

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

**CARACTERIZACIÓN DEL ASERRÍN DE PINO COMO
SUSTRATO HIDROPÓNICO DURANTE CINCO
CICLOS DE CULTIVO CON JITOMATE**

T E S I S

QUE PRESENTA:

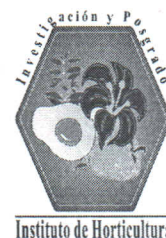
JOEL PINEDA PINEDA

**COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



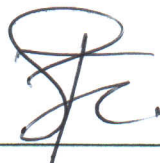
Chapingo, Estado de México, Junio de 2010

**CARACTERIZACIÓN DEL ASERRÍN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPÓNICO
DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO CON JITOMATE**

Tesis realizada por JOEL PINEDA PINEDA bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



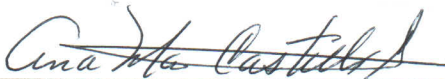
Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ASESOR:



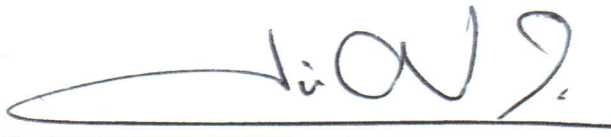
Dr. Armando Ramírez Arias

ASESOR:



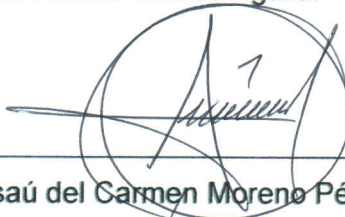
Dra. Ana Ma. Castillo González

ASESOR:



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

LECTOR EXTERNO:



Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

DEDICATORIA

Con infinito amor a mi esposa:

Adriana María

por compartirme su vida para formar nuestra familia.

Con todo el amor a mis hijos:

Oscar Eduardo

Leilani

y Moani

A mis padres por darme la vida y a mis hermanos por la vida compartida

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo por darme la formación como Doctor en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico durante el desarrollo de mis estudios de doctorado.

Al Departamento de Fitotecnia y Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo por las facilidades de espacios y equipos de laboratorio para realizar la presente investigación.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo por su dirección, consejos, orientación y apoyo para realizar esta tesis.

Al Dr. Armando Ramírez Arias por su asesoría, apoyo y tiempo dedicado en la conducción de esta investigación.

A la Dra. Ana Ma. Castillo González por su asesoría, apoyo y facilidades para culminar esta investigación.

Al Dr. Luis Alonso Valdés Aguilar por sus observaciones y correcciones para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez por sus comentarios y recomendaciones como lector externo para mejorar la presentación de esta tesis.

A los integrantes del grupo AGRIBOT de Preparatoria Agrícola por permitirme trabajar parte de esta investigación en sus invernaderos.

CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN GENERAL.....	xiii
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
LITERATURA CITADA.....	5
CAPITULO I. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. I: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS FÍSICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....	7
RESUMEN.....	7
ABTRACT.....	8
1.1. NTRODUCCIÓN.....	10
1.2. MATERIALES Y METODOS.....	15
1.2.1. Ubicación del estudio.....	15
1.2.2. Material vegetal utilizado.....	16
1.2.3. Tratamientos y diseño experimental.....	16
1.2.4. Muestreo de sustrato y medición de variables.....	17
1.3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	18
1.3.1. Interacción entre el tamaño de partícula de tezontle y la relación aserrín/tezontle.....	19
1.3.2. Efecto del tamaño de partícula sobre las características físicas del sustrato.....	27
1.3.3. Efecto de la relación aserrín/tezontle sobre las características físicas del	

sustrato.....	27
1.4. CONCLUSIONES.....	34
1.5. LITERATURA CITADA.....	35
 CAPITULO II. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. II: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS QUIMICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....	 39
RESUMEN.....	39
ABTRACT.....	40
2.1. INTRODUCCIÓN.....	42
2.2. MATERIALES Y METODOS.....	46
2.2.1. Ubicación del estudio.....	46
2.2.2. Material vegetal utilizado.....	46
2.2.3. Tratamientos y diseño experimental.....	46
2.2.4. Instalación y desarrollo experimental.....	47
2.2.5. Muestreo de sustrato y medición de variables.....	48
2.3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	49
2.3.1. Interacción entre el tamaño de partícula de tezontle y la relación aserrín/tezontle.....	49
2.3.2. Efecto del tamaño de partícula sobre las variables químicas.....	63
2.3.3. Efecto de la relación aserrín/tezontle sobre las variables químicas.....	63
2.4. CONCLUSIONES.....	68
2.5. LITERATURA CITADA.....	69
 CAPITULO III. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. III: INMOVILIZACIÓN NUTRIMENTAL.....	 73
RESUMEN.....	73
ABSTRACT.....	75

3.1. INTRODUCCIÓN.....	76
3.2. MATERIALES Y METODOS.....	82
3.2.1. Ubicación del estudio.....	82
3.2.2. Material vegetal utilizado.....	83
3.2.3. Materiales empleados como componentes de los sustratos.....	83
3.2.4. Solución nutritiva.....	83
3.2.5. Tratamientos y diseño experimental.....	85
3.2.6. Instalación y desarrollo experimental.....	86
3.2.7. Variables medidas.....	86
3.3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	87
3.3.1. Interacción entre el sustrato (S) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración de nutrimentos en los lixiviados del sustrato.....	88
3.3.2. Efecto del sustrato sobre la concentración de nutrimentos en los lixiviados.....	99
3.3.3. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre la concentración de nutrimentos en los lixiviados del sustrato.....	99
3.3.4. Comportamiento del pH durante 87 ddt.....	102
3.3.5. Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) durante 87 ddt.....	103
3.4. CONCLUSIONES.....	107
3.5. LITERATURA CITADA.....	108
 CAPITULO IV. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. IV: PRODUCCION DE JITOMATE DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....	 113
RESUMEN.....	113
ABTRACT.....	114
4.1. INTRODUCCIÓN.....	115
4.2. MATERIALES Y METODOS.....	116
4.2.1. Material vegetal utilizado.....	116

4.2.2. Tratamientos y diseño experimental.....	117
4.2.3. Medición de variables en fruto.....	118
4.3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	119
4.3.1. Efecto del tamaño de partícula sobre los principales componentes del rendimiento de fruto de jitomate.....	119
4.3.2. Efecto de la relación aserrín/tezontle sobre los principales componentes del rendimiento de fruto de jitomate.....	120
4.5. CONCLUSIONES.....	127
4.6. LITERATURA CITADA.....	128
DISCUSIÓN GENERAL.....	131
CONCLUSIONES GENERALES.....	135
LITERATURA CITADA.....	136

INDICE DE CUADROS

CAPITULO I. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. I: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS FÍSICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO

Cuadro 1. Niveles de significancia de las variables físicas medidas en los tratamientos formados por la combinación de diferente diámetro de partícula y relaciones aserrín/tezontle, durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	19
Cuadro 2. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato antes de establecer el cultivo.....	28
Cuadro 3. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del primer ciclo (6 meses) de jitomate.....	29
Cuadro 4. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del segundo ciclo (12 meses) de jitomate.....	29
Cuadro 5. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en	

las características físicas del sustrato al final del tercer ciclo (18 meses) de jitomate.....	30
Cuadro 6. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del cuarto ciclo (24 meses) de jitomate.....	30
Cuadro 7. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del quinto ciclo (30 meses) de jitomate.....	31

CAPITULO II. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. II: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS QUIMICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....

Cuadro 1. Niveles de significancia de las variables químicas medidas en los tratamientos formados por la combinación de diferente diámetro de partícula de tezontle y relaciones aserrín/tezontle, durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	50
Cuadro 2. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en el pH en agua (relación 1:1.5) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	64
Cuadro 3. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en la conductividad eléctrica (CE, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	64
Cuadro 4. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en la cantidad de materia orgánica oxidable (%) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	65
Cuadro 5. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en la capacidad de intercambio cationica (CIC, $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	65

CAPITULO III. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. III: INMOVILIZACIÓN NUTRIMENTAL.....

Cuadro 1. Composición química del agua y concentración de macronutrientes de las soluciones nutritivas evaluadas en el experimento.....	84
Cuadro 2. Niveles de significancia de las variables nutrimentales medidas en los sustratos regados con solución nutritiva con diferente conductividad	

eléctrica durante dos meses de cultivo.....	88
Cuadro 3. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de nitrógeno en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate.....	100
Cuadro 4. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de fósforo en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate.....	101
Cuadro 5. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de potasio en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate.....	101
Cuadro 6. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de calcio en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate.....	102

CAPITULO IV. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. IV: PRODUCCION DE JITOMATE DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....

Cuadro 1. Efecto del tamaño de partícula ($\leq 3, 3-6, 6-13 \text{ mm}$) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el primer ciclo de cultivo, establecido de agosto de 2007 a enero de 2008.....	125
Cuadro 2. Efecto del tamaño de partícula ($\leq 3, 3-6, 6-13 \text{ mm}$) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el segundo ciclo de cultivo, establecido de febrero de 2008 a julio de 2008.....	125
Cuadro 3. Efecto del tamaño de partícula ($\leq 3, 3-6, 6-13 \text{ mm}$) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el tercer ciclo de cultivo, establecido de agosto de 2008 a enero de 2009.....	126
Cuadro 4. Efecto del tamaño de partícula ($\leq 3, 3-6, 6-13 \text{ mm}$) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el cuarto ciclo de cultivo, establecido de febrero de 2009 a julio de 2009.....	126
Cuadro 5. Efecto del tamaño de partícula ($\leq 3, 3-6, 6-13 \text{ mm}$) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el quinto ciclo de cultivo, establecido de julio de 2009 a enero de 2010.....	127

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. I: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS FÍSICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....

Figura 1. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la porosidad del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	23
Figura 2. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de retención de humedad del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	24
Figura 3. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de aireación del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	25
Figura 4. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la densidad aparente del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	26

CAPITULO II. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. II: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS QUIMICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO.....

Figura 1. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre el pH (relación 1:1.5 sustrato:agua) del sustrato después 30 meses de cultivo con jitomate.....	59
Figura 2. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la conductividad eléctrica (CE) (relación 1:1.5 sustrato:agua) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	60
Figura 3. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la materia orgánica oxidable del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	61
Figura 4. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.....	62

CAPITULO III. ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. III: INMOVILIZACIÓN NUTRIMENTAL.....

Figura 1. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 dS·m ⁻¹) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de nitrógeno en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.....	95
Figura 2. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 dS·m ⁻¹) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de fósforo en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.....	96
Figura 3. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 dS·m ⁻¹) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de potasio en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.....	97
Figura 4. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 dS·m ⁻¹) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de calcio en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.....	98
Figura 5. Variación en pH de los lixiviados de diferentes sustratos regados con solución nutritiva con diferente conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹) durante 87 días después del trasplante de jitomate.....	105
Figura 6. Variación en conductividad eléctrica de los lixiviados de diferentes sustratos regados con solución nutritiva con diferente conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹) durante 87 días después del trasplante de jitomate.....	109

CARACTERIZACIÓN DEL ASERRÍN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPÓNICO DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO CON JITOMATE

CHARACTERIZATION OF PINE SAWDUST AS SOILLESS SUBSTRATE DURING FIVE TOMATO GROWTH CYCLES

J. Pineda-Pineda^{1†}, F. Sánchez del Castillo¹, A. Ramírez-Arias³, A. M. Castillo-González², L. A. Valdés-Aguilar⁴ y Moreno-Pérez E del C².

¹Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo Edo de México. CP. 56230 ([†]Autor responsable).

²Profesor-Investigador. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México- Texcoco. Chapingo Edo de México. CP. 56230.

³Profesor-Investigador. Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México- Texcoco. Chapingo Edo de México. CP. 56230.

⁴Investigador del Departamento de Plásticos en la Agricultura. Ciga, Blvd. Enrique Reyna No 140, Saltillo Coahuila, México. CP 25253.

RESUMEN

En agricultura bajo ambiente protegido se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos, debido a limitantes físicas, químicas y biológicas. La utilización de materiales que son subproductos o desechos agroindustriales posibilita tener sustratos más baratos y un impacto ecológico positivo, como es el caso de la industria maderera que genera grandes volúmenes de aserrín con potencial como sustrato. Las características físicas de los sustratos son las más importantes, ya que una vez establecido el cultivo, difícilmente se pueden modificar y deben permanecer constantes a lo largo del ciclo del cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación de las características físicas del sustrato formado por mezclas aserrín/tezontle en contenedores (bolsa de 15 L de capacidad con 30 cm de altura) durante varios ciclos de cultivo para determinar su factibilidad de uso. Se establecieron 10 tratamientos que se formaron de la combinación de tres tamaños de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) con tres relaciones aserrín/tezontle (90/10, 80/20 y 70/30) más un tratamiento de 100 % aserrín utilizado como testigo. Estos tratamientos se evaluaron durante cinco ciclos continuos de cultivo con jitomate (30 meses). Al sustrato original y al final de cada ciclo se le midió porosidad total, volumen de partículas, capacidad de retención de humedad, capacidad de aireación y densidad aparente. Se encontró poca variación en la densidad, pero la porosidad, la capacidad de retención de humedad y la de aireación disminuyeron gradualmente durante el cultivo con jitomate. La capacidad de aireación fue la característica física que presentó mayor variación, con valores por debajo del adecuado a los 24 meses.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: porosidad, humedad, aireación, densidad aparente.

ABSTRACT

In agriculture under controlled environment, soil has been gradually substituted for substrates due to physical, chemical and biological limitations. The use of material from discards of agricultural industry facilitate the use of low cost substrates as well as a positive ecological impact, which is the case of the forest industry that produce a large volume of pine sawdust with potential use as a substrate. The physical characteristics are the most important, because they cannot be modified if crop has been established and they have to keep without change during plant production. The objective of this work was to evaluate the variation of physical characteristics of substrates formed by several mixtures of sawdust/volcanic sand used as a medium to produce five tomato growth cycles. It were established ten treatments which were formed by the combinations of three volcanic rock particle sizes (≤ 3 , 3-6 and 6-12 mm) and three ratios of sawdust/volcanic sand (90/10, 80/20 and 70/30) plus a treatment with 100 % pine sawdust. These treatments were tested during five continuous tomato growth cycles (thirty months). In the original substrates and at the end of each tomato growth cycle, total porosity, water retention capacity, air capacity and bulk density were measured. It was found less variation in bulk density, but total porosity, water retention capacity and air capacity, diminished with time. The air capacity was the physical characteristic that showed greatest variation; nevertheless the values reached were under the standard value after 24 months of tomato cultivation.

ADDITIONAL INDEX WORDS: porosity, water retention capacity, air capacity, bulk density.

INTRODUCCIÓN GENERAL

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. 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, 2005).

Las plantas tienen demandas específicas sobre las características de los medios de crecimiento debido al volumen tan pequeño para el desarrollo radical que implica la producción fuera del suelo usando contenedores (Raviv y Lieth, 2008). La disponibilidad, capacidad de amortiguamiento y absorción de agua, así como la disponibilidad de oxígeno deben ser óptimas. También el pH y la concentración nutrimental deben satisfacer la demanda de las plantas. La actividad biológica debe ser tal que esta no interfiera negativamente con las plantas (Handereck y Black, 2005; Fonteno, 1994). Por ello, un medio de crecimiento estable es esencial para un buen desarrollo de las plantas. La estabilidad puede ser definida desde una perspectiva física, química o biológica (Lemaire, 1995). La estabilidad física de un sustrato significa que la estructura de las partículas no cambia y por lo tanto, la porosidad, la capacidad de almacenamiento de agua, la retención de humedad y aireación, entre otras

características, no se modifican significativamente con el uso. La estabilidad química incluye el amortiguamiento en pH, amortiguamiento de cationes y aniones en términos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y capacidad de intercambio aniónica (CIA), los cuales pueden ser influidos 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 (Verhagen, 2009; Blok *et al.*, 2008; Raviv *et al.*, 2002).

Dada la variabilidad de los materiales, procesos y fenómenos que se presentan en un sustrato, es necesario estudiarlos y caracterizarlos a través del tiempo, durante el desarrollo del cultivo. La variación en las propiedades físicas, químicas y biológicas influirá en el crecimiento de las plantas (Bunt, 1988; Lemaire, 1995).

En la actualidad se están buscando sustratos alternativos más amigables con el ambiente para sustituir a los sustratos hidropónicos típicos como lana de roca y perlita (Jackson y Wright, 2009; Urrestarazu *et al.*, 2006), así como a los sustratos orgánicos de producción natural como las turbas, por el daño ambiental que genera su uso y por el incremento en los costos de producción que ello implica (Muro *et al.*, 2005). Por otro lado, existen diversas actividades agroindustriales que generan un gran volumen de desechos produciendo contaminación en los lugares donde se acumulan. Una alternativa a esta problemática es utilizar estos materiales como sustratos para la producción de plantas en ambientes protegidos donde se usan sistemas de cultivo sin suelo. En México, la industria forestal genera anualmente como subproductos a la corteza, aserrín y viruta, que corresponden alrededor del 50 % de la madera en rollo

que se procesa (Caballero, 2000); de estos la corteza y el aserrín tienen un alto potencial como sustrato, ya sea con o sin compostaje (Maher *et al.*, 2008; Handreck y Black, 2005).

Las principales ventajas del compostaje son la obtención de un producto estable sin problemas de inmovilización nutrimental, libre de sustancias tóxicas y de patógenos (Handreck y Black, 2005). Sin embargo, para llevar a cabo el compostaje se requiere espacio, mano de obra y un proceso estandarizado aplicado durante 4 a 6 meses para asegurar la calidad del producto. Esta situación encarece la obtención del compost y lo restringe a profesionales o empresas con personal especializado. Por ello, para la realización de este trabajo se establecieron los supuestos siguientes:

- a) El uso de aserrín fresco sin compostar como sustrato hidropónico puede ser una alternativa viable cuando se aplica una solución nutritiva completa y balanceada con todos los nutrimentos minerales.
- b) Al ser el aserrín un material orgánico, cuando se pone en los contenedores y se riega con una solución nutritiva, se inicia su descomposición biológica.
- c) La descomposición biológica del aserrín producirá la inmovilización de nutrimentos, nitrógeno y fósforo principalmente.
- d) La descomposición del aserrín modificará las propiedades físicas y químicas, lo que reducirá el tiempo de reutilización como sustrato.
- e) Es posible que mezclando el aserrín con materiales inorgánicos como la arena volcánica (tezontle), los cambios en sus propiedades físicas sean más lentos, proporcionando un sustrato más durable sin incrementar los costos.

Con base en lo anterior en este trabajo se plantearon los objetivos siguientes:

- a) Evaluar los cambios en las propiedades físicas y químicas del aserrín y relaciones aserrín/tezontle durante cinco ciclos de cultivo continuo (30 meses) con jitomate, para determinar el tiempo de reutilización del sustrato sin limitar el crecimiento de las plantas debido al desbalance en estas características.
- b) Evaluar la inmovilización N, P, K y Ca aplicando soluciones nutritivas con concentración media ($2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), alta ($3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y muy alta ($4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) de nutrimentos para determinar la concentración nutrimental en la solución nutritiva que debe aplicarse durante el primer ciclo de cultivo mientras se presente la inmovilización de nutrimentos.
- c) Evaluar los componentes del rendimiento de fruto de jitomate desarrollado en aserrín y relaciones aserrín/tezontle aplicando una solución nutritiva estándar balanceada en nutrimentos, durante cinco ciclos de cultivo continuo (30 meses).

LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P.; CARRION B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 299-354.
- ABAD, B. M.; NOGUERA P.; CARRIÓN B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. URRESTARAZU (Ed). Tratado de cultivo sin suelo. Segunda edición. Ediciones Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.
- BLOK, C.; DE KREIJ C.; BAAS, R.; AND WEVER, G. 2008. Chapter 7. Analytical Methods Used in Soilless Cultivation. In Soilless Culture: Theory and Practice. RAVIV, M.; LIETH J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America. pp. 245-290.
- BUNT, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman Ltd London, England. 309 p.
- CABALLERO D. M. 2000. La actividad forestal en México. Universidad Autónoma Chapingo. México. Pág. 195-212.
- FONTENO, W. 1994. Growing media. In: Bedding Plants IV, A manual on the culture of bedding plants as a greenhouse crop. Fourth edition. E. J. Holcomb (ed.). Ball Publishing. Batavia, Illinois, USA. 430 p.
- JACKSON, B. E; R. D. WRIGHT. 2009. Pine tree substrate: an alternative and renewable substrate for horticultural crop production. Acta Horticulturae 819: 265-272.
- HANDRECK, K. A.; N. BLACK. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. Acta Horticulturae, 396: 273-284.

- MAHER, M.; PRASAD, M.; RAVIV, M. 2008. Organic Soilless Media Components. In Soilless Culture: Theory and Practice. RAVIV, M.; LIETH, J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America. pp 459-504.
- MURO, J.; I. IRIGOYEN, P. SAMITIER, P. MAZUELA, M. C. SALAS, J. SOLER, M. URRESTARAZU. 2005. Wood fiber as growing medium in hydroponic crops. *Acta Horticulturae* 697: 179-185.
- RAVIV, M.; WALLACH, R.; SILBER, A.; BAR-TAL, A. 2002. Substrates and their analysis. In: Hydroponic production of vegetables and ornamentals. SAVVAS, D.; PASSAM, H. (Eds.). Athens: Embryo Publications. pp. 25-101.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- URRESTARAZU, M.; MAZUELA C. P.; MARTÍNEZ A. G. 2006. Effect of substrate reutilization on yield and properties of melon and tomato crops. *J. Plant Nutr.* 31 (11): 2031-2043.
- VERHAGEN, J. B. G.M. 2009. Stability of growing media from a physical, chemical and biological perspective. *Acta Horticulturae* 819: 135-142.

CAPITULO I

ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. I: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS FÍSICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO

PINE SAWDUST AS SOILLESS SUBSTRATE. I: CHANGES IN PHYSICAL CHARACTERISTICS AFTER FIVE TOMATO GROWTH CYCLES.

RESUMEN

En agricultura bajo ambiente protegido se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos, debido a limitantes físicas, químicas y biológicas. La utilización de materiales que son subproductos o desechos agroindustriales posibilita tener sustratos más baratos y un impacto ecológico positivo, como es el caso de la industria maderera que genera grandes volúmenes de aserrín con potencial como sustrato. Las características físicas de los sustratos son las más importantes, ya que una vez establecido el cultivo, difícilmente se pueden modificar y deben permanecer constantes a lo largo del ciclo del cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación de las características físicas del sustrato formado por mezclas aserrín/tezontle en contenedores (bolsa de 15 L de capacidad con 30 cm de altura) durante varios ciclos de cultivo para determinar su factibilidad de uso. Se establecieron 10 tratamientos que se formaron de la combinación de tres tamaños de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) con tres relaciones aserrín/tezontle (90/10, 80/20 y 70/30) más un tratamiento de 100 % aserrín utilizado como testigo. Estos tratamientos se evaluaron durante cinco ciclos continuos de cultivo con jitomate (30 meses). Al sustrato original y al final de cada ciclo se le midió porosidad total, volumen de partículas, capacidad de retención de humedad, capacidad

de aireación y densidad aparente. Se encontró poca variación en la densidad, pero la porosidad, la capacidad de retención de humedad y la de aireación disminuyeron gradualmente durante el cultivo con jitomate. La capacidad de aireación fue la característica física que presentó mayor variación, con valores por debajo del adecuado a los 24 meses.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: porosidad, humedad, aireación, densidad aparente.

ABSTRACT

In agriculture under controlled environment, soil has been gradually substituted for substrates due to physical, chemical and biological limitations. The use of material from discards of agricultural industry facilitate the use of low cost substrates as well as a positive ecological impact, which is the case of the forest industry that produce a large volume of pine sawdust with potential use as a substrate. The physical characteristics are the most important, because they cannot be modified if crop has been established and they have to keep without change during plant production. The objective of this work was to evaluate the variation in physical characteristics of substrates formed by several mixtures of sawdust/volcanic sand used as a medium to produce five tomato growth cycles. It were established ten treatments which were formed by the combinations of the three volcanic sand particle sizes (≤ 3 , 3-6 and 6-12 mm) and the three ratios of sawdust/volcanic sand (90/10, 80/20 and 70/30) plus a treatment with 100 % pine sawdust. These treatments were tested during five continuous tomato growth cycles (thirty months). In the original substrates and at the end of each tomato growth

cycle, total porosity, water retention capacity, air capacity and bulk density were measured. It was found less variation in bulk density, but total porosity, water retention capacity and air capacity, diminished with time. The air capacity was the physical characteristic that showed greatest variation; nevertheless the values reached were under the standard value after 24 months of tomato cultivation.

ADDITIONAL INDEX WORDS: porosity, water retention capacity, air capacity, bulk density

1.1. INTRODUCCIÓN

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. 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 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; Pastor, 1999). Esto clasifica a los sustratos en químicamente inertes (perlita, lana de roca, roca volcánica, otros) y químicamente activos (turberas, corteza de pino, aserrín, fibra o polvo de coco, otros). Los primeros actúan en la retención de agua y como soporte para planta, mientras que segundos intervienen en procesos de adsorción, fijación, inmovilización y mineralización de nutrimentos (Lemaire, 1995; Pastor, 1999). 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.

Existe gran variación 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.

Fonteno (1994) menciona que un sustrato debe cumplir cuatro condiciones: 1) proveer agua, 2) suministrar nutrimentos, 3) permitir el intercambio de gases entre la zona radicular y el exterior del sustrato, y 4) dar soporte a las plantas. Además, Bunt (1988) indica que el sustrato debe proporcionar un ambiente que mantenga un balance biológico.

Dada la variabilidad de los distintos componentes, procesos y fenómenos que se presentan en el sistema contenedor-sustrato-planta-ambiente, es necesario caracterizar los cambios del sustrato a través del tiempo, durante el desarrollo de uno o varios ciclos de cultivo. La variación en las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato influirá en el crecimiento de las plantas, ya que es el medio de donde obtendrán oxígeno, agua y nutrimentos. En el caso de las propiedades físicas, implica alteración en las relaciones agua/aire debido a cambios en la porosidad y sobre todo, en el tamaño de poros. Esto se debe a la manifestación de varios fenómenos (Lemaire, 1995): a) la compresibilidad del sustrato por la acción de fuerzas mecánicas durante el manipuleo, la compactación durante el transporte o la contracción del sustrato cuando se presenta variación en el contenido de humedad (humedecimiento y secado) en materiales orgánicos, hace que se pierda la forma y acomodo original del sustrato; b) la evolución biológica del material orgánico y c) la segregación de partículas finas al fondo del contenedor durante el riego.

Para los sustratos orgánicos la resistencia o facilidad que ofrecen a la descomposición microbiana (bioestabilidad) es un aspecto muy importante. Existen dos procesos básicos: 1) mineralización rápida, 2) humificación y mineralización lenta; procesos que implican desaparición de materia orgánica original y formación de nuevo material

orgánico estabilizado (humus). De acuerdo con varios autores (Abad *et al.*, 2004; Burés, 1997; Blok *et al.*, 2008), las consecuencias sobre las propiedades físicas y químicas son las siguientes: a) pérdida de volumen y disminución de la porosidad debido a la compactación del sustrato, b) disminución de la capacidad de aireación y aumento de la capacidad de retención de humedad a capacidad contenedor, c) alteración del tamaño de partículas, d) modificación de la composición de la fase gaseosa debido a la producción de CO₂ y consumo de O₂, e) incremento de pH y capacidad de intercambio catiónico, f) incremento de la salinidad debido a la liberación de iones durante la mineralización, g) alteración de la composición nutrimental debido a la inmovilización de N, P y otros nutrimentos, h) liberación de sustancias fitotóxicas (taninos, resinas, fenoles) o producción de ellas durante la descomposición del material orgánico cuando no se lleva a cabo en condiciones adecuadas.

El mejor medio de cultivo depende de numerosos factores como son el tipo de material vegetal con el que se trabaja (semillas, plantas ornamentales, plantas hortícolas, enraizamiento de estacas, plantas frutales y forestales), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego, fertilización y aspectos económicos (Fernández *et al.*, 1998; Torres *et al.*, 1997). Por ejemplo, para obtener buenos resultados durante la germinación y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del medio de cultivo a) elevada porosidad (> 85 %), b) elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible (30 a 40 %), c) suficiente suministro de aire (10 a 30 %), d) baja densidad aparente (< 0.4 g·cm⁻³), e) estructura estable que impida la contracción o hinchazón del sustrato y f) distribución del tamaño

de las partículas que mantenga las condiciones anteriores (Fernández *et al.*, 1998; Torres *et al.*, 1997).

Actualmente, se comercializan sustratos de características y orígenes diversos, de forma pura o en mezclas de dos o más de estos materiales, que buscan satisfacer las necesidades específicas de ciertos cultivos; sin embargo, sus altos precios (varios de ellos son de importación) limitan su acceso y uso a muchos productores. En las últimas décadas, se ha encontrado aplicación como medios de crecimiento de cultivo, a materiales, que son subproductos o residuos de desecho de muy diversas actividades domésticas, urbanas e industriales (Resh, 1998; Sánchez y Escalante, 1988; Maher *et al.*, 2008). La incorporación de estos materiales, posibilita tener productos más baratos y, a largo plazo, un positivo impacto ecológico.

El aserrín de pino que proviene de la industria maderera, es un material que tiene potencial como sustrato. El aserrín y virutas son partículas finas (aserrín < 6 mm), medias o gruesas (virutas > 6 mm) de madera, de color amarillo claro, que se obtienen de la industria forestal durante el aserrío y trabajo de la madera. La SEMARNAT (2000) menciona que en México se procesan anualmente poco más de 8 millones de metros cúbicos de madera, de la cual 70 % se destina a la industria maderera. Del total de la madera en rollo que se produce, el pino representa en promedio el 82 % de la producción, el cual es la principal fuente de aserrín con potencial para sustrato. En el año 2007, la producción forestal maderable fue de 6.9 millones de m³ de madera en rollo (SEMARNAT, 2007), de los cuales los coeficientes de aserrío apenas alcanzan el 50 %, lo que significa que cerca de tres punto cinco millones de metros cúbicos en rollo resultan en subproductos como aserrín, corteza y astilla (Caballero, 2000).

Las propiedades físicas del aserrín dependen del tamaño de sus partículas y se recomienda que del 20 al 40 % sean inferiores a 0.8 mm. Este es un sustrato ligero, con una densidad aparente de 0.1 a 0.45 g/cm³. La porosidad total es superior al 80 - 85 %, la capacidad de retención de agua es de baja a media, pero su capacidad de aireación suele ser adecuada (Maher *et al.*, 2008; Prasad y Maher, 2004), lo que representa una mayor tasa de difusión de oxígeno en comparación con la turba. El bajo contenido de agua disponible puede producir estrés hídrico durante el crecimiento de la planta (Allaire *et al.*, 2005; Dorais *et al.*, 2005), por ello el riego debe aplicarse con frecuencia y en pequeñas cantidades (Favaro *et al.*, 2002).

En la literatura abundan las recetas de sustratos hidropónicos, pero pocas veces se indican con claridad las características físicas, químicas y biológicas de estos materiales y las proporciones adecuadas de los mismos cuando son mezclados. La variación de las propiedades puede provocar resultados totalmente opuestos a los esperados, razones que hacen necesario caracterizar física y químicamente estos materiales para predecir su comportamiento y mejorar su manejo (Abad *et al.*, 2004; 2005). La ventaja principal del aserrín es su bajo costo, pero al ser un material orgánico entra en descomposición, lo que reduce su vida útil como sustrato. Es posible que mezclando el aserrín con materiales inorgánicos como la arena volcánica (tezontle), los cambios en sus propiedades físicas sean más lentos, proporcionando un sustrato más durable sin incrementar los costos.

El perfeccionamiento del manejo de los sistemas de producción agrícola usando sustratos (Medrano *et al.*, 2001; Suay *et al.*, 2003), requiere una base de conocimientos mayor sobre la variación de las características del medio de crecimiento para poder

manejar el suministro del agua y los nutrimentos. Hace falta aclarar qué factores y en qué medida influyen en la nutrición hídrica y mineral de las plantas, así como su aplicación para mejorar los sistemas de producción comercial (Kläring *et al.*, 1999; Roca *et al.*, 2003).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar la variación en las características físicas, como son la retención de humedad, la capacidad de aireación, la densidad aparente y la porosidad total, del aserrín de pino solo y mezclado con distintas proporciones de arena volcánica (tezontle) durante cinco ciclos de cultivo, para determinar el tiempo en que se mantienen en un intervalo adecuado.

