



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

OPTIMIZACIÓN DE LA NUTRICIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS PROTEGIDOS

VÍCTOR MANUEL MONTOYA JASSO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Víctor Manuel Montoya Jasso, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Víctor M. Ordaz Ch., por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

Optimización de la nutrición en la producción de cultivos protegidos

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 25 de julio de 2019



Firma del
Alumno (a)



Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: "OPTIMIZACIÓN DE LA NUTRICIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS PROTEGIDOS" realizada por el alumno: VÍCTOR MANUEL MONTOYA JASSO bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Víctor Manuel Ordaz Chaparro

ASESORA



M.C. Alejandrina Ruiz Bello

ASESOR



Dr. Gerardo Sergio Benedicto Valdés

ASESOR EXTERNO



Dr. Jesús Manuel Arreola Tostado

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2019

OPTIMIZACIÓN DE LA NUTRICIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS PROTEGIDOS

Víctor Manuel Montoya Jasso, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

Los sustratos representan un componente importante en los sistemas hidropónicos de diversos cultivos con interés agronómico. El objetivo del estudio fue evaluar mezclas de sustratos con adición de composta y mezcla mineral de zeolita-dolomita que permitan mejorar las características físicas y químicas de los sustratos para la producción de *Capsicum pubescens*. Se utilizó un sustrato base de tezontle y aserrín (1:2) al cual se aplicó composta (1:2:2), 50 y 100% de K en Solución Steiner y tres niveles (0, 40 y 80 cm³ L⁻¹) de mezcla mineral generando 12 tratamientos, establecidos en parcelas divididas. Se evaluó el efecto de estos tratamientos en las propiedades físicas y químicas de los sustratos y su repercusión en la morfología de *Capsicum pubescens* R. donde se obtuvieron mejoras en las características de número de flores, altura, proporción de materia seca y volumen radical. Los resultados muestran que las propiedades de los sustratos evaluados son similares a los propuestos por otros autores, además de favorecer la retención de nutrientes disponibles y el incremento de los mismos en el tejido vegetal por la adición de composta en el sustrato. Se realizaron análisis en laboratorio de caracterización fisicoquímica y flujo de CO₂ para determinar la mineralización de la MO del sustrato. La tasa de mineralización fue afectada por el uso de minerales, la calidad y origen del sustrato donde los sustratos con composta, por su alta mineralización, resultaron apropiados para la producción agrícola con ventajas en el suministro de N. En conjunto se caracterizó la zeolita y dolomita para conocer su potencial de la fertilidad en la producción bajo sustrato mostrando cualidades de aporte a la fertilidad química de los sustratos y provocando cambios en las proporciones de las porosidades.

Palabras clave: *Minerales, Capsicum pubescens, Absorción nutrimental, Sustratos, Mineralización, Composta.*

OPTIMIZATION OF NUTRITION IN THE PRODUCTION OF PROTECTED CROPS

Víctor Manuel Montoya Jasso, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

The substrates represent an important component in the hydroponic systems of various crops with agronomic interest. The objective of the study was to evaluate mixtures of substrates with addition of compost and zeolite-dolomite mineral mixture that allow improving the physical and chemical characteristics of the substrates for the production of *Capsicum pubescens*. A base substrate of tezontle and sawdust (1:2) was used to which compost was applied (1:2:2), 50 and 100% K in Steiner Solution and three levels (0, 40 and 80 cm³ L⁻¹) of mineral mixture generating 12 treatments, established in divided plots. The effect of these treatments on the physical and chemical properties of the substrates and their impact on the morphology of *Capsicum pubescens* R. were evaluated, where improvements were obtained in the characteristics of number of flowers, height, proportion of dry matter and radical volume. The results show that the properties of the substrates evaluated are similar to those proposed by other authors, in addition to favoring the retention of available nutrients and their increase in plant tissue by the addition of compost in the substrate. Laboratory analyzes of physicochemical characterization and CO₂ flow were performed to determine the mineralization of the substrate's MO. The mineralization rate was affected by the use of minerals, the quality and origin of the substrate where the composted substrates, due to their high mineralization, were appropriate for agricultural production with advantages in the supply of N. Overall, the zeolite was characterized and dolomite to know its fertility potential in the production under substrate showing qualities of contribution to the chemical fertility of the substrates and causing changes in the proportions of the porosities.

Index words: *Minerals, Capsicum pubescens, Nutritional absorption, Substrates, Mineralization, Compost.*

DEDICATORIA

A mi padre Pedro Montoya Acevedo, recuerdo las historias que me contabas de niño en donde siempre era el vencedor, gracias papá por enseñarme a ser un campeón desde pequeño, por inculcarme que con esfuerzo todo se puede y a hacerme sentir afortunado; pues a pesar de vivir sin riquezas, tengo un padre que vale más que cualquier tesoro en el mundo, te quiero mucho papá.

A mi madre Ma. Blanca Jasso Castro, eres la persona que me ha hecho como soy y gracias a ti he afrontado mi vida con seguridad y alegría. Es imposible que algún día te devuelva todo lo que has hecho por mí, tus palabras, tus consejos, tu cariño que suavizó mi carácter y tu amor que ilumina mi vida. Te amo mamá.

A mi hijo Santiago David Montoya Ramírez. A él por ser el principal pilar de todo lo que he construido durante su presencia en mi vida, por esos “Papi, yo también quiero ser agrónomo...” que siempre me motivaban a dar lo mejor de mí día a día. Por todo, gracias campeón.

A mi abuelo Pablo Jasso Ballesteros (†) por esas pláticas motivacionales que me daba todos los días que nos veíamos, por enseñarme la alegría de la vida, por ser un amigo antes de todo y alegrarse inmensamente cada día que pasábamos; por eso y mucho más abuelo. El mejor abuelo del mundo siempre.

A mis hermanos: Jesús, José Eduardo, Antonio, Ma. Patricia, Soledad, Pedro y Pablo Alejandro por su apoyo incondicional ante todas mis necesidades como estudiante, por las palabras de ánimo que siempre me daban, en general, por considerarme un ejemplo a seguir para todos ellos. Gracias hermanos, los quiero bastante.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados por permitirme ser parte de su matrícula de estudiantes y brindar las herramientas necesarias para ampliar los conocimientos científicos en el área agrícola.

Al CONACYT por la beca proporcionada para la realización del posgrado.

A todas las amistades que generé durante estos dos años de estudio, de todos ellos aprendí muchas cosas por demás buenas. En especial, agradecer a todo el personal administrativo y de laboratorio del Posgrado de Edafología por su tan apreciada amistad, apoyo y grandes momentos pasados.

Al Dr. Víctor Manuel Ordaz Chaparro por la dirección, revisión y apoyo incondicional durante la realización de mi tesis. Principalmente, muchas gracias por la amistad y confianza depositada en mí durante estos años, por abrirme las puertas al conocimiento científico. Me siento agradecido de haber sido uno de sus alumnos y tener la oportunidad de recibir parte de sus conocimientos.

A la M.C. Alejandrina Ruiz Bello por la revisión y apoyo durante mi paso en el CP. Principalmente por la amistad y confianza depositada en mí, por los conocimientos brindado y abrirme las puertas al razonamiento científico.

Al Dr. Sergio Gerardo Benedicto Valdés por la revisión y apoyo durante la realización de mi tesis. Gracias por los conocimientos brindados durante mi formación, por la amistad, los consejos, por ser mi docente.

Al Dr. Jesús Manuel Arreola Tostado por la amistad y confianza que me brinda. Por los consejos, los conocimientos, las experiencias, por ser mí amigo, por ser una gran persona. Por darme el valor de realizar una maestría y siempre despertar en mí el gusto por la ciencia. Muchas gracias Dr., gracias.

Un pensamiento que quisiera dejar grabado en ese trabajo está bellamente expresado por Alan Paton en su libro *Cry the Beloved Country*:

“La hierba es fuerte y espesa, y no deja ver el suelo. Retiene la lluvia y el vaho que escurren hasta la tierra y engrosan las corrientes por todos los resquicios... Teneos descalzos sobre él, que el suelo es sagrado... Conservadlo, guardadlo, cuidadlo; que él conserva, guarda y cuida al hombre. Destruídlo, y el hombre será destruido.”

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
LISTA DE CUADROS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CONSIDERACIONES GENERALES	2
I. Ubicación del experimento	2
II. Características climáticas	2
III. Tratamientos y diseño experimental	2
CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSTA, ZEOLITA Y DOLOMITA COMO POTENCIALIZADORES DE LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS	5
I. INTRODUCCIÓN	5
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	7
Objetivo	7
Hipótesis	7
III. REVISIÓN DE LITERATURA	8
Abonos orgánicos en agricultura	8
Compostas	8
Uso de compostas en la agricultura	8
Características físicas y químicas de las compostas	8
Uso de potencializadores de la fertilidad en horticultura	9
Zeolita	10
Aplicaciones de la zeolita en la agricultura	10
Ocurrencia	10
Cristalografía	11
Dolomita	11
Aplicaciones de la dolomita en la agricultura	12

Ocurrencia	12
Cristalografía.....	13
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Caracterización de la composta y de la mezcla mineral de zeolita y dolomita.....	14
Propiedades físicas y químicas.....	14
Análisis cristalográfico de la mezcla mineral de zeolita y dolomita	14
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
Caracterización de la composta	15
Propiedades físicas y químicas.....	15
Caracterización de la zeolita y de la dolomita	15
Propiedades fisicoquímicas y contenido nutrimental	15
Análisis cristalográfico.....	16
VI. CONCLUSIONES.....	17
VII. LITERATURA CITADA	18
CAPÍTULO 2. RESPUESTAS MORFOLÓGICAS DE CHILE MANZANO (<i>Capsicum</i>	
<i>pubescens</i> R. y P.) A LA FERTILIZACIÓN MINERAL Y ORGÁNICA.....	26
I. INTRODUCCIÓN	26
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	28
Objetivo general	28
Objetivos particulares.....	28
Hipótesis	28
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	29
Situación del chile en México	29
Ecología del cultivo de chile	29
Chile manzano	30
Manejo agronómico	30
Variedad utilizada.....	30
Fecha de trasplante	31
Densidad de siembra	31
Fertilización	31
Manejo integrado de plagas y enfermedades.....	31

IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
Chile manzano variedad Chapingo como cultivo indicador.	32
Elaboración del sustrato	32
Manejo del cultivo	32
VARIABLES EVALUADAS EN PLANTA.....	32
Altura de planta.....	33
Número de botones florales	33
Número de nudos.....	33
Peso fresco de raíz	33
Volumen de raíz.....	33
Peso seco de raíz	33
Producción de materia seca (MS)	34
Análisis nutrimental de la planta.....	34
Análisis estadístico	34
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
VARIABLES EVALUADAS EN PLANTA.....	35
Altura de planta.....	35
Número de botones florales	36
Número de nudos.....	37
Peso fresco de raíz	38
Volumen de raíz.....	39
Peso seco de raíz	39
Proporción de materia seca (MS)	40
Análisis nutrimental de la planta.....	41
VI. CONCLUSIONES.....	44
VII. LITERATURA CITADA	45
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN Y POTENCIAL DE LOS SUSTRATOS EN LA	
NUTRICIÓN DE CULTIVOS.....	52
I. INTRODUCCIÓN	52
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	54
Objetivo general	54

Objetivos particulares.....	54
Hipótesis	54
III. REVISIÓN DE LITERATURA	55
Sustrato	55
Materiales utilizados como sustratos.....	55
Aserrín.....	55
Tezontle	56
Funciones del sustrato.....	56
Características físicas de los sustratos.....	56
Densidad aparente.....	57
Granulometría	57
Porosidad	57
Curva de retención de la humedad.....	57
Características químicas de los sustratos.....	57
Conductividad eléctrica	57
pH	58
Bases intercambiables	58
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	58
Relación Carbono/Nitrógeno.....	58
Uso de potencializadores de la fertilidad en la agricultura	59
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	60
Caracterización de los sustratos	60
Físicas:.....	60
Porosidad	60
Densidad aparente.....	60
Granulometría	60
Curva de retención de humedad.....	61
Químicas:	61
Conductividad eléctrica y pH.....	61
Bases intercambiables y Capacidad de intercambio catiónico	61
Relación Carbono/Nitrógeno.....	61

