresa. El diseño de tratamientos fue un factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso), generándose 12 tratamientos, los cuales se arreglaron en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue de 12 plantas por canaleta.

3.4.3. Desarrollo del experimento

El ciclo del cultivo se inició en septiembre del 2016 y finalizó en abril de 2017; diariamente se realizaban 5-6 riegos (130 ml/planta/día) con la solución nutritiva Steiner (1984) (Cuadro 1) con carga iónica de 20 meq·L⁻¹; a partir de los 60 días después del trasplante se realizó un ajuste a la solución nutritiva en donde se aplicó 1.5 meq·L⁻¹ de H₂PO₄⁻ y 6.5 meq·L⁻¹ de SO₄⁼.

Cuadro 1. Composición de macronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevo y reutilizados.

meq·L ⁻¹											
	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	H ₂ PO ₄ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	pH	CE
Agua*	0.2	2.1	0	0.5	1.92	0.12	1.83	1.61	0.71	7.4	0.5
solución nutritiva**	12	7	1	0	0.5	7	9	4	0	6	2
mg·L ⁻¹											
Solución nutritiva	168	112	31	0	0.5	273	180	48	0	6	2
Agua	2.8	33.6	0			4.68	36.6	19.32			
Solución nutritiva compensada	165.2	78.4	31			268.3	143.4	28.68			

*El agua para riego corresponde al pozo de riego "San Ignacio" ubicado en el Campo Agrícola de la Preparatoria Agrícola, UACH; **Solución Nutritiva Universal de Steiner (1984).

Cuadro 2. Composición de micronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevo y reutilizados.

	mg·L⁻¹, ion-EDTA					
	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
Solución Nutritiva	1.875	0.875	0.175	0.486	0.065	0.062

3.4.4. Propiedades químicas de sustratos

Antes de establecer el cultivo solo se tomaron muestras a los sustratos nuevos (tres muestras de 1 litro por tratamiento). Al finalizar el ciclo de cultivo se tomaron tres muestras de 1 litro cada una por tratamiento, para realizar los análisis químicos del sustrato. Cada muestra se formó tomando sustrato de tres unidades experimentales. En cada muestra se determinaron en extracto de saturación las propiedades químicas siguientes: pH y conductividad eléctrica (dS·m⁻¹) con un potenciómetro marca Hanna Instruments Modelo HI 98130. También se determinó la concentración nutrimental (N, P, K, Ca y Mg). Para la concentración de amonio y nitratos se utilizó el método de doble destilación microkjeldahl (Chapman y Pratt, 1979); el fósforo se cuantificó por el método amarillo vanadato-molibdato (Chapman & Pratt, 1979) leyendo la absorbancia a 470 nm en un espectrofotómetro marca Genesys 10UV. Para determinar potasio se tomó una alícuota de 1 ml aforado en 5 a 20 ml (de acuerdo a la concentración de K en la muestra) con agua desionizada y se determinó con un Espectrofotómetro de flama marca Corning (Flame-Photometer 410). Las concentraciones de Ca y Mg se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, en un espectrofotómetro modelo SpectrAA 220 de Varian (Australia).

3.4.5. Análisis de datos

Para analizar los resultados se llevó a cabo un análisis de varianza y comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey, con nivel de significancia al 5 %; para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS, 2016).

3.5. Resultados y Discusión

En el Cuadro 3 se observan que las variables químicas evaluadas, en los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, en sus diferentes ciclos de usos, fueron altamente significativas ($p \leq 0.05$). Se observó que a medida que pasan los ciclos de uso de un sustrato se da un incremento de pH y de CE, así como de las concentraciones de NO_3 , P, K, Ca, y Mg. Silber *et al.* (2010) mencionan que, durante el período de crecimiento de un cultivo, el sustrato es fertirrigado con una solución nutritiva que contiene iones en balance, pero el excedente de los nutrimentos no absorbidos puede ser almacenado en el sustrato o perdido por drenaje (Handreck y Black, 2010; Pineda *et al.*, 2011). El ortofosfato y algunos iones metálicos como Zn^{2+} , Mn^{2+} y Fe^{2+} son adsorbidos específicamente por el medio de crecimiento y, por lo tanto, cambian su carga superficial y sus propiedades químicas; además, se acumulan nuevos materiales sólidos, principalmente compuestos orgánicos, formados durante el crecimiento de las raíces, estando el sustrato en contacto con exudados de raíz y productos de descomposición. Estos compuestos, y especialmente los ácidos orgánicos de bajo peso molecular, pueden causar descomposición de la fase sólida (Tan, 1986) y modificar la carga superficial, afectando así la disponibilidad de nutrimentos en el sustrato de crecimiento (Silber y Raviv, 1996). Es importante considerar la posible inmovilización de elementos que pueden producirse en sustratos orgánicos por la actividad microbiana, ya que este hecho puede tener repercusiones en la nutrición del cultivo (Domeño *et al.*, 2009).

3.5.1. pH

En el Cuadro 3 se presentan los valores de pH de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle. La fibra de coco nueva presentó un pH ligeramente ácido, igual al intervalo encontrado por Vargas-Tapia *et al.* (2008), en la fibra de coco del ciclo I y II de reúso se dio un incremento significativo de pH 6.81 a 7.06, respectivamente; para los ciclos III y IV el pH se mantuvo en un promedio de 7.35. La perlita nueva mostro un pH neutro de 6.77, valor que está por debajo de lo descrito por Abad *et al.* (1993) y por arriba de 5.9-6.3 que estableció Kang

et al. (2004); pero se incrementó significativamente a 6.96 y 7.28, en los ciclos I y II, respectivamente, los ciclos III y IV presentaron un pH ligeramente alcalino de 7.45 y 7.63, respectivamente. El tezontle al igual que perlita y fibra de coco mostró una tendencia a incrementar el pH en el extracto de saturación.

El pH medio de los sustratos fibra de coco nueva, fibra de coco de ciclo I, perlita nueva, tezontle nuevo, y tezontle de los ciclos I y II, se mantuvieron dentro del intervalo óptimo (5.7-6.8) establecido por Abad *et al.* (1992, 1993). Sin embargo, con estas mediciones no se puede saber cómo fue la variación durante el ciclo de cultivo, situación que es importante ya que el pH tiene influencia en la asimilación de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica (Abad *et al.*, 2004; Abad *et al.*, 2005; Pineda, 2010). Raviv y Lieth (2008) mencionan que es importante notar que todos los cambios en las propiedades químicas de los sustratos son afectados por las características sólidas del sustrato, el tipo de planta, etapa de crecimiento y el manejo agrícola (tasa de fertilización, proporciones de componentes de fertilizantes, la frecuencia de fertirrigación y el volumen del medio disponible para el crecimiento de la raíz). El cultivo sin suelo se define por las restricciones del sistema radical que inducen una densidad de raíces muy alta y, en consecuencia, las propiedades del medio son fuertemente afectadas por el crecimiento de la planta (Silber *et al.*, 2010).

El aumento del pH de la fibra de coco puede justificarse por la actividad de los microorganismos que descomponen el material y al ser alimentados liberan iones hidroxilo al medio ambiente (Barraud, 1990). Además, la forma de nitrógeno N-NO_3 suministrado con la solución nutritiva, tiene un efecto alcalino en la solución del sustrato durante su absorción (Tagliavini *et al.*, 1997; Marschner, 2012), lo que también explicaría el incremento de pH en fibra de coco, perlita y tezontle; mientras que la forma de N-NH_4 , tiende a acidificar el medio de crecimiento (Tagliavini *et al.*, 1997; Marschner, 2012). Las plantas que crecen con nitrato en solución generalmente mantienen la neutralidad eléctrica al liberar un exceso de aniones, incluidos los iones hidroxilo (OH^-)

y bicarbonato (HCO_3^-) (Dakoral & Phillips, 2002; Marschner, 2012). Por otra parte, Raviv y Lieth (2008) mencionan que los cambios de pH mediados por la raíz son causados por la excreción de iones, principalmente H^+ , OH^- , HCO_3^- , bases y ácidos orgánicos, que equilibran la carga eléctrica, después de la absorción de cationes o aniones por raíces, respiración de raíz, exudación de carbono o procesos de reducción.

3.5.2. Conductividad eléctrica (CE)

En el Cuadro 3 se presentan los valores de CE para los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle. La fibra de coco nueva presentó una CE de $2.64 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, valor que está dentro de los rangos establecidos por Abad *et al.* (1997) y Vargas-Tapia *et al.* (2008); en los ciclos I, II, III y IV no se muestran diferencias significativas, pero sí una tendencia a aumentar la CE. Domeño *et al.* (2009) encontraron que el aumento de la CE en el extracto de saturación de la fibra de coco se atribuye a la alta presencia de sodio y cloro. La perlita nueva presentó el valor de CE más baja con $0.12 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, estando dentro del rango establecido por Burés (1997), de 0.01 a $0.12 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; pero a medida que pasaron los ciclos de usos se dio un aumento de la CE. De acuerdo con las conclusiones de Silber y Raviv (1996) y Morel y Hinsinger (1999), las modificaciones de las propiedades químicas de la perlita reutilizada pueden estar directamente relacionadas con el crecimiento de la planta. El tezontle es considerado un material inerte (Trejo-Téllez *et al.*, 2013) ya que presenta CE muy bajas, de 0.08 a $0.15 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Cruz *et al.*, 2012; Trejo-Téllez *et al.*, 2013), aspecto contrario en el tezontle nuevo en esta investigación, quizás debido una posible contaminación; mientras el tezontle en los ciclos I, II, III y IV, al igual que en fibra de coco y perlita, mostraron un aumento en la CE.

Cuando la CE se mide en extracto de saturación reproduce de manera confiable las condiciones reales en que se encuentra el sustrato en el contenedor (Ansorena, 1994). Bunt (1988) y Ansorena (1994), mencionan que los niveles de salinidad ($\text{CE dS}\cdot\text{m}^{-1}$) determinados en el extracto de saturación del sustrato,

son los siguientes: < 0.74 muy bajo, 0.75 a 1.99 apropiado para germinación de semillas y crecimiento de plántulas y 2.00 a 3.49 satisfactorio para la mayoría de las plantas, 3.50 a 5 ligeramente alta para la mayoría de plantas, solo adecuado para plantas vigorosas, 5.0 a 6 crecimiento reducido, plantas raquílicas, marchitamiento y necrosis marginal y > 6.0 daño severo y probable pérdida del cultivo. Todos los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con excepción de la perlita nueva, presentaron acumulación de sales. Las causas que provocan un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar colocado en el contenedor son: 1) La presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se mineralizan para producir nitratos o bien, cuando liberan sales mediante difusión en cantidad superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas; 2) Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución nutritiva es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación; 3) Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrimentos (Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 2004; Abad *et al.*, 2005).

Abad *et al.* (2004, 2005) mencionan que todas las situaciones antes mencionadas se pueden prevenir en gran parte, conociendo las cantidades de nutrimentos requeridos por los cultivos y evitando aplicaciones excesivas de fertilizantes. Considerando el balance entre las características químicas, solo la CE podría limitar la reutilización de los sustratos estudiados durante varios ciclos de cultivo, Pineda (2010) y Pineda *et al.* (2011) encontraron que la acumulación de sales en mezclas de aserrín/tezontle con diferentes proporciones y tamaños de partículas, se debió a un desequilibrio entre la aplicación de nutrimentos con el fertirriego, la absorción por la planta y el porcentaje de drenaje para lixiviar el exceso de sales. El exceso de sales solubles es fácilmente lixiviado con el riego (Ansorena 1994; Noguera *et al.*, 2000; Abad *et al.*, 2004, 2005).