1.2. MATERIALES Y METODOS

1.2.1. Ubicación del estudio

El experimento se estableció en un invernadero de vidrio de la Universidad Autónoma Chapingo durante los años 2007 a 2009, estableciéndose cinco ciclos de cultivo de seis meses cada uno. El invernadero tenía control de clima a través de extractores de aire húmedo y calefacción con calentadores eléctricos.

1.2.2. Material vegetal utilizado

El material vegetal utilizado fue el híbrido de jitomate Tequila (F1) de la Compañía Vilmorin, cuyas características son: precocidad de 75 a 85 días; poco follaje y entrenudos cortos, buena cobertura y ventilación; fruto ovoide, muy consistente, de

color intenso, brillante, tamaño homogéneo, con larga vida de anaquel y buen sabor. Es de excelente fructificación con una producción muy elevada. Tiene resistencia al Virus del Mosaico del Tabaco, *Verticillium* sp, *Fusarium* raza 1 y a nemátodos.

Las plántulas fueron obtenidas en charolas para germinación de 200 cavidades usando turba como sustrato. El trasplante se hizo a los 30 días después de la siembra cuando las plántulas tenían en promedio 15 cm de altura.

1.2.3. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se formaron utilizando un arreglo factorial 3x3. Uno de los factores correspondió al tamaño de partícula del tezontle y los tres niveles fueron diámetros ≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm; el segundo factor correspondió a las relaciones aserrín/tezontle y los niveles fueron 90/10, 80/20 y 70/30. En todos los casos se uso aserrín de pino con diámetro de partícula ≤ 6 mm. La combinación de factores y niveles dio los siguientes tratamientos: T1: 90/10 (6-12 mm), T2: 80/20 (6-12 mm), T3: 70/30 (6-12 mm), T4: 90/10 (3-6 mm), T5: 80/20 (3-6 mm), T6: 70/30 (3-6 mm), T7: 90/10 (≤ 3 mm), T8: 80/20 (≤ 3 mm) y T9: 70/30 (≤ 3 mm). Se incluyó además un T10 que consistió en 100% aserrín de pino. Se usaron bolsas de plástico bicolor (blanco-negro) de 15 L de capacidad y 30 cm de altura, que son las más usadas en la producción comercial, de las cuales se llenaron 10 bolsas con cada tratamiento de sustrato y se trasplantaron dos plántulas de jitomate, en cada una. Las unidades experimentales (bolsas con dos plantas) se distribuyeron de acuerdo a un diseño completamente al azar, con un total de 10 tratamientos y 4 repeticiones.

El experimento se instaló en dos camas, cada una con dos hileras de bolsas y dos plantas por bolsa. Se establecieron cinco ciclos de cultivo con duración de seis meses en promedio cada uno. Al final de cada ciclo se removían los tallos junto con las raíces más gruesas, se tomaban muestras de tres litros de sustrato para el análisis físico y se volvía a plantar. El fertiriego consistió en ocho riegos diarios con un sistema de goteo, colocando una estaca por planta con gasto de $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. La duración de cada riego varió de 2 a 6 minutos dependiendo de la edad de la planta y condiciones ambientales. Para el control del riego diario se consideró un drenaje de 15 a 25 %. Durante los diferentes ciclos de cultivo, se aplicó la solución nutritiva de Steiner (1984) con una carga iónica de $20.5 \text{ meq} \cdot \text{litro}^{-1}$, incrementando la concentración de P a 1.5 y la de K a $7.5 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$, para lograr el equilibrio entre cationes y aniones en la solución nutritiva.

Los cuidados principales consistieron en control preventivo de mosquita blanca y de enfermedades producidas por *Phytophthora sp*, *Phytium sp*, *Rhizoctonia sp*, así como las labores de manejo de la planta (eliminación de brotes laterales, tutoreo, deshojado, polinización) para conducir el cultivo hasta formar 6 a 7 racimos.

1.2.4. Muestreo de sustrato y medición de variables

Antes de establecer el cultivo se tomaron muestras por triplicado, de todos los sustratos que definían cada tratamiento. Al finalizar cada ciclo de cultivo, antes de establecer el siguiente, igualmente se tomaron tres muestras por tratamiento para realizar los análisis físicos del sustrato. Cada muestra se formó de tres litros tomando sustrato de tres unidades experimentales. En cada muestra se determinaron las propiedades físicas:

porosidad total, volumen de partículas, capacidad de aireación, retención de humedad y densidad aparente. Para ello se utilizó el porómetro aplicando la metodología propuesta por Fonteno y Bilderback, (1993); Drzal *et al.*, (1999) y Handrek y Black (2005).

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar la interacción entre factores, así como pruebas de medias por factor, de las diferentes variables, mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1998).

1.3. RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 1 se observan diferencias altamente significativas para casi todas las variables y para todas las fechas de muestreo estudiadas con respecto a la relación aserrín/tezontle y también para casi todas las fechas estudiadas se encuentran diferencias significativas en porosidad, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación para el tamaño de partícula de tezontle empleado en la mezcla con aserrín; la densidad aparente fue la menos afectada por este factor, con diferencia estadística sólo al inicio y a los 18 y 30 meses de cultivo.

La interacción entre la proporción de tezontle en la mezcla con aserrín y el tamaño de partícula del tezontle usado también fue altamente significativa en todas las fechas estudiadas para la porosidad, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación y a los 0, 18, 24 y 30 meses de cultivo para la densidad aparente.

En virtud de estos resultados, a continuación se hace un análisis más detallado de estas interacciones.

1.3.1. Interacción entre el tamaño de partícula de tezontle y la relación aserrín/tezontle

En el Cuadro 1 se observa que para la mayoría de las variables físicas en todos los ciclos de cultivo (0, 1, 6, 12, 18, 24 y 30 meses), hubo efecto altamente significativo de la interacción entre los factores diámetro de partícula del aserrín y relación aserrín/tezontle.

Cuadro 1. Niveles de significancia de las variables físicas medidas en los tratamientos formados por la combinación de diferente diámetro de partícula y relaciones aserrín/tezontle, durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Factor	Porosidad total (%)						Capacidad de retención de humedad (%)						Capacidad de aireación (%)						Densidad aparente (g·cm ⁻³)					
R P RxP CV	Meses de cultivo																							
	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	ns	**
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	**	**
	.67	1.1	1.2	1.2	1.0	1.1	1.2	2.3	1.3	1.1	1.0	1.1	2.4	8.9	7.4	6.5	4.7	7.2	2.6	1.9	5.7	3.9	5.4	4.9

R: factor relación aserrín/tezontle, P: factor diámetro de partícula del tezontle, CV: coeficiente de variación, **Efecto significativo con $p \leq 0.01$, ns: efecto no significativo.

Porosidad. En la Figura 1 se presenta el comportamiento de la porosidad del sustrato antes de establecer el cultivo y cada seis meses, al final de cada ciclo de cultivo (6, 12, 18, 24, 30) durante 30 meses. La tendencia general que se observa es que la porosidad se redujo conforme disminuyó la proporción de aserrín y aumentó la proporción de

tezontle en la mezcla aserrín/tezontle. Los valores más bajos fueron inferiores a 70 % (registrados con la relación 70/30 y tamaño de partícula de 6 a 12 mm), lo que según algunos autores (Abad *et al.*, 2005; Blok *et al.*, 2008) los ubica fuera del intervalo adecuado, que debe estar entre 85 y 95 %, si se trata de un sustrato hidropónico.

También se observa que la disminución en la porosidad de las mezclas aserrín/tezontle, fue menor cuando se uso tezontle con diámetro menor a 3 mm, lo que se podría atribuir a una mayor similitud entre tamaños de partículas del aserrín y del tezontle, ya que cuando se mezclan partículas con diámetros muy diferentes, se da un mayor empaquetamiento entre ellas por lo que disminuyó la porosidad (Ansorena, 1994; Burés, 1997), lo que quizás ocurrió en las mezclas aserrín/tezontle con mayor diferencia en diámetro (3 a 6 y 6 a 12 mm) de partículas. Además, debido a la degradación biológica las partículas del aserrín se fueron fraccionando al pasar los ciclos de cultivo (Lemaire, 1995), lo que pudo influir también en el comportamiento observado. La variación en la porosidad, afectará la distribución del tamaño de macro y microporos, se modificarán la fuerzas de adhesión a la superficie sólida del sustrato (potencial matricial) y con ello la capacidad de retención y disponibilidad de humedad, así como la capacidad de drenaje y aireación del sustrato (Lemaire, 1995).

Capacidad de retención de humedad. Con relación a la capacidad de retención de humedad, en la Figura 2 se observa una tendencia similar a la porosidad (Figura 1); es decir, la retención de humedad disminuyó conforme se redujo la proporción de aserrín y aumentó la proporción de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle. De manera general, en los diferentes ciclos de cultivo (Figura 2a, b, c, d, e, f), también se presentaron mayores valores de retención de humedad en las mezclas aserrín/tezontle con diámetro de

partícula menor a 3 mm, situación que podría relacionarse con una mayor cantidad de microporos formados en mezclas de sustratos con partículas finas (Bunt, 1988).

De acuerdo con Abad *et al.* (2005) y Handrek y Blak (2005), en sustratos con más de 90 % de porosidad, la retención de humedad mínima debe estar por arriba de 70 %, mientras que en sustratos con porosidad entre 70 y 85 % (como en este caso), la retención de humedad mínima debe estar entre 55 y 70 %, valores que pueden observarse en la Figura 2. Es importante notar que en el sustrato inicial (Figura 2a) la retención de humedad era más baja, pero aumentó conforme se desarrollaron los ciclos de cultivo, situación que podría explicarse por la formación de mayor cantidad de microporos al darse la degradación biológica del aserrín (Lemaire, 1995).

Capacidad de aireación. En cuanto a la capacidad de aireación o porosidad de aire, la Figura 3 muestra su comportamiento durante los 30 meses de cultivo. Se observa que la reducción de aserrín e incremento de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle, de manera similar a la porosidad y retención de humedad (Figuras 1 y 2), también produjo una disminución en la capacidad de aireación, la cual fue más notoria en las mezclas con tezontle de partículas menores a 3 mm.

El sustrato inicial (Figura 3a) y después de 6 (Figura 3b) y 12 (Figura 3c) meses de cultivo, mantuvieron la capacidad de aireación dentro del intervalo adecuado, que se considera entre 15 y 30 % (Abad *et al.*, 2005; Raviv *et al.*, 2002), o bien por arriba del valor mínimo que es 10 % (Bunt, 1988; Lemaire, 1995). No es recomendable una capacidad de aireación menor a 10 %, sobre todo en sustratos orgánicos que requieren de 2 a 3 veces más oxígeno que sustratos inorgánicos, para evitar deficiencia de

oxígeno en las plantas por competencia con los microorganismos (Ansorena, 1994; Bunt, 1988). A los 24 (Figura 3e) y 30 (Figura 3f) meses todos los tratamientos estuvieron por debajo de la capacidad de aireación mínima exigida a un buen sustrato hidropónico. La disminución en la capacidad de aireación es un fenómeno normal en sustratos orgánicos después de estar sometidos a degradación biológica (Lemaire, 1995; Bunt, 1988). Estos resultados concuerdan con Abad *et al.*, (2005) y Burés (1997), quienes señalan que entre las características físicas más importantes de los sustratos está la porosidad total o espacio poroso total y su relación con la distribución de agua y aire dentro de esa porosidad.

Densidad aparente. Aunque en el Cuadro 1 se indica significancia para la interacción entre diámetro de partícula y mezcla aserrín/tezontle para los ciclos de cultivo de 6 y 12 meses, la densidad aparente tuvo un incremento muy marcado en función de la relación aserrín/tezontle (Figura 4).

Con excepción de la mezcla 70/30 que presenta valores por arriba de $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, los demás tratamientos están por debajo de este valor, que es considerado como óptimo (Abad *et al.*, 2005; Blok *et al.*, 2008). Es importante notar que la densidad aparente presentó muy poca variación durante los 30 meses de cultivo, lo que significa que aun cuando la porosidad disminuyó y aumentó el volumen de partículas, la relación masa del sustrato/volumen total casi no fue afectada.

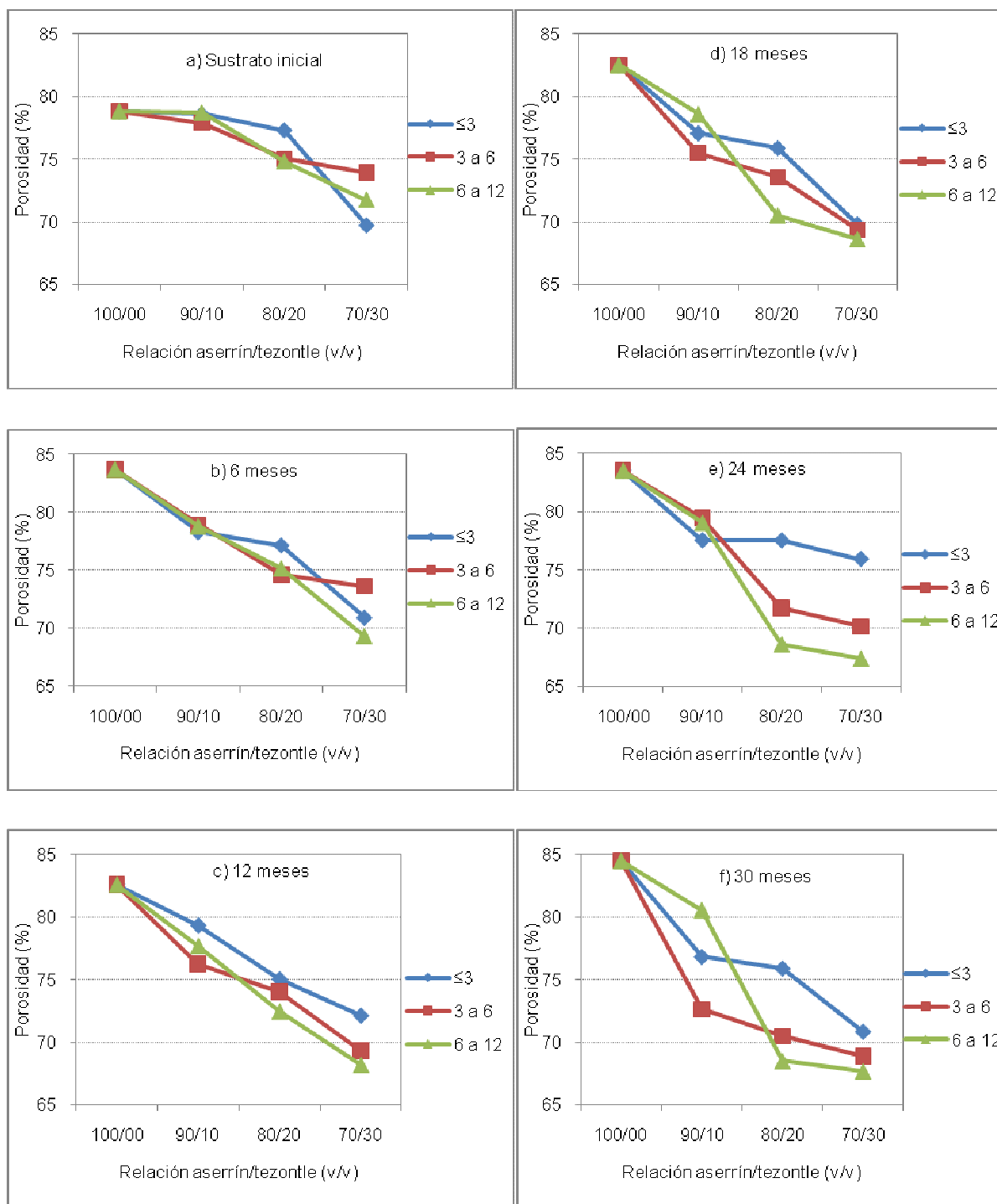


Figura 1. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la porosidad del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

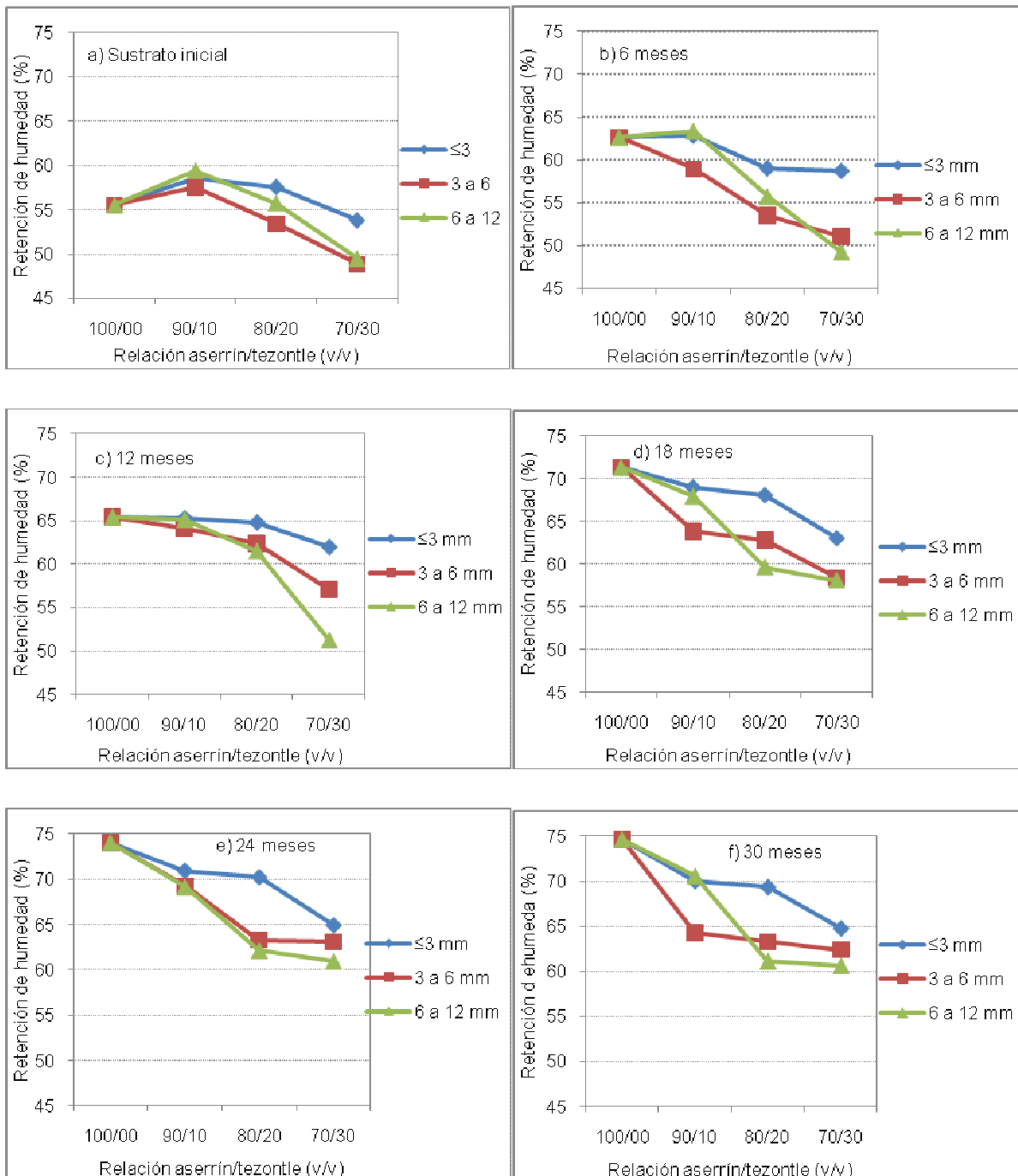


Figura 2. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de retención de humedad del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

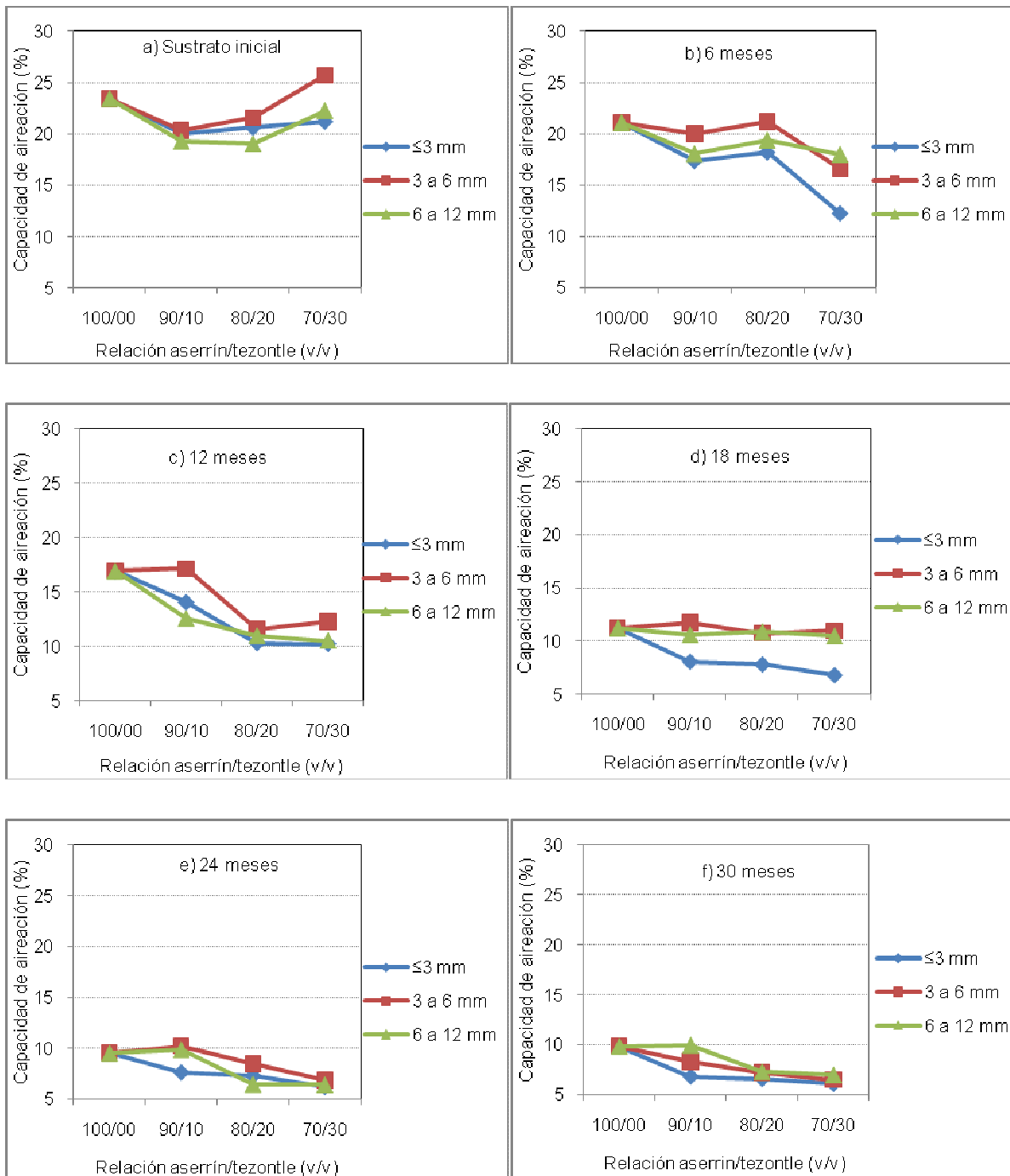


Figura 3. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de aireación del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

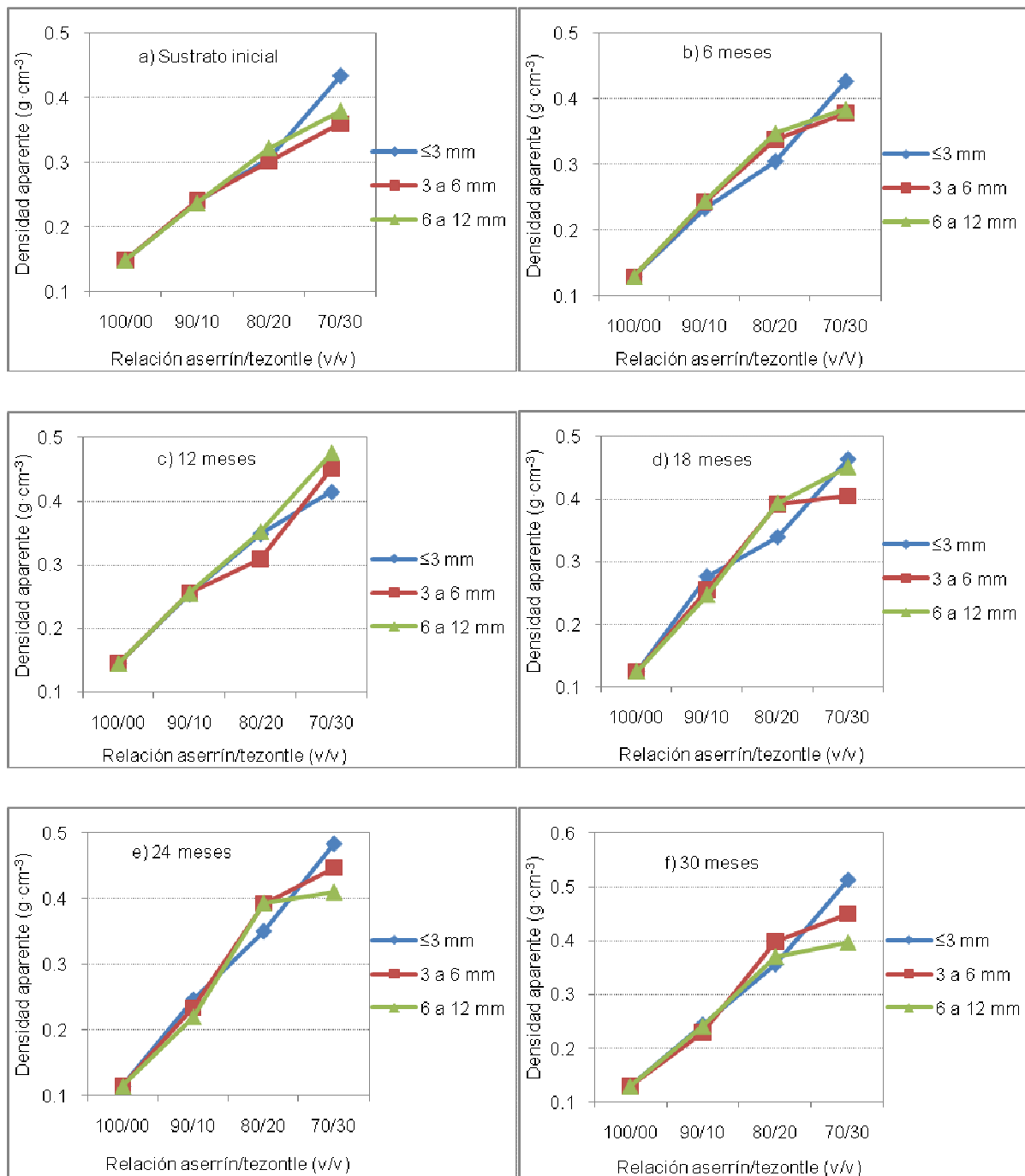


Figura 4. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la densidad aparente del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

1.3.2. Efecto del tamaño de partícula sobre las características físicas del sustrato

En los Cuadros 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se presenta el efecto del factor tamaño de partícula del tezontle de la mezcla con aserrín sobre los valores medios de las características físicas de los sustratos. Se observa una relación inversa entre la porosidad total y el volumen de partícula de tezontle del sustrato, donde con excepción del sustrato inicial y el ciclo a los 12 meses, a mayor diámetro de partícula del tezontle menor porosidad total y mayor volumen de partícula, con diferencias significativas entre las partículas de 6-12 mm y menores de 3 mm. También se presenta una relación inversa entre la capacidad de retención de humedad y la capacidad de aireación, por lo que a mayor tamaño de partícula mayor capacidad de aireación, con diferencias estadísticas significativas entre partículas de 6-12 mm y menores a 3 mm.

Con excepción del mes 18, no hubo efecto del diámetro de partícula sobre la densidad aparente. Con relación al tamaño de partícula, Ansorena (1994) y Burés (1997) mencionan que el tamaño de partícula determina el comportamiento de otras características físicas, principalmente la porosidad y las relaciones agua/aire en el sustrato. El tamaño de las partículas afecta al crecimiento de las plantas a través de los tamaños de los poros, los cuales determinan el balance entre el contenido de agua y de aire del sustrato, a cualquier nivel de humedad (Abad *et al.*, 2005).

1.3.3. Efecto de la relación aserrín/tezontle sobre las características físicas del sustrato

En los Cuadros 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se presentan las pruebas de medias para observar el efecto de la mezcla aserrín/tezontle sobre las características físicas más importantes. En general, para los diferentes ciclos de cultivo, se observa que al aumentar la

proporción de tezontle y disminuir la de aserrín, la porosidad disminuyó y aumentó el volumen de partícula significativamente.

Para el caso de la retención de humedad y capacidad de aireación, ambas mostraron una disminución significativa, con excepción de los meses 12 y 18 donde la capacidad de aireación fue mayor en los tratamientos con mayor cantidad de tezontle. Como se esperaba, la densidad aparente aumentó proporcionalmente con la cantidad de tezontle en la mezcla, llegando a valores ligeramente por arriba de lo óptimo que es de $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Abad *et al.*, 2005).

Cuadro 2. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato antes de establecer el cultivo.

Factor de estudio	Pt -----	VP -----	CA % -----	CRH -----	Dap ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Tamaño de partícula del tezontle					
≤ 3 mm	75.32 b	24.97 a	19.38 b	55.98 a	0.281 a
3-6 mm	76.05 a	23.88 b	21.04 a	55.84 a	0.262 a
6-12 mm	76.43 a	24.01 b	22.63 a	53.83 b	0.272 a
DMSH	0.523	0.535	1.061	1.590	0.020
Relación aserrín/tezontle (v/v)					
100/00	78.87 a	21.64 c	23.44 a	55.53 b	0.149 d
90/10	78.43 a	21.84 c	19.91 c	58.52 a	0.238 c
80/20	74.65 b	25.87 b	19.61 c	55.06 b	0.309 b
70/30	71.81 c	28.31 a	21.10 b	50.71 c	0.391 a
DMSH	0.667	0.682	0.654	0.842	0.010

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (tukey, $p \leq 0.05$).

Pt: porosidad total, VP: volumen de partícula, CA: capacidad de aireación, CRH: capacidad de retención de humedad, Dap: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 3. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del primer ciclo (6 meses) de jitomate.

Factor de estudio	Pt	VP	CA	CRH	Dap
	-----	-----	% -----	-----	(g·cm ⁻³)
Tamaño de partícula del tezontle					
≤ 3 mm	78.66 a	21.34 c	17.00 b	61.66 a	0.28 a
3-6 mm	77.73 b	22.27 b	19.71 a	58.02 b	0.27 a
6-12 mm	76.57 c	23.43 a	21.17 a	55.40 c	0.27 a
DMSH	0.880	0.880	1.770	1.370	0.034
Relación aserrín/tezontle (v/v)					
100/00	83.54 a	16.46 d	20.29 a	63.24 a	0.14 d
90/10	79.98 b	20.01 c	20.09 a	59.89 b	0.23 c
80/20	75.81 c	24.19 b	20.52 a	55.29 c	0.33 b
70/30	71.28 d	28.71 a	16.28 b	55.01 c	0.40 a
DMSH	1.120	1.121	2.260	1.750	0.043

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (tukey, $p \leq 0.05$).

Pt: porosidad total, VP: volumen de partícula, CA: capacidad de aireación, CRH: capacidad de retención de humedad,

Dap: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta

Cuadro 4. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del segundo ciclo (12 meses) de jitomate.

Factor de estudio	Pt	VP	CA	CRH	Dap
	-----	-----	% -----	-----	(g·cm ⁻³)
Tamaño de partícula del tezontle					
≤ 3 mm	77.24 a	21.92 b	11.06 c	66.13 a	0.27 b
3-6 mm	74.20 b	25.88 a	15.19 a	59.01 c	0.29 ab
6-12 mm	74.49 b	25.51 a	12.18 b	62.31 b	0.31 a
DMSH	0.902	1.77	0.85	0.680	0.041
Relación aserrín/tezontle (v/v)					
100/00	82.56 a	17.44 d	11.22 b	71.34 a	0.13 d
90/10	76.74 b	23.36 c	11.36 b	60.87 c	0.24 c
80/20	72.24 c	26.64 b	14.04 a	62.63 b	0.37 b
70/30	69.70 d	30.29 a	14.61 a	55.09 d	0.43 a
DMSH	1.140	2.26	1.081	0.862	0.015

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (tukey, $p \leq 0.05$).