Contenido de materia orgánica y carbono orgánico	62
Contenido total de nitrógeno	62
Fósforo (P)	62
Análisis estadístico	62
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
Características física y química de los sustratos	63
Físicas:	63
Porosidad	63
Densidad aparente	64
Granulometría	65
Curva de liberación de la humedad	65
Químicas:	68
Conductividad eléctrica y pH	68
Bases intercambiables y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	69
Relación Carbono/Nitrógeno	70
Contenido de materia orgánica (MO)	71
Carbono orgánico (CO)	71
Contenido de nitrógeno (NT)	71
Fósforo (P)	72
Potasio (K)	73
Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)	73
VI. CONCLUSIONES	75
VII. LITERATURA CITADA	76
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE SUSTRATOS	
MEDIANTE LA LIBERACIÓN DE CO₂ BAJO FERTILIZACIÓN NITROGENADA	86
I. INTRODUCCIÓN	86
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	88
Objetivo general	88
Objetivos particulares	88
Hipótesis	88
III. REVISIÓN DE LITERATURA	89

La materia orgánica y el carbono orgánico del sustrato	89
El carbono en los sustratos	89
El nitrógeno en los sustratos.....	89
Humedad del sustrato como control de la liberación de CO ₂	90
Descomposición de la fracción orgánica	90
Impacto de los minerales en la mineralización de la materia orgánica	91
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	92
pH y Conductividad eléctrica (CE)	93
Materia orgánica y carbono orgánico	93
Nitrógeno total.....	93
Relación Carbono/Nitrógeno.....	93
Emisión, flujo, acumulación y tasas de mineralización de CO ₂	93
Análisis estadístico	94
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
Emisión de CO ₂ con el 15 y 30% de humedad	95
Acumulación de CO ₂ en 15 y 30% de humedad.....	97
Tasa de mineralización absoluta en 15 y 30% de humedad.....	98
Tasa de mineralización absoluta en 50 y 100% de fertilización nitrogenada.....	99
Tasa de mineralización absoluta en sustratos con incorporación de 0, 40 y 80 cm ³ L ⁻¹ de mezcla mineral de zeolita y dolomita	100
Tasa relativa de mineralización total de los sustratos	101
pH y Conductividad eléctrica (CE)	102
Materia orgánica (MO).....	104
Carbono orgánico (CO)	105
Nitrógeno total (NT).....	105
Relación Carbono/Nitrógeno.....	106
VI. CONCLUSIONES.....	108
VII. LITERATURA CITADA.....	109
CONCLUSIONES GENERALES.....	117
ANEXOS.....	119

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Tratamientos evaluados en el cultivo de chile manzano.....	3
Cuadro 2. Características químicas en compostas de cachaza con bagazo, estiércol vacuno, pulpa de café y gallinaza.....	9
Cuadro 3. Ángulos 2θ e intensidades de difracción para la zeolita clinoptilolita (ICSD, 1996).	11
Cuadro 4. Ángulos 2θ e intensidades de difracción para la dolomita (ICSD, 1996).....	13
Cuadro 5. Características químicas de la composta y la mezcla mineral de zeolita y dolomita.	15
Cuadro 6. Descripción de los tratamientos para la evaluación de la liberación de CO ₂ en sustratos bajo fertilización nitrogenada.....	92
Cuadro A.1. Cuadrados medios de las variables de altura, número de nudos, botones florales, peso fresco radical, peso seco radical, volumen de raíz y producción de materia seca en chile manzano.....	119
Cuadro A. 2. Cuadrados medios de las variables de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en tejido vegetal de chile manzano.....	120
Cuadro A. 3. Medias de la acción de los factores de estudio a las variables de respuestas morfológicas y contenido nutrimental en tejido vegetal.....	121
Cuadro A. 4. Prueba de medias para los tratamientos de estudio y el efecto en las variables de respuesta en la morfología y contenido nutrimental en tejido vegetal.....	122
Cuadro A. 5. Matriz de correlación de los factores de estudio a las variables de respuestas morfológicas y de contenido nutrimental en tejido vegetal.	123
Cuadro A. 6. Cuadrados medios de las variables de potencial hidronio, conductividad eléctrica, porosidad total, porosidad de aireación, porosidad de retención de humedad y densidad aparente en sustratos.	124
Cuadro A. 7. Prueba de medias de los factores de estudio a las variables fisicoquímicas y físicas de los sustratos.....	125
Cuadro A. 8. Prueba de medias para los tratamientos de estudio y el efecto en las variables fisicoquímicas y físicas de los sustratos.....	126

Cuadro A. 9. Cuadrados medios de las variables de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno en sustratos.....	127
Cuadro A. 10. Prueba de medias de los factores de estudio a las variables de respuestas químicas de los sustratos.....	128
Cuadro A. 11. Prueba de medias de los tratamientos de estudio a las variables de respuestas químicas de los sustratos.....	129
Cuadro A. 12. Matriz de correlación de los factores de estudio a las variables de respuestas físicoquímicas, físicas y químicas del sustrato.....	130
Cuadro A. 13. Cuadrados medios de las variables de pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno en sustratos con 15% de humedad gravimétrica.....	131
Cuadro A. 14. Cuadrados medios de las variables de pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno en sustratos con 30% de humedad gravimétrica.....	131
Cuadro A. 15. Prueba de medias de las propiedades químicas de los sustratos con 15 y 30% de humedad gravimétrica.	132
Cuadro A. 16. Matriz de correlación de los factores de estudio a las variables de respuestas químicas del sustrato con 15% de humedad gravimétrica.	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Patrón de difracción de rayos X de la dolomita y de las especies zeolíticas heulandita y clinoptilolita.	16
Figura 2. Altura y número de nudos de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.	36
Figura 3. Botones y número de nudos de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.....	37
Figura 4. Peso fresco y volumen radical de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.....	38
Figura 5. Peso fresco y peso seco radical de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.....	40
Figura 6. Materia seca de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.....	40
Figura 7. Concentración de nitrógeno total foliar de chile manzano en etapa de floración.	41
Figura 8. Concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio foliar de chile manzano en etapa de floración.	42
Figura 9. Proporción de las distintas porosidades en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.	64
Figura 10. Curva de liberación de la humedad de las mezclas de sustratos al inicio del experimento.....	66
Figura 11. Curva de liberación de la humedad de la mezcla de sustratos de tezontle y aserrín (T:A) al final del experimento.	67
Figura 12. Curva final de liberación de la humedad de la mezcla de sustratos de tezontle, aserrín y composta (T:A:C) al final del experimento.	67
Figura 13. pH y conductividad eléctrica en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.	68
Figura 14. Capacidad de intercambio catiónico final en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.	70
Figura 15. Concentración de calcio, magnesio y potasio en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.	74

Figura 16. Evolución del CO ₂ en sustratos con 15% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.....	95
Figura 17. Evolución del CO ₂ en sustratos con 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.....	96
Figura 18. Acumulado del CO ₂ en sustratos con 15% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.....	97
Figura 19. Acumulado del CO ₂ en sustratos con 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.....	98
Figura 20. Tasa absoluta de mineralización de los sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	99
Figura 21. Tasa absoluta de mineralización de los sustratos con 50 y 100% de nitrógeno y diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	100
Figura 22. Tasa absoluta de mineralización de los sustratos con 0, 40 y 80 cm ³ L ⁻¹ de mezcla mineral y diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).	101
Figura 23. Tasa relativa de mineralización de sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	102
Figura 24. pH y conductividad eléctrica de sustratos bajo 15% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	103
Figura 25. pH y conductividad eléctrica de sustratos bajo 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	103
Figura 26. Contenido de materia orgánica de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	104

Figura 27. Contenido de carbono orgánico de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	105
Figura 28. Nitrógeno total de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	106
Figura 29. Relación carbono/nitrógeno de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).....	106

INTRODUCCIÓN GENERAL

En este planeta todo lo que en él sucede es protagonizado por la naturaleza que se muestra como un cuerpo vivo capaz de sostenerse en equilibrio biológico, siendo entonces imprescindible el papel de la materia orgánica para enriquecer la vida biológica y mantener una tierra sana, productiva y fértil.

Tal equilibrio biológico nos muestra que su secreto es la renovación sostenida de los elementos que la naturaleza ofrece. Se considera sostenida aquella condición que puede mantenerse indefinidamente, usando recursos que nunca se agoten. Por tal motivo, a la luz de los problemas mundiales como la reducción de la cantidad de recursos disponibles por persona y agotamiento del suelo, el desarrollo de las técnicas y medios de cultivos con altos rendimientos que conserven los recursos, son aún más importantes cada día.

En México existen materiales que provienen de desechos del beneficiado de productos agrícolas, de los residuos ganaderos y de la industria maderera que ofrecen gran potencial en la agricultura para su explotación alternativa como sustratos. Parte de ese potencial está en el competir con costos y calidad con materiales de importación que han penetrado en el mercado agrícola nacional.

Los residuos orgánicos tienen un doble valor potencial, por un lado, representan una posible fuente de ingresos complementarios a la empresa agropecuaria, cuando a corto plazo son directamente utilizados por el agricultor como fuente de fertilización química y física y, por otro lado, a más largo plazo, significan una aportación en forma de materia orgánica capaz de incrementar o restituir el potencial productivo de los sistemas agrícolas.

En la actualidad el uso de minerales como potencializadores de la fertilidad es escaso, generalmente son utilizados en otras actividades. El uso de zeolitas y dolomitas, los principales minerales utilizados en la agricultura, provoca cambios en las características de los sustratos que los vuelven más apropiados para la producción de cultivos en ciclos más prolongados sin perder sus principales componentes en base a su funcionalidad, costos y facilidad de manejo. En la actualidad existe una gran cantidad de materiales que pueden ser utilizados como mejoradores de los sustratos y su selección dependerá de la especie vegetal a cultivar, el tiempo, el sistema de siembra, el precio, la disponibilidad y las características propias de cada sustrato.

CONSIDERACIONES GENERALES

I. Ubicación del experimento

La presente investigación se realizó en dos fases: campo y laboratorio del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. El lote experimental está ubicado en los 19°46'52'' LN y 98°91'30'' LO, a 2,240 de altitud.

II. Características climáticas

El clima es clasificado como Cwb el cual corresponde a templado con inviernos secos. La temperatura media anual es de 15.2 °C, y precipitación media anual de 590 mm. Las heladas inician en los últimos días de octubre, se establecen de manera franca en noviembre y en ocasiones se manifiestan hasta enero.

III. Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental correspondió a un parcelas subdivididas con doce tratamientos para medir el efecto de mezcla mineral de zeolita y dolomita, composta y fertilización en el cultivo de chile manzano. Cuatro tratamientos correspondieron a pruebas testigo (con y sin composta), con dos niveles de fertilización y sin adición de mezcla mineral. Los restantes ocho tratamientos fueron clasificados acordes a su contenido de mezcla mineral. Las descripciones de los tratamientos se presentan en el Cuadro 1. La dimensión de cada unidad experimental fue de 12 parcelas chicas comprendidas por 20 contenedores con capacidad de 10 litros, dentro de cada parcela chica se realizó la aleatorización para cumplir con homogeneidad estadística. La separación entre parcelas chicas fue de 0.5 m lineales, mientras que la separación de las parcelas grandes fue de 1.5 m de longitud. La superficie total del ensayo fue de 75 m².

Los materiales utilizados para conformar el sustrato fueron una mezcla mineral de zeolita (16%) y dolomita (48%) con tamaño de partícula de 2-0.5 mm, composta a base de estiércol vacuno, cachaza y pulpa de café; tezontle <2.5 cm y aserrín proveniente de aserradero. El sustrato resultante fue sometido a la determinación de pH, CE, porosidad total, de aireación y porcentaje

de retención de humedad con la finalidad de calcular el contenido de agua fácilmente disponible y programar los riegos. La fertilización se manejó con distintos contenidos de K en su formulación (50 y 100%) para conocer si la disminución de K propiciaba cambios en el cultivo. Marschner (2002) menciona que el K cumple con funciones importantes para la nutrición de plantas, entre las cuales están promover un crecimiento fuerte (Fageria *et al.*, 1997), maximiza la síntesis de proteínas y enzimas encargadas del desarrollo, maduración y calidad del fruto (Genc *et al.*, 2005).