Entre los efectos de la salinidad sobre los cultivos se pueden distinguir los

efectos osmóticos y los específicos. Los efectos osmóticos se determinan por la presión osmótica de la solución, estos son independientes del tipo de partículas de soluto que provocan la ósmosis y generalmente no afectan a la absorción de iones o su translocación en la planta. Los efectos específicos de la salinidad se pueden manifestar de dos maneras, los efectos en la nutrición mineral y los efectos por toxicidad. Los efectos específicos de la salinidad debido a la nutrición mineral implica que el crecimiento de los cultivos se ve afectado por desórdenes en la absorción o distribución posterior de los iones esenciales para el desarrollo de la planta. El efecto tóxico de la salinidad se da por el exceso de absorción de un ion osmóticamente activo (Sonneveld, 2004). La reducción del crecimiento causada por la salinidad es un proceso dependiente del tiempo (Raviv & Lieth, 2008). Munns (1993, 2002) propuso un modelo de dos fases para describir los efectos perjudiciales de la salinidad sobre el crecimiento de las plantas. La primera fase incluye un rápido (minutos, horas) deterioro causado por el aumento del potencial osmótico externo y es básicamente idéntico al estrés hídrico (Munns, 2002). La segunda fase es mucho más lenta, llevando días o semanas para desarrollarse, y conduce a lesiones internas causadas por la excesiva acumulación de sal, sobre todo en las hojas con transpiración alta.

3.5.3. Nitrógeno

En el Cuadro 3 se observa que el NO_3 presenta diferencias altamente significativas entre ciclos de cultivo para los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle. La mayor concentración de NO_3 en extracto de saturación, la presentó fibra de coco seguido de perlita y por último tezontle con 175.30, 163.71 y 148.63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente. Se observó que los sustratos nuevos de fibra de coco, perlita y tezontle, presentaron las concentraciones más bajas de NO_3 , estando por debajo del intervalo óptimo establecido por Abad *et al.* (1992) y Abad *et al.* (1993), pero a partir del ciclo I se dio una gran acumulación de NO_3 . Según el intervalo óptimo de concentración de NO_3 , los sustratos fibra de coco en el ciclo I, perlita en los ciclos II y III, y todos los sustratos de tezontle, están

dentro del rango óptimo. Los sustratos que no cumplen con los intervalos óptimos se pueden utilizar siempre y cuando se realice una modificación a la solución nutritiva (Vargas-Tapia *et al.*, 2008).

La evolución de las propiedades fisicoquímicas de un sustrato orgánico durante un ciclo de cultivo, están relacionadas con su estabilidad (Domeño *et al.*, 2009), la modificación de la materia orgánica se lleva a cabo por microorganismos que aceleran notablemente su actividad cuando se aporta la solución nutritiva del cultivo hidropónico (Riviere, 1999), aunque hay que tener en cuenta el proceso de inmovilización de elementos nutritivos, que se produce en sustratos orgánicos por los microorganismos. El principal nutrimento que se inmoviliza es N, ya que los microorganismos lo utilizan para su desarrollo (Handreck, 1992; Handreck y Black, 2010; Gruda, 2000). Las concentraciones de NO_3 obtenidos del extracto de saturación (Cuadro 3) no muestran información de cómo se comportó este nutrimento a través de todo el ciclo del cultivo. Al respecto, Pineda (2010) demostró que en mezclas de aserrín/tezontle en los primeros días del cultivo (10, 20 y 30 ddt) hubo una alta inmovilización de N, y de ahí en adelante la concentración en los lixiviados aumentó hasta llegar a la misma concentración de N que la solución nutritiva. Por otra parte, Domeño *et al.* (2009), encontraron que la inmovilización de NO_3 en aserrín fue más rápida desde el principio, mientras que en la fibra de coco fue gradual.

3.5.4. Fósforo

La fibra de coco nueva y del ciclo I, mostraron diferencias significativas, con concentraciones de 50.33 y 82.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de P, respectivamente; pero en los ciclos II, III y IV se observó una reducción en la concentración de P (Cuadro 3). La perlita nueva, al ser un aluminosilicato de origen volcánico, tiene una concentración baja de fósforo (Burés, 1997; Abad *et al.*, 2005; Silber *et al.*, 2010), pero en el ciclo I se observó un aumento a 22.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, y para los ciclos II, III y IV se obtuvo una disminución, quedando en 12.26, 10.66 y 6.84 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de P, respectivamente. En tezontle nuevo no se detectó P en solución (Cuadro 3), similar a lo reportado por Trejo-Téllez *et al.* (2013), que al ser un material

inerte presenta una concentración de $0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de P (Cruz *et al.*, 2012; Trejo-Téllez *et al.*, 2013); pero en los ciclos I, II, III y IV se observa P residual en la solución, y aunque no hubo diferencias significativas, en los ciclo III y IV se dio una disminución de la concentración, probablemente debido a una mejor sincronía entre el aporte y la demanda de la planta (Pineda, 2010).

Abad *et al.* (1992) y Abad *et al.* (1993) mencionan que el intervalo óptimo de P en un extracto de saturación es de 6 a $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, estando los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle por arriba de este intervalo. Domeño *et al.* (2009) encontraron que la fibra de coco comparada con aserrín, presentó las concentraciones más altas de P en drenaje, los que según Noguera *et al.* (2000) se explica por las altas concentraciones iniciales de este nutrimento en fibra de coco, situación también observada en este estudio.

Raviv *et al.* (2002) mencionan que las concentraciones de P en solución se ven reducidas por la fuerte interacción entre los iones ortofosfato y los componentes de la fase sólida, después de la aplicación de fertilizante; existen dos mecanismos implicados: 1) reacciones electrostáticas rápidas (segundos o minutos) de adsorción en la fase sólida, 2) formación lenta (horas o días) de nuevos compuestos sólidos de metal-fosfato (precipitación). Es importante recalcar que cuando el pH está por arriba de 7.0 la concentración de P disminuye, lo que probablemente se dio en los sustratos fibra de coco y perlita en el ciclo II y en tezontle en el ciclo III, ya que se tuvo un pH de 7.06, 7.28 y 7.32, respectivamente. Al respecto, Steiner (1984) señala que en una solución nutritiva con pH superior a 7, si el producto del número de milimoles de iones Ca^{2+} por el número de milimoles de iones HPO_4^{2-} es igual o mayor que 2.2, ocurrirá precipitación de ortofosfato di básico de calcio (CaHPO_4). Por el contrario, en un pH ácido, el P puede precipitar con Al, Fe y Mn (Silber, 2008), situación poco probable en este estudio debido a la ausencia de pH ácido.

La forma o especie química del P es afectada por el pH de la solución, y en consecuencia en su concentración; por lo tanto, es de particular interés mantener el pH en el intervalo de 5 - 6.5, en el cual se preparan y mantienen las

soluciones nutritivas. De acuerdo a la disociación del H_3PO_4 (ácido fosfórico) a pH de 4.6, el 100 % del fosfato presente en las soluciones nutritivas está en la forma química H_2PO_4^- , y se mantiene como especie química dominante hasta pH 5.5. A pH 6.0 se tiene todavía 95 % de H_2PO_4^- y 5 % de HPO_4^{2-} . Al aumentar a pH 7.2, el porcentaje de cada una de las dos últimas formas es 50 % (Baca-Castillo *et al.*, 2016), situación que favorece la precipitación química de CaHPO_4 (Prasad & Power, 1997).

3.5.5. Potasio

En el Cuadro 3 se observa que, de todos los nutrimentos evaluados, el K presentó las mayores concentraciones. La fibra de coco presentó las concentraciones más altas, seguida de tezontle y perlita con 663.98, 630.68 y 510.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente. La fibra de coco nueva presentó una concentración de 403.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, valor que está dentro de lo reportado por Abad *et al.* (2005b) y Vargas-Tapia *et al.* (2008), mientras que la fibra de coco de los ciclos I, II, III y IV aumentaron su concentración, las cuales están muy por arriba del óptimo (Abad *et al.*, 1992; Abad *et al.*, 1993). Domeño *et al.* (2009), mencionan que los drenajes de fibra de coco presentan altas concentraciones de K, debido a que el sustrato presenta altos contenidos de cloruro de potasio. La perlita nueva presentó 9.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, valor que está por arriba de 4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, reportado por Burés (1997) y Silber *et al.*, (2010). La perlita al igual que el tezontle presentó concentración alta de K a medida que pasaron los ciclos de reutilización; en ambos sustratos se acumuló el K fuera del intervalo óptimo. También Pineda *et al.* (2011) reportaron valores altos de K en el sustrato y en los lixiviados del sustrato; además, tiene baja participación en los procesos de inmovilización o retención en sustratos orgánicos (Pineda, 2010).

3.5.6. Calcio

La concentración de Ca en los diferentes sustratos aumentó a medida que la CE se incrementó (Cuadro 3). Los sustratos nuevos de fibra de coco, perlita y

Cuadro 3. Propiedades químicas de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de usos al final de cultivo de fresa.

Sustrato	Ciclo de uso	pH	CE	NO ₃	P	K	Ca	Mg
				mg·L ⁻¹				
Fibra de coco	Nuevo	5.52 c	2.64 a	7.03 c	50.33 b	403.70 c	17.44 c	20.70 c
	Ciclo I	6.81 b	5.59 a	228.36 a	82.32 a	757.30 ab	147.98 bc	82.84 bc
	Ciclo II	7.06 ab	5.76 a	154.03 b	30.09 bc	583.33 bc	313.55 ab	114.42 ab
	Ciclo III	7.39 a	6.88 a	253.72 a	15.81 c	658.06 b	366.12 a	180.24 a
	Ciclo IV	7.32 a	7.18 a	233.38 a	21.29 c	917.50 a	469.43 a	191.56 a
	DMSH	0.42	5.52	58.18	27.36	253.59	189.11	84
	CV (%)	2.2	34.89	11.76	24.26	13.54	25.49	25.25
Perlita	Nuevo	6.77 c	0.12 c	1.51 c	0 c	9.40 d	61.04 c	3.71 c
	Ciclo I	6.96 bc	3.79 b	185.85 b	22.89 a	477.86 c	277.98 b	96.77 b
	Ciclo II	7.28 ab	5.25 ab	160.76 b	12.26 ab	618.40 bc	376.28 b	134.68 ab
	Ciclo III	7.45 a	5.57 ab	251.81 a	10.66 abc	661.20 ab	573.05 a	149.73 ab
	Ciclo IV	7.63 a	6.59 a	218.63 ab	6.84 bc	783.20 a	589.72 a	181.54 a
	DMSH	0.48	2.74	65.29	12.25	159.79	138.39	71.73
	CV (%)	2.34	22.74	14.14	41.17	11.11	13.06	22.44
Tezontle	Nuevo	6.80 ab	2.17 c	42.23 c	0 b	186.20 c	99.50 b	72.51 d
	Ciclo I	6.70 b	6.83 ab	174.06 b	26.95 ab	737.60 ab	957.69 a	207.59 ab
	Ciclo II	6.83 ab	7.60 a	158.90 b	36.27 a	858.10 a	1281.51 a	222.51 a
	Ciclo III	7.32 a	6.80 ab	170.56 b	12.84 ab	642.33 b	898.01 a	124.73 cd
	Ciclo IV	7.02 ab	5.58 b	197.40 a	17.06 ab	729.20 ab	1122.45 a	155.11 bc
	DMSH	0.53	1.54	15.86	27.82	143.55	543.51	61.82
	CV (%)	2.69	9.44	3.78	52.95	8.07	22.1	14
Coco		6.82 b	5.61 a	175.30 a	39.97 a	663.98 a	262.90 c	117.95 b
Perlita		7.22 a	4.26 b	163.71 ab	10.53 c	510.01 b	375.61 b	113.28 b
Tezontle		6.93 b	5.79 a	148.63 b	18.62 b	630.68 a	871.83 a	156.49 a
DMSH		0.14	1.11	16.31	7.64	59.50	112.21	22.98
CV (%)		11.10	36.69	10.94	24.66	19.68	2.25	23.50
OPTIMO*		5.2-6.8	0.75-3.5	100-199	6-10	150-249	>200	>70

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey p=0.05). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación. *Valores óptimos según Abad *et al.* (1992) y Abad *et al.* (1993).

tezontle fueron los que presentaron las concentraciones más bajas de Ca, con 17.44, 61.04 y 99.5 mg·L⁻¹, respectivamente; aunque la concentración de Ca en fibra de coco nueva está por arriba de la que reporta Vargas-Tapia *et al.* (2008). El valor de Ca en perlita nueva es muy inferior al que reporta (190 mg·L⁻¹) Burés (1997), y también sobrepasa a lo encontrado (30 mg·L⁻¹) por Kang *et al.* (2004). El tezontle fue el sustrato que presentó las mayores concentraciones de Ca en el extracto de saturación, observándose un aumento significativo desde el ciclo I (Cuadro 3).