Pt: porosidad total, VP: volumen de partícula, CA: capacidad de aireación, CRH: capacidad de retención de humedad,

Dap: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 5. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del tercer ciclo (18 meses) de jitomate.

Factor de estudio	Pt	VP	CA	CRH	Dap
	-----	-----	% -----	-----	(g·cm ⁻³)
Tamaño de partícula del tezontle					
≤ 3 mm	72.66 a	27.38 a	8.03 b	64.63 a	0.31 a
3-6 mm	72.57 a	27.51 a	11.07 a	61.49 b	0.30 a
6-12 mm	72.21 a	27.82 a	10.02 a	62.20 b	0.29 a
DMSH	0.832	0.882	0.940	0.841	0.090
Relación aserrín/tezontle (v/v)					
100/00	73.02 b	27.15 b	8.63 b	64.39 b	0.15 d
90/10	75.55 a	24.25 c	9.90 a	65.65 a	0.26 c
80/20	72.75 b	27.24 b	10.52 a	62.22 c	0.34 b
70/30	68.61 c	31.38 a	9.76 a	58.85 d	0.45 a
DMSH	1.050	1.124	0.94	1.072	0.022

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (tukey, $p \leq 0.05$).

Pt: porosidad total, VP: volumen de partícula, CA: capacidad de aireación, CRH: capacidad de retención de humedad, Dap: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 6. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del cuarto ciclo (24 meses) de jitomate.

Factor de estudio	Pt	VP	CA	CRH	Dap
	-----	-----	% -----	-----	(g·cm ⁻³)
Tamaño de partícula del tezontle					
≤ 3 mm	77.52 a	22.48 c	7.65 b	69.86 a	0.29 a
3-6 mm	76.24 b	23.75 b	8.78 a	67.46 b	0.29 a
6-12 mm	74.68 c	25.31 a	8.10 a	66.59 c	0.28 a
DMSH	0.802	0.803	0.795	0.685	0.016
Relación aserrín/tezontle (v/v)					
100/00	83.56 a	16.44 d	9.53 a	74.04 a	0.11 d
90/10	79.04 b	20.96 c	9.25 a	69.78 b	0.24 c
80/20	72.65 c	27.35 b	7.41 b	65.24 c	0.38 b
70/30	69.34 d	30.65 a	6.50 c	62.84 d	0.25 a
DMSH	1.023	1.023	0.505	0.874	0.021

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (tukey, $p \leq 0.05$).

Pt: porosidad total, VP: volumen de partícula, CA: capacidad de aireación, CRH: capacidad de retención de humedad, Dap: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta

Cuadro 7. Efecto del tamaño de partículas y de la mezcla aserrín/tezontle en las características físicas del sustrato al final del quinto ciclo (30 meses) de jitomate.

Factor de estudio	Pt	VP	CA	CRH	Dap
	-----	-----	% -----	-----	(g·cm ⁻³)
Tamaño de partícula del tezontle					
≤ 3 mm	77.04 a	22.95 c	8.56 a	69.70 a	0.31 a
3-6 mm	74.14 b	25.85 b	7.98 a	66.75 b	0.30 a
6-12 mm	75.33 b	24.66 b	7.34 b	66.77 b	0.29 a
DMSH	1.231	0.974	0.584	0.782	0.149
Relación aserrín/tezontle (v/v)					
100/00	84.51 a	15.49 d	9.88 a	74.63 a	0.13 d
90/10	76.69 b	23.31 c	8.39 b	68.31 b	0.24 c
80/20	71.65 c	28.32 b	7.05 c	64.60 c	0.38 b
70/30	69.17 d	30.83 a	6.54 c	62.62 d	0.45 a
DMSH	1.027	1.013	0.745	0.997	0.019

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (tukey, $p \leq 0.05$).

Pt: porosidad total, VP: volumen de partícula, CA: capacidad de aireación, CRH: capacidad de retención de humedad, Dap: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Se observó que sólo la densidad aparente tuvo poca variación durante los 30 meses de cultivo, mientras que la porosidad total, volumen de partícula, retención de humedad y capacidad de aireación variaron significativamente. Considerando el balance entre estas características para definir el sustrato ideal, se observa que las características físicas iniciales del aserrín y mezclas aserrín/tezontle, mejoraron al final de los 6, 12 y 18 meses de cultivo, pero a los 24 y 30 meses quedaron fuera de los intervalos normales, principalmente la capacidad de aireación que se redujo a valores por debajo de los adecuados.

La capacidad de aireación es una característica muy importante ya que tiene influencia en diversos procesos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas y en condiciones de contenedor, el efecto podría ser más importante. La capacidad de

aireación determina el intercambio gaseoso (CO_2 y O_2) entre el interior y el exterior del sustrato (Fonteno, 1994). El oxígeno en el medio de crecimiento juega un papel crítico, ya que determina la orientación radicular así como el estado metabólico de la raíz. El oxitropismo permite a las raíces evitar las zonas del sustrato con bajos niveles de oxígeno y podría ser también un mecanismo fisiológico desarrollado para reducir la competencia entre las raíces por agua, nutrimentos y oxígeno (Morard *et al.*, 2000; Porterfield and Musgrave, 1998).

Las plantas que crecen en contenedores, especialmente las que duran confinadas por largos periodos, normalmente desarrollan mayor cantidad de raíces en el fondo y en el espacio entre el sustrato y las paredes del contenedor. Esto se debe a la compactación del medio de crecimiento, el cual produce deficiencia de oxígeno y muerte de las raíces en el centro del contenedor (Asady *et al.*, 1985). Este fenómeno puede ser más acentuado cuando el medio de crecimiento contiene materia orgánica que entra en descomposición por microorganismos consumidores de oxígeno.

El crecimiento vertical hacia abajo es una respuesta natural al gravitropismo e hidrotropismo, típico de todas las raíces activas. Sin embargo, en contenedores, esto resulta frecuentemente en una maraña de raíces desarrollándose en el fondo del contenedor, donde pueden ser expuestas a deficiencia de oxígeno debido a la competencia entre raíces por el oxígeno asociado a las frecuentes acumulaciones de agua en el fondo del contenedor. Se ha demostrado que aun con 10 min de interrupción en el suministro de oxígeno, el crecimiento de las raíces puede detenerse, y con ausencia de oxígeno de 30 min se produce la muerte de la zona de elongación arriba de la punta de la raíz (Huck *et al.*, 1999).

En contenedores, los sustratos tienden a compactarse debido a la falta de cuidado en el manipuleo, los impactos físicos en la superficie del sustrato cuando se mueven los contenedores y por la sobre irrigación. Una vez compactado el sustrato en el contenedor, el proceso es irreversible y el crecimiento de la raíz se reduce (Kafkafi, 2008).

En jitomate la falta de oxígeno en las raíces promueve la expansión celular en el envés de los folíolos, lo que resulta en un encurvamiento hacia el envés de la hoja (epinastia). Este fenómeno, según Jackson (2002) se debe al transporte vía xilema del ácido 1-carboxílico-1-aminociclopropano (ACC) de la raíz hacia la hoja. En raíces con deficiencia de oxígeno, la oxidación del ACC a etileno se inhibe, pero en las hojas donde el oxígeno es abundante, el ACC se convierte rápidamente a etileno por la ACCoxidasa, la cual se incrementa rápidamente en las hojas después de la deficiencia de oxígeno en la raíz. La acumulación de etileno también produce la epinastia. También la falta de oxígeno disminuye la concentración de citocininas y giberelinas en la savia del xilema (Jackson, 2002).

1.4. CONCLUSIONES

Tanto en el aserrín como en las mezclas aserrín/tezontle, la densidad aparente presentó poca variación después de 30 meses de cultivo con jitomate.

En general, la disminución de la proporción de aserrín y aumento en la de tezontle en la relación aserrín/tezontle disminuyeron la porosidad, la retención de humedad y la capacidad de aireación del sustrato durante 30 meses de cultivo continuo con jitomate.

El balance adecuado en las propiedades físicas (porosidad, volumen de partículas, retención de humedad, capacidad de aireación y densidad aparente) del sustrato se mantuvo hasta los 24 meses de cultivo con jitomate.

La capacidad de aireación fue la característica física que presentó mayor variación, mostrando valores por debajo del adecuado (10 a 30 %) a los 24 y 30 meses de cultivo continuo con jitomate.

De acuerdo con los resultados de este trabajo se puede recomendar el uso del aserrín mezclado con tezontle en proporciones 80/20 y 70/30 por un periodo de 24 meses de cultivo continuo en contenedores de 15 L con 30 cm de altura, sin riesgo de producir efectos negativos sobre el crecimiento y desarrollo del jitomate por variación en las características físicas.

1.5. LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P.; CARRION B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En: CADAHIA C (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 299-354.
- ABAD, B. M.; NOGUERA P.; CARRIÓN B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. URRESTARAZU (Ed). Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.
- ALLAIRE, S. E.; CARON, J.; MÉNARD, C. AND DORAIS, M. 2005. Potential replacements for rockwool as growing substrate for greenhouse tomato. Can. J. Soil Sci., **85**, 67–74
- ANSORENA, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- ASADY, G. H.; SMUCKER, A. J. M.; ADAMS M.W. 1985. Seedling test for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil. Crop Sci. 25: 802–806.
- BLOK, C.; DE KREIJ C.; BAAS, R.; AND WEVER, G. 2008. Chapter 7. Analytical Methods Used in Soilless Cultivation. In Soilless Culture: Theory and Practice. RAVIV, M.; LIETH J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United Stated of America. pp. 245-290.
- BUNT, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman Ltd London, England. 309 p.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- CABALLERO D. M. 2000. La actividad forestal en México. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp. 195-212.

- DE BOODT, M.; VERDONCK, O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 26: 37-44.
- DORAIS, M., CARON, J., BÉGIN, G. 2005. Equipment performance for determining water needs of tomato plants grown in sawdust based substrates and rockwool. *Acta Horticulturae* 691: 293–304.
- DRZAL, M. S.; FONTENO, W. C.; D. K CASSEL. 1999. Pore fraction analysis: a new tool for substrate testing. *Acta Horticulturae* 481: 43-54.
- FAVARO, J.C., BUYATTI, M.A. AND ACOSTA, M.R. (2002). Evaluation of sawdust-based substrates for the production of seedlings. *Investigación Agraria Producción y Protección Vegetales*, 17: 367–373.
- FERNÁNDEZ, M.M.; AGUILAR, M .I.; CARRIQUE J. R.; TORTOSA, J.; GARCÍA, C.; LÓPEZ, M.; PÉREZ, J.M. 1998. Suelo y medio ambiente en invernaderos. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía, España.
- FONTENO, W. 1994. Growing media. In: *Bedding Plants IV, A manual on the culture of bedding plants as a greenhouse crop*. Fourth edition. E. J. Holcomb (ed.). Ball Publishing. Batavia, Illinois, USA.
- FONTENO, W.C.; T. E. BILDERBACK. 1993. Impact of hydrogel on physical properties of coarse-structured horticultural substrates. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118: 217-222.
- HANDRECK, K. A.; N. BLACK. 2005. *Growing media for ornamental plant and turf*. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544.
- HUCK, M. G.; KLEPPER, B.; TAYLOR, H. M. 1999. *Cotton Root Growth & Time Lapse Photography of Root Growth (VHS)*, VHS, ASA, CSSA, and SSSA. Item number: B30463. Wisconsin USA.
- JACKSON, M. B. 2002. Long-distance signaling from roots to shoots assessed: the flooding story. *Journal of Experimental Botany* 53: 175–181.

- KAFKAFI, U. 2008. Functions of the root system. *In*: Michael Raviv J R and L. Heinrich. (eds). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier 84 Theobald's Road, London WC1X 8RR, UK. 587 p.
- KLÄRING, H. P.; SCHWARZ D.; CIERPINSKI W. 1999. Control of concentration of nutrient solution in soilless growing systems, depending on greenhouse climate. Advantages and limitations. *Acta Horticulturae* 507: 133-139.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*, 396: 273-284.
- MAHER, M.; PRASAD, M.; RAVIV, M. 2008. Organic Soilless Media Components. In *Soilless Culture: Theory and Practice*. RAVIV, M.; LIETH, J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America. pp 459-504.
- MEDRANO ,E.; LORENZO P.; SÁNCHEZ M. C. 2001. Evaluation of a greenhouse crop transpiration model with cucumber under high radiation conditions. *Acta Horticulturae* 559: 465-470.
- MORARD, P.; LACOSTE, L.; J. SILVESTRE. 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 23:1063-1078.
- PASTOR, S. 1999. Utilización de sustratos en viveros. *Revista Terra*. 17: 231-235.
- PORTERFIELD, D.M.; MUSGRAVE, M. E. 1998. The tropic response of plant root to oxygen: oxitropism in *Pisum Sativum* L. *Planta* 206: 1–6.
- PRASAD, M. AND MAHER, M.J. (2004). Stability of peat alternatives and use of moderately decomposed peat as a structure builder in growing media. *Acta Hort.* (ISHS), **648**, 145–151.
- RAVIV, M.; WALLACH, R.; SILBER, A.; BAR-TAL, A. 2002. Substrates and their analysis. In *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. SAVVAS, D.; PASSAM, H. (Eds.). Athens: Embryo Publications. p.p. 25-101.

- RAVIV, M.; LIETH, J. H. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- RESH, H. 1998. Cultivos Hidropónicos. Editorial Mundi-Prensa. España. 509 p.
- ROCA, D.; MARTÍNEZ, P.F.; SUAY, R.; MARTÍNEZ, S. 2003. Nitrate and water uptake rates on a short term basis by a rose soilless crop under greenhouse. *Acta Horticulturae* 614:181-187.
- SÁNCHEZ DEL C. F.; ESCALANTE R. E. 1988. Hidroponia. Un sistema de producción de plantas. Universidad Autónoma Chapingo.
- SAS INSTITUTE INC, 1998. SAS/STAT guide for personal computers. Version 8. Cary NC. USA 595 p.
- SEMARNAT. 2000. Texto guía forestal. Secretaría de medio ambiente recursos naturales y pesca . México, D F.
- SEMARNAT. 2007. Anuario Forestal. Estadísticas de Recursos Naturales. México.
- STAINER, A. 1984. The Universal Nutrient Solution. ISOC. Netherlands.
- SUAY, R.; MARTÍNEZ P.F.; ROCA D.; MARTÍNEZ, M.; HERRERO, J.M.; RAMOS, C. 2003. Measurement and estimation of transpiration of a soilless rose crop and application to irrigation management. *Acta Horticulturae* 614:625-630.
- TORRES, V.; ARTEXE, A.; BEUNZA, A. 1997. Caracterización física de los sustratos de cultivo. *Revista Horticultura* Nº 125.

CAPITULO II

ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. II: CAMBIOS EN CARACTERISTICAS QUIMICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO

PINE SAWDUST AS SOILLESS SUBSTRATE. II: CHANGES IN CHEMICAL CHARACTERISTICS AFTER FIVE TOMATO GROWTH CYCLES

RESUMEN

Las propiedades químicas caracterizan las transferencias de sustancias entre la fase sólida y la solución del sustrato a través de reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (químicas), reacciones de intercambio de iones (físico-químicas) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímicas). Las características químicas más importantes que determinan el comportamiento de los sustratos orgánicos son el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio iónico (cationes y aniones), el contenido de materia orgánica, la relación C/N y la presencia o ausencia de sustancias fitotóxicas. Normalmente las propiedades químicas de los sustratos se caracterizan antes de establecer las plantas y se acondiciona un sustrato estable y homogéneo en composición. Sin embargo, a través del periodo de crecimiento de las plantas el sustrato se vuelve heterogéneo y las propiedades químicas serán muy diferentes de las establecidas al inicio, bien definidas y homogéneamente distribuidas en el sustrato. El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación de las características químicas del sustrato formado por mezclas aserrín/tezontle durante varios ciclos de cultivo para determinar su influencia sobre el

tiempo de reutilización del sustrato. Se establecieron 10 tratamientos que se formaron de la combinación de tres tamaños de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) con tres relaciones aserrín/tezontle (90/10, 80/20 y 70/30) más un tratamiento de 100 % aserrín. Estos tratamientos se evaluaron durante cinco ciclos continuos de cultivo con jitomate (30 meses). Al sustrato original y al final de cada ciclo se midió pH, conductividad eléctrica (CE), contenido de materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se observó que el pH presentó poca variación durante los 30 meses de cultivo, mientras que la CE, el contenido de MO y la CIC tuvieron mayores cambios. La CE en los primeros dos ciclos de cultivo (6 y 12 meses) se mantuvo en valores bajos a medios, mientras que después del tercero y hasta el final del quinto ciclo (30 meses) la CE indicó acumulación de sales en el sustrato a niveles por arriba del intervalo adecuado para las plantas. La MO y la CIC mostraron un incremento significativo a lo largo de los ciclos de cultivo y sus valores fueron mayores a medida que se incrementó la cantidad de aserrín en el sustrato.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica

ABSTRACT

Substrate chemical properties determine the transference of substances between particles and substrate solution through dissolution and hydrolysis reactions of minerals (chemical reaction), through reactions of anion and cation exchange (physicochemical reaction) and through organic matter biodegradation (biochemical reaction). The most important chemical characteristics that influence the behavior of organic substrates are

pH, electrical conductivity (EC), organic matter content (OM), ionic exchange capacity (anion and cation), C/N ratio and phytotoxic substances. Substrate chemical properties are fixed before plants are established and a stable and homogeneous medium is obtained. However through plant growth, the substrate becomes disrupted and the chemical properties will be different from initial well homogeneous substrate properties.

The objective of this work was to evaluate the variation of chemical characteristics of substrates formed by a mixture of sawdust/volcanic sand and used it as a medium to produce five tomato cultivations. It were established ten treatments which were formed by the combinations of three volcanic sand particle sizes (≤ 3 , 3-6 and 6-12 mm) and three ratios of sawdust/volcanic sand (90/10, 80/20 and 70/30) plus a treatment with 100 % pine sawdust. These treatments were tested during five continuous tomato cultivations (thirty months). In the original substrates and at the end of each tomato growth cycle, pH, EC, OM and CEC were measured. It was found less variation in pH during 30 months of tomato cropping, whilst EC, OM contents and CEC had greatest changes. The EC in two first tomato cultivations (6 and 12 months) showed low and medium values, but after third until the end of fifth tomato cultivation (30 months) EC indicated salt accumulation to levels over optimal range to plant growth. OM and CEC showed a significantly increase trough tomato cultivations with values according to quantity of sawdust in the substrate.

ADDITIONAL INDEX WORDS: cation exchange capacity, electrical conductivity, pH, organic matter.

2.1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades químicas caracterizan las transferencias de sustancias entre la fase sólida y la solución del sustrato a través de reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (químicas), reacciones de intercambio de iones (físico-químicas) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímicas) (Abad *et al.*, 2005; Alarcón, 2000).

Los sustratos orgánicos, además de funcionar como soporte para la planta, actúan como depósito de reserva de nutrimentos contenidos en el sustrato o de algunos de los aportados mediante la fertilización, almacenándolos a través de procesos de fijación y adsorción o cediéndolos a la solución del sustrato por medio de la desorción y mineralización de los nutrimentos (Urrestarazu, 2004; Lemaire, 1995).

En general, los sustratos orgánicos son susceptibles de degradación microbológica y por ello cambian las propiedades físicas, químicas y biológicas, y en consecuencia se afectan los parámetros de cultivo y/o la producción a través de su efecto en la raíz (Urrestarazu, 2004).

Entre las características químicas más importantes que determinan el comportamiento de los sustratos orgánicos y el manejo que debe dárseles durante la producción de plantas están el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio iónico (cationes y aniones), el contenido de materia orgánica, la relación C/N y la presencia o ausencia de sustancias fitotóxicas (Ansorena, 1994; Burés, 1997; Bunt, 1988).

La conductividad eléctrica (CE) mide la cantidad de sales solubles presentes en la solución del sustrato, comúnmente referida de manera genérica como salinidad (Abad

et al., 2005). Cuando se elige un sustrato orgánico como medio para desarrollar un cultivo, es conveniente realizar un análisis del extracto de saturación, para conocer la cantidad de sales que tiene disponibles y ajustar la solución nutritiva, al menos durante las primeras semanas del cultivo.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se define como la suma de cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato, es decir la capacidad de retener cationes e intercambiarlos con la solución acuosa. La CIC se expresa en meq por unidad de peso o volumen, meq/100 g, meq/100 cc o meq/L (Bunt, 1988). Sin embargo, los sistemas de cultivo sin suelo involucran un volumen relativamente pequeño y fijo para el desarrollo radicular y por lo tanto es más práctico expresar los valores de la CIC con base a unidades de volumen ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{cmol}\cdot\text{L}^{-1}$). De esta manera, es posible comparar sustratos de altas con bajas densidades aparentes (Silber, 2008; Ansorena, 1994). La determinación de la CIC es importante en sustratos que incluyan una fracción orgánica que tenga influencia en la nutrición del cultivo, donde no es necesaria la aplicación de nutrimentos con el agua de riego, por ejemplo en los sistemas orgánicos.

Según Ansorena (1994) los sustratos orgánicos no poseen capacidad de intercambio aniónico (CIA), por lo que la disponibilidad de los nutrimentos que se encuentran en forma aniónica (NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-}) está condicionada sólo por procesos de formación y disolución de precipitados químicos. El nitrato es muy soluble y no forma prácticamente sales insolubles con ningún catión, por lo que casi la totalidad del nitrato aportado permanecerá en solución y podrá ser lavado fácilmente. Contrariamente, Raviv *et al.* (2002) indican que los sustratos pueden tener una alta CIA y mencionan

como ejemplo la adsorción de fosfatos en la superficie de materiales volcánicos. Por su parte Silber (2008) menciona que la superficie de la fase sólida de los sustratos orgánicos y de origen volcánico tiene carga eléctrica positiva (permanente y/o variable) y negativa.

La materia orgánica consiste de sustancias húmicas constituidas por compuestos orgánicos con un núcleo central, generalmente de compuestos aromáticos (en primer término fenoles), cadenas laterales de carbohidratos y cadenas alifáticas en las que se sitúan los grupos funcionales que determinan su actividad, resultado de la transformación de las sustancias orgánicas originales (carbohidratos, proteínas, lípidos). Según el tamaño del núcleo y las cadenas laterales, las sustancias húmicas pueden ser ácidos fúlvicos (núcleo pequeño y cadena larga), ácidos húmicos (núcleo pequeño y cadenas más cortas y huminas (núcleo grande y cadenas cortas) (Reines *et al.*, 1998).

Las características químicas del aserrín varían según la especie utilizada (Burés, 1997). En la madera se pueden encontrar hemicelulosa, azúcares, almidones, proteínas, aminoácidos, sales inorgánicas, grasas, ceras, resinas, taninos, terpenos, flavonoides, materiales colorantes, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, aldehídos, fenoles y quinonas (Earl, 1982). Por su parte, Mateo (2002) indica que el aserrín de pino contiene 94 % de materia seca, 0.62 % proteína cruda y 0.35 % de cenizas. La fracción fibrosa está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina. En el resto, se encuentran sustancias como olerosina, que está compuesta por resinas.

El aserrín tiene baja capacidad amortiguadora con un pH neutro a ligeramente ácido (6.3 a 7.0). Su conductividad eléctrica es muy baja, resultado de la baja liberación de

nutrimentos. Con relación a su composición mineral, Raviv y Lieth (2008) indican que los niveles Mn y Zn pueden variar en un amplio intervalo, pero en general los demás están en concentraciones bajas. Kipp *et al.* (2000) reportan en fibra de madera de pino una concentración de 3, 35, 2, 7, 17, 4, 2 y 3 mg·L⁻¹ para N-NO₃, K, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, y P, respectivamente. Martínez (2008) al usar diferentes sustratos para evaluar germinación de amarilis (*Hipeastrum* sp) encontró en aserrín de pino sin compostar un pH de 6.4, conductividad eléctrica (mmhos/cm) 0.54, porcentaje de materia orgánica 5.52, nitrógeno 1.11 %, P (mg·Kg⁻¹) 30 y K (mg·Kg⁻¹) 960.

Normalmente las propiedades químicas de los sustratos se caracterizan antes de establecer las plantas y se acondiciona una fase sólida estable y homogénea en composición. Sin embargo, a través del periodo de crecimiento de las plantas se acumulan compuestos orgánicos por la excreción de las raíces o como resultado de los procesos de descomposición. De esta manera, la superficie de la fase sólida se vuelve heterogénea y las propiedades químicas de la mezcla serán muy diferentes de las establecidas al inicio, bien definidas y homogéneamente distribuidas en el sustrato (Silber y Raviv, 1996).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la variación en las características químicas, como son el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica oxidable, del aserrín de pino y mezclas aserrín/tezontle durante cinco ciclos de cultivo, para determinar el tiempo en que se mantienen en un intervalo adecuado.

2.2. MATERIALES Y METODOS

2.2.1. Ubicación del estudio

El experimento se estableció en un invernadero de cristal del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo durante los años 2007 a 2009, estableciéndose cinco ciclos de cultivo de 6 meses cada uno. El invernadero tenía control de clima a través de extractores de aire húmedo y calefacción con calentadores eléctricos.

2.2.2. Material vegetal utilizado

Se utilizó el híbrido de jitomate Tequila (F1) de la Compañía Vilmorin, cuyas características son precocidad de 75 a 85 días, poco follaje y entrenudos cortos, buena cobertura y ventilación; fruto ovoide muy consistente de color rojo intenso, brillante, tamaño homogéneo, con larga vida de anaquel y buen sabor. Es de excelente fructificación con una producción elevada. Tiene resistencia al Virus del Mosaico del Tabaco, *Verticillium* sp, *Fusarium* raza 1 y a nemátodos.

Las plántulas fueron obtenidas en charolas para germinación de 200 cavidades usando turba vegetal como sustrato. El trasplante se hizo a los 30 días después de la siembra cuando las plántulas tenían en promedio 15 cm de altura.

2.2.3. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se formaron utilizando un arreglo factorial 3x3. Uno de los factores correspondió al tamaño de partícula del tezontle y los tres niveles fueron diámetros ≤ 3 ,

3 a 6 y 6 a 12 mm, mientras que el segundo factor correspondió a relaciones aserrín/tezontle y los niveles fueron 90/10, 80/20 y 70/30 v/v. En todos los casos se uso aserrín de pino con diámetro de partícula ≤ 6 mm. La combinación de factores y niveles dio los siguientes tratamientos: T1: 90/10 (6-12 mm), T2: 80/20 (6-12 mm), T3: 70/30 (6-12 mm), T4: 90/10 (3-6 mm), T5: 80/20 (3-6 mm), T6: 70/30 (3-6 mm), T7: 90/10 (≤ 3 mm), T8: 80/20 (≤ 3 mm) y T9: 70/30 (≤ 3 mm), se incluyó además un T10 que consistió en 100% aserrín de pino (testigo). Se usaron bolsas de plástico bicolor (blanco-negro) de 15 L de capacidad y 30 cm de altura, de las cuales se llenaron 10 bolsas con cada tratamiento de sustrato y se trasplantaron dos plántulas de jitomate en cada una. Las unidades experimentales (bolsas con dos plantas) se distribuyeron de acuerdo a un diseño completamente al azar, con un total de 10 tratamientos y 4 repeticiones.

2.2.4. Instalación y desarrollo experimental

El experimento se instaló en dos camas, cada una con dos hileras de bolsas y dos plantas por bolsa. Se establecieron cinco ciclos de cultivo con duración de 6 meses en promedio cada uno. Al final de cada ciclo se removían los tallos junto con las raíces más gruesas, se tomaban las muestras para el análisis físico del sustrato y se volvía a plantar. El fertirriego consistió en ocho riegos diarios con un sistema de goteo, colocando una estaca por planta con gasto de $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. La duración de cada riego varió de 2 a 6 minutos dependiendo de la edad de la planta y condiciones ambientales. Para el control del riego diario se consideró un drenaje de 15 a 25 %. Durante los diferentes ciclos de cultivo, se aplicó la solución nutritiva de Steiner (1984) con una carga iónica

de $20.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, incrementando la concentración de P a 1.5 y la de K a $7.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, para lograr el equilibrio entre cationes y aniones en la solución nutritiva.

Los cuidados principales consistieron en control preventivo de mosquita blanca y de enfermedades producidas por *Phytophthora* sp, *Phytium* sp, *Rhizoctonia* sp, así como las prácticas de manejo de la planta (eliminación de brotes laterales, tutoreo, deshojado, polinización) para conducir el cultivo hasta formar 6 a 7 racimos.

2.2.5. Muestreo de sustrato y medición de variables

Antes de establecer el cultivo se tomaron muestras de 5 L por triplicado, de todos los sustratos que definían cada tratamiento. Al finalizar cada ciclo de cultivo, antes de establecer el siguiente, igualmente se tomaron tres muestras de 3 L 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 las propiedades químicas siguientes: pH y conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en agua relación 1:1.5 (sustrato:agua) con un potenciómetro marca Hanna Instruments modelo HI 98130; capacidad de intercambio catiónico (Chapman, 1965) y materia orgánica oxidable (Walkley y Black) (Jackson, 1964). Los procedimientos de las metodologías utilizadas son ampliamente descritas en Etchevers *et al* (s/f) y Robledo y Maldonado (2005).

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar la interacción entre factores, así como comparación de medias por factor de las diferentes

variables, mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1998).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 1 se observan diferencias significativas ($p < 0.01$ y 0.05) para casi todas las variables y para la mayoría de las fechas de muestreo estudiadas con respecto a la relación aserrín/tezontle. También para la mayoría de las fechas estudiadas se encuentran diferencias significativas en pH, CE, CIC y MO para el tamaño de partícula de tezontle empleado en la mezcla con aserrín. Durante la primera fecha de muestreo que correspondió al sustrato inicial, no hubo efecto significativo para pH y CE.

La interacción entre relaciones aserrín/tezontle y el tamaño de partícula del tezontle usado, también fue altamente significativa en la mayoría de las fechas estudiadas para pH, CE, CIC y MO.

En virtud de estos resultados, a continuación se hace un análisis más detallado de estas interacciones y efectos individuales de los factores estudiados.

2.3.1. Interacción entre el tamaño de partícula de tezontle y la relación aserrín/tezontle

En el Cuadro 1 se observa que para la mayoría de las variables químicas en todos los ciclos de cultivo (0, 6, 12, 18, 24 y 30 meses), hubo efecto altamente significativo de la

interacción entre los factores diámetro de partícula del aserrín y relación aserrín/tezontle.

Cuadro 1. Niveles de significancia de las variables químicas medidas en los tratamientos formados por la combinación de diferente diámetro de partícula de tezontle y relaciones aserrín/tezontle, durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Factor	pH						CE (dS·m ⁻¹)						CIC (meq·L ⁻¹)						MO (%)					
R P RxP CV	Meses de cultivo																							
	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30
	ns	**	**	**	ns	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	ns	ns	**	ns	ns	**	ns	**	**	**	**	ns	**	*	ns	ns	*	*	**	ns	ns	ns	*	**
	ns	ns	**	ns	*	**	ns	**	ns	*	**	ns	**	*	ns	*	ns	*	*	ns	ns	**	*	**
	3.5	1.7	2.1	1.7	1.3	2.1	28	6.3	14.4	4.7	6	2.7	15	12.7	10	6.6	7.4	8.5	25	21	10	7.7	10	10.3

R: factor relación aserrín/tezontle, P: factor diámetro de partícula del tezontle, CV: coeficiente de variación, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, MO: materia orgánica oxidable, **Efecto significativo con $p < 0.01$, *Efecto significativo con $p < 0.05$, ns: efecto no significativo.

pH. En la Figura 1 se presenta el comportamiento del pH del sustrato antes de establecer el cultivo y cada seis meses, al final de cada ciclo de cultivo (6, 12, 18, 24, 30) durante 30 meses. Se observa que el pH inicial fue ácido en todos los tratamientos, influido quizás por la alta proporción de aserrín en el sustrato, el cual normalmente tiene un pH ácido (Fernández, 1999; Raviv y Lieth, 2008).

El pH medido al final de cada ciclo de cultivo indica que, con excepción del cuarto ciclo (Figura 1 e) que estuvo alrededor de 7, éste se mantuvo dentro del intervalo óptimo cuando se mide en una relación 1:1.5 (sustrato:agua) que es de 5.7 a 6.8 o bien dentro del intervalo óptimo general, que es de 5 a 6.5 (Abad *et al.*, 2005, Abad *et al.*, 2004; Burés, 1997). 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).