Cuadro 1 Tratamientos evaluados en el cultivo de chile manzano.

Tratamiento	Sustrato		Factores	
	T:A	SN (K%)	C (v:v)	MM (cm ³ L ⁻¹)
1	1:2	100	0	0.0
2	1:2	100	0	40.0
3	1:2	100	0	80.0
4	1:2	50	0	0.0
5	1:2	50	0	40.0
6	1:2	50	0	80.0
7	1:2	100	2	0.0
8	1:2	100	2	40.0
9	1:2	100	2	80.0
10	1:2	50	2	0.0
11	1:2	50	2	40.0
12	1:2	50	2	80.0

Dónde: T.- Tezontle, A.- Aserrín, SN.- Solución nutritiva, C.- Composta y MM.- Mezcla mineral.

El experimento se manejó bajo agricultura protegida. Para todos los tratamientos, el sustrato constó de tezontle y aserrín (T:A) en relación volumen de 1:2, para la SN se tomó referencia en la Solución Universal de Steiner (1984) donde se evaluaron la reducción del 50% y el suministro total (100%) de potasio. La composta fue dividida en la mitad de los tratamientos, se agregó en relación volumen junto con T:A (1:2:2) y MM se añadió en cantidades crecientes teniendo en cuenta la adición por la capacidad del contenedor.

Los datos obtenidos en cada variable fueron sometidos al análisis estadístico correspondiente, cuyo modelo estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu_{...} + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\delta)_{ik} + (\beta\delta)_{jk} + (\alpha\beta\delta)_{ijk} + \xi_{ijkl}$$

Donde:

$I = 1, 2, \dots, a$ (hasta “a” niveles de la parcela A)

$j = 1, 2, \dots, b$ (hasta “b” niveles de la parcela B)

$k = 1, 2, \dots, c$ (hasta “c” niveles de la parcela C)

$l = 1, 2, \dots, r$ (repeticiones)

Factores:

μ = Media estadística.

α_i = Efecto del i-ésimo nivel de la parcela A.

β_j = Efecto del j-ésimo nivel de la parcela B.

δ_k = Efecto del k-ésimo nivel de la parcela C.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel de la parcela A con el j-ésimo nivel de la parcela B.

$(\alpha\delta)_{ik}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel de la parcela A con el k-ésimo nivel de la parcela C.

$(\beta\delta)_{jk}$ = Efecto de la interacción del j-ésimo nivel de la parcela B con el k-ésimo nivel de la parcela C.

$(\alpha\beta\delta)_{ijk}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel de la parcela A con el j-ésimo nivel de la parcela B del k-ésimo nivel de la parcela C.

ξ_{ijkl} = Variación del error asociado a las ijkl-ésimas unidades experimentales.

CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSTA, ZEOLITA Y DOLOMITA COMO POTENCIALIZADORES DE LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más evidentes que enfrenta la humanidad, actualmente, es la degradación del medio ambiente; este hecho se produce por el uso excesivo e incorrecto de la tecnología, la industria y de la ciencia. La desproporcionada fertilización química, realizada en los últimos años, ha atentado contra la calidad del medio ambiente y la salud del hombre (Bertsch, 2003).

Los abonos orgánicos no contienen los nutrimentos suficientes para la obtención de cosechas rentables y el uso de elevado de fertilizantes, específicamente nitrogenados y fosfatados, causan daños graves al ambiente (Castillo *et al.*, 1999). Por tanto, una opción es ir sustituyendo gradualmente el uso de químicos inorgánicos por abonos orgánicos hasta lograr un equilibrio que permita cierta rentabilidad sin alteración de los recursos naturales (Soto, 2003).

Velasco *et al.*, (2001) resaltan la importancia de implementar técnicas de producción agrícola enfocadas al uso eficiente de los recursos que tiendan hacia una agricultura sostenible, las cuales persiguen reducir los insumos químicos al suelo manteniendo rendimientos rentables. Las prácticas agronómicas de fertilización hacen referencia a todas aquellas técnicas que permiten mejorar la fertilidad de las tierras desde el punto de vista físico, químico y biológico (Bertsch, 2003), dentro de ellas, el abastecimiento de nutrimentos a través de fuentes minerales y abonos orgánicos como los estiércoles, restos de cosecha, compost y vermicompost, entre otros (Leblanc *et al.*, 2007). La incorporación de minerales y abonos orgánicos con fines de biorremediación y potencialización de suelos agrícolas, es una práctica de importancia mundial (Nieto *et al.*, 2002) ya que con su uso se mejoran las condiciones de suelos que han sido deteriorados por el uso excesivos de fertilización, agroquímicos y sobreexplotación.

El uso de abonos orgánicos y minerales aumentan los rendimientos, según han reportado Añez y Espinoza (2003), Barroso *et al.*, (1993) y Caballero *et al.*, (1995). De igual manera Jakse

y Mihelic (1999), Sikora (1998), Voogt (1999) y Zhao *et al.*, (1992) mencionan que el uso de abonos y fertilización de base mineral mejoran las condiciones edáficas.

De cara a esta realidad, es de gran importancia rescatar los conocimientos ancestrales de la agricultura conservacionista de los suelos, que fue practicada por nuestros ancestros, mediante las prácticas sencillas y de bajo costo como son: los cultivos asociados, la incorporación de estiércoles, el descanso adecuado de los suelos para mantener su fertilidad, entre otras actividades y así alcanzar una agricultura sustentable (Kalmás y Vázquez, 1996).

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo

- I. Caracterizar la composta, la zeolita y la dolomita para identificar sus efectos como potencializador en la producción de cultivos protegidos.

Hipótesis

- I. La composta y los minerales optimizan la disponibilidad de los nutrimentos para los cultivos.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

Abonos orgánicos en agricultura

Los abonos orgánicos son aquellos residuos de origen animal y vegetal de los cuales las plantas pueden obtener importantes cantidades de nutrimentos (Pérez *et al.*, 2007), el suelo, con la descomposición de estos abonos se ve enriquecido con materia orgánica y mejora sus características físicas, químicas y biológicas. Entre los abonos de mayor uso en la agricultura se encuentran los estiércoles, las compostas y esquilmos (Salgado *et al.*, 2012).

Compostas

Las compostas son materia orgánica, proveniente de residuos domésticos, agroindustriales, agropecuarios y marinos, atacada por microorganismos en un proceso de fermentación aeróbica termofílica (Singh y Lal, 2007) en un ambiente cálido y húmedo que favorezca la acción microbiana (Gerónimo *et al.*, 2002).

Uso de compostas en la agricultura

Al aplicarse compostas al suelo, se promueve el crecimiento de raíces y la absorción de nutrimentos con repercusión en el rendimiento de los cultivos (Bautista *et al.*, 2004). Su uso ha permitido aumentar la producción y obtención de productos agrícolas con mejores prácticas de manejo (Vásquez, 2005) causando ahorros en la aplicación de fertilizantes permitiendo la disponibilidad de nutrientes para la planta como lo han manifestado Vásquez *et al.*, (2007), Terry *et al.*, (2007), Otero (2010) y Hernández *et al.*, (2010).

Las compostas, por sus propias características en su composición son formadoras de humus y enriquecen al suelo mejorando algunas de sus propiedades como el pH y la CIC. Sin embargo, es necesario tener especial cuidado con el uso de compostas a base de estiércoles de pollo o cerdo ya que pueden acarrear problemas por toxicidad de elementos como cobre o arsénico (Alloway, 1990).

Características físicas y químicas de las compostas

Quintero y Gómez (2006), Arreola *et al.*, (2004), Pérez *et al.*, (2008) y Hernández *et al.*, (2009) hacen mención de las características fisicoquímicas de las compostas formadas por

materiales de la industria azucarera y agropecuaria presentes en México, en el Cuadro 2 se presentan los valores promedios de los parámetros.

Cuadro 2. Características químicas en compostas de cachaza con bagazo, estiércol vacuno, pulpa de café y gallinaza.

Mezclas	NT	MO	CE	pH	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
	(%)	(%)	(dS m ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
Cachaza-Bagazo (50:50)	1.1	38.7	3.0	5.0	317.3	406.3
Cachaza-Estiercol vacuno (50:50)	0.9	51.0	3.3	5.3	70.2	11.3
Cachaza-Pulpa de café (25:75)	0.6	45.7	0.5	7.3	68.4	21.8
Cachaza-Gallinaza (50:50)	1.2	49.7	3.0	5.0	2,145.3	324.8

Uso de potencializadores de la fertilidad en horticultura

La fertilidad del suelo es la capacidad que tiene el terreno para sustentar el crecimiento de las plantas y optimizar el rendimiento de los cultivos, ello puede potenciarse por medio de fertilizantes orgánicos e inorgánicos que nutran el suelo.

Las zeolitas se han aplicado como mejorador de diferentes características de suelos y cultivos, provocando en estos un incremento de la capacidad de intercambio catiónico y mayores contenidos de fósforo y potasio en los suelos (Febles *et al.*, 2014). La incorporación de zeolitas naturales en la formulación de fertilizantes minerales puede ser una alternativa para favorecer la retención del NH₄⁺ y de otros cationes provenientes de los fertilizantes (He *et al.*, 2008). De acuerdo con De Campos *et al.*, (2003) estas pueden actuar como abonos de liberación lenta incrementando el uso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo o como enmiendas al aumentar la capacidad de retención de humedad en los suelos.

La dolomita cumple con algunas de las características deseables en los productos que se utilizan para aumentar el contenido de calcio y magnesio en los suelos (Osorio, 2006) pero su uso tiene poco interés dentro de la agricultura (Alvarado y Loarte, 2004) ya que con un buen manejo del suelo y aportes de diversas fuentes de materia orgánica no suele ser necesaria (Havlin y Tisdale, 1999). El efecto de la dolomita se restringe al cambio del pH (Zapata, 2004).

Zeolita

Forman parte de la familia de los aluminosilicatos hidratados con estructura cristalina, tridimensional y formada por tetraedros de óxido de silicio (SiO_4^{4-}) en los cuales el oxígeno de cada arista está compartido con tetraedros adyacentes (Gottardi, 1978). Se han identificado alrededor de quince especies de zeolita en la naturaleza con gran potencial en la agricultura, entre ellas: cabacita, heulandita, laumontita, erionita, mordenita, filipsita y clinoptilolita. La especie clinoptilolita es la más abundante y con presencia en suelos que van desde ligeramente ácidos hasta fuertemente alcalinos (Ming, 1986).

Aplicaciones de la zeolita en la agricultura

El uso de zeolitas para mejorar la productividad agrícola está basado en sus propiedades físicas y químicas y su amplia distribución en depósitos sedimentarios derivados de materiales volcánicos. Unas amplias variedades de aplicaciones han sido probadas para el uso de zeolitas, incluyendo la de mejoradores de suelo, fertilizantes de lenta liberación, portadores de plaguicidas y agentes de remediación en suelos contaminados (Ming y Allen, 2001). De igual manera, han sido reportados los beneficios de su aplicación en la reducción de la volatilización del nitrógeno hasta en un 47% cuando se combina con fertilizantes nitrogenados como la urea (Urquiaga y Zapata, 2002). Las formulaciones de zeolita con urea han permitido reducir dosis de aplicación, sin disminución de los rendimientos en cultivos como trigo (Osuna *et al.*, 2012), soya (Rodríguez y Gatti, 2010), hortalizas y papa (John *et al.*, 2001), avena (Flórez *et al.*, 2007), cebolla puerro (Álvarez *et al.*, 2010), girasol (Gholamhoseini *et al.*, 2013) y maíz (González *et al.*, 2012).

Ocurrencia

En 1972, Mumpton realizó en México el primer descubrimiento de un yacimiento de zeolitas de origen sedimentario (clinoptilolita y mordenita) en el Valle del río Atoyac (Olguín, 1999). Los estudios de caracterización detectaron abundancia de heulandita, chabazita y clinoptilolita (Servín, 2005). La heulandita y la clinoptilolita se formaron por la alteración del vidrio volcánico, durante el movimiento del agua meteórica en los yacimientos continentales de tipo sistema abierto. Este proceso de alteración tuvo lugar en dos grandes formaciones estratigráficas; la primera, de edad Terciario Superior Volcánico (TSV), está constituida por riolitas y sus tobas (Plioceno); la segunda, del Cretácico Medio (Formación Vallecitas), está compuesta por series volcanosedimentarias de flujos de lavas y brechas riolíticas (Ostrooumov, 2003).