Benoit y Ceustermans (1993, 1994, 1995) mencionan que, en los sustratos orgánicos, se puede observar una alta retención de Ca. Pineda (2010) encontró que el Ca participó más que el K en procesos de inmovilización o retención en diferentes mezclas de aserrín con tezontle. Silber *et al.* (2010) reportan efectos significativos de las plantas sobre la composición química de la solución en perlita, especialmente en el aumento de las concentraciones de Ca solubles en sustratos reutilizados. La concentración de Ca en el extracto de saturación del sustrato debe ser superior a 200 mg·L⁻¹ (Abad *et al.*, 2005), valor que se rebasa a medida que se dio la reutilización de los diferentes sustratos.

3.5.7. Magnesio

El Mg mostró una mayor acumulación en los sustratos de tezontle, seguido de fibra de coco y perlita con concentraciones de 156.49, 117.95 y 113.28 mg·L⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). El Mg al igual que NO₃, K y Ca, evaluados en el extracto de saturación, mostraron el mismo comportamiento, a medida que aumentó la CE la concentración de los mismos se incrementó. Las concentraciones de Mg que se registraron son menores a las de K y Ca, ya que dentro de los cationes aplicados en la solución nutritiva es la menor concentración (K 273 mg·L⁻¹, Ca 180 mg·L⁻¹ y Mg 48 mg·L⁻¹) (Steiner, 1984). Silber *et al.* (2010) reportan que el Mg es liberado a la fase líquida con mayor facilidad en sustratos de perlita reutilizados. Según Abad *et al.* (1992) y Abad *et al.* (1993) todos los sustratos que tienen más de 70 mg·L⁻¹ de Mg en el extracto de saturación son ideales como medio de crecimiento.

3.6. Conclusiones

Los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle incrementaron el pH a medida que pasaron los ciclos de reutilización, en general el pH óptimo (5.2 a 6.8) de los sustratos nuevos solo se mantuvo durante el ciclo I, al final de los ciclos II, III y IV los sustratos presentaron pH alcalino.

En general la reutilización de los sustratos durante los ciclos I, II, III y IV generó un incremento de la conductividad eléctrica, lo que se relacionó con la acumulación de NO_3 , K, Ca y Mg.

Las concentraciones de P disminuyeron significativamente con la reutilización de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, lo que se relacionó con el incremento de pH por arriba de 7.0 en el extracto de saturación.

Los niveles óptimos de las propiedades químicas establecidas para los sustratos, indican que después de IV ciclos de cultivo de fresa existen limitantes de pH y concentración alta de sales, por lo que su reutilización estará condicionada a rehabilitar dichas propiedades.

3.7. Literatura citada

- Abad, M., Martínez-Herrero, P. F., Martínez-García, M. D. & Martínez-Corts, J. (1992). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 11, 141-154.
- Abad, B. M., Martínez, P. F., & Martínez, J. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivos. *Acta de Horticultura*, 11, 141-154.
- Abad, B. M., Noguera, P., Noguera, V., Roig, A., Cegarra, J., & Paredes C. (1997). Reciclados de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 19, 92-109.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2004). Los Sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. G. Urrestarazu (3ª Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). España: Mundi-Prensa.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2005). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In C. Cadahía (3ª Ed), *Fertirrigación: Cultivos hortícolas y ornamentales* (pp. 299-352). España: Mundi-Prensa.
- Abad, M., Fornes, F., Carrión C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, A., & Puchades R. (2005b). Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat. *Hortscience*, 40 (7), 2138–2144.

- Ansorena, M. J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. España, Madrid: Mundi-Prensa. 172 p.
- Baca-Castillo, G., Rodríguez-Cruz, E., & Quevedo-Nolsco, A. (2016). La solución nutritiva en hidroponía. México: Autor. 197 p.
- Barraud, F. (1990). *Evolution au cours du temps des propriétés des fibres de bois utilisées comme support de culture*. France: Angers. 64 p.
- Benoit, F., & Ceustermans, N. (1993). Growing tomatoes on ecologically sound substrates. *Plasticulture*, 97, 41–47.
- Benoit, F., & Ceustermans, N. (1994). Growing pepper on ecologically sound substrates. *Acta Horticulturae*, 361, 167–178.
- Benoit, F., & Ceustermans, N. (1995). Growing cucumber on ecologically sound substrates. *Acta Horticulturae*, 396, 55–66.
- Bunt, A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants*. London, England: Unwin Hayman Ltd. 301 p.
- Burés. S. (1997). *Sustratos*. España, Madrid: Agrotécnicas. 342 p.
- Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1979). *Métodos de análisis para suelos, planta y aguas*. México: Editorial Trillas. 70 p.
- Cruz, C. E., Sandoval, V. M., Volke, H. V. H., Can, Ch. A., & Sánchez, E. J. (2012). Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Revista Mexicana. Ciencia Agrícola*, 3, 1361-1373.
- Dakoral, F. D., & Phillips D. A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and soil*. 245.
- Domeño, I., Irigoyen, I., & Muro J. (2009). Evolution of organic matter and drainages in wood fibre and coconutfibre substrates. *Scientia Horticulturae*, 122, 269–274. Doi:10.1016/j.scienta.2009.05.006
- Gruda, N., (2000). N-immobilization of wood fiber substrates in the production of tomato transplants. *Journal of Applied Botany*, 74, 32–37.
- Handreck, K. A., (1992). Rapid assessment of the rate of nitrogen immobilization in organic components of potting media: 1. Method development. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 201–215.
- Handreck, K. A., & Black, N. (2010). *Growing media for ornamental plant and turf*. Australia Kensington: New South Wales University Press. 544 p.
- Kang, J. Y., Lee, H. H., & Kim, K. H. (2004). Physical and Chemical Properties of Inorganic Horticultural Substrates Used in Korea. *Alsanius, Jensen & Asp Acta Horticultural* 644.
- Lemaire, F. (1995). Physical Chemical and Biological Properties of Growing Medium. *Acta Horticulturae*, 396, 273-284. doi:10.17660/ActaHortic. 1995.396.33.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Riviere, L. M., Charpenter, S., & Model, P. (2005). *Cultivos en Maceta y Contenedores. Principios Agronómicos y Aplicaciones*, (2ª Ed). España, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 232 p.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*, (3ª Ed). London: Academic Press. 649 p.
- Morel, C., & Hinsinger, P. (1999). Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. *Plant and Soil*, 211, 103-110.

- Munns, R. (1993). Physiological processes limiting plant growth in saline soil: Some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ*, 16, 15–24.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.*, 25, 239–255.
- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., & Maquieira, A. (2000). Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Horticultural*, 517, 279–288.
- Pineda J. (2010). *Caracterización del aserrín de pino como sustrato hidropónico durante cinco ciclos de cultivo con jitomate*. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura). 138 p.
- Pineda, P. J., Ramírez, A. A., Sánchez, C. F., Castillo, G. A. M., Valdez, A. L. A., Vargas, C. J. M. (2011). Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*, 893, 997–1005.
- Pineda, J., Sánchez, F., Ramírez, A., Castillo, A. M., Valdez, L. A., & Del Cid, E. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18 (1), 95–111.
- Prasad, R., & Power, J. (1997). *Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture*. United States of America: Lewis Publishers. 384 p.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., & Bar-Tal, A. (2002). Substrates and their analysis, In: D. Savvas and H. Passam (eds.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals* (pp. 25–101). Athens: Embryo Publ.
- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless Culture: Theory and Practice*. United States of America: Editorial Elsevier. 625 p.
- Riviere, L. M. (1999). La Estabilidad de los Sustratos. *Actas de Horticultura*, 23, 113–125.
- SAS. (2016). Statistical Analysis System 9.3 TS1M2 (1-7). Cary, N.C., USA.
- Steiner, A. (1984). The Universal Nutrient Solution. ISOC. Netherlands.
- Silber, A., & Raviv, M., 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant and Soil*, 186, 353–360.
- Silber, A. (2008). Chemical characteristics of soilless media. In: M. Raviv & J. H. Lieth. *Soilless Culture: Theory and Practice* (Eds.). *Soilless Culture: Theory and Practice* (pp. 210–239). United States of America: Editorial Elsevier.
- Silber, A., Bar-Yosef, B., Levkovitch, I., & Soryano S. (2010). pH-Dependent surface properties of perlite: Effects of plant growth. *Geoderma*, 158, 275–281.
- Sonneveld, C. (2004). Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. Urrestarazu (3ª Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113–158). España: Mundi-Prensa.
- Tagliavini, M., Neilsen, D., Nogue, E. J., & Neilsen, G. H. (1997). Effects of the nitrogenfertiliser form on rhizosphere pH and growth of apple in soil with different buffer capacity. *Acta Horticulturae*, 448, 297–302.
- Tan, H. K. (1986). Degradation of soil minerals by organic acids. In: Huang, P.M., Schnitzer, M. (Eds.), *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (pp. 1–27). Special 17. Soil Science Society of

America, Madison.

- Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., Tejeda-Sartorius, O. (2013) Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 863-876.
- Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J. Z., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López-Romero, R., & Ojodeagua-Arredondo, J. L. (2008). Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31 (4), 375-381. Consultada en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61031410>

4. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUSTRATOS REUTILIZADOS EN EL CULTIVO DE FRESA

4.1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de las propiedades físicas y químicas de sustratos reutilizados en el crecimiento y desarrollo del cultivo de fresa. El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizó un diseño de tratamientos factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso), generando 12 tratamientos, arreglados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en canaletas de PVC con 12 plantas de fresa del cv. Albión. A los 2 meses de producción se evaluó la calidad de fruto (peso, longitud, diámetro ecuatorial, concentración de ácido cítrico, pH y grados brix) y al finalizar el ciclo de cultivo (7 meses ddt) se evaluó el peso fresco y contenido nutrimental (N, P, K, Ca, Mg y Fe) en raíz, corona, hojas y frutos. A los datos se les realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias (Tukey $p=0.05$). Las variables de calidad de fruto, peso fresco de planta y rendimiento total no mostraron diferencias significativas entre los sustratos fibra de coco, perlita, tezontle, así como en sus diferentes ciclos de reúso, a pesar de que se presentaron variaciones en sus propiedades físicas y químicas. La alta conductividad eléctrica en los sustratos produjo desbalances nutrimentales en la planta, observándose concentraciones de K en exceso, mientras que el Ca y Mg estuvieron deficientes.

Palabras clave: Rendimiento y calidad de fruto, contenido nutrimental, *Fragaria x ananassa* Duch., peso fresco.