Solamente para el segundo (Figura 1 c) y quinto ciclo (Figura 1 f) de cultivo se observa un efecto significativo (Cuadro 1) de la interacción entre tamaño de partícula del tezontle y mezclas aserrín/tezontle. A los 12 meses, la inclusión de tezontle en la mezcla mostró una ligera disminución en pH, mientras que a los 30 mese se dio un incremento en pH.

En otros trabajos se ha reportado que el pH puede variar dependiendo del estado de descomposición del sustrato. Martínez (2008) al usar aserrín sin compostar para germinación de amarilis (*Hipeastrum* sp) midió un pH de 6.4; mientras que Jaimez (1985) encontró que el pH varía si el aserrín es fresco o compostado independientemente del tamaño de partícula, en aserrín grueso sin compostar el pH fue de 4.6, en aserrín grueso compostado de 8.3, en aserrín fino sin compostar de 4.6 y 5.6 en aserrín fino compostado.

Conductividad eléctrica (CE). La Figura 2 muestra el comportamiento de la CE durante los 30 meses de cultivo. La interacción entre factores se presentó (Cuadro 1) solo para las fechas 6, 18 y 24 meses. A los 6 meses de cultivo, se observa (Figura 2 b) un incremento en la CE en los tratamientos con menor diámetro de partícula conforme disminuyó la proporción de aserrín y aumentó la de tezontle; sin embargo, a los 12 y 24 meses, de manera general, se presentó una menor CE conforme disminuyó la proporción de aserrín en la mezcla y aumentó la de tezontle (Figura 2 d, e). De acuerdo con Warncke (1990), cuando la CE se mide en una relación 1:1.5

(sustrato:agua) los valores de CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y su relación con la salinidad es la siguiente: 0.0 a 0.24 muy baja, 0.25 a 0.49 baja, 0.50 a 0.99 media, 1 a 1.99 alta y > 2.0 muy alta salinidad. Esto significa que después de 12 meses de cultivo, con excepción del sustrato de 100 % aserrín, todos los sustratos tenían un exceso de sales acumuladas, y después de 18 meses también el sustrato con 100 % aserrín presentó este exceso. Las causas que originan 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 degradan para producir nitratos o bien, cuando liberan sales mediante difusión, en niveles superiores a las cantidades absorbidas o lixiviadas; 2) cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante, es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación y 3) cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y al mismo tiempo, se descompone en el transcurso del cultivo, liberando nutrimentos (Abad *et al.*, 2005; Ansorena, 1994; Burés, 1997). Estas situaciones pueden ser prevenidas en gran parte, conociendo las cantidades de nutrimentos que requieren las plantas para evitar aplicaciones excesivas de fertilizantes (Abad *et al.*, 2005).

Materia orgánica oxidable (MO). En la Figura 3 se presenta la interacción entre el tamaño de partícula del tezontle y las relaciones aserrín tezontle para la variable MO. No hubo efecto significativo (Cuadro 1) para los 6 y 12 meses, situación que también se observa en la Figura 3; sin embargo, en el sustrato inicial, a los 18, 24 y 30 meses, se observa que a mayor proporción de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle hubo menor contenido de MO, efecto que en general fue más marcado para la relación con menor diámetro de partícula (< 3 mm). También se observa (Figura 3) que los valores de la

MO fueron más altos en el aserrín y que al adicionar tezontle en las diferentes relaciones aserrín/tezontle la MO disminuyó significativamente. Además, con excepción de la relación aserrín/tezontle 80/20 a los 30 meses, la variación en los valores de la MO entre las relaciones aserrín/tezontle para el mismo diámetro de partícula fue mayor que la variación en la MO para diferente diámetro de partícula del tezontle a una misma relación aserrín/tezontle. Lo anterior significa que los valores de la MO estuvieron determinados principalmente por el contenido de aserrín en el sustrato. Esto se atribuye a que la determinación de la MO se hace considerando el peso de la muestra y no el volumen. Por lo tanto, al pesar las mezclas aserrín/tezontle, con baja ($0.14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y alta ($1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) densidad aparente para el aserrín y tezontle, respectivamente, proporcionalmente la cantidad de serrín en la mezcla fue muy inferior que cuando se pesó sólo aserrín para la determinación de MO en el tratamiento 100 % aserrín. Finalmente la Figura 3 muestra cómo cambió la MO a lo largo de los ciclos de cultivo. Al inicio (Figura 3 a) el intervalo de variación estuvo entre 3 a 15 %, mientras que al final de los 30 meses el intervalo quedó entre 12 a 44 %, correspondiendo en ambos casos, los valores más bajos a la relación aserrín/tezontle 70/30 y los valores más altos al aserrín.

En general la humificación es un proceso progresivo de reacciones secuenciadas, mediante las cuales los precursores solubles evolucionan en ácidos fúlvicos, después en ácidos húmicos y finalmente en huminas, creciendo en el mismo sentido la estabilidad de las macromoléculas. El proceso de humificación es una transformación de la estructura de los compuestos orgánicos originales que consiste en una disminución progresiva de las estructuras biomoleculares alifáticas mas lábiles y al

mismo tiempo un aumento de macromoléculas con estructuras aromáticas más complejas, que son las que presentan una mayor resistencia a la biodegradación (Labrador, 1996). La diversidad de los precursores orgánicos determina que no se llegue a una estructura molecular única, sino a distintas estructuras macromoleculares (Labrador, 1996). La materia orgánica funciona como fuente de carbono para que se lleve a cabo una serie de transformaciones, en las que actúan los microorganismos, utilizando a esta como fuente de energía. En este proceso se da la mineralización de nutrimentos tales como nitrógeno, fósforo y azufre. Actúa también como agente quelatante de micronutrimentos, como el Fe y Mn y como fuente de ácidos húmicos y fúlvicos que en algunos casos pueden afectar favorablemente la fisiología de la planta. Por ello, los microorganismos que actúan a nivel de la rizósfera y que favorecen la solubilización de nutrimentos, requieren de materia orgánica para reproducirse más activamente. En condiciones de altos niveles de materia orgánica, la inoculación de microorganismos tiene más posibilidades de ser exitosa, pues pueden colonizar más rápidamente el medio. Por otro lado, la fijación asociativa del nitrógeno llevada a cabo por bacterias del género *azotobacter* y otras especies asociativas deben su capacidad de fijación de nitrógeno a la disponibilidad de carbono (Castellanos *et al.*, 2000). Debido a estos procesos que ocurren en los sustratos orgánicos, el contenido de nutrimentos asimilables difiere marcadamente entre ellos (Abad *et al.*, 2005).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). En la Figura 4 se presenta la interacción entre el tamaño de partícula del tezontle y las relaciones aserrín tezontle para la variable CIC. No hubo efecto significativo (Cuadro 1) para los 12 y 24 meses, situación que también se observa en la Figura 4; sin embargo, al inicio, a los 6, 18 y 30 meses,

se observa que a mayor proporción de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle hubo menor CIC, efecto que en general es más marcado en la relación con menor diámetro de partícula ($< 3 \text{ mm}$). En la Figura 4 se observa que los valores de la CIC fueron muy altos en el aserrín y que al adicionar tezontle en las diferentes relaciones aserrín/tezontle la CIC disminuyó significativamente. También se observa que la variación en los valores de la CIC entre las relaciones aserrín/tezontle para el mismo diámetro de partícula fue mayor que la variación en la CIC para diferente diámetro de partícula del tezontle a una misma relación aserrín/tezontle. Lo anterior indica que los valores de la CIC estuvieron determinados principalmente por el contenido de aserrín en el sustrato. Esto se atribuye, de manera similar a la MO, a que la determinación de la CIC se hace considerando el peso de la muestra y no el volumen. Por lo tanto, al pesar las mezclas aserrín/tezontle, donde el aserrín es de baja densidad aparente ($0.14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y el tezontle de alta ($1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), proporcionalmente la cantidad de aserrín fue muy inferior que cuando se pesó sólo aserrín para la determinación de la CIC en el tratamiento 100 % aserrín. La Figura 4 también muestra como cambió la CIC a lo largo de los ciclos de cultivo. Al inicio el intervalo de variación estuvo entre 20 a $60 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ y al final de los 30 meses el intervalo quedó entre 60 y $200 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, correspondiendo en ambos casos, los valores más bajos a la relación aserrín/tezontle 70/30 y los valores más altos al aserrín.

Como se habrá notado, existe un comportamiento similar entre el contenido de MO (Figura 3) y la CIC (Figura 4) en los diferentes tratamientos. Esto se debe a que la CIC depende de la MO (Havlin *et al.*, 2005), la cual tiene una alta cantidad de grupos funcionales, principalmente COOH y en menor proporción de OH fenólicos que pueden

disociar los H^+ y generar carga negativa en la superficie de las sustancias húmicas (Stevenson, 1994; Brady y Weil, 2002).

Los valores de la CIC en materiales inorgánicos son muy bajos en comparación a los valores de los materiales orgánicos que son muy altos, los cuales a su vez tienen un amplio rango de variación debido a las diferencias naturales de los materiales. Estos valores también varían con el grado de humificación (Lax *et al.*, 1986). Al respecto, Worrall (1978) indica que el aserrín fresco tiene una CIC baja, pero aumenta en la medida que se descompone, en promedio varía de 55 a 60 meq/100 g (Maher *et al.*, 2008).

El valor óptimo de la CIC en los sustratos depende principalmente de la frecuencia de la fertirrigación (Abad *et al.*, 2004). Cuando las plantas en contenedores se alimentan con solución nutritiva o con fertilizantes de liberación controlada, el sustrato debe tener una CIC baja. Sin embargo, en términos generales es deseable una CIC moderada (50-100 meq·L⁻¹), aunque los materiales orgánicos compostados llegan a presentar valores de 200-300 meq·L⁻¹ (Handreck y Black, 2005).

Los materiales orgánicos poseen una elevada capacidad de intercambio catiónico y una alta capacidad tampón frente a cambios rápidos en la disponibilidad de los nutrimentos y a variaciones en el pH. Valores altos de CIC suponen un depósito de reserva para los nutrimentos, mientras que los materiales con baja CIC, como la mayoría de los sustratos minerales, retienen cantidades reducidas de nutrimentos y requieren una aplicación frecuente y regular de los fertilizantes. Por ello, cuando se requiere prevenir cambios rápidos en la acidez o la alcalinidad de los sustratos y hacer una fertirrigación

intermitente, se recomienda utilizar materiales orgánicos en las mezclas de cultivo (Abad *et al.*, 2005; Verhagen, 1999).

Raviv *et al.*, (2002) mencionan que tanto los sustratos inorgánicos (arenas volcánicas), como los orgánicos tienen superficies cargadas negativamente, ya sea carga permanente o variable. La carga variable, tanto positiva como negativa, depende del pH de la solución, y se genera principalmente por la adsorción de H^+ y OH^- en las superficies sólidas de los sustratos, tales como óxidos de metales, hidróxidos, silicatos microcristalinos (alofano e imogolita) y en los grupos funcionales orgánicos. Las propiedades de carga en la superficie de los sustratos tienen un efecto determinante en las reacciones químicas que tienen lugar en la rizósfera. Incluso en los sustratos inorgánicos, la acumulación de compuestos orgánicos excretados por las raíces o los que provienen de la descomposición durante el ciclo del cultivo, sirven para crear superficies con carga. Las características de carga en las superficies dependen del estado de descomposición de los materiales orgánicos. La relación C/N y el contenido de lignina presentan una alta correlación con la CIC y pueden utilizarse como índices de madurez y calidad de los materiales orgánicos. Una CIC alta puede ayudar a retener NH_4^+ y en consecuencia disminuir su fitotoxicidad o reducir su efecto antagónico sobre la absorción de Ca y Mg (Raviv *et al.*, 2002).

La CIC de sustratos orgánicos es generalmente alta, valores comunes están entre 80 y 160 $cmol \cdot kg^{-1}$ (800 y 1600 $mmol_c \cdot kg^{-1}$) y tiene la característica de ser dependiente del pH (carga variable). El efecto del pH en la CIC de los sustratos orgánicos es mayor al efecto que se da en la materia orgánica del suelo. La contribución del incremento en una unidad de pH sobre la CIC de la materia orgánica del suelo es del orden de 51

$\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de C orgánico. Asumiendo que el C orgánico constituye el 58 % de la materia orgánica (Stevenson, 1994), entonces el incremento de una unidad de pH aumenta la CIC en $29.6 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Las reacciones de intercambio catiónico tiene importancia en la horticultura en los casos donde: a) la concentración de un catión tóxico o con efectos negativos (como los metales pesados o el Na^+) en la solución del medio de crecimiento disminuye como resultado de la adsorción, b) la concentración de un catión benéfico en la solución se incrementa debido a la desorción. Alternativamente, los efectos contrarios también pueden ocurrir, con consecuencias negativas del intercambio catiónico, a) un incremento en la concentración de cationes tóxicos o perjudiciales en la solución debido a la desorción y b) una disminución de la concentración a niveles deficientes de cationes benéficos después de la adsorción a la fase sólida del sustrato (Silber, 2008).

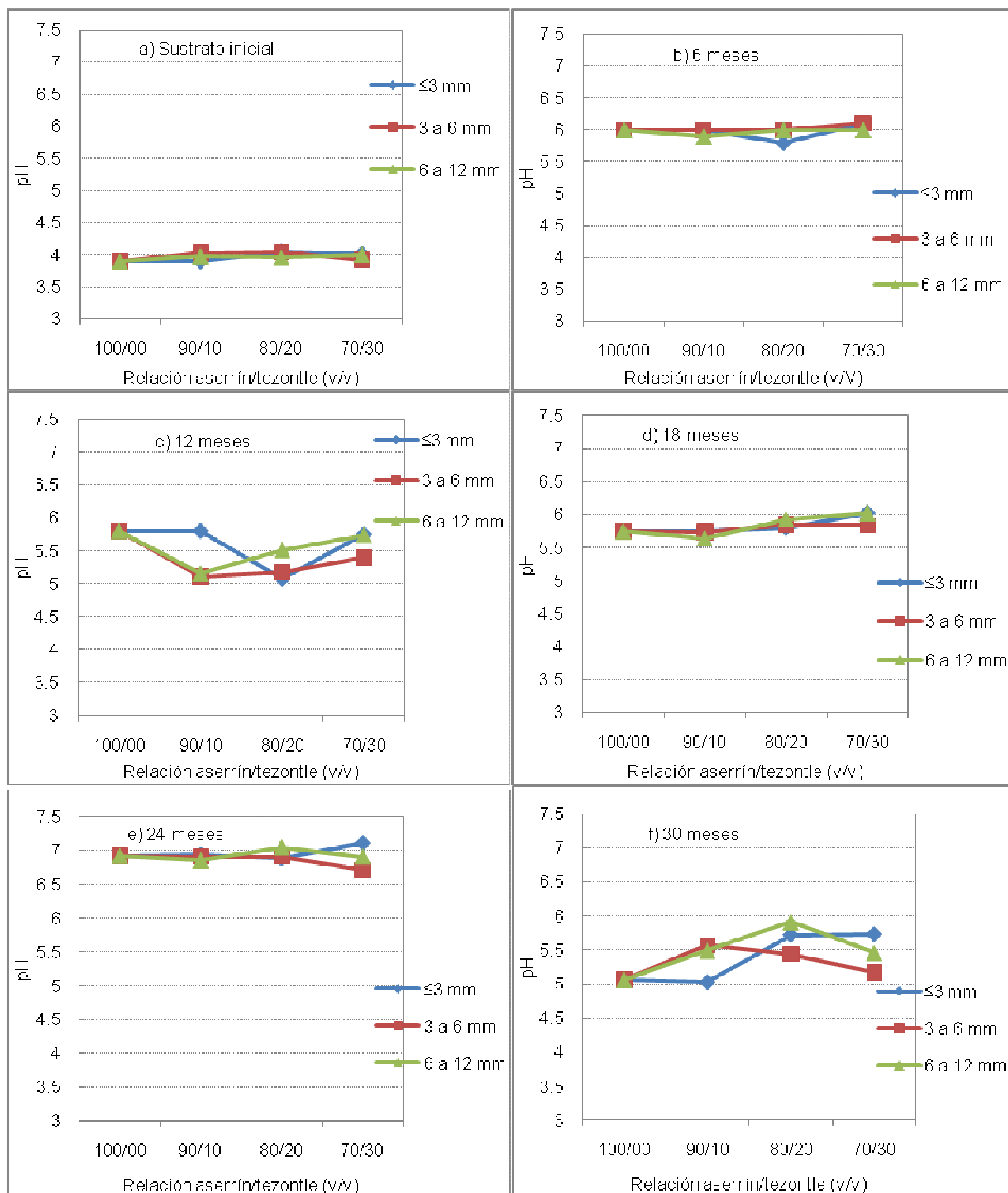


Figura 1. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre el pH (relación 1:1.5 sustrato:agua) del sustrato después 30 meses de cultivo con jitomate.

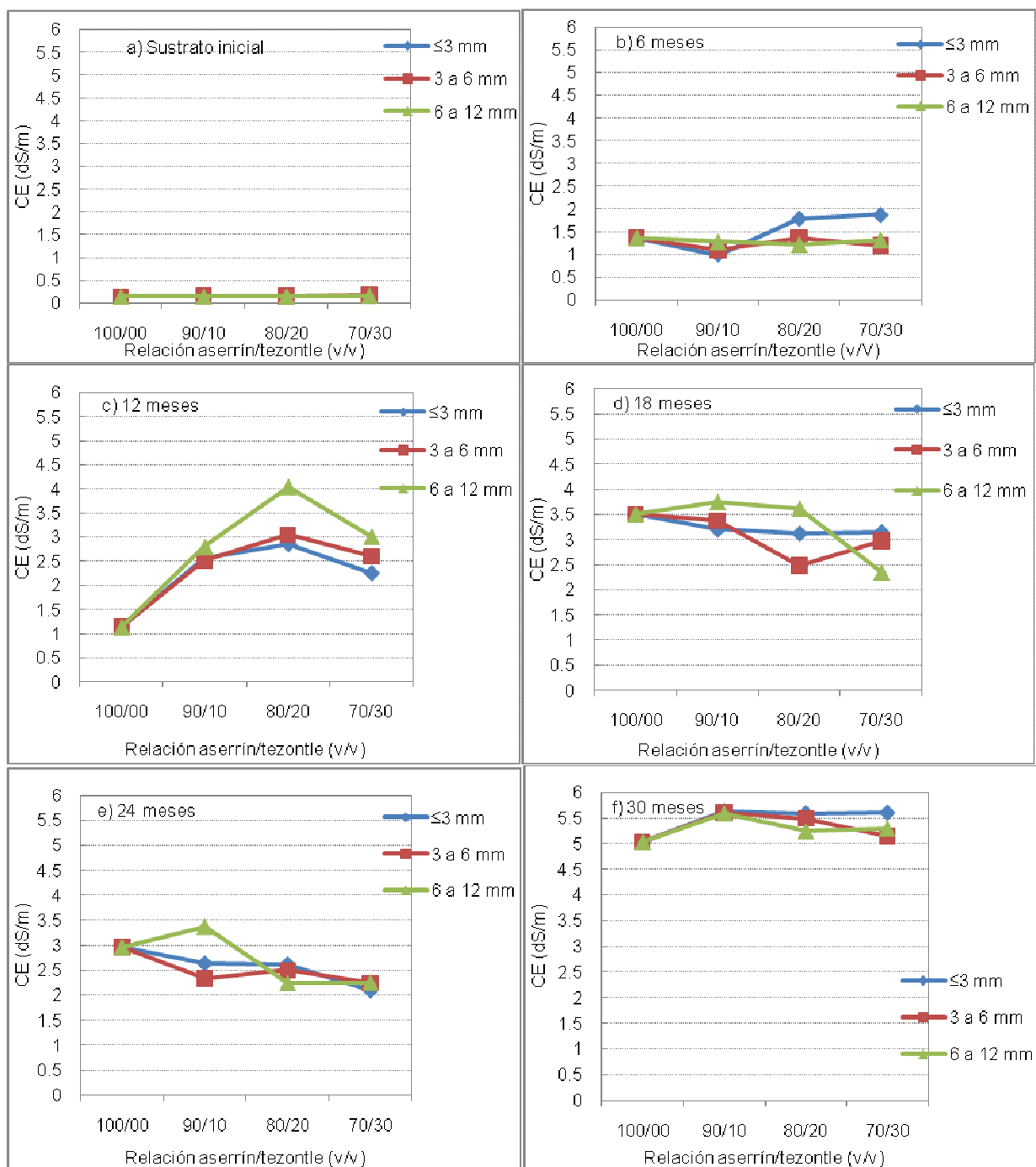


Figura 2. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la conductividad eléctrica (CE) (relación 1:1.5 sustrato:agua) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

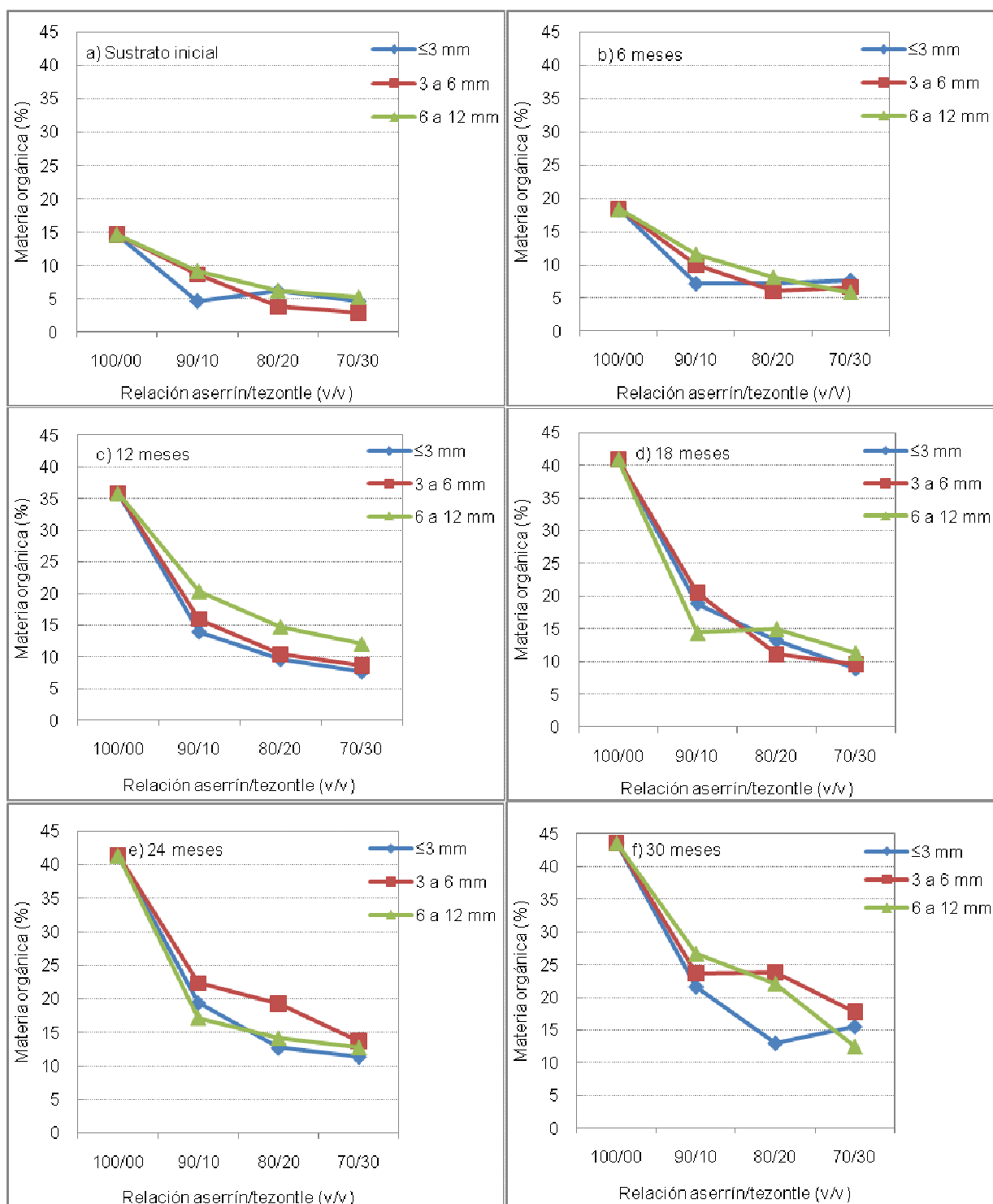


Figura 3. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la materia orgánica oxidable del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

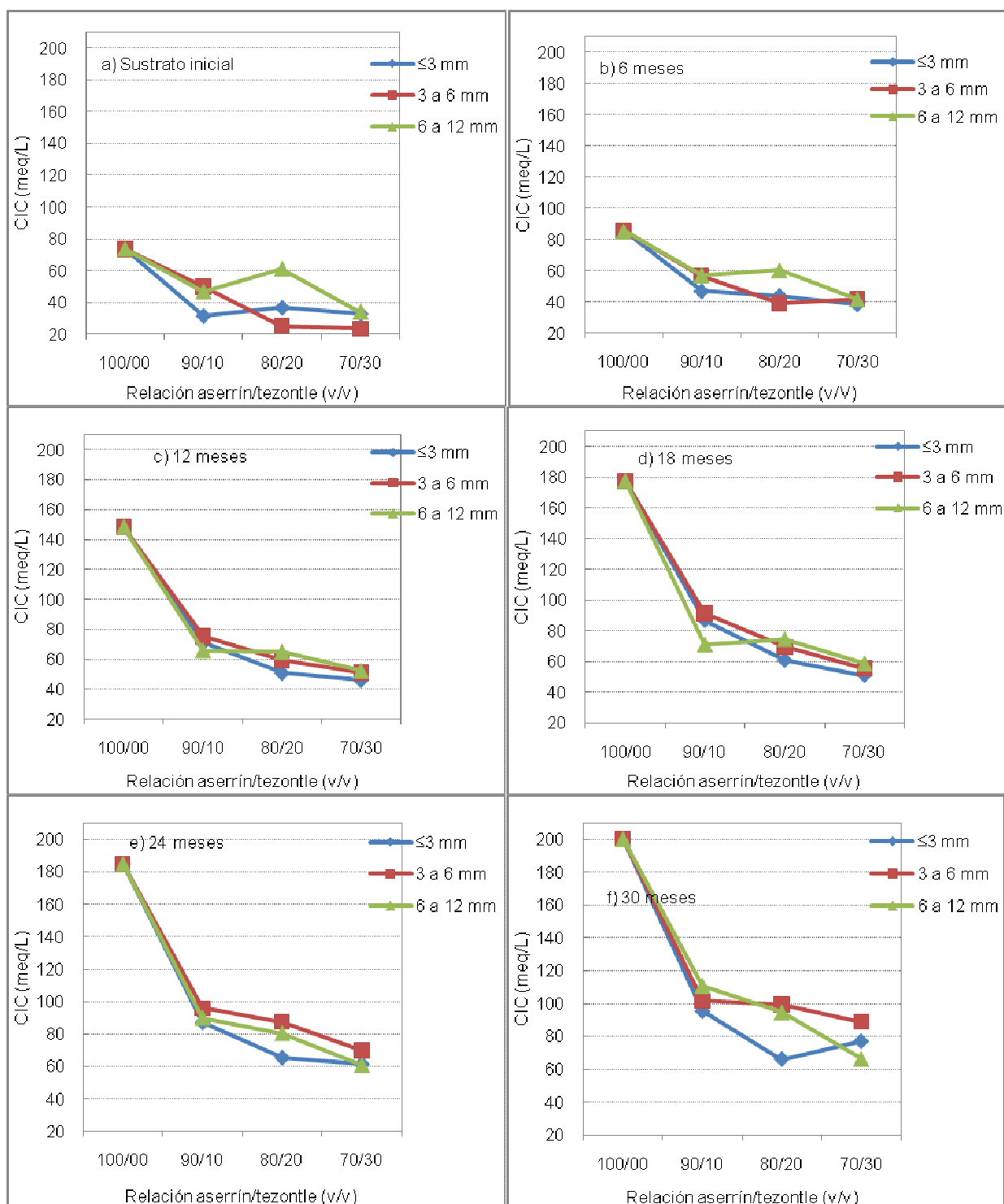


Figura 4. Efecto del tamaño de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

2.3.2. Efecto del tamaño de partícula sobre las variables químicas

En los Cuadros 2, 3, 4 y 5 se presenta el efecto del factor tamaño de partícula sobre los valores medios de las características químicas de los sustratos. Se observa que el tamaño de partícula casi no tiene efecto en pH (Cuadro 2), pero en la CE (Cuadro 3), en la MO (Cuadro 4) y en la CIC (Cuadro 5), en términos generales, los valores fueron mayores en el tezontle con mayor diámetro de partícula. Esta situación es contraria a lo esperado, ya que el tezontle fino debería retener mas sales porque el drenaje es más lento y en teoría tiene más superficie específica y mas carga (positiva o negativa) como lo han demostrado Silber (2008) y Raviv *et al.* (2002). En parte, una explicación a lo anterior, es que al momento de pesar la mezcla aserrín/tezontle grueso, disminuye la fracción de partículas gruesas porque la diferencia en granulometría hace que la mezcla se separe y al momento de pesar se excluyen las partículas más gruesas para ajustar el peso de muestra que será analizada (posible error experimental).

2.3.3. Efecto de la relación aserrín/tezontle sobre las variables químicas

En los Cuadros 2, 3, 4 y 5 se presentan las pruebas de medias para observar el efecto de la mezcla aserrín/tezontle sobre las características químicas más importantes.

No hubo una tendencia definida del efecto de la relación aserrín/tezontle sobre el pH (Cuadro 2) y la CE (Cuadro 3) del sustrato, mientras que para MO (Cuadro 4) y CIC (Cuadro 5) a mayor contenido de aserrín en el sustrato, mayores valores de estos parámetros, aspectos ya discutidos anteriormente.

Cuadro 2. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en el pH en agua (relación 1:1.5) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Factor de estudio	Meses de cultivo					
	0 ^y	6	12	18	24	30
Tamaño de partícula del tezontle						
≤ 3 mm	3.98 a	5.98 a	5.49 a	5.83 a	6.94 a	5.54 a
3-6 mm	3.97 a	6.06 a	5.37 b	5.79 a	6.86 a	5.31 b
6-12 mm	3.96 a	6.02 a	5.95 a	5.84 a	6.94 a	5.48 a
DMSH	0.144	0.106	0.113	0.102	0.095	0.118
Relación aserrín/tezontle (v/v)						
100/00	3.90 a	6.03 ab	5.79 a	5.76 bc	6.92 a	5.04 c
90/10	3.99 a	5.93 b	5.21 c	5.70 c	6.92 a	5.58 ab
80/20	4.01 a	5.99 ab	5.23 c	5.86 ab	6.95 a	5.69 a
70/30	3.98 a	6.11 a	5.63 b	5.96 a	6.92 a	5.46 b
DMSH	0.184	0.135	0.143	0.129	0.122	0.151

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

DMS: diferencia mínima significativa honesta, ^ySustrato inicial.

Cuadro 3. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en la conductividad eléctrica (CE, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Factor de estudio	Meses de cultivo					
	0 ^y	6	12	18	24	30
Tamaño de partícula del tezontle						
≤ 3 mm	0.15 a	1.51 a	2.21 b	3.08 b	2.57 b	5.46 a
3-6 mm	0.16 a	1.28 b	2.32 b	3.26 a	2.50 b	5.32 a
6-12 mm	0.15 a	1.30 b	2.75 a	3.30 a	2.80 a	5.41 a
DMSH	0.044	0.088	0.356	0.156	0.162	0.149
Relación aserrín/tezontle (v/v)						
100/00	0.14 a	1.13 c	1.14 c	3.50 a	2.96 a	5.03 c
90/10	0.14 a	1.37 b	2.63 b	3.46 a	2.92 a	5.60 a
80/20	0.15 a	1.46 ab	3.32 a	3.07 b	2.45 b	5.61 a
70/30	0.16 a	1.50 a	2.62 b	2.82 c	2.19 c	5.35 b
DMSH	0.056	0.112	0.454	0.119	0.207	0.191

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

DMS: diferencia mínima significativa honesta, ^ySustrato inicial.