Cristalografía

En el Cuadro 3 se presentan los patrones de difracción estándar que son utilizados para conocer la presencia y pureza de una zeolita en cualquier muestra sometida a un análisis de difracción de rayos X. Los ángulos 2θ en los cuales la clinoptilolita difracta los rayos X procedentes de los planos sucesivos y su intensidad de reflexión son los aceptados por Inorganic Crystal Structure Database en su tarjeta de identificación 25-1349.

Cuadro 3. Ángulos 2θ e intensidades de difracción para la zeolita clinoptilolita (ICSD, 1996).

2θ	Intensidad	h	k	l
9.838	85	0	2	0
11.186	40	2	0	0
13.096	15	-2	0	1
14.939	5	-2	2	0
16.953	15	-3	1	1
17.320	30	1	1	1
19.069	30	-1	3	3
20.435	10	-4	0	1
22.388	100	4	0	0
22.742	70	-4	2	1
23.193	10	2	2	1
25.091	20	-3	1	2
26.069	45	-2	2	2
26.344	25	-4	0	2
28.195	40	-4	2	2
28.591	25	-4	4	1
29.047	20	-1	3	2
30.026	65	1	5	1
32.033	40	-6	2	1
32.768	25	-6	0	2

Dolomita

La fórmula química de este mineral es $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ y fue descubierto por primera vez entre los años 1788 y 1789 por el mineralogista y geólogo francés Déodat de Dolomieu, por quién se le da el nombre de Dolomita al mineral, en forma de reconocimiento (Leguey *et al.*, 2010). La dolomita es un carbonato doble de calcio y magnesio, es más que una simple variante de caliza, contiene el 30.41% de CaO, 21.86% de MgO y el 47.73% de CO_2 , en su forma más pura (Ortiz, 2008). Normalmente se presenta en cristales romboédricos y por lo general estos cristales son de

hábito deformado, muy aplastados, curvos en forma de silla de montar o en formas masivas, compactas o bien en forma de pequeñas geodas (Casado *et al.*, 2014).

Dependiendo del contenido de carbonato de magnesio ($MgCO_3$) que contenga la dolomita, ésta puede llegar a confundirse con caliza dolomítica, magnesita o caliza magnesiana (Vasconcelos y McKenzie, 1997). La Teruelita es una variedad negra de la dolomita por su abundancia en hierro. La sustitución del magnesio (Mg) por hierro (Fe) es frecuente e ilimitada, llegándose al término en que todo el Mg es sustituido por Fe dando la Ankerita o Ferrodolomita; $CaFe(CO_3)_2$ (Mercedes-Martín *et al.*, 2016); la sustitución del magnesio (Mg) por manganeso (Mn) también se da, llegándose al término en que todo el (Mg) es sustituido por (Mn) dando la kutnahorita o Manganodolomita, $CaMn(CO_3)_2$, una especie rara (Casado *et al.*, 2014).

Aplicaciones de la dolomita en la agricultura

La acidificación de los suelos es una limitante a la producción de los cultivos, principalmente en zonas tropicales (Vázquez y Pagani, 2015). Dentro de las consecuencias de esta problemática pueden mencionarse la disminución de la disponibilidad de nutrientes básicos y de los nutrientes que varían su solubilidad en función del pH, la aceleración de la alteración de los minerales edáficos, propensión a estructuras inestables y toxicidad de aluminio (Azcarate *et al.*, 2012).

El uso de minerales como la dolomita tiene como objetivo incrementar el pH, la incorporación de calcio y magnesio (Vázquez, 2007). En relación al suministro de calcio y magnesio al cultivo, al aplicarse vía foliar el calcio posee una velocidad de absorción foliar mucho menor que el magnesio (Salas, 2002) cuyos periodos de absorción son de 2 a 5 horas para el calcio y de 1 a 2 días para el magnesio (Bertsch, 1995) por esta razón se recomienda hacerlo directamente en fertilización al suelo donde la dolomita es un excelente material para suministrar los elementos.

Ocurrencia

La mayoría de las dolomías se originan por sustitución de Mg por Ca en las calizas, como ocurre en las calizas dolomitizadas y dolomías del Jurásico inferior y Cretácico superior. Este proceso genera que se pierdan la mayor parte de las estructuras que existían en las calizas (Roberts *et al.*, 2013)

Las dolomías primarias, se suelen formar en lagunas salobres sometidas a un clima caluroso y seco, donde se dan importantes procesos de evaporación, que propician la precipitación de carbonatos y posteriormente de sulfatos y haluros, como ocurrió durante el Triásico en gran parte del mundo (Leguey *et al.*, 2010).

Cristalografía

En el Cuadro 4 se presentan los patrones de difracción estándar que son utilizados para conocer la presencia y pureza de una dolomita en cualquier muestra sometida a un análisis de difracción de rayos X. Los ángulos 2θ en los cuales el carbonato de magnesio difracta los rayos X procedentes de los planos sucesivos y su intensidad de reflexión son los aceptados por Inorganic Crystal Structure Database 01-089-0460.

Cuadro 4. Ángulos 2θ e intensidades de difracción para la dolomita (ICSD, 1996).

2θ	Intensidad	h	k	l
34.885	20.5	0	1	2
35.449	1.4	0	0	9
37.548	0.1	1	0	4
39.444	17.9	0	1	5
44.166	0.1	1	0	7
46.922	20.5	0	1	8
47.897	0.5	0	0	12
53.086	4.6	1	0	10
56.458	3.1	0	1	11
60.766	5.5	1	1	0
60.982	2.9	0	0	5
62.110	5.9	1	1	15
63.723	2.1	1	0	3
66.047	1.9	1	1	13
67.610	1.2	0	1	6
71.606	0.2	0	2	14
72.020	0.6	2	0	1
72.362	0.2	1	1	2
73.667	0.1	0	2	9
74.893	1.6	2	0	4

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la composta y de la mezcla mineral de zeolita y dolomita

Propiedades físicas y químicas

El pH y la CE fueron medidos por la metodología de Ansorena (1994) mediante extracto acuoso. El nitrógeno total se realizó por el método micro Kjeldahl (modificado por Bremmer (1965) que consiste en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico. El fósforo se determinó por colorimetría mediante el método Olsen como resultado de un valor de pH >7 (Fernández, 2006). El valor de la CIC se obtuvo por el método del acetato de amonio a pH 7 1 N saturando la muestra con un catión desplazante bajo la metodología en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Análisis cristalográfico de la mezcla mineral de zeolita y dolomita

El análisis fue realizado por difracción de rayos X, utilizando un difractómetro EMPYREAN acoplado equipado con filtro de hierro, tubo de cobalto de foco fino de níquel y detector PIXcel3D. La muestra se homogeneizó mediante un mortero de alumina y se montó en un portamuestras de aluminio de doble carga.

La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 4° a 80° con un “step scan” de 0.003° (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso. La identificación se realizó utilizando el software HighScore (PANalytical) y las bases de datos ICSD (Inorganic Crystal Structure database) y ICDD (International Center for Diffraction Data). La cuantificación se realizó mediante el método de RIR (reference Intensity Ratio).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la composta

Propiedades físicas y químicas

La calidad de un compostaje se puede medir en términos de edad, madurez, contenido de nutrientes y propiedades fisicoquímicas y biológicas (Bissala y Pyne, 2006). En el Cuadro 5 se presentan los valores de pH y CE. El valor de pH de la composta fue ligeramente alcalino, sin embargo, no causa la limitante en la disposición de nutrimentos, la conductividad eléctrica presente se catalogó en un rango medio lo que podría causar un alto contenido de sales en el sustrato junto con la fertilización, el manejo del riego fue factor positivo para evitar la acumulación de sales.

En cuanto a la composta utilizada en el ensayo los nutrientes contenidos en la composta estuvieron determinados por el tipo de material utilizado para su elaboración, Uribe *et al.*, (2001) menciona que el composteado de estiércol vacuno debe presentar un valor mayor a 1% de nitrógeno total y de fósforo, además de una capacidad de intercambio catiónico mínima de 30 $\text{Cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de composta (Day y Shaw, 2001). Teniendo en cuenta los parámetros anteriores la composta utilizada se considera apta para la producción agrícola (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características químicas de la composta y la mezcla mineral de zeolita y dolomita.

Muestra	pH	CE	N	P	K	Ca	Mg	Na	CIC
		(dS m^{-1})	(%)	(ppm)					($\text{Cmol}_c \text{kg}^{-1}$)
Composta	7.38	3.12	1.82	0.05	0.15	1.02	27.62	0.06	30
Mezcla mineral	7.02	5.16	0.07	0.14	0.48	2.53	3.77	0.07	49

Caracterización de la zeolita y de la dolomita

Propiedades fisicoquímicas y contenido nutrimental

En el Cuadro 5 se observa pH de la mezcla mineral el cual es ligeramente alcalino, y tiene relación con el contenido de nitrógeno total, Jordán *et al.*, (2007) encontraron cambios de pH en minerales cargados con NH_4^+ donde la zeolita tiene mayor absorción del catión amonio.

La incorporación de minerales puede ser una alternativa para favorecer la fertilidad química del sustrato, de acuerdo con De Campos *et al.*, (2013) la zeolita actúa como agente de liberación lenta de nutrientes como nitrógeno y potasio mientras la dolomita es fuente de elementos como

calcio y magnesio, en algunos casos suministra hierro. Soca y Daza (2015) caracterizaron una mezcla mineral de dolomita, zeolita y roca potásica (1:1:1) donde adjudicaban valores de nitrógeno total de 1.8%, un 0.40% de fósforo y 10 $\text{Cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de potasio. Los valores obtenidos en la mezcla mineral utilizada en el ensayo (Cuadro 5) presentaron valores bajos en comparación con la mezcla caracterizada por Soca y Daza, principalmente en el contenido de potasio ya que el uso de roca fosfórica aumentó el contenido del elemento considerablemente.

Análisis cristalográfico

El análisis cristalográfico de la mezcla mineral se muestra en la Figura 1 y arroja la existencia de dolomita, cuarzo y dos especies zeolíticas, heulandita y clinoptilolita que coinciden con las tarjetas de identificación del ICSD e ICDD.

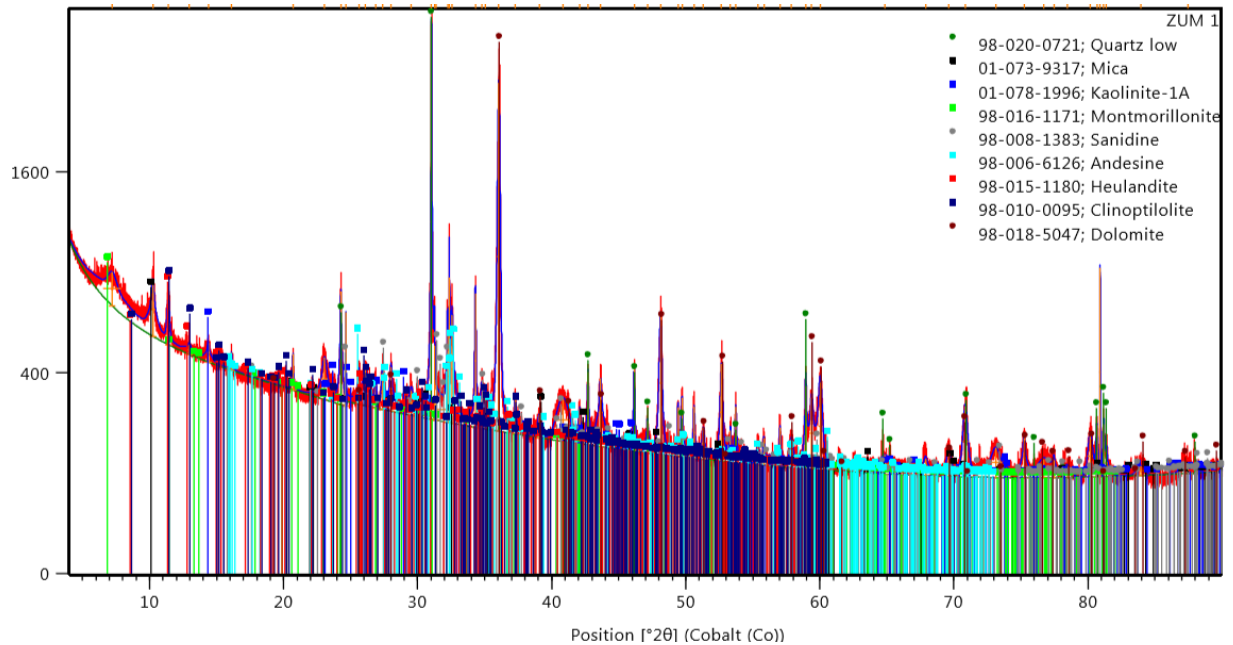


Figura 1. Patrón de difracción de rayos X de la dolomita y de las especies zeolíticas heulandita y clinoptilolita.