INFLUENCE OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF REUSED SUBSTRATES IN STRAWBERRY CULTIVATION

4.2. Abstract

The objective of this work was to evaluate the influence of physical and chemical properties of reused substrates in the growth and development of the strawberry crop. The experiment was carried out in greenhouses at the *Universidad Autónoma Chapingo*. A 3x4 factorial treatment design (substrate, cycles of use) was used, generating 12 treatments, arranged in a randomized complete block design with three repetitions. The experimental unit consisted of PVC gutters with 12 strawberry plants of the Albion cv. After 2 months of production, the fruit quality (weight, length, equatorial diameter, citric acid concentration, pH and brix degrees) was evaluated and at the end of the cultivation cycle (7 months ddt) the fresh weight and nutritional content were evaluated (N, P, K, Ca, Mg and Fe) in root, crown, leaves and fruits. An analysis of variance and multiple comparison of means (Tukey $p=0.05$) were performed on the data. The variables of fruit quality, fresh weight and total yield did not show significant differences between the substrates of coconut fiber, perlite and tezontle, nor was there variation in their different cycles of reuse, although there were variations in their physical and chemical properties. The high electrical conductivity in the substrates produced nutrimental imbalances in the plant, showing excessive concentrations of K, while Ca and Mg were deficient.

Key words: Yield and quality of fruit, nutritional content *Fragaria x ananassa* Duch., fresh weight.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Eduilkar Ameth Saldaña Yangüéz
Thesis Director: Dr. Joel Pineda Pineda

4.3. Introducción

La tendencia creciente hacia una agricultura cada vez más abierta al comercio mundial determina que las actividades agrícolas deben ser cada día más eficientes y competitivas, esto soportado en nuevas y mejores tecnologías de producción (Ruiz & Piedrahíta, 2012). La producción hidropónica bajo invernadero ha ido creciendo en diversas partes del mundo, pues ha mostrado mejoras importantes en el uso eficiente de insumos como el agua y fertilizantes; además de su efecto en el rendimiento y calidad de los productos obtenidos; en tales condiciones los sustratos adquieren especial importancia, pues constituyen el medio de desarrollo del sistema radical con todos sus efectos intrínsecos (Abad *et al.*, 2004; Raviv y Lieth, 2008). Se destaca el uso de diferentes sustratos con el fin de solucionar problemas como: acidez, alta erosión o problemas de tipo fitosanitario que impiden la siembra de forma directa en el suelo. Además de lo anterior, las zonas de producción cada vez son menores lo que implica que se tenga que hacer uso de zonas marginales, siendo fundamental el uso de sustratos para generar sistemas alternativos de producción (Ruiz & Piedrahíta, 2012).

El término sustrato, se aplica en horticultura a todo material sólido distinto del suelo natural o de síntesis, mineral u orgánico, que puesto en un contenedor en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema de raíces (López *et al.*, 2005). Por otra parte, debe señalarse que el cultivo de plantas en sustrato, permite un control del medio radical, particularmente en aspectos relacionados con el suministro de agua y nutrientes (Cegarra, 1994).

La posibilidad de reutilizar sustratos, sin ningún tipo de daño a los cultivos, depende de las propiedades físico-químicas y biológicas del material, así como de la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y/o biótico a la reutilización (Fonteno, 1993; Lemaire & Marfa, 1998). La reutilización de sustratos para cultivos posteriores, es ventajoso para el productor, ya que cuanto más se utilicen estos materiales, menor será el costo e impacto ambiental que tendrán los desechos (Fernandes *et al.*, 2006).

Varios autores estudiaron la reutilización de sustratos y descubrieron que no había disminución en la productividad en dos o más ciclos posteriores (Andriolo *et al.*, 1999; Celikel & Caglar, 1999; Reis *et al.*, 2001; Fernandes *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2007; Pineda, 2010; Acuña *et al.*, 2013; Giuffrida, & Consoli, 2015; Marin *et al.*, 2015). Para reutilizar un sustrato es necesario entender las alteraciones que se producen con el tiempo, para no obstaculizar la productividad (Pineda, 2010; Pineda *et al.*, 2012; Marin *et al.*, 2015).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de las propiedades físicas y químicas de sustratos reutilizados de fibra de coco, perlita y tezontle, en el crecimiento y desarrollo del cultivo de fresa.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Ubicación y características del área experimental

El experimento se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, ubicada a una altitud de 2,250 m, 19° 29' de Latitud Norte, y 98° 53' de Longitud Oeste. Se utilizaron plantas de fresa del cv. Albión. Se usaron los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, en un sistema hidropónico tipo torre, con canaletas de PVC de 3 metros de largo, colocadas a tres niveles, con una separación de 30 centímetros del piso el nivel uno y 50 centímetros en los siguientes dos niveles. Se utilizó un sistema de riego por goteo automatizado, el pH y CE se manejaron de 6.0 a 6.5 y 2.0 dS·m⁻¹, respectivamente, con un 30 ± 5 % de drenaje y sin recirculación de la solución nutritiva.

4.4.2. Diseño de tratamiento y diseño experimental

Los tratamientos se formaron con los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, cada uno con cuatro estados de uso: nuevo, con I, II, y III ciclos de reutilización con cultivo de fresa. El diseño de tratamientos fue un factorial 3×4 (sustrato, ciclos de uso), generándose 12 tratamientos, los cuales se arreglaron en un

diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue de 12 plantas por cada canaleta.

4.4.3. Desarrollo del experimento

El ciclo del cultivo se inició en septiembre del 2016 y finalizó en abril de 2017; la densidad de plantación que se utilizó fue de 12 plantas·m⁻²; diariamente se realizaban 5-6 riegos (130 ml/planta/día) con la solución nutritiva Steiner (1984) (Cuadro 1 y 2), con carga iónica de 20 meq·L⁻¹; a partir de los 60 días después de trasplante se realizó un ajuste a la solución nutritiva en donde se aplicó 1.5 meq·L⁻¹ de H₂PO₄⁻ y 6.5 meq·L⁻¹ SO₄⁼. El manejo de plagas y enfermedades se hizo con el uso preventivo de fitosanitarios, Extracto de canela, Oberon®, Abamectina 1.8 EC, Amistar® y Bellis®. Las prácticas culturales realizadas fueron podas de flores (durante el primer mes de floración), eliminación de estolones y hojas viejas o enfermas, la cosecha de frutos se realizó cada siete días, durante cuatro meses.

Cuadro 1. Composición de macronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevo y reutilizados.

meq·L ⁻¹											
	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	H ₂ PO ₄ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	pH	CE
Agua*	0.2	2.1	0	0.5	1.92	0.12	1.83	1.61	0.71	7.4	0.5
solución nutritiva**	12	7	1	0	0.5	7	9	4	0	6	2
mg·L ⁻¹											
Solución nutritiva	168	112	31	0	0.5	273	180	48	0	6	2
Agua	2.8	33.6	0			4.68	36.6	19.32			
Solución nutritiva compensada	165.2	78.4	31			268.3	143.4	28.68			

*El agua para riego corresponde al pozo de riego "San Ignacio" ubicado en el Campo Agrícola de la Preparatoria Agrícola, UACH; **Solución Nutritiva Universal de Steiner (1984).

Cuadro 2. Composición de micronutrientes de la solución nutritiva para la producción de fresa, en sistema hidropónico, con sustratos nuevos y reutilizados.

	mg·L ⁻¹ , ion-EDTA					
	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
Solución nutritiva	1.875	0.875	0.175	0.162	0.065	0.062

4.4.4. Variables medidas

4.4.4.1. Biomasa

Durante todo el ciclo de cultivo se realizaron prácticas culturales como poda de estolones, flores y hojas, se registró su peso. Cuando la planta cumplió siete meses después del trasplante, se realizó un muestreo destructivo, tomando cuatro plantas por unidad experimental, para un total de 12 plantas por tratamiento, a partir de las cuales se determinó peso fresco de raíz, corona, hoja, inflorescencia y frutos verdes. Posteriormente las plantas separadas en sus partes, se colocaron en una bolsa de papel para secado en una estufa de aire forzado (marca BINDER) a 70 °C durante 72 horas hasta peso constante; una vez seco el material, se pesó cada muestra. La cosecha se realizó cuando los frutos presentaban como máximo el 50 % de su superficie un color rosa a rojo tenue, se cosecho, pesó y cuantificó el total de frutos en cada unidad experimental y se dividió entre el número de plantas muestreadas de cada repetición.

4.4.4.2. Concentración mineral en tejido vegetal

Cuando se tenían las diferentes partes de las plantas secas a peso constante, se molieron en un molino inoxidable con malla para partícula fina (1 mm). Posteriormente se tomaron 0.5 g de la muestra, a la cual se le agregó una mezcla de 4 ml de solución di-ácida de H₂SO₄ y HClO₄ (2:1, v/v) y 2 ml de peróxido de hidrógeno a 30 % y se colocaron en la placa de digestión, a una temperatura de 200 °C. Se consideró como punto final de la digestión cuando el

líquido se puso totalmente transparente. Posteriormente se aforó a 50 ml con agua desionizada; en este digestado se cuantificó la concentración de todos los nutrimentos minerales.

La determinación de nitrógeno se realizó por el método de microkjeldahl (Chapman & Pratt, 1979); el fósforo se cuantificó por el método amarillo vanadatolibdato (Chapman & Pratt, 1979), haciéndose la lectura en absorbancia a 470 nm en un espectrofotómetro marca Genesys 10 UV. Para determinar potasio se tomó una alícuota de 1 ml diluyendo en 5 a 25 ml (de acuerdo a la concentración de K en la muestra) con agua desionizada y se determinó con un Espectrofotómetro de flama marca Corning (Flame-Photometer 410). Las concentraciones de Ca, Mg y Fe se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, en un espectrofotómetro modelo SpectrAA 220 de Varian (Australia).

4.4.4.3. Calidad de frutos

Cuando las plantas de fresa estaban en el segundo mes de producción se determinaron parámetros de calidad del fruto. Se tomaron 30 frutos por tratamiento en el mismo estado de maduración (rojo brillante), a los cuales se les midió longitud y diámetro ecuatorial (utilizando un vernier digital General® No. 143), peso de fruto (con báscula de precisión a 0.01 g), sólidos solubles totales (empleando un refractómetro digital ATAGO® modelo PAL-1).

Se tomaron 3 frutos por tratamiento, se maceraron y se determinó el pH (mediante un potenciómetro marca CONDUCTRONIC modelo PC45) y acidez titulable o porcentaje de ácido cítrico (se siguió las metodologías descritas por la Asociación de Química Analítica Oficial) (AOAC, 1980).

4.4.5. Análisis de datos

Para evaluar los resultados se realizó un análisis de varianza y comparación múltiples de medias mediante la prueba de Tukey con nivel de significancia $p=0.05$; se utilizó el programa estadístico SAS (SAS, 2016).

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Producción de biomasa, rendimiento y su relación con características de los sustratos

En el Cuadro 3 se presenta el peso de materia fresca ($\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$) para los órganos: raíz, corona, hojas, flores, frutos verdes, frutos rojos y también para el rendimiento de fruto por unidad de superficie. Los pesos de cada órgano fueron estadísticamente iguales entre sustratos y ciclos de reutilización, aun cuando los sustratos presentaron variación en sus propiedades físicas y químicas. Tampoco los pesos de materia seca presentaron diferencia significativa entre sustratos y ciclos de reutilización con cultivo de fresa.

Varios autores estudiaron la reutilización de sustratos y descubrieron que no había disminución en la productividad en los siguientes dos o más ciclos (Andriolo *et al.*, 1999, Celikel & Caglar, 1999; Reis *et al.*, 2001; Fernandes *et al.*, 2007; Acuña *et al.*, 2013; Giuffrida, & Consoli, 2015; Marin *et al.*, 2015). Para reutilizar un sustrato es necesario entender las alteraciones que se producen con el tiempo, para no afectar la productividad (Marin *et al.*, 2015).