Cuadro 4. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en la cantidad de materia orgánica oxidable (%) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Factor de estudio	Meses de cultivo					
	0 [¥]	6	12	18	24	30
Tamaño de partícula del tezontle						
≤ 3 mm	7.4 b	10.1 a	16.8 a	20.3 a	21.2 b	23.4 b
3-6 mm	7.5 b	10.7 a	17.7 a	21.2 a	24.2 a	27.2 a
6-12 mm	10.1 a	11.9 a	18.0 a	19.9 a	22.1 ab	26.2 a
DMSH	2.18	2.33	1.95	1.62	2.34	2.70
Relación aserrín/tezontle (v/v)						
100/00	14.6 a	18.4 a	35.8 a	40.8 a	41.4 a	43.5 a
90/10	7.5 b	9.2 b	14.1 b	17.9 b	20.6 b	24.0 b
80/20	6.9 bc	8.8 b	11.6 c	14.1 c	16.4 c	19.6 c
70/30	4.3 c	6.7 b	8.5 d	9.1 d	11.6 g	15.3 d
DMSH	2.77	2.97	2.49	2.06	2.98	3.44

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

DMS: diferencia mínima significativa honesta, [¥]Sustrato inicial.

Cuadro 5. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) y de la mezcla aserrín/tezontle en la capacidad de intercambio catiónica (CIC, $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Factor de estudio	Meses de cultivo					
	0 [¥]	6	12	18	24	30
Tamaño de partícula del tezontle						
≤ 3 mm	43.8 b	53.9 b	80.4 a	95.5 a	99.9 b	102.7 b
3-6 mm	43.2 b	55.9 ab	83.1 a	98.5 a	109.6 a	120.8 a
6-12 mm	53.9 a	63.3 a	84.7 a	95.5 a	103.9 ab	118.2 ab
DMSH	7.43	7.49	8.77	6.52	7.89	10.02
Relación aserrín/tezontle (v/v)						
100/00	73.7 a	85.6 a	148.5 a	177.5 a	184.7 a	200.5 a
90/10	42.8 b	53.7 ab	70.2 b	83.1 b	91.1 b	102.6 b
80/20	41.2 b	50.6 b	62.5 b	70.9 c	77.9 c	86.7 c
70/30	30.2 c	40.8 c	49.9 c	55.1 d	64.2 d	75.1 c
DMSH	9.48	9.56	11.19	8.32	10.07	12.79

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

DMS: diferencia mínima significativa, [¥]Sustrato inicial.

Se observó que solo el pH presentó menor variación durante los 30 meses de cultivo, mientras que la CE, el contenido de MO y la CIC tuvieron mayores cambios. La CE en los primeros dos ciclos de cultivo (6 y 12 meses) se mantuvo en valores bajos a medios, mientras que después del tercero y hasta el final del quinto ciclo (30 meses) la CE indicó acumulación de sales en el sustrato a niveles por arriba del intervalo adecuado para las plantas, sin embargo el jitomate no mostro síntomas anormales por exceso de sales. La MO y la CIC mostraron un incremento significativo a lo largo de los ciclos de cultivo y sus valores fueron mayores a medida que se incrementó la cantidad de aserrín en el sustrato. De acuerdo con Bray y Weil (2002) y Havlin *et al.* (2005), el incremento en los contenidos de MO y CIC en el sustrato puede mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Considerando el balance entre las características químicas solo la CE podría limitar la reutilización del aserrín como sustrato durante varios ciclos de cultivo; sin embargo, el exceso de sales se debió más bien a un desequilibrio entre la aplicación de nutrimentos con el fertiriego, la absorción por la planta y el porcentaje de drenaje para lixiviar el exceso de sales. Varios autores (Urrestarazu, 2004; Abad *et al.*, 2005; Ansorena 1994) recomiendan aplicar más drenaje durante el cultivo y lavar las sales del sustrato antes de establecer las plántulas.

Los principales problemas que generan las sales para las plantas cultivadas se son el déficit hídrico (ya que al existir mas sales en solución el potencial hídrico disminuye y con ello aumenta la resistencia a la absorción de agua), las toxicidades de iones específicos (como el Na y Cl que producen quemaduras en el follaje) y las deficiencias nutrimentales (el exceso de Na reduce la absorción de otros cationes y el exceso de Cl

disminuye la absorción de otros aniones, NO_3^- principalmente) (Marschner, 2003; Taiz y Zeiger, 2003).

En general la salinidad tiene un efecto negativo sobre la absorción de nutrimentos, principalmente sobre aquellos que se mueven por flujo de masas como el Ca y B. Esto se debe a que la salinidad disminuye el gradiente de potencial hídrico entre el exterior e interior de la planta, lo que a su vez causa una disminución en la absorción y transporte del agua hacia los diferentes tejidos de la planta. En el caso de plantas pequeñas (plántulas y pequeñas herbáceas) donde la presión de raíz es importante para transportar agua y nutrimentos al follaje, la salinidad tiene influencia negativa, al disminuir el efecto de la presión de raíz (Marschner, 2003; Taiz y Zeiger, 2003; Salisbury y Ross, 2000). Sin embargo, no solo es importante la salinidad en sí misma, medida a través de la conductividad eléctrica, sino la composición mineral es importante ya que en algunos experimentos se ha encontrado que el efecto de la salinidad para inducir la deficiencia de calcio depende de la composición de la solución. Savvas y Passam (2002) observaron que cuando la salinidad se incrementó con todos los nutrimentos en la solución nutritiva se produjo mayor incidencia de necrosis apical de fruto de tomate (deficiencia de Ca) que cuando la salinidad se incrementó con solo NaCl, situación que se atribuyó a un mayor efecto antagónico del K que del Na sobre la absorción del Ca.

Otro problema de antagonismo con aguas salinas (ricas en NaCl) es el que se da entre el Cl^- y NO_3^- , siendo necesario incrementar de 3 a 5 meq·L⁻¹ de NO_3^- para compensar su disminución en la absorción por efecto del Cl^- (Urrestarazu, 2004). También se han observado efectos contrarios de la salinidad por NaCl sobre la absorción de P, en

algunos casos habiendo P disponible, se aumentó la absorción hasta niveles tóxicos mientras que en otros, la disminuyó causando deficiencias (Marschner, 2003). Se ha sugerido que con exceso de Na, este reemplaza al Ca en las membranas celulares y en consecuencia se altera la permeabilidad de membrana (efecto de viets) (Mengel y Kirkby, 2001).

2.4. CONCLUSIONES

Tanto en el aserrín como en las mezclas aserrín/tezontle, el pH presentó poca variación durante 30 meses de cultivo, manteniéndose en general en un intervalo de 5 a 6.5 que es adecuado para la producción de jitomate.

Después de 30 meses de cultivo, tanto en aserrín como en las mezclas aserrín/tezontle la conductividad eléctrica se incrementó a valores que indican acumulación de sales en el sustrato.

En general, a mayor proporción de aserrín y disminución de tezontle en la relación aserrín/tezontle aumentó a niveles favorables el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico durante 30 meses de cultivo continuo con jitomate.

Después de 30 meses de cultivo con jitomate en sustratos formados por aserrín de pino como componente principal, las características químicas de pH, contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico no limitaron la reutilización del sustrato.

2.5. LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P.; CARRION B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 299-354
- ABAD, B. M.; NOGUERA, P.; CARRIÓN, B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. URRESTARAZU (Ed). Tratado de cultivo sin suelo. 2nd ed. Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.
- ALARCÓN, V. A. 2000. Introducción a los cultivos sin suelo. Sistemas y sustratos, p 191. *In: Tecnología Para Cultivos de Alto Rendimiento. Universidad Politécnica de Cartagena (Ed).*Cartagena.
- ANSORENA, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- BRADY, N. C. AND R. R. WEIL. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall, Upper Saddle River N J. USA. 965 p.
- BUNT, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman Ltd London, England. 309 p.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- CHAPMAN, H. D. 1965. Cation exchange capacity. In: C. A. BLACK (ed). Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin. Agronomy 9: 891-900.
- EARL L. C. 1982. La ciencia y la tecnología sobre pulpa y papel. Ed. C.E.C.S.A. México. Pág 113-125.
- ETCHEVERES, B, J.; GOIBERG G.; LOPEZ R. R. M.; PADILLA C. J.; ALVARADO L. J.; HIDALGO M. C.; CRUS H. L.; GUERRERO P. A.; Y MIRABDA C. E. S/A. manual de Procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos. IRENAT-Colegio de Posgraduados. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.

- FERNANDEZ T. E. 1999. Evaluación de sustratos alternativos para el desarrollo de plántulas en tres especies de *Pinus* en vivero forestales. Tesis de licenciatura, DICIFO. UACH.
- HANDRECK, K. A.; N. BLACK. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544 p.
- HAVLIN, L. S., L. W. NELSON, AND D. J. BEATON. 2005. Soil fertility and fertilizer. 7th ed. Pearson and Prentice-Hall. New York. 515 p.
- JACKSON, M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Editorial Omega, Barcelona España.
- JAIMEZ A. A. 1985. Evaluación del aserrín de pino como sustrato hidropónico. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp.150.
- KIPP, J. A., WEVER, W. AND DE KREIJ, C. (EDS) (2000). International substrate manual, Elsevier International Business Information, PO Box 4, 7000 BA, Doetinchem, The Netherlands.
- LABRADOR, M. J. 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación. Editor Mundi Prensa. Madrid, España. 167 p.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. Acta Horticulturae 396: 273-284.
- MAHER, M.; PRASAD, M.; RAVIV, M. 2008. Organic Soilless Media Components. In Soilless Culture: Theory and Practice. RAVIV, M.; LIETH, J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United Stated of America. pp. 459-504.
- MARTÍNEZ, J. A. J. 2008. Evaluación de sustratos en la germinación y desarrollo de plántulas de Amarillis (*Hipeastrum sp.*) Tesis de Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. PP 29
- MATEO S, J. J. 2002. Potencial de aserrín como alimento para rumiantes y sustrato pa plantas. Tesis de Doctorado. Colegio de posgraduados, Montecillos, México. Pág 92.

- RAVIV, M.; WALLACH, R.; SILBER, A.; BAR-TAL, A. 2002. Substrates and their analysis. In Hydroponic production of vegetables and ornamentals. SAVVAS, D.; PASSAM, H. (Eds.). Athens: Embryo Publications. pp. 25-101.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- REINES, A. M., RODRÍGUEZ, A. C., SIERRA, P. A., Y VÁZQUEZ, G. M. M. 1998. Lombrices de tierra con valor comercial. Biología y Técnicas de Cultivo. Universidad de Quintana Roo. México. 60 p.
- ROBLEDO, S. E.; MALDONADO T. R. 2005. Manual de metodologías de análisis de suelo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 82 p.
- SAS INSTITUTE INC, 1998. SAS/STAT guide for personal computers. Version 8. Cary NC. USA 595 p.
- STEINER, A. 1984. The Universal Nutrient Solution. ISOC. Netherlands.
- SILBER, A., M. RAVIV. 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. Plant Soil 186: 353-360.
- SILBER, A. 2008. Chemical characteristics of soilless media. In: RAVIV, M.; LIETH, J. H. (eds). Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- STEVENSON, F.J. 1994. Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reactions (2nd ed). New York: John Wiley and Sons. 496 p.
- URRESTARAZU, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Editorial Mundi-Prensa. España. 914 p.
- VERHAGEN, J. B. G.M. 2009. Stability of growing media from a physical, chemical and biological perspective. Acta Horticultrae 819: 135-142.
- WARNCKE, D. D. 1990. Chapter 13. Testing artificial growth media and interpreting the results. In Soil testing and plant analysis. Third edition. Number 3 in the Soil

Science Society of America Book serie. Westerman, R. L. (ed.). Madison, WI. USA. pp. 337-357.

WARNCKE, D. D. 1995. Recommended test procedures for greenhouse growth media. In Sims, JT., y Wolf, M. A. (eds.). Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States. 2nd Ed. Northeastern Regional Publication Bulletin 493. Agricultural Experiment Station. University of Delaware, Newark. pp. 76-82.

WORRALL, R. 1978. The use of composted wood waste as a peat substitute. In: Acta Horticulturae 82: 79-86.

CAPITULO III

ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. III: INMOVILIZACIÓN NUTRIMENTAL

PINE SAWDUST AS SOILLESS SUBSTRATE. III: NUTRIENT IMMOBILIZATION

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la inmovilización nutrimental en sustratos formados por aserrín y mezclas aserrín/tezontle, se evaluó la concentración de N, P, K y Ca, así como los cambios en pH y conductividad eléctrica (CE) en los lixiviados del sustrato cultivado con jitomate (*Solanum Lycopersicon* L). Los sustratos se formaron con aserrín al 100 % (partículas ≤ 6 mm) y mezclas de aserrín/tezontle (70/30, v/v) con tres diferentes granulometrías: fina (≤ 3 mm), media (3 - 6 mm) y gruesa (6 - 12 mm). El riego se aplicó con tres soluciones nutritivas con concentraciones medias, altas y muy altas de macronutrientes (2, 3 y 4 dS·m⁻¹, respectivamente) considerando el equilibrio de Steiner (1984), las cuales generaron una conductividad eléctrica de 2, 3 y 4 dS·m⁻¹, respectivamente. Al combinar los cuatro sustratos con las tres soluciones nutritivas (factorial 4x3) se obtuvieron 12 tratamientos, los cuales se establecieron en un diseño completamente al azar con 6 repeticiones en dos hileras de cultivo dentro del invernadero. La unidad experimental consistió en una bolsa bicolor (blanco y negro) con 15 litros de sustrato y dos plantas de jitomate. La medición de pH y CE se realizó cada tercer día en los lixiviados de los sustratos y los análisis químicos de nutrientes se hicieron en muestras compuestas de lixiviado promedio de diez días, evaluándose a los 10, 20 30, 40, 50 y 60 días después del trasplante (ddt). Se presentó interacción entre

las relaciones aserrín/tezontle y CE para N, K y Ca, observándose mayor concentración de nutrientes en el lixiviado conforme se incrementó la CE de la solución nutritiva y disminuyó el diámetro de partícula del tezontle en la mezcla aserrín/tezontle. En los tratamientos con solución nutritiva de $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se encontraron concentraciones deficientes de N, P y Ca en los lixiviados durante los primeros 60 ddt, mientras que los tratamientos con soluciones nutritivas de 3 y 4 dS/m produjeron concentraciones de N, P y Ca en el lixiviado, similares o superiores a las aplicadas con la solución nutritiva, a partir de los 20 a 30 ddt. Se observó una alcalinización (pH 8 a 8.6) y una disminución de la CE en los lixiviados del sustrato debido a la inmovilización nutrimental. El aserrín sólo ó mezclas aserrín/tezontle (70/30, v/v) sin compostaje, constituye un sustrato adecuado para la producción de jitomate si se aplica una solución nutritiva con la concentración de nutrientes que satisfaga la demanda nutrimental de la planta y los requerimientos de inmovilización del sustrato.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: macronutrientes, pH, conductividad eléctrica, drenaje, lixiviados.

ABSTRACT

In order to evaluate nutrient immobilization in substrates formed by sawdust and mixtures of sawdust/volcanic sand (tezontle), we measured the concentration of N, P, K and Ca as well as the pH and electrical conductivity (EC) changes in the leachate of substrates where tomato plants (*Solanum Lycopersicon* L) were grown. The substrates were obtained with 100 % sawdust (diameter $\leq 6 \text{ mm}$) and mixtures of sawdust/volcanic sand (70/30, v/v) with three different particle sizes: fine ($\leq 3 \text{ mm}$), medium (3 - 6 mm)

and thick (6 - 12 mm). Water was supplied with three nutrient solutions which has medium, high and very high macronutrient concentrations according to Steiner nutrient solution, with a corresponding EC of 2, 3 and 4 dS·m⁻¹, respectively. The combination of the four substrates and the three nutrient solutions (factorial 4x3) resulted in 12 treatments, which were established in a completely randomized design with three replications inside the greenhouse. The experimental unit consisted in one bicolor plastic bag with 15 L of substrate and two tomato plants. In the leachate of substrates, pH and EC were measured each three days, while the chemical determinations of N, P, K and Ca were measured in a leachate composed sample at 10, 20, 30, 40, 50 and 60 days after transplant (*dat*). There was a significant interaction between substrate and EC for N, K and Ca. In general higher nutrient concentration in the leachate was observed when higher EC was present in the nutrient solution and the substrate had lower particle size. Treatments with 2 dS·m⁻¹ in the nutrient solutions resulted in low N, P and Ca concentrations in the leachate of substrates during 60 *dat*, whilst treatments with 3 and 4 dS/m resulted in similar or higher N, P and Ca concentration in the leachate than its concentration in nutrient solutions, after 20 or 30 *dat*. An increase in pH (8 to 8.6) and a decrease in EC in the leachate of substrates were observed due to nutrient immobilization. Sawdust or mixtures of sawdust/volcanic sand (70/30, v/v) without composting process, can be an optimal substrate to grow tomato plants if a nutrient solution that satisfies nutrient plant requirements and substrate nutrient immobilization is applied.

ADDITIONAL INDEX WORDS: macronutrients, pH, electrical conductivity, drainage, leachate

3.1. INTRODUCCIÓN

Aunque el aserrín tiene ciertas aplicaciones en la producción de adobes (tabiques), combustibles, camas para corrales y producción de papel de baja calidad, actualmente su uso es limitado. Como una medida de control para la calidad del ambiente, existe una regulación federal que prohíbe la quema del aserrín, por lo que en los aserraderos se regala o se vende a precios mínimos, o bien se tira en forma clandestina para evitar la acumulación (Mateo, 2002). El aserrín es un subproducto estable y su acumulación produce un problema serio de contaminación ambiental, en particular en los suelos donde se deposita (Starbuck, 1997). Se ha encontrado que una capa de aserrín de 5 cm de espesor se descompone en un periodo de 5 a 8 años (Cortez, 1990).

El aserrín de pino se ha utilizado como medio de cultivo tanto en mezclas como componente único del sustrato (Raviv y Lieth, 2008). Es el residuo de madera más común y más ampliamente usado, ya sea directamente o compostado, observándose mejor respuesta por los cultivos cuando es compostado. El cultivo de hortalizas en aserrín es común en las zonas que poseen una importante industria forestal (Resh, 1998; Maher *et al.*, 2008). En varios cultivos se ha observado que las tasas de crecimiento del follaje, con una proporción de 50 a 80 % de compost de aserrín, fueron superiores que las obtenidas con turba en las mismas condiciones de cultivo. El compost de aserrín en proporciones de 50 a 100 % como sustrato ha dado buenos resultados en cultivos de invernadero como jitomate, pepino, lechuga, nochebuena, y plantas de follaje (Parks *et al.*, 2004; Prasad y Maher, 2004; Jackson *et al.*, 2008).

La calidad del aserrín depende del tipo de madera que se utiliza y de los aditivos (conservadores) que hayan sido o no añadidos, por lo que es importante realizar

pruebas de fitotoxicidad para determinar la calidad agronómica del material (Nelson, 1991; Winsor y Schwarz, 1990).

En sustratos de naturaleza orgánica no inertes, como consecuencia del ataque de los microorganismos, la materia orgánica se descompone y experimenta una serie de cambios en su composición, hasta alcanzar una cierta estabilidad biológica (Alarcón, 2000). De manera global, la descomposición de la materia orgánica en los medios de cultivo es desfavorable desde el punto de vista hortícola, debiéndose tomar precauciones para minimizar sus efectos sobre las plantas. La disponibilidad de compuestos biodegradables (carbohidratos, ácidos grasos y proteínas) determina la velocidad de descomposición. Si el cultivo es de ciclo largo, 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 (Abad *et al.*, 2005).

El aserrín y las virutas de pino se descomponen muy lentamente debido al elevado contenido de lignina y compuestos lignocelulósicos, lo cual permite su reutilización como sustrato y con esto reducir los costos de producción en cultivos intensivos bajo invernadero (Mastalerz, 1977). Prasad y Maher (2004) reportan que para producción de plantas de vivero, el compost de aserrín puede sustituir con éxito a la turba. Los compuestos fenólicos que resultan de la degradación de los compuestos orgánicos, especialmente lignina, junto con las sustancias húmicas tienen un efecto positivo sobre el crecimiento vegetal (Abad *et al.*, 2005). Como propiedades biológicas, el aserrín tiene un efecto supresor en el desarrollo de microorganismos patógenos, por lo que presenta menos posibilidades de que se propaguen enfermedades de raíz producidas por *Fusarium*, *Streptomyces*, *Rizoctonia* y *Phytium* (Resh, 2001).

A pesar de que el aserrín tiene una relación C/N muy alta (Resh, 2001) y en condiciones naturales es difícil su descomposición (Cortez, 1990), cuando se somete a cierto manejo de fertilización se incrementa su degradación a través del tiempo, y en consecuencia, se alteraran sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Los principales problemas que se tienen con el uso de sustratos de residuos de madera con contenido bajo de lignina, es la alta tasa de inmovilización de N, lo que obliga a utilizar fertilizantes nitrogenados de lenta liberación, o durante el compostaje a adicionar N y otros nutrimentos (Nelson, 1991), como P y S, que aunque menos importantes, también deben considerarse en la descomposición de los residuos y en los problemas de inmovilización nutrimental cuando se usan materiales orgánicos (Havlin *et al.*, 2005). Por ejemplo, Gruda *et al.* (2004) indican que en caso de no añadirse nitrógeno durante el compostaje, tendrá que agregarse en la etapa de cultivo hasta 400 mg L^{-1} de nitrógeno, para contrarrestar su inmovilización. Por otra parte, Prasad (1997) encontró que se inmovilizaron $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de nitrógeno en aserrín en un periodo de 5 semanas de incubación.

La relación C/N se usa tradicionalmente como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y de su estabilidad. Los daños que aparecen en las plantas cultivadas sobre materiales orgánicos inmaduros son debidos tanto a una inmovilización del nitrógeno 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 y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares y al oxígeno para la respiración (Urrestarazu, 2004). Una relación C/N entre 20 y 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato y se considera como un índice de materiales

orgánicos maduros y estables (Cadahía, 2005). También se han señalado algunos resultados negativos atribuidos al efecto de sustancias fitotóxicas como las resinas y taninos en los aserrines frescos ó mal compostados (Handreck y Black, 2005; Raviv y Lieth, 2008).

En el proceso de inmovilización de nitrógeno, el N mineral es transformado a N orgánico en el tejido microbiano y ocurre como resultado de la alta relación C/N de los residuos orgánicos. Debido a que las bacterias construyen su protoplasma celular con 8 a 10 moléculas de carbono por cada molécula de N, al no existir suficiente N para el proceso de síntesis celular, los microorganismos recurren al N-mineral (NH_4^+ ó NO_3^-) para continuar su proceso de utilizar a los residuos como fuente de energía, reduciendo así las reservas de N-mineral, proceso que se conoce como inmovilización (Castellanos *et al.*, 2000).

La inmovilización de N es un tipo de competencia entre la planta y los microorganismos por las reservas del N-mineral. En realidad, la inmovilización es un fenómeno parcial, pues posteriormente se revierte una vez que la relación C/N empieza a disminuir debido a que mediante la respiración microbiana (liberación de CO_2) se reduce el contenido de carbono, y por ende, se reduce la relación C/N y se inicia el proceso de mineralización neta (Castellanos *et al.*, 2000).

Para una adecuada descomposición de los residuos orgánicos se requiere de una mezcla de materiales de diferente composición o de la adición de nutrimentos a través de fertilizantes. Además del N, la adición de P es importante para asegurar la reproducción y acción de los microorganismos. La adición de Ca es importante para

estabilizar el pH y para saturar la mayor parte del complejo de intercambio del humus una vez transformado el material original (Handreck y Black, 2005).

Las plantas que crecen en aserrín como sustrato pronto tendrán poco nitrógeno disponible a menos que sea suministrado continuamente. La deficiencia de N aparecerá más rápido en materiales pobres en N de rápida descomposición que en materiales que resisten la descomposición, pero desaparecerá en corto tiempo. Sin embargo, en materiales como el aserrín de lenta descomposición, la deficiencia inicial de N no es tan severa pero durara un largo periodo de tiempo. Por ello se recomienda compostar el aserrín, aunque si no se adiciona N, se presentará también una inmovilización gradual de este nutrimento (Handreck y Black, 2005).

Uno de los principales problemas del compost de aserrín es la variación entre lotes en la liberación gradual del N. Esto se debe a un inadecuado control del proceso de compostaje que conduce a una variación en el grado de estabilización y maduración del aserrín compostado. Las compostas de aserrín de madera dura tienen altas tasas de inmovilización de N para usarse con éxito en las mezclas de sustratos para producción de plantas. Su inclusión en la mezcla no debería exceder al 20 % con base a volumen; sin embargo, se puede utilizar mayor proporción si se suministra N a la mezcla (Handreck y Black, 2005).

El aserrín cuando presenta problemas de exceso de humedad, debe mezclarse con materiales que aporten aireación, tanto en el compostaje como en el cultivo, puesto que el material puede compactarse produciendo procesos anaeróbicos de fermentación que dan lugar a la acumulación de algunos ácidos orgánicos. Además el material debe ser

desechado después de dos ciclos de cultivo, para evitar gastos de esterilización en el control de patógenos (Winsor y Schwarz, 1990).

La relación C/N del aserrín varía entre 250 a 800 con una media de 500. A medida que el material se descompone el contenido de C disminuye. La velocidad de descomposición depende del contenido de lignina, la cual es resistente al ataque de microorganismos. La celulosa y hemicelulosa son relativamente fáciles de descomponer, pero las capas de lignina protegen a la celulosa de la descomposición. Por ello el N agregado para balancear el C de las celulosas y ligninas se perderá por lixiviación. La relación C/N inicial, después del compostaje quedara alrededor de 80 a 100. Por lo tanto existirá una demanda continua de N una vez que la composta de aserrín se pone en los contenedores como sustrato para el desarrollo de las plantas, ya que la descomposición continúa. Después de varios meses a un año, la relación C/N habrá disminuido a 40 o 30. Durante este periodo y más allá de este, el aserrín continuará inmovilizando N de la solución. En la mezcla del contenedor, es esencial que se siga suministrando N y P en una relación P/N de 0.15 para contrarrestar esta disminución de nutrimentos (Handreck y Black, 2005).

Entre las grandes ventajas del aserrín están su versatilidad en uso, ya sea solo o en mezclas, con o sin compostaje. Además, siempre ha sido barato y fácil de conseguir en las zonas de grandes industrias forestales (Resh, 2001). El manejo del aserrín es más complicado que otros materiales orgánicos, pero con un cuidado especial sobre la nutrición es posible obtener plantas de alta calidad (Handreck y Black, 2005).

Aunque el tratamiento de residuos orgánicos para formar compost es una alternativa para estabilizar los abonos orgánicos y hacerlos menos peligrosos por problemas de fitotoxicidad (Capistrán *et al*, 1999), el proceso de transformación encarece la obtención de estos sustratos; además en el caso de materiales de madera se requiere adicionarles nutrimentos durante el proceso de compostaje para evitar deficiencias de N y otros nutrimentos (Handreck y Black, 2005).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la inmovilización nutrimental en el sustrato formado por aserrín de pino y mezclas aserrín/tezontle, para determinar la concentración de nutrimentos que deben aplicarse en la solución nutritiva para el cultivo del tomate cuando se usa este material sin compostaje previo.

3.2. MATERIALES Y METODOS

3.2.1. Ubicación del estudio

El presente experimento se llevó a cabo en un invernadero de vidrio con control de clima a través de extractores de aire húmedo y calefacción con calentadores eléctricos que suministran aire, localizado en la Universidad Autónoma Chapingo. La altitud media es de 2251 msnm. El clima de la región, según la clasificación climática de Köppen modificada por García (1987) es C(Wo)(W)b(i'')g, que significa templado con verano fresco largo, cuya precipitación invernal es inferior al 5 % con una oscilación térmica de 5 a 7 °C y el mes con temperatura más elevada es mayo. La temperatura media anual es de 15 °C, la precipitación media anual es de 664.8 mm con un promedio de 96 días de lluvia, ocurriendo la máxima en el mes de julio y la mínima en enero.

3.2.2. Material vegetal utilizado

Se utilizó el híbrido de jitomate Tequila (F1) de la Compañía Vilmorin, cuyas características son precocidad de 75 a 85 días, poco follaje y entrenudos cortos, buena cobertura y ventilación; fruto ovoide muy consistente de color rojo intenso, brillante, tamaño homogéneo, con larga vida de anaquel y buen sabor. Es de excelente fructificación con una producción elevada. Tiene resistencia al Virus del Mosaico del Tabaco, *Verticillium* sp, *Fusarium* raza 1 y a nemátodos.

Las plántulas fueron obtenidas en charolas para germinación de 200 cavidades usando turba como sustrato. El trasplante se hizo a los 30 días después de la siembra cuando las plántulas tenían en promedio 15 cm de altura.

3.2.3. Materiales empleados como componentes de los sustratos

Se utilizó aserrín pino de pino (*Pinus* sp) obtenido directamente de aserradero y tamizado con malla de 6 mm de diámetro. También se utilizó tezontle con diferente granulometría. Para ello se tamizó tezontle con malla de 12, 6 y 3 mm. A las partículas que quedaron entre las mallas 12 y 6 mm se le denominó tezontle grueso; las que quedaron entre 6 y 3 mm, tezontle medio; y las que pasaron por la malla de 3 mm, tezontle fino. Con estos materiales se realizaron mezclas con aserrín en diferentes proporciones.

3.2.4. Solución nutritiva

Las soluciones nutritivas que se usaron correspondieron a tres diferentes concentraciones de nutrimentos. La primera de acuerdo con la solución nutritiva

universal de Steiner (1984) modificando H_2PO_4^- a $1.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ y $\text{SO}_4^{=}$ a $6.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, con una concentración total de $20 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ de aniones y cationes. La segunda y tercera solución nutritiva se prepararon a 30 y 40 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ (Cuadro 1). A estas soluciones nutritivas se les incrementó de manera proporcional la concentración nutrimental, conservando los equilibrios de cationes y aniones que se establece en la solución nutritiva universal antes mencionada. La conductividad eléctrica de estas soluciones fue aproximadamente de 2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente. El pH se ajustó a 6 en los tres casos. Se empleo agua potable y se consideró la composición química de la misma para ajustar las soluciones nutritivas.

Cuadro 1. Composición química del agua y concentración de macronutrientes de las soluciones nutritivas evaluadas en el experimento.

	Cationes ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$)						Aniones ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$)					
	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	Na^+	H^+	NO_3^-	H_2PO_4^-	$\text{SO}_4^{=}$	HCO_3^-	$\text{CO}_3^{=}$	Cl^-
AGUA*	0.2	1.75	1.25	--	1.8	--	--	--	1.50	3.0	--	0.5
SN 1	7	8.5	4.0	0.5	--	--	12	1.5	6.5	--	--	--
Aporte	6.8	6.75	2.75	0.5	--	+2.5	12	1.5	5.0	-2.5	--	--
SN 2	9.8	12.6	5.6	2.0	--	--	20	2	8	--	--	--
Aporte	9.6	10.85	4.35	2.0	--	+2.5	20	2.0	6.5	-2.5	--	--
SN 3	13.6	17.6	7.8	3.0	--	--	29	3	10	--	--	--
Aporte	13.4	15.85	6.55	3.0	--	+2.5	29	3.0	8.5	-2.5	--	--

*Análisis químico del agua de riego. SN: solución nutritiva

3.2.5. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se formaron utilizando un arreglo factorial 4x3. Uno de los factores correspondió a 4 sustratos, uno formado por aserrín con diámetro de partícula ≤ 6 mm y tres mezclas aserrín/tezontle en proporciones 70/30, pero variando la granulometría del tezontle con diámetros de partícula ≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm. El segundo factor correspondió a tres concentraciones de nutrimentos en la solución nutritiva que dieron una CE de 2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Cuadro 1). La combinación de factores y niveles dio los siguientes tratamientos:

A2 = 100 % aserrín + solución nutritiva con 2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A3 = 100% aserrín + solución nutritiva con 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A4 = 100% aserrín + solución nutritiva con 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TF2 = Aserrín/tezontle fino + solución nutritiva con 2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TF3 = Aserrín/tezontle fino + solución nutritiva con 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TF4 = Aserrín/tezontle fino + solución nutritiva con 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TM2 = Aserrín/tezontle medio + solución nutritiva con 2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TM3 = Aserrín/tezontle medio + solución nutritiva con 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TM4 = Aserrín/tezontle medio + solución nutritiva con 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TG2 = Aserrín/tezontle grueso + solución nutritiva con 2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TG3 = Aserrín/tezontle grueso + solución nutritiva con 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

A/TG4 = Aserrín/tezontle grueso + solución nutritiva con 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$

Se usaron bolsas de plástico bicolor (blanco-negro) de 15 L de capacidad y 30 cm de altura, de las cuales se llenaron 18 bolsas con cada sustrato y se trasplantaron dos plántulas de jitomate en cada una. Las unidades experimentales se distribuyeron de acuerdo a un diseño completamente al azar, con un total de 12 tratamientos y 4 repeticiones.