Considerando que las intensidades del difractograma permiten determinar la cristalinidad de la muestra (Borchardt, 1995), mientras que el ancho informa sobre el tamaño promedio del cristal (Sands, 1993).

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- I. Debido a las características químicas que la composta presenta es una buena opción para mezclar con sustratos sin causar problemas de CE y pH ni presentar inmovilización nutrimental.
- II. La concentración mayor de N de la composta favorece la rápida mineralización del sustrato aumentando su fertilidad.
- III. La caracterización de la mezcla mineral permitió corroborar el contenido total de 48% de dolomita, 16% de zeolita, 22% de cuarzo y el restante 14% comprendió filosilicatos de tipo caolinita y micas.
- IV. La alta CIC de la mezcla mineral se vio influenciada por el mayor contenido de K de la zeolita y el Ca de la dolomita.

VII. LITERATURA CITADA

- Alvarado A. y Loarte J. 2004.** La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* I.F.) en suelos ácidos de Costa Rica. <http://www.accessmylibrarv.com.../summarvO286-5063246ITM> Obtenido el 30/06/19.
- Álvarez L., Múnera V., Nivia D., Ramírez R. y Gutiérrez C. 2010.** Efectos de la zeolita natural en la producción de cebolla puerro (*Allium porrum* L.). Trabajo de Grado Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 60 p.
- Alloway B.J. 1990.** The origins of heavy metals in soils. In: Heavy metals in soils. B.J. Alloway (Ed). Blackie and Son Ltd. U.K. p. 34.
- Ansorena M. J. 1994.** Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid España. pp. 11-168-169.
- Añez, B., y W. Espinoza. 2003.** Respuestas de la lechuga y del repollo a la fertilización química y orgánica. Revista Forest. Venez. 47 (2): 73-82.
- Arreola E., Palma D., Salgado S., Camacho W. y Pastrana L. 2004.** Efecto de cachaza enriquecida sobre la producción y calidad de la caña de azúcar. Terra 22(3):351-357.
- Azcarate P., Kloster N. y Pérez H. 2012.** Reacción del suelo: pH. En: Manual de fertilidad dy evaluación de suelos. Alberto Quiroga y Alfredo Bono (editores). Ed. INTA. Anguil. pp. 19-24.
- Barroso, R.; J. Gandarilla, R. Caballero y M. Sánchez. 1993.** El humus de lombriz: Una alternativa más en la nutrición del frijol. Resumen del III Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo y III Seminario Científico La Renee. La Habana p 51.
- Bautista A., Etchevers J., Castillo R. y Gutiérrez C. 2004.** La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas. 8:1-11.

- Bissala, Y. Y. and Payne, W. 2006.** Effect of the pit floor material on compost quality in Semiarid West Africa. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*70:1140 - 1444.
- Bertsch, F. 1995.** La fertilidad de los suelos y su manejo. San José. Costa Rica, ACCS. 157 p.
- Bertsch, F. 2003.** Abonos orgánicos. Manejo de la fracción orgánica y de los aspectos biológicos del suelo. In: G. Meléndez y E. Medina (eds.). *Fertilizantes características y manejo*. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. San Pedro de Oca. Costa Rica. p. 112-130.
- Borchardt W. 1995.** *Crystallography*. Ed. Springer-Verlag. New York.
- Bremner, J.M. 1965.** Inorganic forms of nitrogen. pp. 1179-1232 In: C.A. Black et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr.*9.ASA, Madison, WI.
- Caballero, R.; J. Gandarilla, D. Pérez, O. Pacheco y M. Sánchez. 1995.** El humus de lombriz, una alternativa en la fertilización mineral del tomate en un suelo Pardo sin Carbonatos. In: *Resúmenes I Taller Nacional sobre Desertificación*. p. 56.
- Casado, A.I., Alonso-Zarza, A.M. y La Iglesia, Á. 2014.** Morphology and origin of dolomite in paleosols and lacustrine sequences. Examples from the Miocene of the Madrid Basin. *Sedimentary Geology*, 312: 50-62.
- Castillo, A. E.; S. Vásquez, M. J. Subosky, S. C. Rodríguez y N. Sogari. 1999.** Disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en suelos abonados con lombricompuesto. *Información Tecnológica* 10: 179-182.
- Day M. and Shaw K. 2001.** Biological, chemical and physical processes of composting. En: Stofella, P., Kahn, B. *Compost utilization in horticultural cropping systems*. Lewis. U.S.A.
- De Campos B. A.C., Anchao, O. P.P., De Melo M. M.B. y Souza-Barros, F. 2013.** Brazilian sedimentary zeolite use in agricultura. *Microporus and Mesoporus Materials*. 167, 16-21.
- Febles, J., Borsatto, F. y Soca, M. 2014.** Fercel-Clinoptilolite natural product to optimize the fertilization and reduce enviromental pollution. p 156-160. En. *Memorias 16th World*

- Fertilizer Congress of CIEC. Technological Innovation for a Sustainable Tropical Agriculture. Río de Janeiro, Brasil.
- Fernández, L.M. 2006.** Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Flórez, A., Galvis, A., Hernández, T., De León, F. y Payán, F. 2007.** Efecto de la adición de zeolita (clinoptilolita y mordenita) en un andosol sobre el ambiente químico edáfico y el rendimiento de avena. *Interciencia*. 32(10):692-696.
- Gerónimo C., Salgado G., Catzin F. y Ortíz A. 2002.** Descomposición del follaje de nescafe (*Mucuna spp.*) en la época de seca. *Interciencia* 27(11):625-630.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, M., Khodaeijoghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H. y Farmanbar, E. 2013.** Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil Tillage Research*. 126.193-202.
- González, M., Gómez, N., Muñoz, J., Valencia, F., Gutiérrez, D. y Figueroa, H. 2012.** Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizante en el estado de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(6):1129-1144.
- Gottardi, G. 1978.** Mineralogy and crystal chemistry of zeolites. In: *Natural Zeolites. Occurrence, Properties, Use*. Sand L.B. and F.A. Mumpton eds. Pergamon Press 1978. New York, 31-44.
- Havlin B. and Tisdale N. 1999.** Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient Management. Sexta edición. Edit. Prentice Hall do Brasil, Ltda Rio de Janeiro. Printed in the USA. 49 P.
- He, N., Xe, M. y Ding, Y. 2008.** Computational study on IM-5 zeolite: What is its preferential location of Al and proton siting?. *Microporous and Mesoporous Materials*. 111(1-3):551-559.
- Hernández G., Salgado S., Palma D., Lagunes L., Castelán M. y Ruiz O. 2009.** Potencial de residuos agroindustriales como fuente de nutrientes en caña de azúcar. *Interciencia*. p 16.

- Hernández J., Mármol L., Guerrero F., Salas E., Barcelas J., Polo V. y Colmenares C. 2010.** Caracterización química, según granulometría, de dos vermicompost derivados de estiércol bovino puro mezclado con residuos de fruto de la palma aceitera. Facultad de Agronomía. 27:491-520.
- Jakse, M. and R. Mihelic. 1999.** The influence of organic and mineral fertilization on vegetable growth and N availability in soil: Preliminary results. *Acta Horticulturae* 506: 69-75.
- John, C., Del Vallín, G., Morrero, V., Muñiz, O., Beltrán, R., Sotlongo, J., Gil, R., Delgado, N. y Chong, D. 2001.** Generalización del empleo de la zeolita como aditivo de la urea en cultivos de importancia económica. pp 193-195. En: Producción de cultivos en condiciones tropicales (ISBN: 959-7111-04-7). Primera edición. Instituto de Investigaciones Hortícolas. Quivicán, Cuba, 280 p.
- Jordán H. R., Betancourt R. R., Cabrera G. E. y Cabrera G. D. 2007.** Mejorador de suelo a partir de una zeolita natural cargada: Una propuesta sustentable para la agricultura. *Revista Nova Scientia* 6(1): 01-11.
- Kalmas, E. y D. Vázquez. 1996.** Manual de agricultura ecológica. Una introducción a los principios básicos y su aplicación. Donación ACAO. Ed. Enlace. Nicaragua. p. 27-28.
- Leblanc, H. A.; M. E. Cerrato, A. Miranda y G. Valle. 2007.** Determinación de la calidad de abonos orgánicos a través de bioensayos. *Tierra Tropical* 3: 97-107.
- Leguey S., de León D.R., Ruiz A.I., y Cuevas J. 2010.** The role of biomineralization in the origin of sepiolite and dolomite. *American Journal of Science*, 310: 165–193.
- Mercedes-Martín, R., Rogerson, M.R., Brasier, A.T., Vonhof, H.B., Prior, T.J., Fellows, S.M., Reijmer, J.J.G., Billing, I. y Pedley, H.M. 2016.** Growing spherulitic calcite grains in saline, hyperalkaline lakes: Experimental evaluation of the effects of Mg-clays and organic acids. *Sedimentary Geology*, 335: 93-102.

- Ming, D.W. 1986.** Manufactures soils for plant growth at a lunar base, p. 93-105. In: D.W. Ming and D.L. Henninger, eds. Lunar base agricultura: soils for plant growth. Amer. Soc. Agron.-Crop. Sci. Soc. Amer.- Soil Sci. Amer., Madison, Wis.
- Ming, D., E. Allen. 2001.** Use of natural zeolites in agronomy, horticulture and enviromental soil remediation. Natural zeolites: Ocurrence, properties, aplicaciones. In: Bish D. and Ming D. (eds). Reviews in mineralogy and geochemistry. Vol 45: 619-654.
- Mumpton, F. 1972.** First Reported Occurrence of Zeolites in Sedimentary Rocks of Mexico. American Mineralogist, 28, 287.
- Nieto G A, Murillo AB, Troyo DE, Larrinaga MJ, JL García H. 2002.** El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del chile (*Capsicum annum* L.) en zonas áridas. Interciencia 27(8): 417-421.
- NOM-021-SEMARNAT-2000.** Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial, 31 de diciembre, 2002.
- Olguín, M. 1999.** Zeolitas características y propiedades. Conferencia 1er Congreso Mexicano de zeolitas Naturales, 15-18 de noviembre, Oaxaca.
- Ortiz E. 2008.** Evaluación del efecto de la cal dolomita sobre algunas características químicas del suelo y la absorción de nutrientes en el cultivo de piña (*Ananas comosus*) (L) Merr.. híbrido MD-2 en finca ganadera La Flor S.A. En Río Cuarto, Grecia, Costa Rica.
- Osorio C. 2006.** Efecto de la roca fosfórica, dolomita y cal sobre el pH, la acidez cambiabile, el contenido de fósforo, potasio, calcio y magnesio en un suelo muy acido de Satipo. Instituto de Investigación - Facultad de Ciencias Agrarias Satipo.
- Ostrooumov, M. 2003.** Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Osuna, E., Ramírez, A., Paredes, R., Padilla, J. y Báez, A. 2012.** Eficiencia de la zeolita como aditivo de la urea e inoculación micorrízica en el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(6):1101-1113.
- Otero T. 2010.** Producción y evaluación de vermicomposta en hormigueros, Sierra Nanchititla, México. Universidad Autónoma de México.
- Pérez O., Hernández F., López A., Balaña P. y Solares E. 2007.** El uso de abonos verdes como alternativa para mejorar la productividad y sostenibilidad del cultivo de la caña de azúcar. ATAGUA. Edición julio-septiembre. Guatemala. pp. 6-10.
- Pérez M., Palma D., Salgado S. y Lagunes L. 2008.** Aceleración de la madurez e incremento de la calidad nutrimental de compostas de cachaza con sulfato de amonio. *Universidad y Ciencia*. 6 p.
- Quintero D. y Gómez J. 2006.** Elaboración de compost a partir de cachaza carbonilla y vinaza en el ingenio Manuelita S.A. CEÑICANA. *Carta Trimestral* 2:10-13.
- Roberts, J.A., Kenward, P.A., Fowle, D.A., Goldstein, R.H., González, L.A. y Moore, D.S. 2013.** Surface chemistry allows for abiotic precipitation of dolomite at low temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(36): 14540-14545.
- Rodríguez, M.B. y Gatti, J.P. 2010.** Zeolitas como mejoradoras de la respuesta de la soja a los residuos de feedlot (CD). En: *Memorias XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Salas R. 2002.** Herramientas de diagnóstico para definir recomendaciones de fertilización foliar. En: *Fertilización foliar: Principios y aplicaciones*. Ed. Meléndez G. Molina E. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Cap. 2:7-18. 142 p.
- Salgado S., Núñez R. y Palma D. 2012.** Los abonos orgánicos. En: *Manejo de fertilizantes químicos y orgánicos*. Texcoco, México. pp. 115-146.
- Sands D. 1993.** *Introduction to crystallography*. Dover Publications Inc. New York.