Los pesos frescos de hoja, corona y raíz presentaron los valores más altos en perlita y tezontle, resultados que concuerdan con los reportados por Rivera (2016); el tezontle y la perlita presentaron una mayor acumulación de materia fresca y rendimiento que la fibra de coco, lo que probablemente se relaciona con los mayores cambios en las propiedades físicas y químicas de la fibra de coco (mayor CRH, menor CA, inmovilización nutrimental). El tezontle y perlita fueron los sustratos que presentaron el mayor porcentaje de capacidad de aireación, lo que permitió un adecuado suministro de oxígeno a la zona radical; por otra parte, la fibra de coco presentó los valores más altos de CE ($5.61 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el extracto de saturación. Un sustrato orgánico requiere de dos a tres veces más de oxígeno que sustratos inorgánicos, para evitar deficiencias de oxígeno en las plantas por competencia con los microorganismos (Bunt, 1988; Ansorena, 1994). López-Pérez *et al.* (2005) observaron una tendencia

Cuadro 3. Peso fresco de raíz, corona, hoja, estolones, frutos verdes, frutos rojos y rendimiento total de fresa por m², cultivada en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Ciclos de uso	Raíz	Corona	Hoja	Estolones	Flores	Frutos Verdes	Fruto Rojos	Rendi.
		g-planta ⁻¹							g·m ²
Fibra de coco	Ciclo I	10.7 a	10.0 a	33.7 a	19.8 a	3.1 a	4.2 a	343.8 a	4126 a
	Ciclo II	12.2 a	11.1 a	32.2 a	9.5 a	2.5 a	2.5 a	261.9 a	3143 a
	Ciclo III	14.7 a	13.2 a	41.2 a	18.9 a	2.9 a	3.1 a	374.2 a	4491 a
	Ciclo IV	16.4 a	11.9 a	45.1 a	17.1 a	3.3 a	7.9 a	360.7 a	4328 a
	DMSH	11.5	4.8	15.3	30.9	1.4	5.7	196.2	2354
	CV (%)	30.0	14.6	14.3	67.0	17.3	43.9	20.7	20.71
Perlita	Ciclo I	17.3 a	13.9 a	38.9 a	10.3 a	2.4 a	6.0 a	343.3 a	4120 a
	Ciclo II	18.7 a	12.3 a	47.4 a	14.7 a	3.4 a	7.2 a	408.7 a	4905 a
	Ciclo III	14.2 a	13.9 a	41.4 a	14.1 a	2.7 a	3.1 a	386.5 a	4639 a
	Ciclo IV	17.8 a	13.1 a	42.9 a	15.3 a	3.5 a	4.6 a	417.7 a	5013 a
	DMSH	10.9	10.3	24.0	34.3	1.9	4.4	150.6	1807
	CV (%)	22.7	27.4	19.9	89.4	22.9	29.9	13.7	13.7
Tezontle	Ciclo I	14.2 a	13.9 a	44.2 a	10.6 a	3.7 a	7.2 a	346.4 a	4157 a
	Ciclo II	11.5 a	11.6 a	40.0 a	16.1 a	3.3 a	5.2 a	351.2 a	4215 a
	Ciclo III	13.2 a	12.9 a	40.9 a	13.9 a	3.5 a	4.8 a	339.2 a	4071 a
	Ciclo IV	16.3 a	13.7 a	41.9 a	15.6 a	3.6 a	4.3 a	342.8 a	4114 a
	DMSH	11.7	7.9	15.6	23.6	2.5	6.7	194.5	2334
	CV (%)	29.9	21.7	13.2	59.3	24.9	43.8	19.9	19.9
Coco		13.5 a	11.5 a	38.0 a	16.3 a	2.9 a	4.4 a	335.1 a	4022 a
Perlita		17.0 a	13.3 a	42.6 a	13.6 a	3.0 a	5.2 a	389.1 a	4669 a
Tezontle		13.8 a	13.0 a	41.7 a	14.0 a	3.5 a	5.4 a	344.9 a	4139 a
DMSH		4.0	2.7	7.5	10.1	0.7	1.9	64.3	771.7
CV (%)		26.6	21.2	18.0	67.1	22.3	37.8	17.6	17.6

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey p=0.05). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

negativa del crecimiento de las plantas de fresa conforme se incrementaron las proporciones de la fibra de coco en las mezclas evaluadas, la capacidad de retención de humedad aumentaba por la fibra, reduciendo la aireación en la rizósfera, que causó una disminución del crecimiento de las plantas.

Garriga *et al.* (2017) mencionan que en diferentes genotipos de *Fragaria* sp. el peso fresco de la corona no es afectado por la salinidad; sin embargo, el peso fresco de las hojas y raíces disminuyó a medida que aumentó la CE. Por otra parte, Massetani *et al.* (2017) mencionan que la mezcla de turba y perlita (90/10) produjo la mayor cantidad de biomasa fresca en fresa del cv. Elasante, en comparación con sustratos de turba y fibra de coco, reportaron pesos frescos de raíz de 33.3 a 79.7 g; igualmente reportaron pesos frescos de 107.6

a 149.1 g de la parte vegetativa; estos resultados son superiores a los encontrados en esta investigación. La fertirrigación, cuando está bien administrada, incrementa la productividad y la calidad de planta; sin embargo, una mala gestión de la fertirrigación, puede causar la salinización del sustrato (Marin *et al.*, 2015; Pineda, 2010), como se observó al final de los ciclos de cultivo en los extractos de saturación, promoviendo una absorción excesiva de nutrimentos por la planta, con posibles efectos de toxicidad y disminución de la productividad y calidad de los frutos; además pérdida innecesaria de nutrimentos por lixiviación y contaminación del ambiente (Kawakami *et al.*, 2006). Yilmaz y Kina (2008), mencionan que la salinidad reduce y detiene el desarrollo de las plantas, por lo tanto el área foliar y la fotosíntesis, también se ven afectados (Yildiz *et al.*, 2008).

El rendimiento no mostró diferencias significativas por sustratos y ciclos de reutilización (Cuadro 3), con rendimientos promedio en sustrato de 40.22, 46.69 y 41.25 t·ha⁻¹, para fibra de coco, perlita y tezontle, respectivamente. Los rendimientos de fibra de coco y perlita superan a los obtenidos por Rivera (2016), quien cuantificó 30.2 y 41.87 t·ha⁻¹, respectivamente; sin embargo, obtuvo un rendimiento mayor en tezontle de 57.87 t·ha⁻¹.

4.5.2. Contenido nutrimental en plantas de fresa ‘Albión’

La variación en la concentración de los nutrimentos N, P, K, Ca, Mg y Fe en cada uno de los órganos de la planta (raíz, corona, hoja y frutos rojos), debido al efecto de los sustratos y sus respectivos ciclos de reutilización, al final del experimento (7 meses ddt), se muestran en los Cuadros 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Con base en estos resultados, se observa que la concentración nutrimental en la planta ocurrió en el orden K>N>Ca>P>Mg, diferente a lo encontrado por Rivera (2016), quien reporta mayor acumulación de N, en el orden N>K>P>Mg.

4.5.2.1. Nitrógeno

Las concentraciones de N en raíz, corona, hojas y frutos se presentan en el Cuadro 4, donde se observa que no hubo diferencias significativas dentro de un mismo sustrato, con excepción del N en corona en los sustratos perlita y tezontle, donde en ambos sustratos se observa una tendencia a incrementar la concentración de N a medida que pasan los ciclos de reutilización. De acuerdo con Hancock (1999), las concentraciones de N en hoja en los diferentes ciclos de uso en fibra de coco y perlita, están dentro del nivel de suficiencia (2.00 a 2.8 %), mientras que las concentraciones de N son menores en los diferentes ciclos de usos del tezontle.

Cuadro 4. Concentración (%) de nitrógeno (N) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutilización	Nitrógeno (N)			
		Hoja	Fruto rojo	Corona	Raíz
		%			
Fibra de coco	Ciclo I	2.18 a	1.58 a	1.14 a	1.20 a
	Ciclo II	2.13 a	1.58 a	1.43 a	1.41 a
	Ciclo III	2.13 a	1.75 a	1.21 a	1.15 a
	Ciclo IV	2.13 a	1.42 a	1.12 a	1.40 a
	DMSH	0.45	0.38	0.37	0.33
	CV (%)	7.36	8.55	10.57	9.13
Perlita	Ciclo I	2.11 a	1.56 a	0.99 b	1.17 a
	Ciclo II	2.01 a	1.65 a	0.96 b	1.21 a
	Ciclo III	2.20 a	1.70 a	1.02 b	1.52 a
	Ciclo IV	2.03 a	1.44 a	1.12 a	1.43 a
	DMSH	0.30	0.27	0.06	0.51
	CV (%)	5.00	6.07	2.22	13.50
Tezontle	Ciclo I	1.89 a	1.63 a	1.06 b	1.33 a
	Ciclo II	1.94 a	1.75 a	1.19 a	1.29 a
	Ciclo III	1.96 a	1.82 a	1.13 ab	1.37 a
	Ciclo IV	1.93 a	1.71 a	1.23 a	1.43 a
	DMSH	0.25	0.35	0.12	0.35
	CV (%)	4.51	7.19	3.64	9.09
	Coco	2.14 a	1.59 a	1.22 a	1.29 a
	Perlita	2.09 a	1.59 a	1.02 b	1.34 a
	Tezontle	1.93 b	1.73 a	1.15 a	1.36 a
	DMSH	0.12	0.17	0.09	0.14
	CV (%)	5.69	10.08	7.93	10.42

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p=0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

Las concentraciones de N en frutos rojo disminuyó en el ciclo IV en los sustratos fibra de coco y perlita. Rivera (2016) encontró que las concentraciones de N en corona al final del cultivo eran de 1.1, 0.87 y 0.85 % en fibra de coco, perlita y tezontle, respectivamente, mientras que la concentración en fruto fue de 1.4, 1.1 y 1.4 % en fibra de coco perlita y tezontle, respectivamente; valores que son inferiores a los encontrados en este trabajo. La concentración de N en los órganos siguió el patrón siguiente: hoja > frutos > raíz > corona.

4.5.2.2. Fósforo

La concentración de P en hoja en el rango de suficiencia es de 0.25 a 0.40 % (Hancock, 1999), lo que significa que las concentraciones de P en hoja (Cuadro 5) en todos los sustratos están en exceso (> 0.5 %), a pesar que la concentración de P en el extracto de saturación de los sustratos se vio afectada significativamente cuando el pH, estaba por arriba de 7.0.

Cuadro 5. Concentración (%) de fósforo (P) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutilización	Fósforo (P)			
		Hoja	Fruto rojo	Corona	Raíz
		%			
Fibra de coco	Ciclo I	0.56 a	0.48 a	0.44 a	0.52 a
	Ciclo II	0.58 a	0.50 a	0.52 a	0.59 a
	Ciclo III	0.61 a	0.50 a	0.50 a	0.49 a
	Ciclo IV	0.55 a	0.48 a	0.48 a	0.67 a
	DMSH	0.27	0.16	0.20	0.19
	CV (%)	17.96	12.64	13.06	15.13
Perlita	Ciclo I	0.55 a	0.41 a	0.41 a	0.54 a
	Ciclo II	0.60 a	0.45 a	0.40 a	0.59 a
	Ciclo III	0.55 a	0.45 a	0.47 a	0.55 a
	Ciclo IV	0.57 a	0.43 a	0.44 a	0.49 a
	DMSH	0.16	0.10	0.13	0.11
	CV (%)	10.97	8.95	11.58	7.84
Tezontle	Ciclo I	0.50 h	0.43 a	0.45 a	0.47 a
	Ciclo II	0.53 ab	0.43 a	0.41 a	0.50 a
	Ciclo III	0.59 a	0.47 a	0.45 a	0.49 a
	Ciclo IV	0.54 ab	0.46 a	0.46 a	0.47 a
	DMSH	0.08	0.09	0.16	0.11
	CV (%)	5.67	7.73	12.85	9.41

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p \geq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

Las concentraciones de P en hoja, frutos rojos, corona y raíz, estuvieron en los siguientes intervalos 0.5 a 0.6, 0.41 a 0.5, 0.4 a 0.52 y 0.47 a 0.67 %, respectivamente.