3.2.6. Instalación y desarrollo experimental

El experimento se instaló en dos camas, cada una con dos hileras de bolsas. El fertiriego consistió en 8 riegos diarios con un sistema de goteo, colocando una estaca por planta con gasto de $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. La duración de cada riego varió de 2 a 6 min dependiendo de la edad de la planta y condiciones ambientales. Para el control del riego diario se considero un drenaje de 15 a 25 %. Los cuidados principales consistieron en control preventivo de mosquita blanca y de enfermedades producidas por *Phytoptora* sp, *Phytium* sp, *Rhizoctonia* sp, así como las labores de manejo de la planta (eliminación de brotes laterales, tutoreo, deshojado, polinización) para conducir el cultivo hasta formar 6 a 7 racimos.

3.2.7. Variables medidas

Las variables que se midieron durante el experimento fueron:

- Volumen de agua aportado y drenado en cada unidad experimental. Para ello se utilizaron probetas de 250, 500 y 1000 ml.

- pH y CE de la solución drenada en tres repeticiones de cada tratamiento. Para ello se utilizó un potenciómetro marca Hanna Instruments, modelo HI 98130.
- Concentración de N, P, K y Ca en la solución drenada. Para N se aplicó el método micro-kjeldahl (Bremer, 1965), en P el de molibdo-vanadato para desarrollo de color y se midió en un espectrofotómetro a 420 nm (Bauch & Lomb modelo Spectronic 20), el K se determinó con un espectrofotómetro de flama marca Corning (Flame-Photometer 410) y el Ca con un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC modelo Avanta. Los procedimientos de las metodologías están indicadas en Etchevers *et al.* (s/f) y Robledo y Maldonado (2005).

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar la interacción entre factores, así como pruebas de medias por factor en las diferentes variables, mediante la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$). Para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1998).

3.3. RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2 se observan diferencias altamente significativas para todos los nutrimentos y para la mayoría de las fechas de muestreo estudiadas con respecto a la interacción sustrato y conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva. También para casi todas las fechas estudiadas se encuentran diferencias significativas en la concentración de N, K y Ca en el lixiviado debido al efecto de los factores de manera individual (sustrato y CE). La concentración de P fue la menos afectada por la interacción y por cada factor estudiado, presentando mayor efecto el factor CE,

mientras que la interacción sólo fue significativa a los 20 y 30 días después del trasplante (ddt); el efecto del sustrato fue significativo a los 20, 40, 50 y 60 ddt.

En virtud de estos resultados, a continuación se hace un análisis más detallado de los factores estudiados y de su interacción.

3.3.1. Interacción entre el sustrato (S) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración de nutrimentos en los lixiviados del sustrato

En el Cuadro 2 se observa que, con excepción del P, para la mayoría de los nutrimentos (N, K, Ca) estudiados en todas las fechas de muestreo (10, 20, 30, 40, 50 y 60 ddt), hubo efecto altamente significativo de la interacción entre el sustrato y la CE en la solución nutritiva.

Cuadro 2. Niveles de significancia de las variables nutrimentales medidas en los sustratos regados con solución nutritiva con diferente conductividad eléctrica durante dos meses de cultivo.

Factor	N						P						K						Ca					
S CE SxCE CV	Días después del trasplante (ddt)																							
	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
	**	**	**	**	**	**	ns	**	ns	**	**	**	**	ns	ns	**	**	ns	**	**	**	**	**	**
	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	*	*	**	**	**	**	ns	*	ns	*	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	4.9	3.1	7.1	2.5	2.1	2	86	13	23	0.5	3.7	8.3	3.1	12	8	7.6	8.4	14	6.9	6.1	2.3	4.2	7.8	2.9

S: factor sustrato, CE: factor conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), CV: coeficiente de variación, **Efecto significativo con $p < 0.01$, *Efecto significativo con $p < 0.05$, ns: efecto no significativo.

Nitrógeno. En la Figura 1 se observa en los diferentes sustratos que a mayor CE en la solución nutritiva (SN) hubo mayor concentración de N en el lixiviado de todos los

tratamientos. La mayor diferencia en concentración, entre el N aportado en la SN y el N que salió en los lixiviados, se dio en los primeros días del cultivo (10, 20 y 30 ddt) indicando mayor inmovilización de N, pero a medida que transcurrió el tiempo la concentración de N en el lixiviado fue aumentando hasta que en algunos tratamientos (aserrín/tezontle fino con 3 y 4 de CE) fue superior a la concentración de N en la SN. A los 60 ddt, con excepción del tratamiento con aserrín/tezontle medio con CE de 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (A/TM), la concentración de N en el lixiviado de todos los tratamientos fue muy similar a la de la SN. Este comportamiento indica que (suponiendo igual volumen de agua drenada en todos los tratamientos, que en promedio estuvo entre 15 a 25 % en relación al volumen aportado) a mayor aporte de nutrimentos hubo mayor consumo de N ya sea por la planta o por los microorganismos en el sustrato. Los datos anteriores son congruentes con lo observado por Contin *et al.* (2008) quienes reportan que en un sustrato a base de composta, la cantidad de N mineral extraíble fue baja al inicio, pero después de 56 días de estar el sustrato en condiciones de alta humedad y temperatura de 25 °C, se dio un incremento en el N-NO_3 liberado. Al respecto, Prasad (1997) encontró una inmovilización de nitrógeno por la actividad microbiana aproximadamente de $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de nitrógeno durante 5 semanas de incubación al evaluar el crecimiento de cultivos en fibra de madera, mientras que Gruda *et al.* (2000) indican que tendrá que agregarse hasta $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de nitrógeno soluble en agua, para contrarrestar la inmovilización del nitrógeno usando aserrín como sustrato.

Handreck y Black (2005) indican que las plantas que crecen en aserrín como sustrato pronto tendrán poco nitrógeno disponible a menos que éste sea suministrado continuamente. La deficiencia de N aparecerá más rápido en aserrines pobres en N de

rápida descomposición que en aserrines que resisten la descomposición, pero desaparecerá en corto tiempo. En materiales de lenta descomposición, la deficiencia inicial de N no es tan severa pero durará un largo periodo de tiempo. Durante este periodo y más allá de este, el aserrín continuará inmovilizando N de la solución. Por ello, una vez puesto el sustrato en el contenedor, es esencial que se siga suministrando N y P en una relación P/N de 0.15 para contrarrestar esta disminución de nutrimentos.

Una vez puesto el aserrín en los contenedores, habrá condiciones de humedad, temperatura y nutrimentos necesarios para la descomposición biológica (Raviv *et al.*, 2002). Por ello se requiere un suministro continuo de nutrimentos, en especial N y P que servirán para la alimentación de los microorganismos y la formación de humus. Si la cantidad de N y P es insuficiente la inmovilización de estos nutrimentos se manifestará en deficiencias para el cultivo (Raviv *et al.*, 2002; Handreck, 1996).

Fósforo. En la Figura 2 se observa en los diferentes sustratos que durante los primeros 20 ddt la mayor CE de la SN y en consecuencia la mayor cantidad de P, no tuvo efecto en la concentración de P en el lixiviado, pero de los 30 a 60 ddt a mayor CE en la solución nutritiva hubo mayor concentración de P en el lixiviado de todos los tratamientos. De manera similar a N, la mayor diferencia en concentración, entre la solución nutritiva y los lixiviados, se dio en los primeros días del cultivo (10, 20 y 30 ddt) indicando mayor inmovilización o retención de P, pero a medida que transcurrió el tiempo (40, 50 y 60 ddt) la concentración de P en el lixiviado aumentó gradualmente, pero sin llegar a ser superior a la concentración de P en la solución nutritiva (SN). De acuerdo con información del Cuadro 2, la concentración de P en el lixiviado, para las tres últimas fechas, se explica principalmente por la CE de la SN, ya que no hubo

interacción entre factores estudiados. Este comportamiento indica que, independientemente del volumen de agua drenada, en los primeros 30 ddt la movilidad del P depende de su interacción con el medio de crecimiento de las plantas. Está ampliamente documentada la baja movilidad que tiene el P en el suelo (Barber, 1995; Havlin *et al.*, 2005; Megel y Kirkby, 2001; Marschner, 2003) y aunque en el caso de sustratos se asume mayor movilidad que en el suelo (Ansorena, 1994; Burés, 1997) algunas investigaciones demuestran que los porcentajes de P perdidos en la solución drenada son menores a los porcentajes que se pierden de los demás macronutrientes (N, K, Ca y Mg) (Ojodeagua *et al.*, 2008; Pineda *et al.*, 2009).

La disponibilidad de P en la rizósfera determina el crecimiento y producción de los cultivos. Las fuertes interacciones entre los iones ortofosfato (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) con los constituyentes de la fase sólida continuamente reducen la cantidad de P en solución después de la fertilización al sustrato. Los dos mecanismos involucrados son: 1) reacciones electrostáticas rápidas (segundos o minutos) de adsorción en la fase sólida, debido a la alta afinidad del P por las superficies con carga positiva, y 2) formación lenta (horas o días) de nuevos compuestos de P-metales (precipitación), con Al, Fe y Mn en pH ácido y con Ca y Mg en pH alcalino (Silber, 2008). De esta manera, la disponibilidad de P puede ser muy limitada inmediatamente después de la aplicación de P al sustrato. Por ejemplo, en tezontle se ha encontrado que la cantidad de P en solución depende del pH y de la concentración de Al^{3+} y Ca^{2+} en la solución. A pH menor de 5.5 domina la adsorción durante los primeros minutos y después la formación de compuestos con Al y Fe, mientras que a pH arriba de 7, si la concentración de P no excede a $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ la adsorción domina en los primeros minutos y después se da la precipitación con Ca y Mg. En varios estudios se han determinado las curvas de

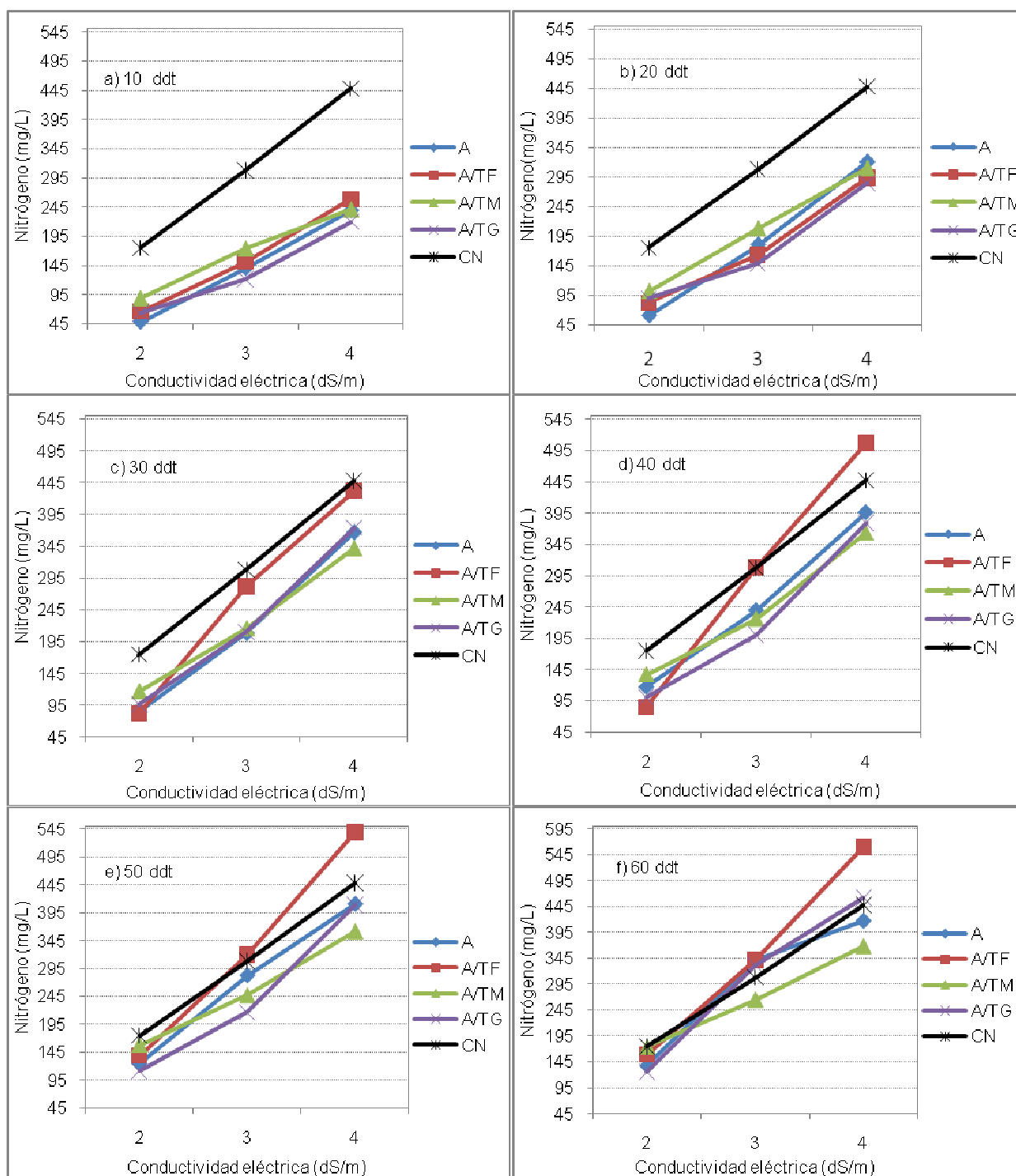
adsorción de fosfatos para tezontle negro, rojo y amarillo. Se encontró una capacidad de adsorción de 53, 148 y 840 mg·kg⁻¹ de sustrato (Ravi *et al.*, 2002; Silber y Raviv, 1996). También Yeager y Wrigth (1982) y Ogden *et al.* (1987) observaron una alta retención de P por sustratos a base de cortezas de pino con una disminución en el crecimiento de las plantas debido a la baja disponibilidad de P. Para disminuir este problema, Silber *et al.* (2003, 2005) y Silber (2008) disminuyeron el tiempo entre adiciones consecutivas de P con el incremento en la frecuencia del fertirriego, con ello lograron aumentar la disponibilidad de P en la rizósfera y la absorción por las plantas. Alternativamente, Silber (2008) indica que la adición de compuestos orgánicos estabilizados como las compostas, que contienen sustancias húmicas y fúlvicas, a los sustratos que contienen tezontle, pueden reducir significativamente la retención de P por el sustrato. Handreck y Black (2005) indican que en general el aserrín de pino tiene contenidos bajos de P, por lo que es necesario adicionar algo de P para facilitar su descomposición (compostaje), e incluso la mayor parte de este P no estará disponible para las plantas después del compostaje, ya que el P estará formando parte del humus.

Potasio. En la Figura 3 se observa en los diferentes sustratos que a mayor CE en la solución nutritiva hubo mayor concentración de K en el lixiviado de todos los tratamientos. De manera contrastante a N y P, para K existe poca diferencia en concentración entre la solución nutritiva y los lixiviados durante las diferentes fechas de muestreo (10 a 60 ddt), indicando que la concentración de K en la solución del sustrato depende principalmente del K aportado en la SN. De manera general, durante los primeros 50 ddt, en la mayoría de los tratamientos, la concentración de K fue similar o estuvo ligeramente por debajo de la concentración en la SN y sólo a los 60 ddt la

concentración de K superó ligeramente a la concentración de la SN. Este comportamiento indica que el K participa poco en procesos de inmovilización o retención como los observados para N y P. La ligera disminución de K observada durante las primeras fechas estudiadas quizás se deba a la retención en el complejo de intercambio (CIC) como lo han sugerido Raviv y Lieth (2008) en materiales de madera, además del aprovechado por la planta. Es importante notar que a diferencia de N y P que mostraron concentraciones deficientes (menores de 100 y 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente) para un crecimiento adecuado de las plantas (Urrestarazu, 2004; Jones, 2005) durante los primeros 30 ddt en los tratamientos con 2 de CE principalmente, para el caso del K, las concentraciones en la solución drenada estuvieron en el intervalo adecuado (200 a 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (Jones, 2005) o por arriba de este, desde el inicio del cultivo en todos los tratamientos.

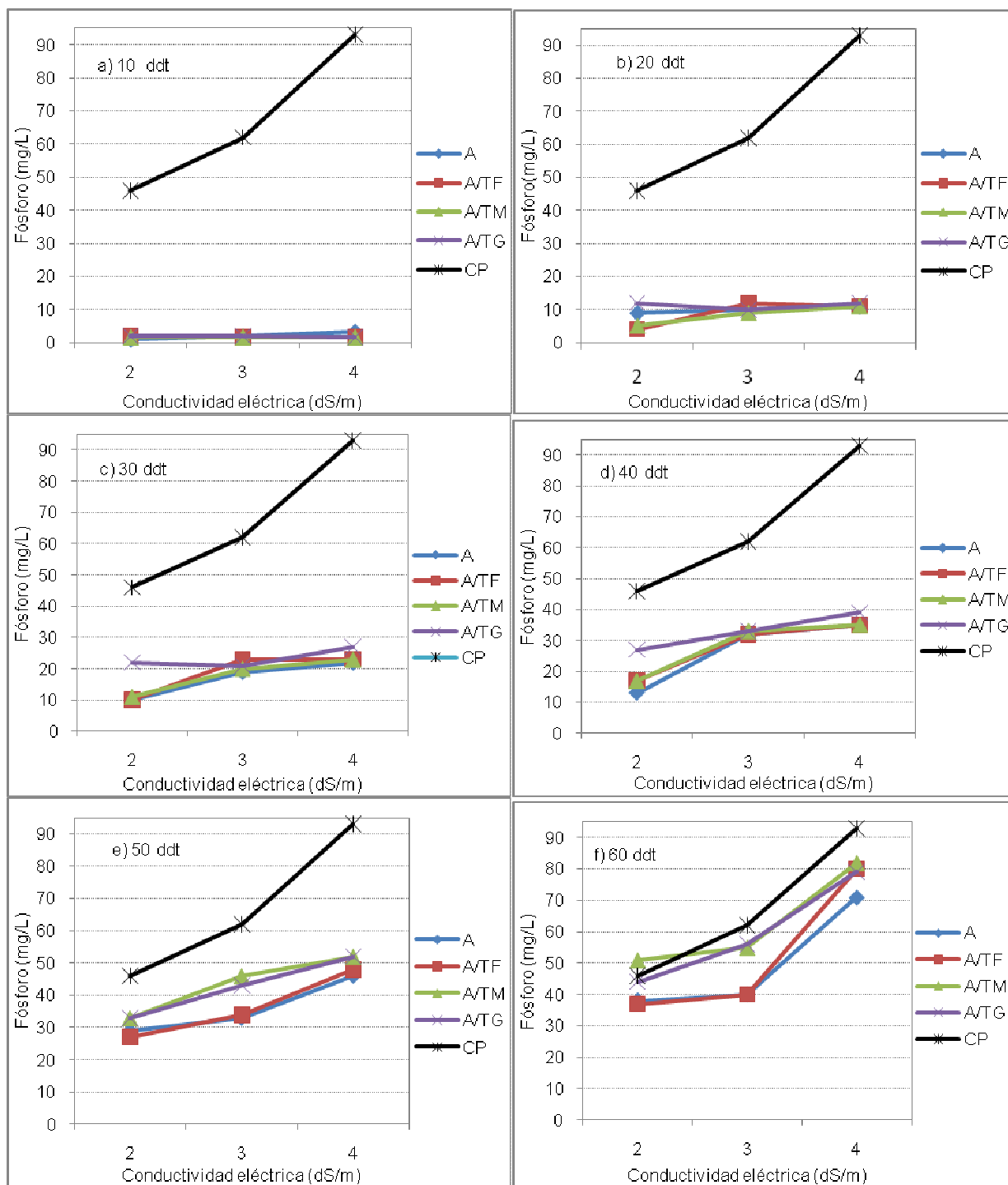
Calcio. En la Figura 4 se observa en los diferentes sustratos que a mayor CE en la SN hubo mayor concentración de Ca en el lixiviado de todos los tratamientos. Durante los primeros 30 ddt, de manera similar a N y P se observan diferencias importantes en la concentración de Ca en el lixiviado de todos los tratamientos en comparación con la concentración de la SN, lo que contrasta con lo observado para K. Posteriormente, a los 40, 50 y 60 ddt en la mayoría de los tratamientos, la concentración de Ca en el lixiviado estuvo ligeramente por debajo o similar a la concentración en la SN, incluso a partir de los 40 ddt los tratamientos con aserrín/tezontle fino (A/TF), mostraron concentraciones de Ca por arriba de la SN. Este comportamiento indica que el Ca participó más que el K en procesos de inmovilización o retención por el sustrato como los observados para N y P (Figuras 1 y 2). La disminución en la concentración de Ca durante las primeras fechas estudiadas (10 a 30 ddt), además del aprovechado por la

planta, quizás se deba a la mayor retención de Ca que otros cationes en el complejo de intercambio (CIC) como lo ha sugerido Raviv y Lieth (2008), quienes indican que algunas fibras de madera tienen niveles bajos de P extraíble, pero otros macro y micronutrimientos extraíbles son superiores a los solubles en agua, lo que indica la presencia de sitios de intercambio en la fibra de madera. La concentración de Ca (menor de $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) medida en los primeros 30 ddt en los tratamientos con CE de 2 ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) se considera deficiente para un crecimiento adecuado de las plantas (Urrestarazu, 2004; Jones, 2005). Al respecto, Abad *et al.* (2005) indican que la concentración adecuada de Ca en el extracto de saturación del sustrato debe estar arriba de $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Si se toma en cuenta este valor de referencia, sólo los tratamientos con CE de 3 o 4 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ después de los 40 ddt tenían una concentración adecuada en el medio de crecimiento.



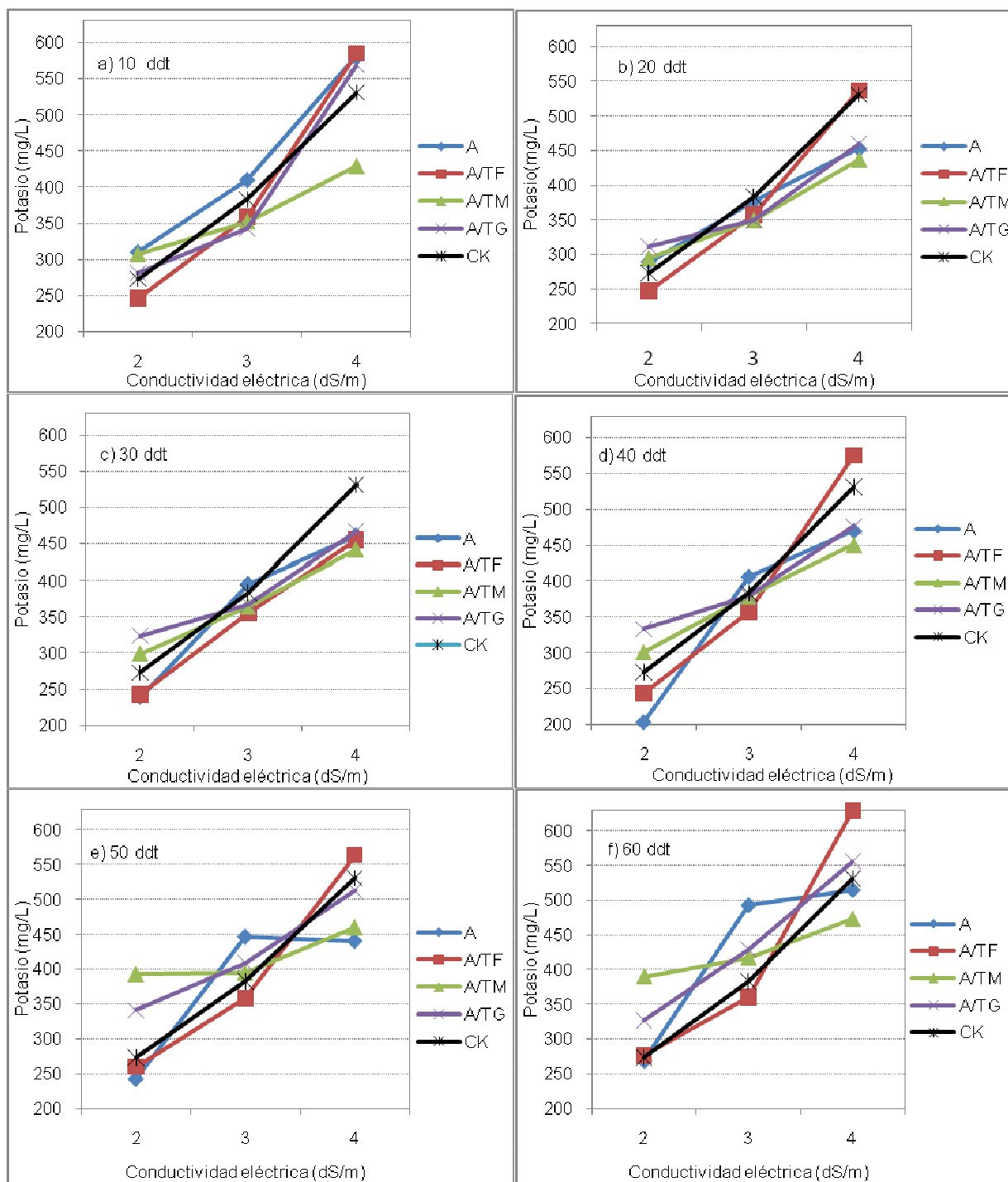
A: aserrín, A/TF: aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm), A/TM: aserrín/tezontle medio (3 - 6 mm), A/TG: aserrín/tezontle grueso (6 - 12 mm), CN: concentración de N en la solución nutritiva aplicada con el riego.

Figura 1. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de nitrógeno en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.



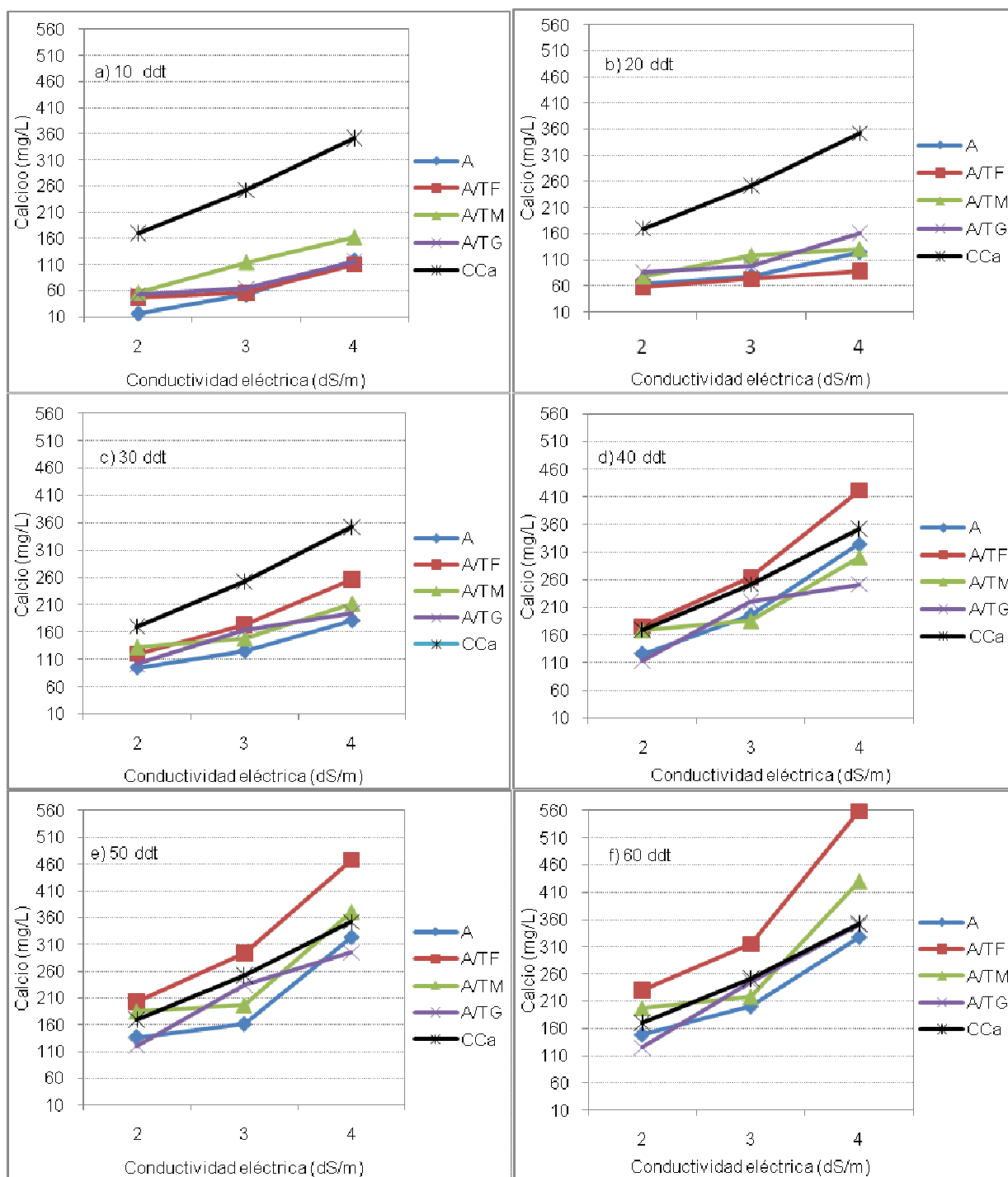
A: aserrín, A/TF: aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm), A/TM: aserrín/tezontle medio (3 - 6 mm), A/TG: aserrín/tezontle grueso (6 - 12 mm), CP: concentración de P en la solución nutritiva aplicada con el riego.

Figura 2. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de fósforo en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.



A: aserrín, A/TF: aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm), A/TM: aserrín/tezontle medio (3 - 6 mm), A/TG: aserrín/tezontle grueso (6 - 12 mm), CK: concentración de potasio en la solución nutritiva aplicada con el riego

Figura 3. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de potasio en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.



A: aserrín, A/TF: aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm), A/TM: aserrín/tezontle medio (3 - 6 mm), A/TG: aserrín/tezontle grueso (6 - 12 mm), CCa: concentración de calcio en la solución nutritiva aplicada con el riego

Figura 4. Efecto de la conductividad eléctrica (2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en la solución nutritiva y relaciones aserrín/tezontle con diferente diámetro de partícula, sobre la concentración de calcio en el lixiviado durante 60 días después del trasplante (ddt) de jitomate.

3.3.2. Efecto del sustrato sobre la concentración de nutrimentos en los lixiviados

En los Cuadros 3, 4, 5 y 6 se presentan los efectos del factor sustrato para las concentraciones de nutrimentos en los lixiviados del sustrato. Se observa un aumento en la concentración de N, P, K y Ca a través del tiempo (10 a 60 ddt) en todos los sustratos. Dentro de las fechas de muestreo existen diferencias significativas entre sustratos, lo que podría estar influido por la variación, aunque mínima, en la cantidad de solución aportada por el sistema de riego y por las diferencias en crecimiento y desarrollo de las plantas, pero principalmente por la mezcla aserrín/tezontle. Estas variaciones en conjunto quizás influyeron en el consumo de agua y nutrimentos por las plantas y en la cantidad de drenaje, el cual a su vez determinó la concentración de nutrimentos en la solución lixiviada. Lo anterior se comprueba al observar que la mayor concentración de nutrimentos, principalmente N y Ca, se encontró en la mezcla aserrín/tezontle fino (A/TF) y la menor concentración en aserrín (A) y la mezcla aserrín/tezontle grueso (A/TG), los cuales tuvieron menor y mayor drenaje, respectivamente (datos no presentados).

3.3.3. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre la concentración de nutrimentos en los lixiviados del sustrato

En los Cuadros 3, 4, 5 y 6 se presentan los efectos del factor CE para las concentraciones de nutrimentos en los lixiviados del sustrato. Se observa un aumento en la concentración de N, P, K y Ca a través del tiempo (10 a 60 ddt) en todos los niveles de CE. Es evidente que la causa principal para explicar las diferencias en concentración de todos los nutrimentos en los lixiviados fue la variación en CE, lo que a

su vez implicó un cambio importante en la concentración de nutrimentos de la SN utilizada (Cuadro 1). Con excepción del P para los 10 ddt, las pruebas de medias de N, P, K y Ca para las demás fecha de muestreo, indican diferencias altamente significativas entre valores de CE, con la mayor concentración a valores más altos de CE (Cuadros 3, 4, 5 y 6).