- Servín, L. 2005.** Metalurgia de Minerales no Metálicos. México. 2005. <http://www.monografias.com/trabajos/zeolitas/zeolitas.shtml#top> Obtenido el 13/06/19.
- Sikora, L. J. 1998.** Nitrogen availability from compost and blends of compost and fertilizers. *Acta Horticulturae* 469: 343-351.
- Singh A. K. and Lal M. 2007.** Assessment of system productivity, cane physiology and economic viability of sugarcane (*Saccharum complex hybrid*) base don crop diversification options through on-station and on-farm trials. *Indian Journal of Agricultural Sciencies*. 77(12):866-869.
- Soca M. y Daza M. C. 2015.** La zeolita, dolomita y roca potásica en le eficiencia del nitrógeno en arroz y maíz. *Revista Ciencias Agrícolas*. 32(2): 46-55.
- Soto, M. G. 2003.** Abonos orgánicos: definiciones y procesos. In: *Abonos orgánicos: Principios, aplicaciones e impactos en la agricultura*. G. Meléndez (Ed.). San José, Costa Rica. p. 20-49.
- Terry E., Leyva A., Ruíz J. y Díaz M. 2007.** Manejo de bioproductos para la producción ecológica de tomate de cascara. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), 28(3):23-27.
- Uribe J., Estrada M., Córdoba S., Hernández L. y Bedoya, E. 2001.** Evaluación de los microorganismos eficaces (EM) en producción de abono orgánico a partir de estiércol bovino. *Revista Colombiana Ciencias Pecuarias*, 14(2), 166-171.
- Urquiaga, M. y Zapata, F. 2002.** Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. EMBRAPA Porto Alegre. 52-53 p.
- Vasconcelos, C. y Mckenzie, J.A. 1997.** Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *Journal of Sedimentary Research*, 67(3): 378-390.

- Vásquez M. 2005.** Evaluación de métodos para cuantificar biomasa microbiana en suelos y su posterior aplicación en el estudio de dinámicas de carbono y nitrógeno en suelos de México. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. p. 98.
- Vásquez M., Govaerts B. and Dendooven L. 2007.** Microbial C measurements in soil of the central highlands of México. *Applied Soil Ecology*. 35:432-440.
- Vázquez M. 2007.** Calcio y magnesio del suelo. Encalado y enyesado. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Echeverría H., García F. (ed.). Cap. 8:181-188. 525 p. 2da reimpresión. 1ra Ed. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Vázquez M. y Pagani A. 2015.** Calcio y magnesio del suelo. Encalado y enyesado. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Echeverría H., García F. (ed.). Cap. 11:317-355. Ed. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Velasco, J.; R. Ferrera Cerrato y J. Almaraz Suarez. 2001.** Vermicomposta, micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense* en tomate de cáscara. *Terra*. 19: 241-248.
- Voogt, W. 1999.** Water and mineral balances of organically grow vegetables under glass. *Acta Horticulturae* 506: 51-57.
- Zapata H. R. 2004.** Química de la acidez del suelo. 1 ed. España. 179 p.
- Zhao, S. W and H. Fun Zhen. 1992.** The nitrogen uptake efficiency from N15 labelled chemical fertilizer in the presence of earthworm manure (cast). In: G. K. Veeresh, D. Rajagopal and C. A. Viraktamath (Eds). *Advances in management and conservation of soil fauna*. New Dehli, India. p. 539- 542.

CAPÍTULO 2. RESPUESTAS MORFOLÓGICAS DE CHILE MANZANO (*Capsicum pubescens* R. y P.) A LA FERTILIZACIÓN MINERAL Y ORGÁNICA

I. INTRODUCCIÓN

El chile es un ingrediente fundamental y representativo de la dieta alimenticia de los mexicanos, el cual se le considera como el primer cultivo domesticado en el continente americano (SIAP, 2010). Una de las especies de chile que se ha adaptado a condiciones ambientales de México es el chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.). Originario de las partes altas de América del Sur y su introducción a México fue favorecida por su capacidad de adaptación a lugares fríos, en donde ningún otro tipo de chile prospera (Laborde y Pozo, 1982).

Espinosa-Torres *et al.*, (2010) mencionan que aun cuando se desarrollen nuevas tecnologías que mejoren la calidad de los productos, la manipulación inadecuada, el deterioro, y la falta de conocimiento e inversión en postcosecha, entre otras, hacen que muchos productos no lleguen a su destino final provocando con esto pérdidas económicas graves a los productores, comercializadores y en ocasiones a los consumidores.

Es evidente que el uso excesivo de fertilizantes ha deteriorado el suelo (De Longe *et al.*, 2016) y como consecuencia extra se presenta contaminación de mantos freáticos, ante estas situaciones surge la necesidad de emplear técnicas de manejo y productos agrícolas con una mayor eficiencia. El uso de minerales como la zeolita tiene efectos directos en la morfología de la planta (Méndez-Arguello *et al.*, 2015) y en la zona radicular con la absorción de nutrientes; la dolomita presenta una buena opción como mejorador de las características físicas y químicas del suelo y sustrato, principalmente en el suministro de calcio y magnesio (Baligar y Fageria, 2015).

Actualmente la producción intensiva de chile manzano se realiza bajo condiciones protegidas usando sustratos y aplicación de soluciones nutritivas, en condiciones de campo se aplica riego por goteo y acolchados de plástico, entre otros componentes tecnológicos (Pérez y Castro, 1998). Estas variantes de producción constituyen sistemas que generan una mayor calidad y rendimiento del fruto (Pérez *et al.*, 2004).

El cultivo de chile ha sido muy estudiado desde el punto de vista de producción con la implementación de tecnología de fertilizantes, buscando alternativas a las demandas nutricionales en apoyo de microorganismos y fertilizantes orgánicos foliares; actualmente el estudio de los efectos del uso de sustratos en la nutrición vegetal se encuentra en crecimiento, especialmente en sistemas de producción protegida. Macias *et al.*, (2012) mencionaron las ventajas de utilizar estiércoles y menores dosis de fertilizante nitrogenado en la morfología del cultivo y la producción de chile jalapeño. Por otro lado, Borges *et al.*, (2006) hacen mención a que la cantidad suministrada de potasio está relacionada con la calidad del fruto mejorando propiedades como prolongación de la vida de anaquel, grosor del pericarpio y mayor contenido de compuestos químicos como la capsaicina (Salisbury y Ross, 1994). La importancia del suministro nutrimental en los sistemas agrícolas es esencial ya que de ella dependen los rendimientos, calidad, supervivencia y correcto desarrollo del cultivo (Preciado-Rangel *et al.*, 2002).

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

- I. Evaluar el efecto de potencializadores de la nutrición mineral y orgánica en el cultivo de chile manzano (*Capsicum pubescens* R.) bajo hidroponía y condiciones protegidas.

Objetivos particulares

- I. Identificar la acción de la zeolita, dolomita y composta en la nutrición del cultivo de chile manzano (*Capsicum pubescens* R.).
- II. Evaluar el efecto de dos dosis de fertilización potásica en la morfología del cultivo.

Hipótesis

- I. La aplicación de zeolita, dolomita y composta optimiza la disponibilidad de los nutrientes en un sistema de producción agrícola.
- II. La zeolita, la dolomita y la composta presentan características que, al ser mezclada con sustratos, mejoran las propiedades físicas y químicas de los mismos.
- III. El potasio mejora las características morfológicas de la planta.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

Situación del chile en México

El cultivo de chile en México se encuentra ligado íntimamente a los de maíz, calabaza y frijol, los cuales le han dado sustento a la población e identidad a las culturas ancestrales (SEDAGRO, 2005); sin embargo, ante los embates de la modernización y la globalización, tales cultivos en nuestras áreas rurales han perdido presencia a medida que han dejado de ser “rentables”, entendiéndose este concepto en función de la plusvalía que generan de acuerdo a los objetivos del capital (Juárez, 2004).

En el nivel mundial la superficie cultivada con chile es encabezada por China, Indonesia y México que participan en su conjunto con 54.64% de dicha superficie (FAO, 2006). Los principales estados con zonas dedicadas al cultivo son Zacatecas (38,210 ha), Chihuahua (28,298 ha), San Luis Potosí (23,864 ha) y Sinaloa (17,537 ha) que concentran 59.06% de dicha superficie (SIAP, 2019). Este cultivo es de gran importancia para la economía de México, ya que las exportaciones generaron cerca de 800 millones de dólares en el 2016 (S.E., 2017) y emplea en forma directa cerca de seis millones de jornales anuales. De manera indirecta, esta producción origina miles de empleos adicionales en las más de 100 deshidratadoras, en la industria alimenticia, del transporte y en proveedores de insumos que operan en el estado. Por lo anterior, la cadena productiva de chile resulta social y económicamente estratégica para el país (Rubio, 2004). En México, la permanencia de esta cadena productiva ha estado en riesgo por la falta de planeación en las plantaciones y la inestabilidad en los precios al no haber regulación de la oferta, además del ingreso desmedido, y en ocasiones desleal, de chiles de países como China y Perú, entre otros (Rubio *et al.*, 2004).

Ecología del cultivo de chile

La producción de chile es una tarea compleja, durante la cual se puede definir la variedad a utilizar y el manejo agronómico adecuado a cada sistema de producción; sin embargo, se tiene un control limitado sobre las condiciones de clima y suelo (Álvarez, 2004). Las estrategias de manejo incluyen el uso de semilla certificada, fechas óptimas de siembra, densidades de población

recomendadas, uso racional de fertilizantes, control de malezas y plagas a través de herbicidas o insecticidas (Castellanos, 2004). La obtención de altos rendimientos en Chile implica la interacción entre factores genéticos, ambientales y de implementar estrategias de manejo (Jaramillo y Lobo, 1982). Entre los factores genéticos se puede mencionar la resistencia a enfermedades, capacidad fotosintética y absorción de minerales, entre otros, características que son controladas por la combinación de genes en cada variedad (Cruz, 1998).

Chile manzano

El Chile manzano requiere de climas templados, temperaturas mayores a 35 °C provocan aborto floral, así como las temperaturas menores a 5 °C detienen sus actividades fisiológicas (Pérez, 2002). La especie se adapta bien en altitudes de 1,700 a 2,400 m (Nuez *et al.*, 1996). Además, es sensible al fotoperiodo; cuando la longitud del día es menor a 11 horas se retrasa significativamente la fase reproductiva (Pérez y Castro, 2010). Existen cultivares indiferentes a la duración del día, pero de manera natural el Chile manzano se considera una especie de día intermedio con radiaciones medias de 550 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Pérez, 2002). La planta se desarrolla bien con humedad relativa de 70 a 80%. Arriba de este valor se tiene poca dehiscencia de anteras disminuyendo la polinización y fecundación de los óvulos, y en consecuencia se tiene menor número de semillas y a su vez menor tamaño de fruto. Con humedades relativas menores al 40 % existe deshidratación de los granos de polen. Lo cual también ocasiona una baja polinización y formación de semillas (Pérez y Castro, 2010).