4.5.2.3. Potasio

La mayoría de las concentraciones de K en hoja estuvieron por encima del rango óptimo (1.5 a 2.5 %) establecido por Hancock (1999). La comparación de medias de los diferentes ciclos de reutilización (ciclo I, II, III y IV) de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle muestran que no hay diferencias estadísticas significativas en la concentración de este elemento en los diferentes órganos de la planta, con excepción de la hoja, en tezontle (Cuadro 6). El contenido de K se dio en el orden hoja > frutos > corona > raíz.

Cuadro 6. Concentración (%) de potasio (K) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutilización	Potasio (K)			
		Hoja	Fruto rojo	Corona	Raíz
		%			
Fibra de coco	Ciclo I	3.94 a	3.16 a	1.70 a	0.95 a
	Ciclo II	4.01 a	4.02 a	1.52 a	0.73 a
	Ciclo III	3.96 a	3.44 a	1.89 a	0.83 a
	Ciclo IV	3.02 a	3.58 a	1.70 a	1.01 a
	DMSH	1.05	1.58	0.62	0.35
	CV (%)	9.94	15.71	12.78	14.10
Perlita	Ciclo I	3.15 a	3.58 a	2.11 a	1.16 a
	Ciclo II	3.40 a	3.95 a	1.30 b	1.15 a
	Ciclo III	3.53 a	3.78 a	1.40 b	0.88 a
	Ciclo IV	2.79 a	2.64 b	1.47 b	0.85 a
	DMSH	1.53	0.89	0.57	0.51
	CV (%)	16.80	8.99	12.90	17.74
Tezontle	Ciclo I	2.76 b	2.41 a	1.54 a	1.14 a
	Ciclo II	2.81 b	2.72 a	1.56 a	0.95 a
	Ciclo III	3.66 a	2.51 a	1.51 a	1.19 a
	Ciclo IV	3.32 ab	2.78 a	1.79 a	1.31 a
	DMSH	0.58	0.43	0.54	0.52
	CV (%)	6.53	5.88	11.83	16.11
Coco		3.73 a	3.55 a	1.71 a	0.88 b
Perlita		3.22 b	3.49 a	1.57 a	1.01 ab
Tezontle		3.14 b	2.60 b	1.60 a	1.15 a
DMSH		0.43	0.39	0.25	0.19
CV (%)		12.38	11.90	14.99	18.67

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey p=0.05). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

4.5.2.4. Calcio

En el Cuadro 7 se observan las concentraciones de Ca en hoja, para todos los sustratos en los diferentes ciclos de reutilización, las cuales están por debajo del intervalo óptimo (0.7 a 1.7 %) (Hancock, 1999); se observan diferencias significativas entre sustratos, los cuales presentan un promedio de calcio en hoja de 0.73, 0.58, 0.49 %, para los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, respectivamente. La acumulación de Ca se dio en el orden raíz > corona > hojas > frutos.

Cuadro 7. Concentración (%) de calcio (Ca) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutilización	Calcio (Ca)			
		Hoja	Fruto rojo	Corona	Raíz
		%			
Fibra de coco	Ciclo I	0.82 a	0.09 b	0.72 a	1.00 a
	Ciclo II	0.76 a	0.08 b	0.78 a	1.04 a
	Ciclo III	0.78 a	0.27 ab	0.77 a	1.62 a
	Ciclo IV	0.57 a	0.41 a	0.80 a	1.38 a
	DMSH	0.28	0.26	0.39	0.67
	CV (%)	13.34	42.75	17.72	18.82
Perlita	Ciclo I	0.56 a	0.28 a	0.73 a	0.86 a
	Ciclo II	0.65 a	0.25 a	0.81 a	1.28 a
	Ciclo III	0.59 a	0.25 a	0.57 a	0.91 a
	Ciclo IV	0.53 a	0.29 a	0.76 a	0.87 a
	DMSH	0.35	0.17	0.46	0.54
	CV (%)	20.93	21.99	22.41	19.53
Tezontle	Ciclo I	0.40 a	0.25 a	0.79 a	0.81 a
	Ciclo II	0.50 a	0.27 a	0.90 a	0.80 a
	Ciclo III	0.54 a	0.23 a	0.84 a	0.78 a
	Ciclo IV	0.52 a	0.23 a	0.88 a	0.64 a
	DMSH	0.29	0.15	0.34	0.26
	CV (%)	20.81	20.98	14.15	12.26
Coco		0.73 a	0.22 a	0.77 a	1.26 a
Perlita		0.58 b	0.27 a	0.72 a	0.98 b
Tezontle		0.49 b	0.25 a	0.86 a	0.76 b
DMSH		0.10	0.07	0.14	0.25
CV (%)		16.61	26.71	17.75	23.96

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p=0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

4.5.2.5. Magnesio

Las concentraciones de Mg en hoja, muestran que no existen diferencias significativas entre sustratos (Cuadro 8), pero se observa que, con excepción de fibra de coco en el ciclo I, la concentración de Mg está por debajo del intervalo óptimo (0.3 a 0.5 %) (Hancock, 1999). En fibra de coco y tezontle, a medida que pasaron los ciclos de uso se dio una disminución en la concentración de Mg en hoja.

Cuadro 8. Concentración (%) de magnesio (Mg) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutilización	Magnesio (Mg)			
		Hoja	Fruto rojo	Corona	Raíz
		%			
Fibra de coco	Ciclo I	0.30 a	0.12 a	0.27 a	0.30 a
	Ciclo II	0.28 a	0.22 a	0.37 a	0.23 a
	Ciclo III	0.27 a	0.22 a	0.36 a	0.29 a
	Ciclo IV	0.25 a	0.17 a	0.36 a	0.25 a
	DMSH	0.13	0.15	0.23	0.13
	CV (%)	16.93	27.33	23.45	16.18
Perlita	Ciclo I	0.18 a	0.19 a	0.34 a	0.33 a
	Ciclo II	0.26 a	0.17 a	0.27 a	0.41 a
	Ciclo III	0.26 a	0.21 a	0.28 a	0.20 a
	Ciclo IV	0.26 a	0.17 a	0.39 a	0.29 a
	DMSH	0.16	0.09	0.26	0.33
	CV (%)	22.48	16.20	28.58	37.87
Tezontle	Ciclo I	0.26 a	0.15 a	0.41 a	0.28 a
	Ciclo II	0.27 a	0.17 a	0.37 a	0.27 a
	Ciclo III	0.21 a	0.17 a	0.32 a	0.33 a
	Ciclo IV	0.19 a	0.17 a	0.45 a	0.34 a
	DMSH	0.10	0.07	0.28	0.11
	CV (%)	14.92	13.77	24.79	12.43
Coco		0.28 a	0.19 a	0.35 a	0.27 a
Perlita		0.25 a	0.19 a	0.32 a	0.31 a
Tezontle		0.24 a	0.17 a	0.39 a	0.31 a
DMSH		0.05	0.04	0.09	0.08
CV (%)		19.93	21.46	23.98	24.94

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p=0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

La perlita nueva presento una concentración muy baja (0.18%), aunque aumentó a 0.26 % durante los ciclos II, III y IV. Las mayores concentraciones de Mg se dieron en el orden, corona y raíz > hoja > fruto.

4.5.2.6. Hierro

Según Hancock (1999) el intervalo de suficiencia de Fe en hoja va de 60 a 250 mg·kg⁻¹; la concentración de Fe en hoja de fresa desarrollada en fibra de coco, disminuyó con los ciclos de reutilización (Cuadro 9), pasando de 150.80 mg·kg⁻¹ en el ciclo I a 20.13 mg·kg⁻¹ al final del ciclo IV. Lo anterior es congruente con los síntomas de deficiencia observadas en hoja de fresa desarrolladas en este sustrato, lo que podría explicarse por la disminución del hierro disponible por inmovilización con la fracción orgánica, debida a la quelatación entre las sustancias húmicas y los iones metálicos Fe, Cu, Zn y Mn (Handreck y Black, 2005). Las concentraciones de Fe en hoja en los sustratos perlita y tezontle muestran diferencias significativas, pero no se observa una tendencia definida como en fibra de coco. Por el contrario, la fibra de coco y perlita muestran un incremento en la concentración de Fe en raíz, a medida que pasaron los ciclos de reutilización (Cuadro 9), mientras que las concentraciones de Fe en fruto en los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle aumentaron de 41.60 a 63.85, de 47.69 a 62.96 y de 57.90 a 78.16 mg·kg⁻¹, respectivamente. El Fe al igual que el Mg, presenta las mayores concentraciones en raíz y corona, seguido de hojas y frutos, lo que coincide con Bienfait (1985) quien encontró las mayores concentraciones de hierro en raíz y corona, lo que se atribuye al efecto que tiene la raíz en los procesos de absorción y óxido-reducción para el transporte de este micronutriente (Bienfait, 1985).

Yavari *et al.* (2009) observaron síntomas de deficiencia de Fe y clorosis en plantas de fresa, cultivadas en diferentes sustratos orgánicos, debido a altas concentraciones de Mn en sustratos y hojas. Al parecer un alto nivel de Mn restringe la translocación de Fe del suelo para enraizar y/o desde la raíz hasta las hojas (Roomizadeh & Karimian, 1996). Aunque el Fe es indispensable para la biosíntesis de la clorofila, su contenido total en la planta no es

necesariamente un indicador de la aparición de clorosis en hojas (Katyal & Sharma, 1980).

El impacto de la salinidad en cultivo en sustratos en invernadero, es diferente al que se produce en condiciones en suelo al aire libre. La diferencia más notable es la mayor proporción de nutrimentos en los cultivos en sustratos respecto al suelo al aire libre, observándose una CE más alta en la solución del sustrato, llegando a niveles no deseados, que reducen el crecimiento (Sonneveld, 2004). Según Abad *et al.* (2004) y Abad *et al.* (2005) la respuesta de las plantas a la salinidad depende de la especie, edad, condiciones ambientales, prácticas de manejo y el grado de tolerancia a las sales.

Cuadro 9. Concentración ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) de hierro (Fe) en hojas, frutos rojos, corona y raíz de fresas cultivadas en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutilización	Hierro (Fe)			
		Hoja	Fruto rojo	Corona	Raíz
		mg·L ⁻¹			
Fibra de coco	Ciclo I	150.80 a	57.85 a	75.90 a	347.76 a
	Ciclo II	132.56 a	63.85 a	77.95 a	336.66 a
	Ciclo III	28.46 b	60.50 a	123.80 a	553.70 a
	Ciclo IV	20.13 b	41.60 a	112.30 a	549.95 a
	DMSH	66.88	2.18	2.40	2.40
	CV (%)	28.51	26.87	19.41	16.56
Perlita	Ciclo I	31.80 b	62.96 a	253.63 a	77.23 b
	Ciclo II	71.33 b	62.33 a	165.10 a	232.86 b
	Ciclo III	42.86 b	47.60 a	248.60 a	644.75 a
	Ciclo IV	170.25 a	51.30 a	123.16 a	628.80 a
	DMSH	2.40	47.41	2.40	2.40
	CV (%)	23.79	29.93	22.68	22.32
Tezontle	Ciclo I	90.55 bc	57.90 a	224.80 a	580.20 b
	Ciclo II	134.43 ab	78.16 a	231.86 a	406.46 b
	Ciclo III	53.50 c	70.20 a	270.66 a	398.30 b
	Ciclo IV	169.65 a	62.13 a	252.40 a	857.40 a
	DMSH	2.40	39.89	232.33	2.67
	CV (%)	16.89	21.03	33.56	12.64
Coco		82.99 b	56.46 a	96.81 b	426.06 b
Perlita		74.67 b	56.05 a	195.78 a	347.74 b
Tezontle		108.42 a	67.10 a	244.93 a	558.80 a
DMSH		10.59	10.80	10.59	10.31
CV (%)		21.98	24.80	31.02	15.92

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p=0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación.