Cuadro 3. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de nitrógeno en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate

Factor de estudio	Días después del trasplante					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	142 b	187 b	220 b	251 b	272 b	299 b
Aserrín/tezontle fino [¥]	158 ab	180 bc	265 a	384 a	333 a	354 a
Aserrín/tezontle medio [€]	168 a	207 a	225 b	242 b	256 bc	269 c
Aserrín/tezontle grueso [£]	134 b	174 c	227 b	226 c	245 c	294 b
DMSH	19.80	7.56	21.42	18.10	17.3	17.8
CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$):						
2 ($175 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de N)	67 c	83 c	95 c	110 c	134 c	149 c
3 ($308 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de N)	147 b	175 b	229 b	244 b	266 b	320 b
4 ($448 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de N)	139 a	302 a	379 a	415 a	450 a	443 a
DMSH	17.6	15.9	16.80	16.3	15.7	16.2

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey $p \leq 0.05$).

[¥]Diámetro de partícula $\leq 3 \text{ mm}$, [€]diámetro de partícula 3 - 6 mm, [£]Diámetro de partícula de 6-12 mm,

DMS: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 4. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de fósforo en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate

Factor de estudio	Días después del trasplante					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	2.1 a	9.8 ab	17.2 b	26.6 b	35.8 b	52.2 b
Aserrín/tezontle fino [¥]	1.7 a	9.1 b	18.3 ab	28.1 b	36.2 b	54.2 b
Aserrín/tezontle medio [€]	1.6 a	8.3 b	17.7 ab	28.2 b	43.5 a	64.4 a
Aserrín/tezontle grueso [£]	1.8 a	11.1 a	23.4 a	33.2 a	42.5 ab	60.8 a
DMSH	2.11	1.65	5.76	3.96	7.05	6.25
CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$):						
2 ($46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de P)	1.7 a	7.4 c	13.3 b	18.6 c	30.3 c	42.5 c
3 ($62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de P)	1.8 a	9.9 b	20.8 a	32.3 b	38.8 b	47.6 b
4 ($93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de P)	2.1 a	11.5 a	23.5 a	36.2 a	49.5 a	83.5 a
DMSH	1.64	1.29	4.51	3.11	5.53	4.90

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey $p \leq 0.05$).

[¥]Diámetro de partícula $\leq 3 \text{ mm}$, [€]diámetro de partícula 3 - 6 mm, [£]Diámetro de partícula de 6-12 mm,

DMS: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 5. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de potasio en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate

Factor de estudio	Días después del trasplante					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	434 a	373 a	365 a	358 b	373 b	426 a
Aserrín/tezontle fino [¥]	397 b	380 a	351 a	392 ab	364 b	422 a
Aserrín/tezontle medio [€]	362 c	360 a	368 a	377 ab	416 a	460 a
Aserrín/tezontle grueso [£]	398 b	374 a	386 a	396 a	421 a	438 a
DMSH	25.74	21.80	38.50	32.80	32.70	42.90
CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$):						
2 ($273 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de K)	286 c	285 c	276 c	269 c	307 c	340 c
3 ($383 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de K)	366 b	359 b	370 b	381 b	402 b	425 b
4 ($531 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de K)	541 a	472 a	457 a	493 a	494 a	543 a
DMSH	12.40	19.30	16.6	20.10	17.80	18.1

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey $p \leq 0.05$).

[¥]Diámetro de partícula $\leq 3 \text{ mm}$, [€]diámetro de partícula 3 - 6 mm, [£]Diámetro de partícula de 6-12 mm,

DMS: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 6. Efecto del sustrato y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de calcio en el lixiviado, durante dos meses de cultivo con jitomate

Factor de estudio	Días después del trasplante					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	62 b	89 b	134 c	215 b	206 c	226 d
Aserrín/tezontle fino [¥]	71 b	73 c	183 a	288 a	322 a	369 a
Aserrín/tezontle medio [€]	111 a	109 a	165 ab	219 b	251 b	282 b
Aserrín/tezontle grueso [£]	77 b	116 a	153 bc	195 c	217 c	240 c
DMSH	17.3	7.30	25.30	12.60	25.20	10.70
CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$):						
2 ($170 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Ca)	43 c	72 c	112c	146 c	161 c	176 c
3 ($252 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Ca)	71 b	93 b	153 b	217 b	222 b	245 b
4 ($352 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Ca)	126 a	126 a	211 a	325 a	364 a	417 a
DMSH	5.7	6.10	19.80	9.80	19.80	18.40

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey $p \leq 0.05$).

[¥]Diámetro de partícula $\leq 3 \text{ mm}$, [€]diámetro de partícula 3 - 6 mm, [£]Diámetro de partícula de 6-12 mm,

DMS: diferencia mínima significativa honesta.

3.3.4. Comportamiento del pH durante 87 ddt

En la Figura 5 se presenta la variación en pH durante 87 ddt en los diferentes tratamientos. Partiendo de pH 6 de la solución nutritiva, en todos los tratamientos hubo un aumento gradual de pH más o menos constante, durante las primeras 3 semanas (21 ddt) hasta llegar a valores entre 8.0 a 8.6; posteriormente (21 a 45 ddt) hubo un periodo de estabilización caracterizado por variaciones de pH entre 8 a 8.6 en promedio y finalmente un periodo entre los 45 a los 87 ddt, donde el pH disminuyó gradualmente hasta alcanzar valores entre 6.6 a 7.4 en los diferentes tratamientos. De manera general, no hubo una diferenciación en los valores de pH de los diferentes tratamientos durante el periodo de incrementos (1 a 21 ddt) en pH y durante el periodo en que se mantuvo el intervalo (8 a 8.6) más alto de pH, pero una vez que el pH empezó a

disminuir, se observa que los tratamientos con mayor CE ($4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) presentaron los valores más bajos de pH, mientras que sucedió lo contrario para los tratamientos con menor CE (2 dS/m), los cuales mostraron valores más altos de pH en el lixiviado (Figura 5).

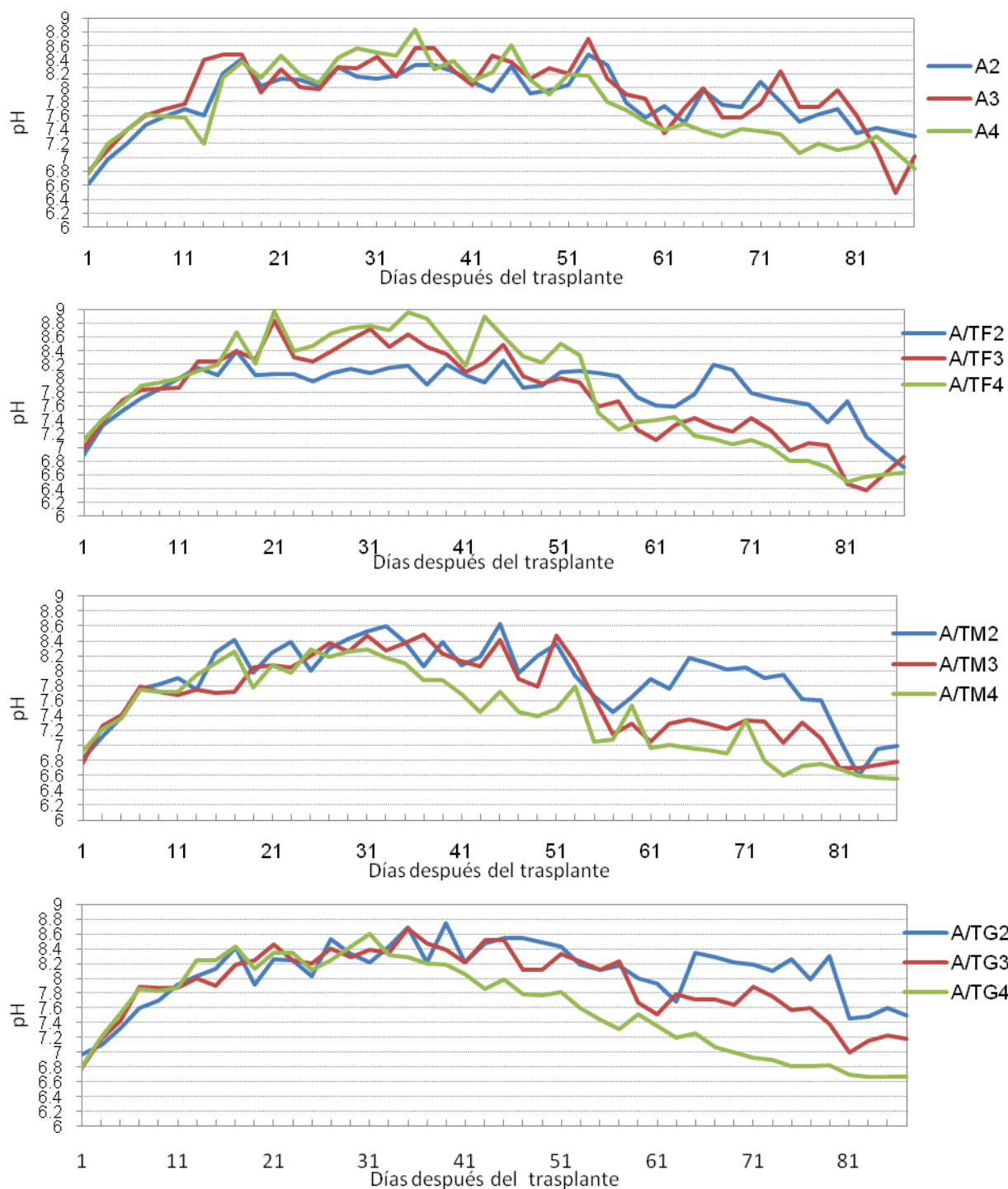
Con relación a los cambios en pH durante la descomposición de los residuos orgánicos, Handreck y Black (2005) mencionan que la savia de las plantas es ácida, así que la descomposición inicia en condiciones ácidas; además, con frecuencia el aserrín tiene pH por debajo de 7. Por ello, al iniciar la descomposición el pH disminuye, pero después conforme se descomponen los ácidos orgánicos, se libera amoníaco (NH_3) el cual se combina con H^+ para formar amonio (NH_4^+) y el pH se incrementa a valores entre 8 y 9. Después el amonio es usado por los microorganismos y por las plantas y se vuelven a liberar H^+ , el pH vuelve a disminuir y se estabiliza alrededor de 7.

Otra explicación a los cambios de pH observado podría atribuirse a la asimilación del NO_3^- por los microorganismos y plantas. Está bien documentado que la absorción de nitrato produce una alcalinización del medio debido a la extrusión de iones OH^- y HCO_3^- ó bien al consumo de H^+ durante la entrada de NO_3^- a las células (Imsande y Touraine, 1994; Marschner, 2003; Mengel y Kirkby, 2001).

3.3.5. Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) durante 87 ddt

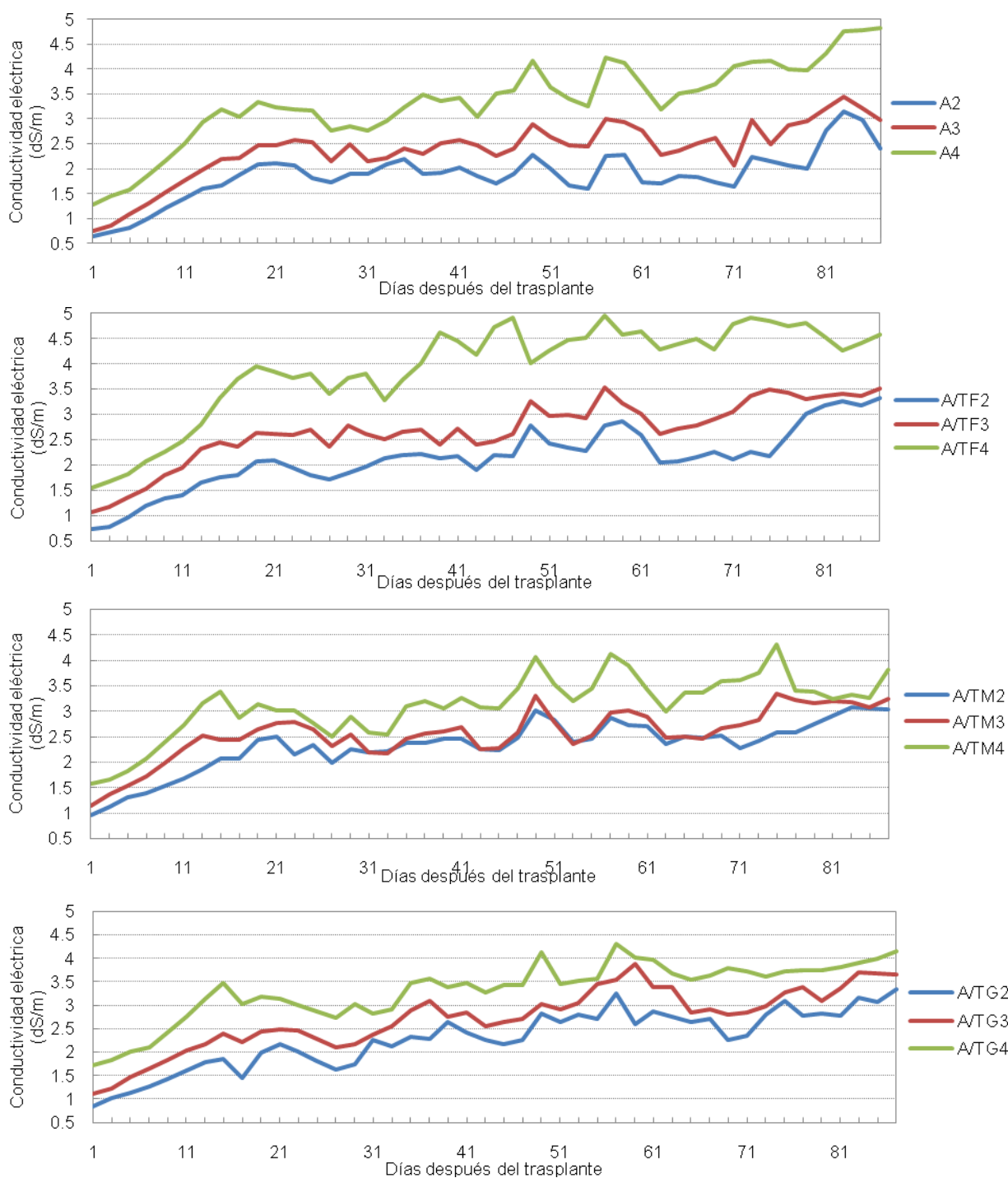
En la Figura 6 se presenta la variación en CE durante 87 ddt en los diferentes tratamientos. Partiendo de una CE de 2, 3 y $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en la solución nutritiva con que fueron regados los diferentes sustratos, se observa una fuerte disminución en la CE del lixiviado los primeros días de establecido el cultivo. Posteriormente hubo un incremento

gradual rápido, más o menos constante, durante las primeras 3 semanas (21 ddt) hasta llegar a valores de 2, 2.5 y 3 a 3.5 para los tratamientos con CE de 2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ respectivamente. Posteriormente, entre los 21 a 75 ddt se observa una estabilización entre 2 a 2.5 y 2.5 a 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para los tratamientos que recibieron 2 y 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente, en la solución de riego. Para el caso de los tratamientos con 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, se observa un incremento gradual de 3 a 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para este mismo periodo (21 a 75 ddt). Es importante notar, que a diferencia del pH (Figura 5), los valores de CE en los lixiviados están bien diferenciados de acuerdo al tratamiento correspondiente de CE de la solución nutritiva, es decir, a mayor CE de la SN mayor CE del lixiviado. Para el caso de los tratamientos con aserrín/tezontle fino (A/TF) es donde se presentó el mayor incremento en la CE del lixiviado, sobre todo con el nivel más alto (4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) de CE en la solución nutritiva. Este comportamiento es congruente con lo observado en los Cuadros 2, 3, 4 y 5, donde de manera general se encontró mayor concentración nutrimental en los lixiviados, después de los 30 ddt.



A: aserrín, A/TF: aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm), A/TM: aserrín/tezontle medio (3 - 6 mm), A/TG: aserrín/tezontle grueso (6 - 12 mm), 2, 3 y 4: conductividad eléctrica de 2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente.

Figura 5. Variación en pH de los lixiviados de diferentes sustratos regados con solución nutritiva con diferente conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) durante 87 días después del trasplante de jitomate.



A: aserrín, A/TF: aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm), A/TM: aserrín/tezontle medio (3 - 6 mm), A/TG: aserrín/tezontle grueso (6 - 12 mm), 2, 3 y 4: conductividad eléctrica de 2, 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente.

Figura 6. Variación en conductividad eléctrica de los lixiviados de diferentes sustratos regados con solución nutritiva con diferente conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) durante 87 días después del trasplante de jitomate.

3.4. CONCLUSIONES

En los tratamientos con solución nutritiva de $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se encontraron concentraciones deficientes de N, P y Ca en los lixiviados durante los primeros 60 ddt, mientras que los tratamientos con soluciones nutritivas de 3 y $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ produjeron concentraciones de N, P y Ca en el lixiviado, similares o superiores a las aplicadas con la solución nutritiva, a partir de los 20 a 30 ddt.

La concentración de K en los lixiviados del sustrato fue directamente proporcional a la concentración de K en las soluciones nutritivas de 2, 3 y $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, no se observó un efecto de inmovilización por el sustrato durante 60 ddt.

Durante los primeros 40 ddt se produjo una alcalinización del sustrato hasta alcanzar valores entre 8 a 8.6 en todos los tratamientos.

Durante los primeros 20 ddt la inmovilización nutrimental disminuyó la conductividad eléctrica del lixiviado del sustrato a valores muy por debajo de la CE de la solución nutritiva de riego.

El aserrín solo ó en mezclas aserrín/tezontle de 70/30 (v/v) sin compostaje, constituye un sustrato adecuado si se aplica una solución nutritiva con la concentración de nutrientes que satisfaga la demanda nutrimental de la planta y los requerimientos de inmovilización del sustrato.

La solución nutritiva con CE de $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se considera deficiente en nutrientes para los primeros 60 ddt con cultivo de jitomate en aserrín o mezclas aserrín/tezontle sin compostaje, mientras que una solución con $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se considera adecuada para esta

etapa, con una concentración de 22, 2, 9.8, 12.6, 5.6 y 8 meq·L⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg y S, respectivamente.

3.5. LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P.; CARRIÓN, B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- ALARCÓN, V. A. 2000. Introducción a los cultivos sin suelo. Sistemas y sustratos, p 191. *In: Tecnología Para Cultivos de Alto Rendimiento. Universidad Politécnica de Cartagena (Ed).Cartagena.*
- ANSORENA, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- BARBER, A. S. 1995. Soil nutrient bioavailability. John Wiley and Sons. 414 p.
- BREMMER, J. M. 1965. Total nitrogen. Pp.11-1178. In: C. A. Black (ed) Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- CADAHÍA, L. C. 2005. Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutícolas y ornamentales. Ediciones Mundi – Prensa (Ed). 3ra. Edición. España.
- CASTELLANOS, J. Z., UVALLE B. J. Y AGUILAR S. A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Segunda edición. México.
- CAPISTRAN, F., ARANDA, E., ROMERO, J. C. 1999. Manual de reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. 151 p.
- CONTIN, M., DE NOBILI, M. Y CATTIVELLO, C. 2008. Mineralization/inmobilization of nitrogen and phosphorous in composted growing media. Acta Horticulturae. No. 779: 599 – 605.

- CORTEZ J. G. 1990. Proceso de producción y algunas características fisicoquímicas del tabique elaborado a base de aserrín. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Pág. 7-35.
- ETCHEVERES, B. J.; GOIBERG G.; LOPEZ R. R. M.; PADILLA C. J.; ALVARADO L. J.; HIDALGO M. C.; CRUS H. L.; GUERRERO P. A.; Y MIRABDA C. E. S/A. manual de Procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos. IRENAT-Colegio de Posgraduados. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.
- GARCÍA, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Cöppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 217 pág. Talleres de Offset Larios. D. F. México.
- GRUDA, N. and SCHNITZLER, W.H. (2004). Suitability of wood fibre substrate for production of vegetable transplants.1 Physical properties of wood fibre substrates, *Sci. Hortic.*, **100**, 309–322.
- HANDRECK, K. A. 1996. Phosphorus immobilization in wood waste-based potting media. *Comm. Soil Sci. plant Anal.* 25: 2081-2088.
- HANDRECK, K. A.; N. BLACK. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544.
- HAVLIN, L. S., L. W. NELSON, AND D. J. BEATON. 2005. Soil fertility and fertilizer. 7th ed. Pearson and Prentice-Hall. New York. 515 p.
- IMSANDE, J.; B. TOURAINE. 1994. N Demand and the Regulation of Nitrate Uptake. *Plant Physiol.* 105: 3-7.
- JACKSON, B. E., WRIGHT D. R. Y BARNES C. M. 2008. Pine tree substrate, nitrogen rate, particle size, and peat amendment affect poinsettia growth and substrate physical properties. *HortScience* 43(7): 2155 – 2161.
- JONES, J. B. 2005. Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. CRC PRESS (Ed). 2nd ed. United States of America.

- MAHER, M.; PRASAD, M.; RAVIV, M. 2008. Organic Soilless Media Components. In Soilless Culture: Theory and Practice. RAVIV, M.; LIETH, J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America. 459-504 pp.
- MARSCHNER, H. 2003. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London. 889 p.
- MENGEL, A Y K. KIRKBY. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic publishers. 5th edition. Netherlands. 849 p.
- MASTALERZ, J. 1977. Growing media. In: John Wiley & Sons. (ed.). The greenhouse environment. New York, USA.
- MATEO S, J. J. 2002. Potencial de aserrín como alimento para rumiantes y sustrato para plantas. Tesis de Doctorado. Colegio de posgraduados, Montecillos, México. Pág 92.
- NELSON, P. 1991. Greenhouse operation and management. 4th edition Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey. USA.
- OGDEN, R.J., POKORNY, F.A., MILLS, H.A. AND DUNAVANT, M.G. 1987. Elemental status of pine bark-based potting media. *Hortic. Rev.*, **9**, 103–131.
- OJODEAGUA, A. J. L., CASTELLANOS, R. J.Z., MUÑOZ, R. J.J. ALCANTAR, 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. *Rev. Fitotec. Mex.* 31(4): 367-374.
- PARKS, S., NEWMAN, S. AND GOLDING, J. (2004). Substrate effects on greenhouse cucumber growth and fruit quality in Australia. *Acta Hort.* (ISHS), **648**, 129–133.
- PINEDA, P. J.; RAMIRES A. A.; SANCHEZ, DEL C. F.; CASTILLO G. A. M.; VALDEZ A. L. A.; VARGAS C. J. M. 2009. Extraction and nutrient efficiency during vegetative growth of tomato under hydroponic conditions. GreenSys, Quebec Ca.

- PRASAD, M. 1997. Nitrogen fixation of various materials from a number of European countries by three nitrogen fixation tests. *Acta Hort.* (ISHS), **450**, 353–362.
- PRASAD, M. AND MAHER, M.J. (2004). Stability of peat alternatives and use of moderately decomposed peat as a structure builder in growing media. *Acta Hort.* (ISHS), **648**, 145–151.
- RAVIV, M.; WALLACH, R.; SILBER, A.; BAR-TAL, A. 2002. Substrates and their analysis. In Hydroponic production of vegetables and ornamentals. SAVVAS, D.; PASSAM, H. (Eds.). Athens: Embryo Publications. p.p. 25-101.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- RESH, M. H. 1998. Cultivos Hidropónicos. Editorial Mundi-Prensa. España.
- RESH, M. H. 2001. Cultivos Hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Quinta edición. Editorial Mundi-Prensa. España.
- ROBLEDO, S. E.; MALDONADO T. R. 2005. Manual de metodologías de análisis de suelo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.
- SAS INSTITUTE INC, 1998. SAS/STAT guide for personal computers. Version 8. Cary NC. USA 595 p.
- SILBER, A., XU, G., LEVKOVITCH, I. 2003. High fertigation frequency: The effect on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant Soil*, **253**, 467–477.
- SILBER, A., BRUNER, M., KENIG, E. 2005. High fertigation frequency and phosphorus level: effects on summer-grown bell pepper growth and blossom-end rot incidence. *Plant Soil*, **270**, 135–143.
- SILBER, A., M. RAVIV. 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant Soil*, 186: 353-360.

- SILBER, A. 2008. Chemical characteristics of soilless media. In: RAVIV, M.; LIETH, J. H. (eds). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- STARBUCK, C. 1997. Producción y su uso de compost de aserrín y estiércol de avena. III Symposium Internacional y IV Reunión Nacional de Agricultura Sostenible. Universidad de Guadalajara, 16-19 de noviembre. Guadalajara, Jalisco Pág: 66.
- STENER, A. 1984. *The Universal Nutrient Solution*. ISOC. Netherlands.
- URRESTARAZU, M. 2004. *Tratado de cultivo sin suelo*. Editorial Mundi-Prensa. España. 914 p.
- YEAGER, T.H. AND WRIGHT, R.D. 1982. Pine bark – phosphorus relationships. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **13**, 57–66.
- WINSOR, G. & SCHWARZ, M. 1990. *Soilless culture for horticultural crop production*. F.A.O. Plant production and protection paper 101; 188 p. Rome, Italy.

CAPITULO IV

ASERRIN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPONICO. IV: PRODUCCION DE JITOMATE DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO

PINE SAWDUST AS SOILLESS SUBSTRATE. I: FRUIT YIELD DURING FIVE TOMATO GROWTH CYCLES

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar algunos componentes del rendimiento de fruto de jitomate (*Solanum esculentum* L) desarrollado en aserrín y mezclas aserrín/tezontle durante varios ciclos de cultivo para determinar el tiempo de reutilización del aserrín sin afectar la producción de fruto. Se establecieron 10 tratamientos que se formaron de la combinación de tres tamaños de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) con tres relaciones aserrín/tezontle (90/10, 80/20 y 70/30) más un tratamiento de 100 % aserrín. Estos tratamientos se evaluaron durante cinco ciclos (seis meses c/u) continuos de cultivo con jitomate (30 meses) aplicando una solución nutritiva de $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. En la cosecha se midió número, diámetro, peso y rendimiento de fruto ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$). No se observaron efectos del tamaño de partícula del tezontle ni de las relaciones aserrín/tezontle sobre el número, diámetro (mm) y peso promedio de fruto ($\text{g}\cdot\text{fruto}^{-1}$). En el primer ciclo de cultivo, el rendimiento de fruto ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) disminuyó conforme aumentó la proporción de aserrín en la mezcla aserrín/tezontle, probablemente debido a la inmovilización nutrimental. En los demás ciclos de cultivo no se observó efecto negativo en los componentes del rendimiento debido a la variación en las características físicas y

químicas del sustrato, después de 30 meses de cultivo continuo con aplicación de una solución nutritiva estándar de $2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: número de frutos, diámetro de fruto, peso de fruto, rendimiento de fruto.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate some components of fruit tomato (*Solanum esculentum* L) yield growing in sawdust and mixtures of sawdust/volcanic rock as a substrate during several growth cycles in order to determine the reutilization time without affecting fruit yield. It were established ten treatments which were formed by the combinations of the three volcanic sand particle sizes (≤ 3 , 3-6 and 6-12 mm) and the three ratios of sawdust/volcanic rock (90/10, 80/20 and 70/30) plus a treatment with 100 % pine sawdust. These treatments were tested during five (each one six months) continuous growth tomato cycles (thirty months) irrigated with a nutrient solution of $2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. At harvest, diameter, weight and fruit yield ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) were measured. No effects of volcanic rock particle sizes or sawdust/volcanic rock ratios over number, diameter and fruit weight ($\text{g} \cdot \text{fruto}^{-1}$) were observed. In the first growth cycle, fruit yield diminished according to increased sawdust quantity in the mixture sawdust/volcanic rock, probably due to nutrient immobilization. In the other growth cycles, no effect on yield components was observed due to variation in physical or chemical characteristics of substrates during 30 months of continuous growth irrigated with a nutrient solution of $2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$.

ADDITIONAL INDEX WORDS: fruit number, fruit diameter, fruit weight, fruit yield

4.1. INTRODUCCIÓN

El aserrín se ha utilizado como un medio de cultivo, ya sea sólo o en mezcla con otros materiales. Se utiliza principalmente en Australia, Canadá, Nueva Zelanda y la costa del Pacífico de los Estados Unidos (Worrall, 1978; Raviv and Lieth, 2008).

En sustratos de naturaleza orgánica no inertes, como consecuencia del ataque de los microorganismos, la materia orgánica se descompone y experimenta una serie de cambios en su composición, hasta alcanzar una cierta estabilidad biológica (Alarcón, 2000).

Normalmente el aserrín sin compostar no es adecuado debido a la fitotoxicidad (Worrall, 1978; Raviv y Lieth, 2008). El Aserrín generalmente tiene un alto porcentaje de porosidad llena de aire y un bajo contenido de agua disponible, pero esto también se ve afectado por el tamaño de las partículas (Raviv y Lieth, 2008). El bajo contenido de agua disponible puede resultar en estrés de agua durante el crecimiento activo de las plantas (Allaire *et al.*, 2005; Dorais *et al.*, 2005; Raviv y Lieth, 2008). Debido a la baja retención de humedad, el riego debe aplicarse con frecuencia y en pequeñas cantidades (Raviv y Lieth, 2008). Además, como resultado de la compresión mecánica, las propiedades físicas de la fibra de madera pueden cambiar considerablemente (Raviv and Lieth, 2008).

Jackson *et al.* (2008) indican que la alta relación C/N de los sustratos de madera y su efecto en el equilibrio de N como consecuencia de la inmovilización microbiana y la estabilidad (descomposición) de los sustratos de madera, siempre ha sido de gran interés de investigadores y productores (Jackson *et al.*, 2008). Muchas investigaciones

han demostrado que el reducido crecimiento de las plantas en sustratos de madera es generalmente solo un problema cuando los niveles de fertilidad (principalmente N) están cerca de los límites mínimos para el óptimo crecimiento y desarrollo de la planta. Al respecto, Jackson *et al.* (2008) demostraron que los crisantemos pueden ser exitosamente producidos en un sustrato de aserrín de pino al 100 % con una dosis adicional de 100 ppm de N comparados con plantas cultivadas en un sustrato comercial de turba.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar algunos componentes del rendimiento de fruto de jitomate desarrollado en aserrín de pino y mezclas aserrín/tezontle durante cinco ciclos de cultivo, para determinar si el cambio en las características físicas y químicas que definen la calidad de un sustrato hidropónico, tienen influencia sobre parámetros del rendimiento de fruto.

4.2. MATERIALES Y METODOS

El experimento se estableció en un invernadero de vidrio de la Universidad Autónoma Chapingo durante los años 2007 a 2009, estableciéndose cinco ciclos de cultivo de seis meses cada uno. El invernadero tenía control de clima a través de extractores de aire húmedo y calefacción con calentadores eléctricos.

4.2.1. Material vegetal utilizado

El material vegetal utilizado fue el híbrido de jitomate Tequila (F1) de la Compañía Vilmorin, cuyas características son: precocidad de 75 a 85 días; poco follaje y

entrenudos cortos, buena cobertura y ventilación; fruto ovoide, muy consistente, de color intenso, brillante, tamaño homogéneo, con larga vida de anaquel y buen sabor. Es de excelente fructificación con una producción muy elevada. Tiene resistencia al Virus del Mosaico del Tabaco, *Verticillium* sp, *Fusarium* raza 1 y a nemátodos.

Las plántulas fueron obtenidas en charolas para germinación de 200 cavidades usando turba como sustrato. El trasplante se hizo a los 30 días después de la siembra cuando las plántulas tenían en promedio 15 cm de altura.

4.2.2. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se formaron utilizando un arreglo factorial 3x3. Uno de los factores correspondió al tamaño de partícula del tezontle y los tres niveles fueron diámetros ≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm; el segundo factor correspondió a las relaciones aserrín/tezontle y los niveles fueron 90/10, 80/20 y 70/30. En todos los casos se usó aserrín de pino con diámetro de partícula ≤ 6 mm. La combinación de factores y niveles dio los siguientes tratamientos: T1: 90/10 (6-12 mm), T2: 80/20 (6-12 mm), T3: 70/30 (6-12 mm), T4: 90/10 (3-6 mm), T5: 80/20 (3-6 mm), T6: 70/30 (3-6 mm), T7: 90/10 (≤ 3 mm), T8: 80/20 (≤ 3 mm) y T9: 70/30 (≤ 3 mm). Se incluyó además un T10 que consistió en 100% aserrín de pino. Se usaron bolsas de plástico bicolor (blanco-negro) de 15 L de capacidad y 30 cm de altura, que son las más usadas en la producción comercial, de las cuales se llenaron 10 bolsas con cada tratamiento de sustrato y se trasplantaron dos plántulas de jitomate, en cada una. Las unidades experimentales (bolsas con dos

plantas) se distribuyeron de acuerdo a un diseño completamente al azar, con un total de 10 tratamientos y 4 repeticiones.