Manejo agronómico

A continuación, se detallan los puntos clave relacionados con una buena conducción agronómica de las labores culturales que se realizaron al cultivo con el objetivo de mejorar su comportamiento agronómico en la unidad de producción protegida.

Variedad utilizada

Se empleó el híbrido intervarietal Puebla x Zongólica (Grajales St.) el cual fue generado en el programa de Chile manzano de la Universidad Autónoma Chapingo (Pérez *et al.*, 2008).

Fecha de trasplante

La plantación del chile manzano se realiza cuando la planta cuenta con 8 o 10 hojas verdaderas en un periodo de entre 80 y 100 días después de la germinación (Gasca, 2011).

Densidad de siembra

En un sistema de producción en condiciones de malla sombra la densidad de población recomendada es de 21,912 plantas por hectárea, con hileras a cada 1.5 metros y una distancia de plantación de 60 centímetros entre mata y 2 plantas por mata. La cama debe de acolcharse con plástico para reducir el daño por patógenos además de reducir la incidencia de malezas. El tutoreo se puede realizar por hileras con alambre galvanizado calibre 12 (Espinosa-Torres, 2005).

Fertilización

Se recomienda hacer una fertilización de fondo en los suelos nutrimentalmente pobres basándose en un estudio fisicoquímico. Si se cuenta con un sistema de riego por goteo, que es lo más recomendado, el suministro de los fertilizantes se debe hacer a través de éste aplicando el fertilizante según el requerimiento de la etapa fenológica (Carlos, 2012).

Manejo integrado de plagas y enfermedades

Las plagas que pueden aparecer en el cultivo son: mosquita blanca, gusano del fruto, araña roja, pulgones y minador de la hoja; algunos de los productos que se recomiendan para controlar a estos insectos son: imidacloprid, cipermetrina, extractos de toronja y ajo, dicofol, y abamectina; así como colocar trampas con algún pegamento, evitar goteo de la cubierta plástica, mantener buena ventilación, colocar una cubierta del suelo en los pasillos. Las enfermedades que se presentan en el cultivo son: secadera del chile y botrytis. Para disminuir daños se puede aplicar cal al cuello de la planta y aplicaciones preventivas de fungicidas a base de azufre, cobre, clorotalonil y metalaxil.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Chile manzano variedad Chapingo como cultivo indicador.

El material genético utilizado fue el híbrido intervarietal Puebla x Zongólica, el cual tiene un amplio rango de adaptación con una maduración a los 150 días aproximadamente, es una planta vigorosa y con alto potencial de rendimiento de fruto amarillo tipo blocky.

Elaboración del sustrato

Al contar con todos los componentes de las mezclas, se midieron con base en las proporciones de las mezclas (1:2 de tezontle más aserrín y 1:2:2 de tezontle, aserrín y composta). Posteriormente, se realizó el mezclado de los componentes y se prosiguió al llenado de los contenedores para vivero a razón de 10 L de mezcla por contenedor.

Manejo del cultivo

Las plántulas de chile manzano se obtuvieron en el Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. El trasplante se realizó en el mes de julio, posteriormente se aplicó solución enraizadora, con hormonas reguladoras del crecimiento, aminoácidos y fósforo, al 2%. Para conocer el contenido de humedad volumétrica de cada mezcla de sustratos se realizaron curvas de liberación de humedad para determinar el volumen total de agua a aplicar, obteniendo como resultado un %hv que resultó en el suministro de 1.9 L de solución nutritiva con base en la Solución Universal de Steiner por bolsa al día. Para el control de plagas se utilizaron insecticidas a base de imidacloprid y spinetoram ya que hubo presencia de mosquita blanca, pulgón y araña roja; para la prevención de enfermedades se utilizó clortalonil y azoxistrobin. En ambos casos la aplicación se realizó de manera manual a razón de 1.5 mL de Confidor 350 SC, Exalt SC y Bravo 720 SA y 0.5 g de Amistar GS en 20 L de agua.

Variables evaluadas en planta

El método de muestreo se realizó de manera aleatoria y se efectuaron las mediciones en 12 plantas representativas por tratamiento para contar con 144 plantas como muestra.

Altura de planta

La evaluación de la altura se realizó a los 5 meses después del trasplante en cada tratamiento y repetición, con el uso de una cinta métrica flexible. El criterio de medición se efectuó a partir de la base de inicio del tallo hasta el comienzo de la bifurcación y hasta el punto de crecimiento de cada una de las dos varetas para obtener la altura promedio.

Número de botones florales

Se tomó el dato por cada una de las plantas de la muestra y se marcó para contabilizar el número de flores que se presentaron. El dato sirvió para estimar el número de flores por la unidad básica de superficie.

Número de nudos

Se refiere al número de nudos laterales que aparecieron en cada bifurcación de la planta de la muestra. Se contabilizó y se transformó el dato al número de nudos por unidad básica de superficie

Peso fresco de raíz

De todas las muestras de peso fresco se extrajo la raíz y se cuantificó el peso fresco (g) mediante una balanza analítica.

Volumen de raíz

Los datos se obtuvieron al momento de tomar el peso fresco de raíz, se sumergieron en una probeta aforada a 2 litros en cada toma. El líquido desplazado correspondió al volumen radical (cm^3).

Peso seco de raíz

Al finalizar el pesaje en fresco de la raíz éstas se secaron en una estufa a 70 °C por 72 horas. Los resultados se tomaron en gramos.

Producción de materia seca (MS)

La producción de MS se calculó en base al rendimiento en peso seco y al rendimiento de materia verde total. Posteriormente, la producción diaria se calculó con la relación entre la MS y el número de días transcurridos hasta la cosecha.

Análisis nutrimental de la planta

La determinación de las concentraciones de P, K, Ca y Mg se realizó en el extracto resultante de la digestión húmeda de material vegetal seco con ácido sulfúrico, ácido perclórico y peróxido de hidrógeno (1.3:0.7:1, v:v:v), de acuerdo con lo descrito por Alcántar y Sandoval (1999). Los extractos fueron leídos en un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Agilent 725 Series ICP-OES).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó a través del programa estadístico SAS versión 9.3, en el que se ejecutó un análisis de varianza mediante el procedimiento proc GLM para un diseño experimental en parcelas subdivididas, las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables evaluadas en planta

Para la evaluación de los parámetros agronómicos se efectuaron las mediciones en 12 plantas representativas por tratamiento seleccionadas al azar, siendo evaluados las siguientes variables:

Altura de planta

La altura de las plantas fue estadísticamente inferior en los testigos (T1, T2 y T3) a partir de los 150 días después de trasplante con relación a las otras mezclas de sustrato en donde el crecimiento de la planta fue estadísticamente igual (Figura 2).

El valor más alto (330.71 cm) se obtuvo con el T4 (Cuadro A4). El crecimiento uniforme del cultivo en los tratamientos donde se administró la solución nutritiva al 100% se debió a que en la fase vegetativa de floración y formación de fruto se demandan altas cantidades de N y K (Villanueva *et al.*, 2010), resultado que coincide con lo reportado por Lee *et al.*, (2002) quienes, en esta misma fase de cultivo, no encontraron diferencias en esta variable con distintas densidades de siembra.

La altura de la planta fue mayor (311.66 cm) con la reducción del 50% de la dosis de K (Cuadro A3) en el fertirriego, seguido por el efecto de la adición de composta que obtuvo un valor de 294.35 cm, lo que concuerda con Álvarez (2004) que menciona que al combinar sustratos inorgánicos con abonos orgánicos se tiene una mayor altura en el cultivo de pimiento morrón; siendo estadísticamente igual la altura de las plantas que fueron tratadas con la mezcla mineral (Cuadro A3).

La altura de planta es una de las características más importantes en este cultivo, debido al ciclo perenne que presenta, aunado con propósitos de comercialización al contar con frutos por más tiempo. Plantas de chile demasiado altas (>200 cm) son difíciles de cosechar (Agarwal *et al.*, 2007) ya que la mayor presencia de nudos menores se refleja en plantas más frondosas, pero a la vez con mayor potencial de producción si se satisface el manejo agronómico apropiado. La altura y número de nudos presentaron una $R^2 = 0.976$ lo que indica que los nutrimentos, principalmente

el Mg ($R^2= 0.828$), (Cuadro A5) fueron translocados para la producción de biomasa en la etapa de floración (Carpena *et al.*, 1987).

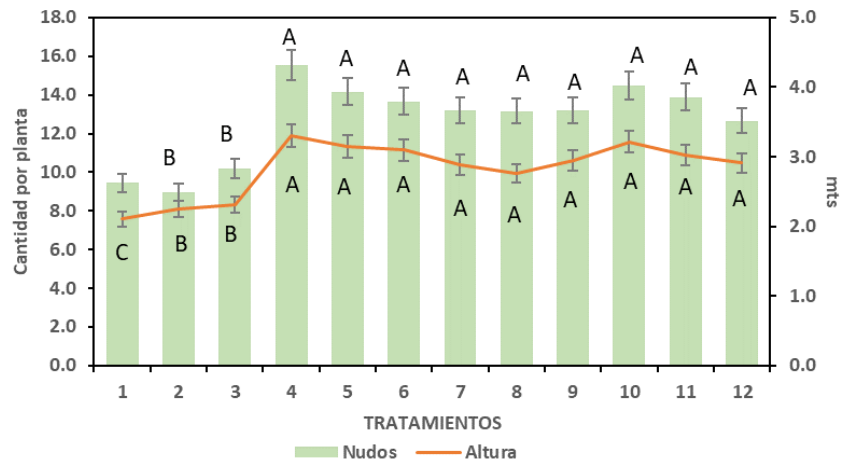


Figura 2. Altura y número de nudos de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.

Número de botones florales

En el número de botones flores el valor más alto se obtuvo con el T11, el cual fue 80% mayor respecto al testigo (T1) (Cuadro A4). La combinación de la mezcla de sustrato con composta y reducción nutrimental de K al 50%, así como la distribución uniforme y continua de los fertilizantes favorecieron la disponibilidad de los nutrimentos lo cual estuvo asociado con una mayor cantidad de flores comparada con el testigo y la fertilización al 100% (Figura 3). Pérez y Castro (2008) mencionan que la cantidad y calidad de la flor depende de la fertilización constante y el contenido de agua en la solución del sustrato, las deficiencias nutrimentales de sustratos inorgánicos se corrigen en gran medida con la incorporación de sustratos orgánicos lábiles.

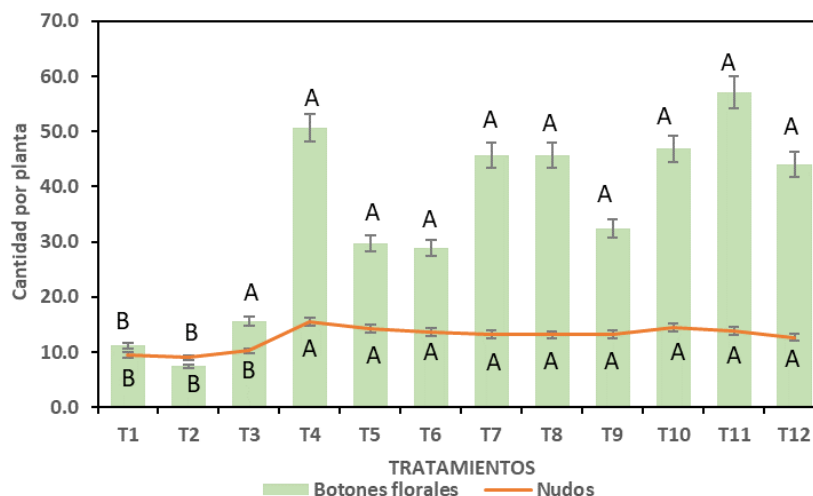


Figura 3. Botones y número de nudos de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.