La proporción entre la concentración de los iones en la rizosfera y la diferencia en ritmo de absorción son muy variables para cada ion. El K^+ , NO_3^- , NH_4^+ y $H_2PO_4^-$ son fácilmente absorbidos por las raíces, mientras que Ca^{2+} y Mg^{2+} son absorbidos con mayor dificultad (Sonneveld & Voogt, 1985; Marschner, 2012). Este comportamiento coincide con lo observado en esta investigación, ya que presentaron las mayores concentraciones de K, N y P, y las menores en Ca y Mg en los diferentes tejidos.

Aplicación de niveles altos de K podría aumentar la capacidad de la planta para el ajuste osmótico en los hábitats salinos (Cerdeira *et al.*, 1995), porque el K es el catión más abundante en el citoplasma (Marschner, 2012), es fácil de movilizar, interviene en el mantenimiento de la turgencia celular y en funciones osmóticas (Sánchez, 2004). Chow *et al.* (1990) encontraron que la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) requirió más K para el crecimiento del brote bajo condiciones de alta salinidad que bajo condiciones de baja salinidad. Adams (1991) menciona que en tomate cuando se aumentó la conductividad de 3 a 8 $dS \cdot m^{-1}$ por adición de macronutrientes (K, Ca, NO_3), la concentración de potasio en la hoja se duplicó de 3.8 a 6.16 %, pero las concentraciones de P, Ca y Mg, disminuyeron considerablemente.

Adams y Winsor (1971) mencionan que la deficiencia de Mg en tomate es más severa con concentraciones crecientes de K, N y Ca, las cuales pueden causar reducciones severas del rendimiento; las mayores pérdidas del rendimiento ocurrieron con altos niveles de N y K. En forma similar, niveles altos de N y K aumentaron la severidad de la deficiencia de Mg en tomate y pepino (Adams *et al.*, 1992).

El ritmo de crecimiento y la humedad del aire en condiciones invernadero suelen ser relativamente altos durante largos periodos, factores importantes que afectan la absorción de Ca, aunque la absorción de Ca influida por el flujo de transpiración también es afectada por varios factores fisiológicos, los cuales determinan los desórdenes que inducen la deficiencia de Ca en hojas (Sánchez, 2004; Sonneveld, 2004). Los desórdenes de Ca en los frutos de hortalizas son

conocidos como pudrición apical, y están relacionados con la alta salinidad y son promovidos por la baja humedad del suelo o sustrato (Sonneveld, 2004). Generalmente la adición de K y Mg no produce efectos específicos de toxicidad en las plantas; sin embargo, reduce la absorción de Ca (Sonneveld, 2004). Las aplicaciones de K y Mg algunas veces reducen fuertemente la absorción de Ca (Sonneveld, 2004) que inducen su deficiencia (Adams & Ho, 1993). La movilidad de iones Ca es afectada por altas concentraciones de iones K (Shear, 1975; Bould & Tsai-Fua, 1976), bajas temperatura (inferiores a 12 °C) y altas concentraciones de fosfatos en el medio de crecimiento (Sánchez, 2004). Los síntomas de deficiencia de calcio, se observan por primera vez en hojas y flores de plantas de fresa que crecen en ambientes con altas temperaturas (22 a 36 °C) (Chow *et al.*, 2004).

4.5.3. Calidad de fruta

Los resultados de calidad de fruto corresponden a las evaluaciones realizadas en el periodo de los 60 a 70 días de iniciada la cosecha. La calidad del fruto no se vio afectada significativamente por los sustratos y ciclos de reutilización (Cuadro 10).

El ácido cítrico vario entre 0.65 y 0.83 %, valores que coinciden con el intervalo (0.42-1.24 %) propuesto por Dale y Luby (1991) para frutos de fresa. De acuerdo con Martínez-Bolaños *et al.* (2008) frutos de fresa con menor acidez, podrían ser preferidos para el consumo en fresco; al respecto, Kader (1999) recomienda que la concentración máxima de ácido cítrico en frutos, sea de 0.8% para tener un sabor aceptable.

El contenido de sólidos sólidos totales (SST) estuvo entre 7.55 y 8.53 °Brix (Cuadro 10), datos que son similares a los reportados por Martínez-Bolaños *et al.* (2008) y Rivera (2016). Dávalos-Gonzalez *et al.* (2017) reportan grados brix en cv de Camino Real y Nikté de 7.77 y 8.70, respectivamente. Alavoine y Crochon (1989) y Montero *et al.* (1996) mencionaron que el mayor contenido de SST en frutos, les confiere mayor calidad. Los valores de pH obtenidos variaron

entre 2.71 y 2.92, los cuales resultan bajos en comparación con los obtenidos por Hancock (1999) y Juárez-Rosete *et al.* (2007) quienes reportan valores de 3.5.

Cuadro 10. Calidad de fruto: peso fresco, longitud, diámetro ecuatorial, porcentaje de ácido cítrico, pH y sólidos solubles totales (°Brix), de fresas cultivada en fibra de coco, perlita y tezontle, con diferentes ciclos de reutilización.

Sustrato	Reutili- zación	CALIDAD DE FRUTO*					pH
		Peso fresco	Longitud	DI	Ácido cítrico	SST	
		g·fruto ⁻¹	----- cm -----		%	°Brix	
Fibra de coco	Ciclo I	18.05 a	4.26 a	2.92 a	0.80 a	8.22 a	2.81 a
	Ciclo II	20.71 a	4.34 a	3.02 a	0.76 a	7.55 a	2.76 a
	Ciclo III	20.47 a	4.81 a	3.27 a	0.72 a	8.02 a	2.78 a
	Ciclo IV	20.55 a	4.54 a	2.99 a	0.70 a	7.68 a	2.86 a
	DMSH	8.18	1.04	0.52	0.16	2.42	0.18
	CV (%)	14.5	8.21	6.06	7.45	10.88	2.22
Perlita	Ciclo I	15.10 a	4.38 a	3.11 a	0.65 a	8.13 a	2.76 a
	Ciclo II	20.27 a	4.03 a	2.98 a	0.76 a	8.53 a	2.71 a
	Ciclo III	19.45 a	4.21 a	3.01 a	0.69 a	8.31 a	2.92 a
	Ciclo IV	18.65 a	4.39 a	3.04 a	0.74 a	8.15 a	2.88 a
	DMSH	6.76	0.95	0.62	0.14	1.62	0.33
	CV (%)	13.01	7.92	7.23	6.89	6.92	4.09
Tezontle	Ciclo I	18.29 a	4.38 a	3.08 a	0.83 a	7.68 a	2.77 a
	Ciclo II	19.07 a	4.27 a	2.98 a	0.69 a	8.09 a	2.91 a
	Ciclo III	17.43 a	4.10 a	3.00 a	0.76 a	8.06 a	2.90 a
	Ciclo IV	20.34 a	4.37 a	3.11 a	0.81 a	8.10 a	2.76 a
	DMSH	5	0.81	0.6	0.25	1.36	0.33
	CV (%)	9.41	6.72	6.99	11.55	6.03	4.1
Fibra de coco		19.95 a	4.49 a	3.05 a	0.75 a	7.87 a	2.81 a
Perlita		18.37 a	4.25 a	3.04 a	0.72 a	8.28 a	2.82 a
Tezontle		18.79 a	4.28 a	3.04 a	0.78 a	7.99 a	2.84 a
DMSH		2.34	0.34	0.22	0.06	0.71	0.10
CV (%)		12.00	7.64	7.04	8.72	8.71	3.74

Valores de medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$). DI: Diámetro ecuatorial; SST: Sólidos solubles totales; DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: coeficiente de variación. *Variables evaluadas entre los 60 y 70 días de iniciada la producción.

Se observó que el mayor peso de fruto fresco fue para fibra de coco seguido de tezontle y perlita, con un promedio de 19.45, 18.78 y 18.36 g·fruto⁻¹, respectivamente; el peso, longitud y diámetro ecuatorial de los frutos reportados en el presente estudio son mayores a los resultados obtenidos por Ornelas-Paz *et al.* (2013), quienes reportan un peso de 13 a 17.6 g·fruto⁻¹, longitudes de 3.69 a 3.8 cm y diámetros ecuatoriales de 2.62 a 2.95 cm, en el cv. Albion. Dávalos-

Gonzalez *et al.* (2017), mencionan que los pesos promedios de fruto de los cultivares Camino Real y Nikté van de 11.6 a 13.1 y de 10.7 a 13 g, respectivamente. Según la Norma Oficial Mexicana (NMX-FF-062-SCFI-2002), el tamaño de las fresas se clasifica en A (> 3.2 cm) y B (2.6 A 3.1 cm). Hancock (1999) menciona que el peso, longitud y diámetro ecuatorial puede cambiar debido que el fenotipo de un cultivar puede variar con las condiciones ambientales, como temperatura, intensidad luminosa y el fotoperiodo.

Depardieu *et al.* (2017) reportaron una disminución en SST (7.94-8.80) en frutos de fresa debido a la alta salinidad en la zona radical durante el crecimiento en aserrín y debido a la alta inmovilización de N en la corteza envejecida. Por otra parte, Kaya *et al.* (2002) y Garriga *et al.* (2017), reportan que la salinidad tuvo un impacto negativo sobre el rendimiento de fruta fresca en 'Camarosa', reducciones en tamaño y peso de fruto, debido a la poca disponibilidad de agua por efecto de la salinidad; sin embargo, los grados brix no fueron afectados, presentando valores de 8.01 a 8.34 (Garriga *et al.*, 2017).

4.6. Conclusiones

Los pesos de la materia fresca de raíz, corona, hojas, flores, frutos y rendimiento total en fresa cv. Albión, fueron iguales entre sustratos y ciclos de reutilización, aun cuando los sustratos presentaron variación significativa en sus propiedades físicas y químicas después de cuatro ciclos de cultivo de fresa.

La variación en la concentración de los nutrimentos N, P, K, Ca, Mg y Fe en cada uno de los órganos de la planta (raíz, corona, hoja y frutos rojos) no presentó diferencias significativas, debido al efecto de los sustratos y sus respectivos ciclos de reutilización, observándose concentraciones dentro y fuera de los niveles óptimos.

Las concentraciones de Ca y Mg en las hojas de fresa estuvieron por debajo de los intervalos óptimos, mientras que el P y K estuvieron en exceso en las plantas desarrolladas en los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle; las

concentraciones de N en hojas de fresa, en los sustratos fibra de coco y perlita estuvieron dentro del rango optimo, mientras que en tezontle las concentraciones de nitrogeno mostraron deficiencia; las concentraciones de Fe en hojas de fresa en los sustratos de fibra de coco mostraron deficiencias a partir del ciclo III.

Los diferentes parámetros medidos para evaluar la calidad del fruto no se vieron afectado por la reutilización de los sustratos fibra de coco, perlita y tezontle, durante cuatro ciclos de reutilización con cultivo de fresa.