El experimento se instaló en dos camas, cada una con dos hileras de bolsas y dos plantas por bolsa. Se establecieron cinco ciclos de cultivo con duración de seis meses en promedio cada uno. Al final de cada ciclo se removían los tallos junto con las raíces más gruesas, se tomaban muestras de tres litros de sustrato para el análisis físico y se volvía a plantar. El fertiriego consistió en ocho riegos diarios con un sistema de goteo, colocando una estaca por planta con gasto de $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. La duración de cada riego varió de 2 a 6 minutos dependiendo de la edad de la planta y condiciones ambientales. Para el control del riego diario se consideró un drenaje de 15 a 25 %. Durante los diferentes ciclos de cultivo, se aplicó la solución nutritiva de Steiner (1984) con una carga iónica de $20.5 \text{ meq} \cdot \text{litro}^{-1}$, incrementando la concentración de P a 1.5 y la de K a $7.5 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$, para lograr el equilibrio entre cationes y aniones en la solución nutritiva.

Los cuidados principales consistieron en control preventivo de mosquita blanca y de enfermedades producidas por *Phytoptora sp*, *Phytium sp*, *Rhizoctonia sp*, así como las labores de manejo de la planta (eliminación de brotes laterales, tutoreo, deshojado, polinización) para conducir el cultivo hasta formar 5 a 7 racimos.

4.2.3. Medición de variables en fruto

Durante la cosecha de cada ciclo de cultivo se dieron de cuatro a seis cortes de fruto. En cada corte de fruto, se contó el número de frutos, con un vernier digital se midió el diámetro ecuatorial de fruto, con una balanza electrónica (precisión de 0.1 g) se pesó el

fruto cosechado, y considerando una densidad de 4 plantas·m⁻² se estimó el rendimiento (kg) por unidad de superficie (m⁻²). La obtención de estas variables se hizo sólo en frutos de tamaño comercial, tomando como criterio a los frutos con peso superior a 50 g, los cuales correspondieron a más del 90 % de la producción total de las plantas. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar la interacción entre factores, así como pruebas de medias por factor, de las diferentes variables, mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1998).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSION

De acuerdo con el análisis de varianza no se encontró diferencias estadísticas significativas para la interacción entre diámetro de partícula del tezontle y la relación aserrín/tezontle sobre las variables de rendimiento de fruto en los diferentes ciclos de cultivo (datos no presentados). Sólo se presentó efecto significativo del factor relación aserrín/tezontle sobre rendimiento de fruto para algunos ciclos de cultivo. A continuación se presentan los valores medios de los principales componentes del rendimiento de fruto de jitomate, para cada nivel del factor tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle obtenidos en los diferentes ciclos de cultivo.

4.3.1. Efecto del tamaño de partícula sobre los principales componentes del rendimiento de fruto de jitomate

En los Cuadros 1, 2, 3, 4 y 5 se presenta el efecto del factor tamaño de partícula sobre los valores medios de algunas características y rendimiento de fruto de jitomate. Se

observa que el tamaño de partícula no tuvo efecto en número, diámetro, peso promedio y rendimiento de fruto en los diferentes ciclos de cultivo. Tampoco se observa alguna tendencia en estas variables relacionada con el diámetro de partícula del tezontle.

4.3.2. Efecto de la relación aserrín/tezontle sobre los principales componentes del rendimiento de fruto de jitomate

En los Cuadros 1, 2, 3, 4 y 5 se presentan las pruebas de medias para observar el efecto de la mezcla aserrín/tezontle sobre los principales componentes de rendimiento de fruto de jitomate en los diferentes ciclos de cultivo. Sólo para el primero, cuarto y quinto ciclo de cultivo se presentaron diferencias significativas en el rendimiento de fruto ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) debido a la relación aserrín/tezontle. Para el primer ciclo de cultivo (Cuadro 1) se observa una disminución en rendimiento a medida que había más aserrín en el sustrato. El menor rendimiento de fruto ($10.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) en el tratamiento con 100 % aserrín, probablemente está relacionado con la mayor inmovilización nutrimental (N, P y Ca) que en general se dio en este tratamiento, como fue expuesto en el capítulo III de este trabajo. Para los siguientes ciclos de cultivo (Cuadros 2, 3, 4 y 5), los valores de rendimiento de fruto no muestran relación con las diferentes proporciones de aserrín en el sustrato, aparentemente el efecto negativo de la inmovilización nutrimental que se observó en el primer ciclo, ya no se dio en los ciclos posteriores y la variación en características físicas (capítulo I) y químicas (capítulo II) observadas no tuvo efecto en características y rendimiento de fruto. En el cuarto ciclo de cultivo el mayor rendimiento ($16.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) correspondió a la relación 90/10 y el menor rendimiento ($13.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) a la

relación 80/20 (aserrín/tezontle); mientras que sucedió lo contrario en el quinto ciclo de cultivo el mayor rendimiento ($13.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) se dio para la relación 80/20 y el menor rendimiento ($11.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) para la relación 90/10 (aserrín/tezontle), lo que aparentemente, no tiene relación con la cantidad de de aserrín o tezontle en el sustrato.

Es importante notar que la variación más importante en las variables medidas se dio entre ciclos de cultivo. Para el primer ciclo (Cuadro 1) se observan, en general, valores menores a los reportados para el segundo, tercero, cuarto y quinto ciclo de cultivo (Cuadros 2, 3, 4 y 5, respectivamente), situación que podría atribuirse tanto a la inmovilización nutrimental como a las condiciones de clima (agosto-enero) que no fueron las más favorables para este ciclo de cultivo. Para el segundo, tercero, cuarto y quinto ciclo, los mayores valores de las diferentes variables, se observan para los ciclos de cultivo desarrollados durante febrero a julio y los valores menores para los ciclos de cultivo desarrollados de agosto a enero. Estas diferencias no son atribuibles a los tratamientos, sino a las variaciones de condiciones climáticas, principalmente temperatura y radiación solar. En el caso de temperatura, para los meses de marzo a julio el promedio diario de la temperatura diurna es de 27°C y el promedio diario de temperatura nocturna de 17°C ; mientras que en los meses de agosto a enero, considerando un día de invierno el promedio de la temperatura diurna es de 22°C y el promedio diario de temperatura nocturna de 8.5°C . En el caso de la radiación solar, para los meses de marzo a julio el promedio diario es mayor que para los meses de agosto a enero. Como puede notarse, las condiciones de clima en los ciclos de cultivo desarrollados en agosto a enero, muestran intervalos de temperatura más alejados de los rangos óptimos y radiación deficiente por el menor número de horas con luz,

situación que influyó en el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que la radiación solar es determinantes para la fotosíntesis y la temperatura para la respiración y demás procesos metabólicos (Salisbury y Ross, 2000; Taiz y Zeiger, 2003).

Considerando los datos de rendimiento del segundo al quinto ciclo, se estima una producción promedio anual de $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (segundo y tercer ciclo) y de $28.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (cuarto y quinto ciclo), valores que están ligeramente por debajo de lo reportado (Ojodeagua *et al.*, 2008) para tezontle ($31.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) y suelo ($34.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) en producción intensiva bajo invernadero bien ligeramente por arriba de lo reportado por Antón (2010) para cultivo en perlita ($15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$).

De acuerdo con lo discutido en el capítulo I, se esperaría una disminución en crecimiento y desarrollo de las plantas y por lo tanto en rendimiento de fruto, en el último ciclo de cultivo (del 25 al 30 mes), ya que las características físicas perdieron el balance ideal, sobre todo la capacidad de aireación que disminuyó a valores inferiores de 10 %. La disminución en la capacidad de aireación, pueden ocasionar problemas de abasto de oxígeno (Abad *et al.*, 2005; Bunt, 1988), sobre todo por tratarse de un sustrato orgánico que normalmente requieren el doble o triple de oxígeno comparado con un sustrato mineral (Lemaire, 1995; Ansorena 1994). Este efecto si se dio, no influyó en el rendimiento de fruto, ya que los rendimientos observados en los dos últimos ciclos fueron superiores a los rendimientos de los primeros ciclos, donde el balance de las propiedades físicas estaba más cerca del óptimo.

De acuerdo con lo discutido en el capítulo II, se esperaría también un efecto negativo de la salinidad del sustrato en los tres últimos ciclos de cultivo (del 12 al 18, 19 al 24 y

del 25 al 30 mes), ya que la CE se incrementó a valores muy altos ($> 2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) (Warncke, 1990) medidos en relación 1:1.5 (sustrato:agua). Sin embargo, el jitomate requiere y tolera niveles más altos de salinidad que otras hortalizas (Nuez, 1995; Urreztarazu, 2004).

Con relación al efecto de la inmovilización nutrimental (capítulo III), esta solo fue evidente en el primer ciclo. Del segundo al quinto ciclo el sustrato se estabilizó, como lo demuestra el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónica (capítulo II) y no se observaron efectos negativos. De manera visual, sólo en el primer ciclo se observaron síntomas de deficiencias nutrimentales de N y P principalmente, que consistieron en hojas de color verde claro (pálido) y nervaduras por el envés ligeramente purpúreas, tallos delgados, sobre todo en la parte terminal donde las hojas, inflorescencias y racimos de fruto están en pleno desarrollo. Del segundo al quinto ciclo cultivo no se observaron síntomas anormales, producidos quizás por falta de oxígeno en la raíz o por exceso de salinidad. Urrestarazu *et al.* (2006) mencionan que los sustratos ecológicamente amigables, han mostrado ser una alternativa viable para sustituir a otros sustratos tradicionales como lana de roca y perlita o incluso a algunos sistemas hidropónicos. Sin embargo para que estos sustratos sean competitivos en la producción de cultivos deben tener una duración de por lo menos un año. Estos mismos autores evaluaron la reutilización de composta de residuos de cultivos de invernadero y la cascarilla de almendro durante tres ciclos de cultivo de melón y jitomate comparándolos con lana de roca. Las propiedades físicas, químicas y físico-químicas evaluadas presentaron diferencias significativas cuando se reciclaron los sustratos; sin embargo, esas diferencias no fueron factores disminuyeron el rendimiento y la calidad

de fruto, cuando el fertiriego se ajustó de acuerdo a las características de los sustratos. Concluyeron que el compost y la cascarilla de almendro pueden ser sustratos adecuados por lo menos para 265 y 530 días de reutilización, respectivamente.

En otros trabajos donde se han evaluado materiales a base de madera de pino, se ha encontrado que estos sustratos pueden utilizarse por varios ciclos de cultivo. Jackson y Wright (2009) evaluaron por dos años un sustrato a base de fibra de madera de pino en la producción de plantas leñosas de vivero y herbáceas de invernadero. Sus resultados indican que no hubo diferencia en producción y calidad de planta en comparación con la turba. Concluyeron que la fibra de madera de pino es un sustrato viable, consistente, renovable y es una alternativa económica para la producción de plantas. Durante ese periodo de tiempo se observaron solo pequeños cambios en la contracción y descomposición del sustrato. Muro *et al.* (2005) evaluaron un sustrato a base de fibra de madera comparándolo con perlita y fibra de coco. Después de cuatro ciclos de producción de jitomate y melón no encontraron diferencias significativas en rendimiento y calidad de fruto entre sustratos.

Cuadro 1. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el primer ciclo de cultivo, establecido de agosto de 2007 a enero de 2008.

Factor de estudio	Número de frutos	Diámetro (mm)	Peso promedio (g·fruto ⁻¹)	Rendimiento (kg·m ⁻²)
Tamaño de partícula de tezontle				
≤ 3 mm	45.0 a	46 a	60.4 a	10.9 a
3-6 mm	44.1 a	47 a	62.3 a	10.9 a
6-12 mm	46.0 a	48 a	64.8 a	11.9 a
DMSH	5.41	6.03	16.34	2.14
Relación aserrín/tezontle (v/v)				
100/00	45.2 a	45 a	58.2 a	10.4 b
90/10	44.1 a	46 a	62.3 a	10.8 ab
80/20	44.0 a	47 a	61.4 a	10.9 ab
70/30	49.3 a	48 a	63.7 a	12.5 a
DMSH	6.47	4.04	13.90	1.812

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 2. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el segundo ciclo de cultivo, establecido de febrero de 2008 a julio de 2008.

Factor de estudio	Número de frutos	Diámetro (mm)	Peso promedio (g·fruto ⁻¹)	Rendimiento (kg·m ⁻²)
Tamaño de partícula de tezontle				
≤ 3 mm	34.3 a	50 a	88.3 a	12.8 a
3-6 mm	36.4 a	52 a	106.4 a	13.6 a
6-12 mm	38.1 a	49 a	94.3 a	12.3 a
DMSH	5.34	6.42	22.13	1.81
Relación aserrín/tezontle (v/v)				
100/00	36.5 a	48 a	89.3 a	12.9 a
90/10	39.5 a	53 a	97.6 a	11.6 a
80/20	40.2 a	52 a	105.6 a	14.3 a
70/30	35.6 a	50 a	83.1 a	12.8 a
DMSH	8.1	5.6	27.430	2.214

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 3. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el tercer ciclo de cultivo, establecido de agosto de 2008 a enero de 2009.

Factor de estudio	Número de frutos	Diámetro (mm)	Peso promedio (g·fruto ⁻¹)	Rendimiento (kg·m ⁻²)
Tamaño de partícula de tezontle				
≤ 3 mm	29.7 a	56.4 a	99.3 a	11.8 a
3-6 mm	30.4 a	53.3 a	89.6 a	10.9 a
6-12 mm	32.1 a	50.4 a	95.8 a	12.3 a
DMSH	5.42	7.30	13.3	1.742
Relación aserrín/tezontle (v/v)				
100/00	28.6 a	55.3 a	95.3 a	11.9 a
90/10	32.3 a	52.4 a	80.5 a	10.6 a
80/20	29.1 a	51.6 a	97.9 a	11.4 a
70/30	36.0 a	55.3 a	87.5 a	12.6 a
DMSH	8.31	6.42	16.72	2.18

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).
DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 4. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el cuarto ciclo de cultivo, establecido de febrero de 2009 a julio de 2009.

Factor de estudio	Número de frutos	Diámetro (mm)	Peso promedio (g·fruto ⁻¹)	Rendimiento (kg·m ⁻²)
Tamaño de partícula de tezontle				
≤ 3 mm	35.2 a	50 a	86.2 a	12.2 a
3-6 mm	39.4 a	55 a	99.4 a	15.6 a
6-12 mm	37.4 a	54 a	102.7 a	15.3 a
DMSH	5.44	4.82	17.47	2.87
Relación aserrín/tezontle (v/v)				
100/00	39.3 a	54 a	98.4 a	15.5 ab
90/10	42.1 a	51 a	96.5 a	16.3 a
80/20	37.0 a	49 a	92.4 a	13.6 b
70/30	38.0 a	58 a	103.8 a	15.7 ab
DMSH	4.75	12.2	19.63	2.16

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).
DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 5. Efecto del tamaño de partícula (≤ 3 , 3-6, 6-13 mm) del tezontle y de la relación aserrín/tezontle sobre componentes del rendimiento de fruto de jitomate en el quinto ciclo de cultivo, establecido de julio de 2009 a enero de 2010.

Factor de estudio	Número de frutos	Diámetro (mm)	Peso promedio (g·fruto ⁻¹)	Rendimiento (kg·m ⁻²)
Tamaño de partícula de tezontle				
≤ 3 mm	33.4 a	52 a	96.2 a	12.6 a
3-6 mm	30.7 a	50 a	99.4 a	12.2 a
6-12 mm	34.1 a	51 a	102.1 a	13.8 a
DMSH	4.34	3.62	14.32	1.74
Relación aserrín/tezontle (v/v)				
100/00	32.2 a	53 a	98.6 a	12.7 ab
90/10	29.7 a	54 a	96.4 a	11.5 b
80/20	34.2 a	53 a	101.4 a	13.9 a
70/30	35.0 a	49 a	97.9 a	13.7 ab
DMSH	5.96	9.4 2	14.94	1.59

Medias en columna con la misma letra no presentan diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).
DMS: diferencia mínima significativa honesta.

4.5. CONCLUSIONES

El número, diámetro y peso promedio de fruto, que son componentes importantes del rendimiento de fruto, no presentaron diferencias significativas durante cinco ciclos continuos de producción de jitomate en aserrín y mezclas aserrín/tezontle.

El rendimiento de fruto (kg·m⁻²) presentó diferencias significativas en el primero, cuarto y quinto ciclo de cultivo de jitomate.

Durante el primer ciclo de cultivo, el incremento de aserrín y disminución de tezontle en el sustrato produjo menor rendimiento de fruto (kg·m⁻²).

La variación en características físicas y químicas del aserrín de pino y mezclas aserrín/tezontle no produjo una disminución del rendimiento de fruto en jitomate del segundo al quinto ciclo de cultivo.

4.6. LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P.; CARRION B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- ALLAIRE, S.E., CARON, J., MÉNARD, C. AND DORAIS, M. 2005. Potential replacements for rockwool as growing substrate for greenhouse tomato. *Can. J. Soil Sci.*, **85**, 67–74
- ANSORENA, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- ANTÓN, A., MONTERO, J.I., MUÑOZ, P. 2010. Necesidades de agua en el cultivo de tomate en invernadero en comparación con el cultivo al aire libre. De Riego, Protección y nutrición de Hortalizas y Frutas. Sección invernadero. Año 8. No. 48. Febrero-Marzo. 52-55.
- BUNT, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman Ltd London, England. 309 p.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- DORAIS, M., CARON, J., BÉGIN, G. 2005. Equipment performance for determining water needs of tomato plants grown in sawdust based substrates and rockwool. *Acta Hort.* (ISHS), **691**, 293–304

- HANDRECK, K. A.; N. BLACK. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544.
- JACKSON, B. E; R. D. WRIGHT. 2009. Pine tree substrate: an alternative and renewable substrate for horticultural crop production. *Acta Horticulturae* 819: 265-272.
- JACKSON, B. E., WRIGHT D. R. Y BARNES C. M. 2008. Pine tree substrate, nitrogen rate, particle size, and peat amendment affect poinsettia growth and substrate physical properties. *HortScience* 43(7): 2155 – 2161.
- JONES, J. B. 2008. Tomato plant culture in the field, greenhouse, and home garden. 2nd. Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, USA. 399 p.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*, 396: 273-284.
- MARSCHNER, H. 2003. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press.
- MENGEL, A Y K. KIRKBY. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic publishers. 5th edition. Netherlands. 849 p.
- MURO, J.; I. IRIGOYEN, P. SAMITIER, P. MAZUELA, M. C. SALAS, J. SOLER, M. URRESTARAZU 2005. Wood fiber as growing medium in hidroponic crops. *Acta Horticulturae* 697.
- NUEZ, F. 1995. El cultivo del tomate. Editorial Mundi Prensa. España. 793 p.
- OJODEAGUA, A. J.L., CASTELLANOS, R. J.Z., MUÑOZ, R. J.J. ALCANTAR, 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. *Rev. Fitotec. Mex.* 31(4): 367-374.
- SALISBUY, B. F Y W. C ROSS. 1994. Fisiología vegetal. Grupo editorial Iberoamérica. México. 759 p.
- SAS INSTITUTE INC, 1998. SAS/STAT guide for personal computers. Version 8. Cary NC. USA 595 p.

- STEINER, A. 1984. The Universal Nutrient Solution. ISOC. Netherlands.
- TAIZ, L AND E. ZEIGER. 2003. Plant physiology. 3th edition. Sinauer Associates. USA. 675 p.
- URRESTARAZU, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Editorial Mundi-Prensa. España. 914 p.
- URRESTARAZU, M; MAZUELA C. P.; MARTÍNEZ A. G. 2006. Effect of substrate reutilization on yield and properties of melon and tomato crops. J. Plant Nutr. 31 (11): 2031-2043.
- VERHAGEN, J. B. G.M. 2009. Stability of growing media from a physical, chemical and biological perspective. Acta Horticultrae 819 ().
- WARNCKE, D. D. 1990. Chapter 13. Testing artificial growth media and interpreting the results. In Soil testing and plant analysis. Third edition. Number 3 in the Soil Science Society of America Book serie. Westerman, R. L. (ed.).Madison, WI. USA. pp. 337-357.
- WORRALL, R. 1978. The use of composted wood waste as a peat substitute. In: Acta Horticulturae 82: 79-86.

DISCUSIÓN GENERAL

Con relación a los cambios en las características físicas, se observó que sólo la densidad aparente tuvo poca variación durante los 30 meses de cultivo, mientras que la porosidad total, volumen de partícula, retención de humedad y capacidad de aireación variaron significativamente. Considerando el balance entre estas características para definir el sustrato ideal, se observó que las características físicas iniciales del aserrín y mezclas aserrín/tezontle, mejoraron al final de los 6, 12 y 18 meses de cultivo, pero a los 24 y 30 meses la capacidad de aireación se redujo a valores por debajo de los adecuados ($< 10\%$), probablemente debido a una disminución de macroporos y aumento de microporos como sucede normalmente en los sustratos orgánicos cuando se descomponen (Abad *et al.*, 2005; Maher, 2008; Lemaire, 1995). La disminución en la capacidad de aireación del sustrato es un cambio negativo, ya que esta característica determina el intercambio gaseoso (CO_2 y O_2) entre el interior y el exterior del sustrato (Fonteno, 1994) y tiene influencia en diversos procesos (respiración, absorción nutricional) que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas. En condiciones de contenedor, el efecto podría ser más importante, ya que el volumen es limitado (Alarcón 2000). Además, en sustratos orgánicos se requiere de 2 a 3 veces más oxígeno que en sustratos minerales, debido al mayor consumo por los microorganismos (Alarcón *et al.*, 2000; Ansorena, 1994; Burés, 1997). La cantidad de oxígeno en el sustrato determina la orientación radicular y el estado metabólico de la raíz para la absorción de nutrientes (Morard *et al.*, 2000; Porterfield and Musgrave, 1998). Huck *et al.* (1999) demostraron que con 10 min de interrupción en el suministro de oxígeno, se detiene el crecimiento de las raíces y con ausencia de oxígeno durante 30 min se produce la muerte de la

zona de elongación arriba de la punta de la raíz. En jitomate, la falta de oxígeno en las raíces produce epinastia en las hojas debido a la acción del etileno y disminuye el transporte por xilema de citocininas y giberelinas (Jackson, 2002).

En las características químicas el pH presentó poca variación durante los 30 meses de cultivo y se mantuvo en un intervalo óptimo (5 a 6.5). Sin embargo, la medición de pH se realizó al final del ciclo de cultivo, situación que podría ser diferente durante el crecimiento de las plantas, como se observó en el experimento que evaluó la inmovilización nutrimental, donde se midieron valores de pH hasta 8.6. El pH del sustrato es importante porque determina la solubilidad de los nutrientes y la actividad de los microorganismos en el sustrato (Barber, 1995; Brady y Weil, 2002).

Los valores medios a bajos de la CE en los primeros dos ciclos de cultivo (6 y 12 meses) indican que la inmovilización nutrimental fue importante, sobre todo durante el primer ciclo de cultivo, como se demostró en el experimento de inmovilización nutrimental (capítulo III). Los valores más altos de CE en los ciclos 4 y 5 indican posibles efectos fisiológicos negativos, aunque el jitomate no mostró síntomas visuales anormales. Considerando el balance entre las características químicas evaluadas, sólo la CE podría limitar la reutilización del aserrín como sustrato durante varios ciclos de cultivo; sin embargo, el exceso de sales se debió más bien a un desequilibrio entre la aplicación de nutrientes con el fertiriego, la absorción por la planta y el porcentaje de drenaje para lixiviar el exceso de sales. Varios autores (Urrestarazu, 2004; Abad *et al.* 2005; Ansorena 1994) recomiendan aplicar más drenaje durante el cultivo cuando se observa salinidad en el sustrato y lavar las sales antes de establecer las plántulas. Otra manera de evitar la acumulación de sales (Sonneveld y Woogt, 2009), es tratar de

sincronizar el suministro de nutrimentos con la solución nutritiva y la demanda de la planta, en función de las condiciones ambientales, de tal manera que se evite la entrada de sales que no se requieren. Los principales problemas que generan las sales para las plantas son el déficit hídrico, las toxicidades de iones específicos (Na y Cl) y las deficiencias nutrimentales por efectos antagónicos (Marschner, 2003; Taiz y Zeiger, 2003). La absorción y transporte de nutrimentos se reduce debido a la disminución en los gradientes de potencial hídrico entre exterior e interior de las células, se afecta negativamente tanto la presión de raíz como el transporte por flujo de masas. (Marschner, 2003; Taiz y Zeiger, 2003; Salisbury y Ross, 2000). En el caso de sales de Na, este reemplaza al Ca en las membranas celulares y en consecuencia se altera la permeabilidad de membrana (Mengel y Kirkby, 2001).

La MO oxidable y la CIC mostraron un incremento significativo a lo largo de los ciclos de cultivo y sus valores fueron mayores a medida que se incrementó la cantidad de aserrín en el sustrato. De acuerdo con Brady y Weil (2002) y Havlin *et al.* (2005), el incremento en los contenidos de MO y CIC en el sustrato puede mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que ayudan mantener estable el pH, almacenan nutrimentos, inactivan sustancias tóxicas y la MO mineraliza nutrimentos.

La inmovilización nutrimental para N y P fue muy evidente durante los primeros 30 ddt. Durante los 40 a 60 ddt a medida que aumentó la concentración de N en la SN también aumentó la concentración de N en los lixiviados. A los 60 ddt la concentración de N en los lixiviados fue similar a la concentración de N en la SN, principalmente en los tratamientos con mayor CE (3 y 4 dS·m⁻¹). Para el caso del P, durante los primeros 20 ddt la inmovilización fue muy evidente en todos los tratamientos. A partir de los 30 ddt a

medida que se incrementó la concentración de P en la SN también aumentó la concentración de P en los lixiviados, pero con excepción de la relación aserrín/tezontle medio (A/TM), nunca igualó o superó la concentración de P en la SN. Estos resultados ponen en evidencia que el aserrín presenta altas tasas de inmovilización, no solo de N sino también de P. Havlin *et al.* (2005), mencionan que para la descomposición de residuos orgánicos se requiere altas cantidades de N y P ya que las sustancias húmicas tiene una relación C/N de 10 y una relación C/P de 200. La reducción drástica en concentración de P durante los primeros 20 ddt, quizás no se explique solo con la inmovilización por los microorganismos, sino por una adsorción sobre las superficie del sustrato o por precipitación química con Ca y Mg debido al pH alcalino, como lo indican Silber (2008), Ravi *et al.* (2002) y Silber y Raviv (1996).

Para K no se observaron evidencias que demuestren su participación importante en el proceso de inmovilización, la concentración de K en los lixiviados fue directamente proporcional a la concentración de K en la SN. De manera similar a N y P se observaron diferencias importantes en la concentración de Ca en el lixiviado de todos los tratamientos en comparación con la concentración de Ca en la SN durante los primeros 30 ddt, lo que contrasta con lo observado para K. Posteriormente, de los 40 a 60 ddt en la mayoría de los tratamientos, la concentración de Ca en el lixiviado estuvo ligeramente por debajo o similar a la concentración en la SN. Este comportamiento indica que el Ca participó más que el K en procesos de inmovilización o retención por el sustrato, como lo observado para N y P. La disminución de Ca en los lixiviados se explica principalmente por la adsorción de este catión sobre la superficie del sustrato (Raviv y Lieth, 2008), situación que no es evidente para K, probablemente por una mayor afinidad de Ca por los sitios de adsorción (Barber, 1995).

Considerando que el pH de la SN era de 6, en el estudio de la inmovilización nutrimental se observó un incremento hasta valores de 8.6 en promedio y al final de los 87 ddt el pH disminuyó a valores por debajo de 7. Este cambio en pH, que está relacionado con la asimilación de N (inmovilización de N por los microorganismos y absorción de N por la planta) (Handreck y Black, 2005; Marschner, 2003), es congruente con la disminución en la CE que se observó también durante los primeros 45 ddt. La inmovilización nutrimental probablemente es la causa principal de la menor producción de fruto de jitomate en el primer ciclo de cultivo en comparación a los ciclos de cultivo posteriores.

La variación en características físicas y químicas no tuvo relación aparente con las características y rendimiento de fruto durante el segundo al quinto ciclo de cultivo, los rendimientos son similares a lo reportado por otros investigadores (Antón, 2010; Ojodeagua *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES GENERALES

La capacidad de aireación y la conductividad eléctrica fueron las características del sustrato que presentaron mayor variación durante cinco ciclos de cultivo con jitomate.

El cambio en las propiedades físicas y químicas del aserrín y relaciones aserrín/tezontle durante cinco ciclos de cultivo continuo con jitomate, no produjeron efectos negativos en la producción de fruto, por lo que se puede reutilizar este sustrato durante 30 meses de cultivo.

La inmovilización de N, P y Ca fue importante durante el primer ciclo de cultivo, pero se puede contrarrestar aplicando una solución nutritiva con concentración de 22, 2, 9.8, 12.6, 5.6 y 8 meq·L⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg y S, respectivamente (3 dS·m⁻¹).

Los componentes principales del rendimiento de fruto de jitomate desarrollado en aserrín y relaciones aserrín/tezontle no se afectaron significativamente del segundo al quinto ciclo de cultivo continuo (30 meses) aplicando una solución nutritiva estándar balanceada en nutrimentos de 2 dS·m⁻¹.

LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P.; CARRIÓN, B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- ALARCÓN, V. A. 2000. Introducción a los cultivos sin suelo. Sistemas y sustratos, p 191. *In: Tecnología Para Cultivos de Alto Rendimiento*. Universidad Politécnica de Cartagena (Ed).Cartagena.
- ANSORENA, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- BARBER, A. S. 1995. Soil nutrient bioavailability. John Wiley and Sons. 414 p.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- BRADY, N. C. AND R. R. WEIL. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall, Upper Saddle River N J. USA. 965 p.

- FONTENO, W. 1994. Growing media. *In: Bedding Plants IV, A manual on the culture of bedding plants as a greenhouse crop. Fourth edition.* E. J. Holcomb (ed.). Ball Publishing. Batavia, Illinois, USA.
- HANDRECK, K. A.; N. BLACK. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544.
- HAVLIN, L. S., L. W. NELSON, AND D. J. BEATON. 2005. Soil fertility and fertilizer. 7th ed. Pearson and Prentice-Hall. New York. 515 p.
- MAHER, M.; PRASAD, M.; RAVIV, M. 2008. Organic Soilless Media Components. In *Soilless Culture: Theory and Practice.* RAVIV, M.; LIETH, J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America. 459-504 pp.
- HUCK, M. G.; KLEPPER, B.; TAYLOR, H. M. 1999. Cotton Root Growth & Time Lapse Photography of Root Growth (VHS), VHS, ASA, CSSA, and SSSA. Item number: B30463. Wisconsin USA.
- JACKSON, M. B. 2002. Long-distance signaling from roots to shoots assessed: the flooding story. *Journal of Experimental Botany* 53: 175–181.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*, 396: 273-284.
- MORARD, P.; LACOSTE, L.; J. SILVESTRE. 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 23:1063-1078.
- MARSCHNER, H. 2003. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London. 889 p.
- MENGEL, A Y K. KIRKBY. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic publishers. 5th edition. Netherlands. 849 p.
- OJODEAGUA, A. J. L., CASTELLANOS, R. J.Z., MUÑOZ, R. J.J. ALCANTAR, 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. Rev. Fitotec. Mex. 31(4): 367-374.
- PORTERFIELD, D.M.; MUSGRAVE, M. E. 1998. The tropic response of plant root to oxygen: oxitropism in *Pisum Sativum* L. *Planta* 206: 1–6.
- RAVIV, M.; WALLACH, R.; SILBER, A.; BAR-TAL, A. 2002. Substrates and their analysis. In Hydroponic production of vegetables and ornamentals. SAVVAS, D.; PASSAM, H. (Eds.). Athens: Embryo Publications. p.p. 25-101.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- SALISBURY, B. F.; C. W. ROSS. 2000. Fisiología de las plantas. Editorial Paraninfo. 974 p.
- SILBER, A., M. RAVIV. 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant Soil*, 186: 353-360.
- SILBER, A. 2008. Chemical characteristics of soilless media. In: RAVIV, M.; LIETH, J. H. (eds). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- SONNEVELD, C.; W. VOOGT. 2009. *Plant Nutrition of greenhouse crops*. Springer. 431 p.
- TAIZ, L.; E. ZEIGER. 2003. *Plant physiology*. Editorial Macmillan. 700 p.
- URRESTARAZU, M. 2004. *Tratado de cultivo sin suelo*. Editorial Mundi-Prensa. España. 914 p.