4. 7. Literatura citada

- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2004). Los Sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. G. Urrestarazu (3ª Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). España: Mundi-Prensa.
- Abad, B. M., Noguera P., & Carrión B. C. (2005). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In C. Cadahía (3ª Ed), *Fertirrigación: Cultivos hortícolas y ornamentales* (pp. 299-352). España: Mundi-Prensa.
- Acuña, R., Bonachela, S., Magán, J., Marfá, O., Hernández, J., & Cáceres, R. (2013). Reuse of rockwool slabs and perlite grow-bags in a low-cost greenhouse: Substrates physical properties and crop production. *Scientia Horticulturae*, 160, 139-147.
- Adams, P. (1991). Effect of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *Journal Horticulturae Science*, 66, 201-207.
- Adams, P., Graves, C. J., & Winsor, G. W. (1992). Some response of cucumber, grown in beds of peat, to N, K and Mg. *Journal Horticultural Science*, 67, 877-884.
- Adams, P., & Ho, L . C. (1993). At the roots of blossom-end rot. *Grower*, 119 (8), 8-9.
- Adatia, M. H., & Winsor, G. W. (1971). Magnesium deficiency in glasshouse tomatoes. Ann. Rep. *Glasshouse Crops Res*, 186-192.
- Andriolo, J.L., Duarte, T.S., Ludke, L., & Skrebsky, E.C. (1999). Caracterização e avaliação de substratos para o cultivo do tomateiro fora do solo. *Horticultura Brasileira*, 17, 215–219
- Alavoine, F., & Crochon, M. (1989). Taste quality of strawberry. *Acta Horticulturae*, 265, 449-452.
- Ansorena, M. J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. España, Madrid: Mundi-Prensa. 172 p.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemistry. (1980). Official Methods of Analysis. (12ª Ed). USA Washington, D.C. 1018 p.

- Bienfait, H. F. (1985). Regulated redox processes at the plasmalemma of plant root cells and their function iron uptake. *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, 17, 73-83.
- Bould, C., & Tsai-Fua, Ch. (1976). Mobility of calcium in fruit plant. Proc 4th Intern. Coll. *On the control of plant nutrition*, Gent, 1, 104-108
- Bunt, A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants*. London, England: Unwin Hayman Ltd. 301 p.
- Chapman, H. D., & Pratt, P., F. (1979). *Métodos de análisis para suelos, planta y aguas*. México: Editorial Trillas. 70 p.
- Cegarra, J. (1994). Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. In: *Programa Universitario de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (PUI)* Ed. Memorias Curso Master Internacional Aprovechamiento de Residuos Orgánicos. Universidad Nacional de Colombia- Sede Palmira, 1-8.
- Celikel, G., & Caglar, G. (1999). Los efectos de la reutilización de diferentes sustratos en el rendimiento y la precocidad de pepino en periodo de crecimiento de otoño. *Acta de Horticultura*, 492, 259-264.
- Cerda, A.J., Pardines, M., Botella, M.A., & Martínez, V. (1995). Effect of potassium on growth, wáter relations and the inorganic and organic solute contents for two maize cultivars grown under saline conditions. *Journal Plant Nutricional*, 18, 839–851.
- Chow, W. S., Ball, C. M., & Anderson, J. M. (1990). Growth and photosynthetic responses of spinach to salinity: Implications of K nutrition for salt tolerance. *Aust. Journal Plant Physiology*, 17, 563–578
- Chow, K. K., Price, T. V., & Hanger, B. C. (2004). Effects of Nitrogen, Potassium, Calcium Concentrations and SolutionTemperatures on the Growth and Yield of Strawberry cv. Redgauntlet in a Nutrient Film (NFT) Hydroponic System. Ed. A.P. Papadopoulos *Acta Horticultura*, 633, 315-327.
- Dale, A., & Luby, J. J. (1991). The Strawberry Into the 21st Century. Proceedings of the Third North American *Strawberry Conference*. Timber Press. Portland, Oregon. 152 p.
- Dávalos-González P. A., Jofre-Garfías A. E., Díaz-Espino, L. A., Mariscal-Amaro, L. A., & López-Pérez, M. G. (2017). Advances in strawberry breeding in Mexico: genotypes selection with high productivity, good fruit quality, and tolerance to the local viral complex and Fusarium oxysporum Proc. VIII International Strawberry Symposium. *Acta Horticulturae*, 1156, 159-166
- Depardieu, C., Prémont, V., Boily C., & Caron J. (2017). Sawdust and bark-based substrates for tray plants strawberry production under greenhouse conditions. Proc. VIII International Strawberry Symposium *Acta Horticulturae*, 1156, 269-276.
- Fernandes, C., Corá, JE, & Braz, LT. (2006). Alteraciones nas propriedades fisicas de substratos para cultivo de tomate cereja, en la función de su reutilización *Horticultura Brasileira*, 24, 94-98 Consutaldo en: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362006000100019>.
- Fernandes, C., Corá, J. E., & Braz, L. T. (2007). Reuse of sand, crushed

- sugarcane and peanut hull-based substrates for cherry tomato cultivation. *Scientia Agricultura*, 64, 630–635
- Fonteno, W.C. (1993). Problemas y consideraciones en la determinación de las propiedades físicas de horticultural substrates. Sustratos hortícolas. *Acta Horticulturae*, 342, 197-204.
- Garriga, M., Caligari P. D. S., & Retamales J. B. (2017). Salt stress induces differential responses in yield, fruit quality, vegetative growth and physiological parameters in commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*) genotypes. Proc. VIII International Strawberry Symposium. *Acta Horticulturae*, 1156, 419-424.
- Giuffrida, F., & Consoli, S. (2015). Reusing Perlite substrates in soilless cultivation: Analysis of Particle size, Hydraulic Properties, and Solarization Effects. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000968.
- Hancock, J. F. (1999). *Strawberries*. Crop production science in horticulture 11 London, UK: *International Publishing*. 236 p.
- Handreck, K. A., & Black, N. (2005). *Growing media for ornamental plant and turf*. Australia Kensington: New South Wales University Press. 544 p.
- Juárez-Rosete, C. R., Rodríguez-Mendoza, M. N., Sandoval-Villa, M., & Muratalla-Lua, A. (2007). Comparación de tres sistemas de producción de fresa en invernadero. *Revista Terra Latinoamérica*, 25(1), 17-23.
- Kader, A. A. (1999). Fruit maturity, ripening and quality relationships. Intl. Symp. On effects of pre-and postharvest factor son storage of fruit. *Acta Horticulturae*, 485, 203-208.
- Katyal, J. C., & Sharma, B. D. (1980). A new technique of plant analysis to resolve iron chlorosis. *Plant and Soil*, 55, 105–119.
- Kawakami, F. P., Araujo, J. A., Iunck, V., Factor, T. L., & Cortez, G. E. (2006). Manejo da fertirrigação em função da condutividade elétrica da solução nutritiva drenada no cultivo de tomate cereja sob ambiente protegido. Consultado en: www.abhorticultura.com.br.
- Kaya, C., Kirnak, H., Higgs, D., & Saltali, K. (2002). El calcio suplementario mejora el crecimiento de las plantas y el rendimiento de la fruta en cultivares de fresas cultivadas a alta salinidad (NaCl). *Scientia Horticulturae*, 93 (1), 65-74. Consultado en: [http://dx.doi.org/10.1016 / S0304-4238 \(01\) 00313-2](http://dx.doi.org/10.1016 / S0304-4238 (01) 00313-2).
- Lemaire, F. & Marfa, O. (1998). Consecuencias de la biodegradabilidad de materia orgánica en los parámetros físico-químicas de los sustratos. *Acta Horticulturae*, 469, 129-138.
- López-Pérez, L., Cárdenas-Navarro, R., Lobit P., Martínez-Castro, O., & Escalante-Linares, O. (2005). Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28, 171-174.
- Marin, M. V., Melo, D. M., Gomes, R. F. , Diniz, G. M. M., Rabelo, H. O., Castoldi, R., Gobato, E. D., Azevedo, R., Braz, L. T., & Fernandes, C. (2015). Effects of different nutrient concentrations and reuse of substrate in tomato production *Acta Horticulturae*, 1107, 297-302. Doi 10.17660/ActaHortic.2015.1107.41

- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. (3^a Ed), Sydney, Australia: Academic Press. 672 p.
- Martínez-Bolaños, M., Nieto-Angel, D., Téliz-Ortiz, D., Rodríguez-Alcazar, J., Martínez-Damian, Ma. T., Vaquera-Huerta, H., & Carrillo-Mendoza, O. (2008). Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares mexicanos y estadounidenses. *Revista Chapingo Serie horticultura*, 14 (2), 113-119.
- Montero, T. M., Mollá, E. M., Esteban, R. M., & Andréu, F., J. L. (1996). Quality attributes of strawberry during ripening. *Scientia Horticulturae*, 65, 239–250.
- Massetani, F., Savini, G., & Neri D. (2017). Effect of substrate and container type in the strawberry soilless cultivation. Proc. VIII International Strawberry Symposium. *Acta Horticulturae*, 1156, 295-300.
- Ornelas-Paz, J. De. J., Yahia, E. M., Ramírez-Bustamante, N., Pérez-Martínez, J.D., Escalante-Minakata, M. Del. P., Ibarra-Junquera, V., ... Ochoa-Reyes, E. (2013). Physical attributes and chemical composition of organic strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Albion) at six stages of ripening. *Food Chemistry*, 138, 372-381.
- Pineda J. (2010). *Caracterización del aserrín de pino como sustrato hidropónico durante cinco ciclos de cultivo con jitomate*. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura).138 p.
- Pineda, J., Sánchez, F., Ramírez, A. Castillo, A. M., Valdez, L. A. Moreno., & Del Cid, E. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18 (1), 71-88.
- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless Culture: Theory and Practice*. United States of America: Editorial Elsevier. 625 p.
- Reis, M., Inácio, H., Rosa, A., Caço, J., & Monteiro, A. (2001). Grape marc compost as an alternative growing media for greenhouse tomato. *Acta Horticulturae*, 554, 75–81. Consultado en: <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.554.6>
- Rivera. R. (2016). Propiedades físicas de sustratos y sus efectos en la nutrición de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), en sistemas hidropónico. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura). 197 p.
- Roomizadeh, S., & Karimian, N. (1996). Manganese-iron relationship in soybean grown in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 19, 397–406.
- Ruiz, R., & Piedrahíta, W. (2012). Fresa (*Fragaria x ananassa*). Manual para el cultivo de frutales en el trópico. *Produmedios*, 474-495.
- Sánchez, A. (2004). Análisis y diagnóstico nutrimental en los cultivos sin suelo. In: M. G. Urrestarazu (3^a Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). España: Mundi-Prensa
- SAS. (2016). Statistical Analysis System 9.3 TS1M2 (1-7). Cary, N.C., USA.
- Shear, C.B. (1975). Calcium nutrition and quality in fruit crops. *Comm. Soil Sciencia Plant Analysis*, 6, 233-244.
- Steiner, A. (1984). The Universal Nutrient Solution. ISOC. Netherlands.

- Sonneveld, C., & Voogt, W. (1985). Growth and cation absorption of some fruit-vegetable crops grown on rockwool as affected by different cation ratios in the nutrient solution. *Journal of Plant Nutricional*, 8, 585-602.
- Sonneveld, C. (2004). Los Sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. G. Urrestarazu (3^a Ed), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). España: Mundi-Prensa.
- Yavari, S., Eshghi, S., Tafazoli, E., & Karimian N. (2009). Mineral Elements Uptake and Growth of Strawberry as Influenced by Organic Substrates. *Journal of Plant Nutrition*, 32, 1498–1512
- Yildiz, K., Uzal, O., & Yilmaz, H. (2008). Consequences of NaCl salinity on growth and on accumulation in selected strawberry cultivars. *European Journal of Horticultural Science*, 73, 69–72.
- Yilmaz, H., & Kina, A. (2008). The influence of NaCl salinity on some vegetative and chemical changes of strawberry (*Fragaria × ananassa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 7, 3299–3305.