El número de botones florales obtenido con los tratamientos antes mencionados presentó una $R^2=0.844$ con la variable de nudos debido a que la producción de biomasa está ligada a la fenología de la planta, principalmente durante la floración y fructificación. Un mayor número de flores es una de las características importantes en este cultivo, ya que con base en éste se establece la producción de fruto, muchas veces interfiriendo con este parámetro debido a la presencia de botón cerrado lo que provoca dehiscencia completa de la flor o polinización deficiente (Rego *et al.*, 2009).

Número de nudos

El Cuadro A4 muestra que la cantidad de nudos por tratamiento incrementó un 38% en los tratamientos que contenían composta. De esta forma, las plantas que recibieron tratamiento con composta percibieron una mayor altura, peso fresco de planta y volumen radical ya que, de acuerdo con Molina (2000) y Almaguer (1998), la presencia de materiales orgánicos de fácil degradación tiene efectos positivos directos sobre procesos fisiológicos que regulan el balance de crecimiento vegetativo influyendo en la producción de biomasa, cantidad de flores y calidad de frutos; lo que se presenta en el Cuadro 5 donde existe una correlación positiva en las variables de altura ($R^2=0.976$), peso fresco de planta ($R^2=0.852$) y volumen radical ($R^2=0.933$).

El número de nudos no mostró diferencias estadísticas significativas por el efecto de la adición de la mezcla mineral (Cuadro A3), lo que concuerda con Urbina *et al.* (2006) quienes

tampoco encontraron diferencias estadísticas cuando se cultivó jitomate con zeolita en las variables de diámetro de tallo y tallos secundarios cuando la granulometría de los sustratos era gruesa (>2 mm), coincidiendo con los valores granulométricos de las mezclas de sustratos del presente ensayo (Cuadro A8).

Peso fresco de raíz

El peso fresco radical no mostró diferencias estadísticas significativas por el efecto de los factores de estudio (Cuadro A3) ni entre tratamientos (Cuadro A4), pero fue mayor y con menor variación (Cuadro A1) cuando se adicionó la mezcla mineral.

De acuerdo con Cardoso y Lomonaco (2003) cuando existe un mayor porcentaje de arcilla se contribuye al aumento de la humedad del suelo y se puede lograr un crecimiento máximo de las plantas con un sistema radical bien desarrollado siempre y cuando el aporte de agua y nutrimentos sea el óptimo (De Willigen & Van Noordwijk, 1997). Con respecto al porcentaje de retención de humedad (Cuadro A8) de los sustratos analizados se encuentran sobre el rango mínimo propuesto por Handreck y Black (1994) quienes mencionan que un mínimo de 55% es deseable para la producción en sustrato.

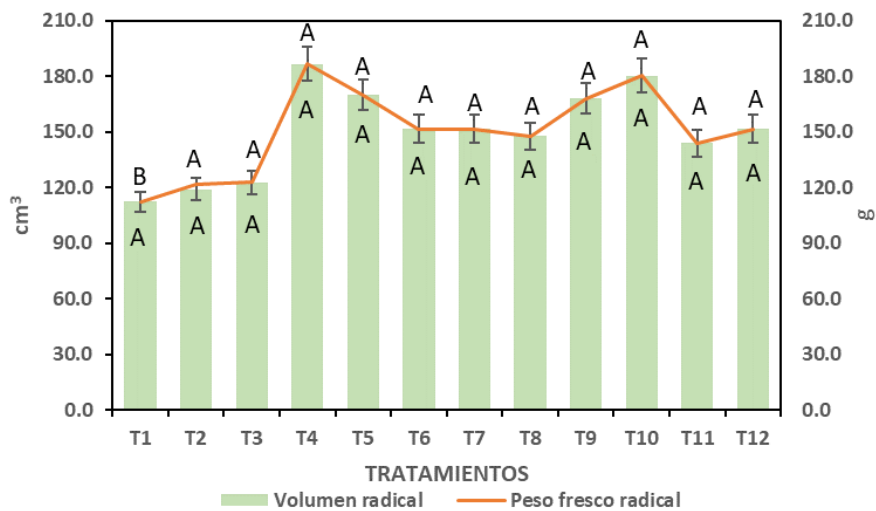


Figura 4. Peso fresco y volumen radical de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.

El peso fresco de raíz fluctuó entre 112 y 195 g, Todorova (2007) encontró que existe una variación en cuanto a la materia fresca radical provocado por el ambiente, fertilización, genotipo y material del sustrato.

Volumen de raíz

El volumen de raíz mostró diferencias estadísticas significativas por el efecto del porcentaje de K suministrado en la solución nutritiva (Cuadros A1 y A3) y en el contenido de composta (Cuadro A3) lo cual es explicado debido a que el K de la composta y el suministrado en la fertilización representan una fracción pequeña el cual, debido al equilibrio dinámico entre el K abastecido y los requerimientos vegetales, es una fuente inmediata de K para las plantas (García, 2008).

En el Cuadro A5 se muestra que existe una relación positiva con el peso fresco radical ($R^2=0.961$) la cual muestra que al aumentar la materia fresca radical se incrementará el volumen y con ello resulta afectado el peso seco radical ($R^2=0.936$).

Peso seco de raíz

Al calcular la materia seca radical no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro A4) ni factores de estudio (Cuadro A3). El mayor peso seco radical lo obtuvo el T4 (24.54 g) ya que se vio influenciado por su mayor peso fresco ($R^2=0.954$) y volumen radical ($R^2=0.936$) (Cuadro A5).

Aun cuando el K fue reducido no se vio afectado el peso de materia seca radical (Figura 5), el K presente en la composta y la presencia de la mezcla mineral, principalmente de la zeolita, originó la fijación del elemento para su disponibilidad durante el periodo del ensayo; el K fijado constituye una reserva y es resistente a la lixiviación (Barshad, 1954).

La materia seca radical fue 43% menor a la materia seca aérea, de acuerdo con González y Pita (2001) en el chile manzano la fracción destinada a la materia seca de raíz fluctúa del 20 al 35% en la etapa vegetativa a la floración.

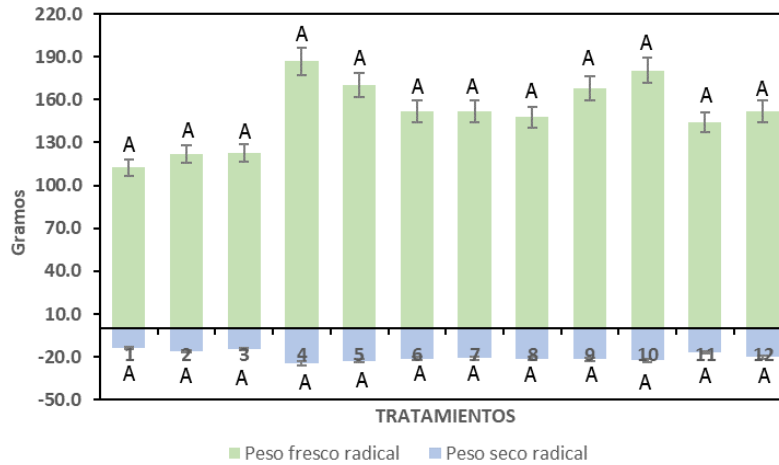


Figura 5. Peso fresco y peso seco radical de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.

Proporción de materia seca (MS)

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y factores en la variable de materia seca (Cuadros A4 y A3). La mayor proporción de materia seca la presentó el T4 (20.50 %) (Figura 6) ya que se vio influenciado por su mayor altura obteniendo una $R^2= 0.741$ (Cuadro A5).

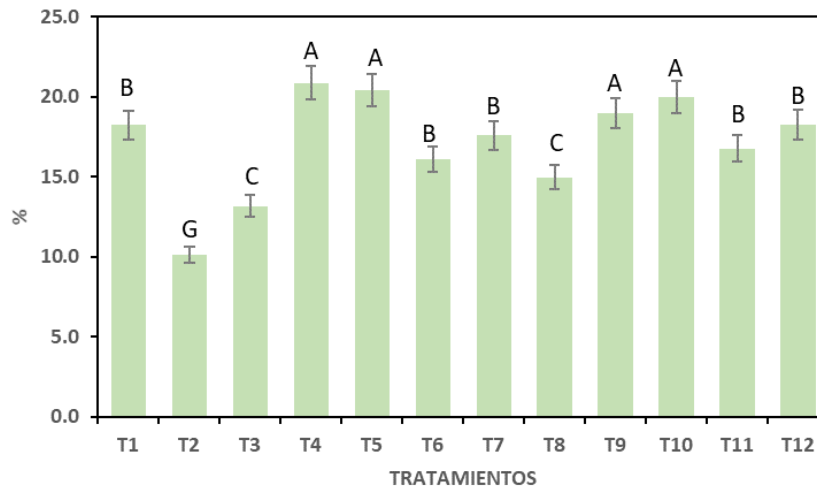


Figura 6. Materia seca de chile manzano producidos en sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 150 ddt.

La deficiencia en el suministro de K mostró efectos positivos en la producción de materia seca (Figura 6). Cuando se suministró K en dosis bajas a cultivos forrajeros Fernández *et al.*, (2004) encontraron aumentos en la producción de materia seca al aumentar el número de cortes. El K presente en la composta constituyó una reserva para la disponibilidad del nutrimento el cual al disminuir su concentración en el sustrato se direccionó a las moléculas de carbohidratos y proteínas lo que se expresó en un incremento en la producción de materia seca (Cruz y Lemaire, 1996; Juárez *et al.*, 2006).

Análisis nutricional de la planta

Nitrógeno total. - Todos tratamientos presentaron concentraciones elevadas de N en tejido vegetal (>5%) (Cuadro A4, Figura 7) propiciado por la sincronía entre la lenta mineralización del N y la absorción por la planta obteniendo contenidos superiores al valor crítico mencionado por Hernández *et al.*, (2009) que es de 3.6%. Bujanos y Arreola (2017) encontraron un contenido de nitrógeno cercanos a 5.5% en pimiento morrón producido en sustrato con abono orgánico.

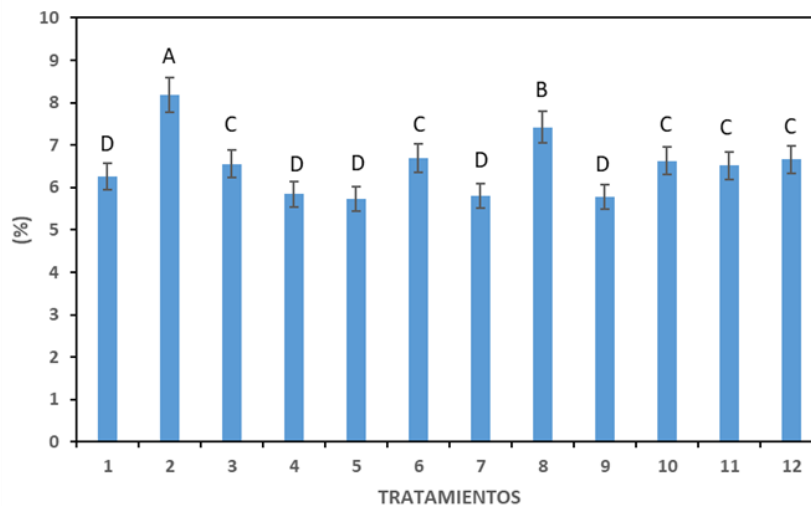


Figura 7. Concentración de nitrógeno total foliar de chile manzano en etapa de floración.

Fósforo. - Cuando se agregaron $40 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de mezcla mineral a los sustratos se incrementó la concentración foliar de P (Cuadro A3) debido al sinergismo que presenta con el Mg (Wisuma, 2003) presente en la dolomita. La menor concentración de P lo obtuvo el T9 con 3,761 ppm (Figura 8) por el bajo contenido de Mg de la composta y su sinergismo con el P. Salisbury y Ross (1994)

proponen una concentración mínima de 2,000 ppm de P en tejido vegetal seco, la mayor concentración de P se presentó en el T3 con 4,426 ppm de P (Cuadro A4). En todos los tratamientos se obtuvieron valores superiores a los rangos críticos debido a que el Ca y el Mg de la mezcla mineral en los sustratos incrementaron la absorción de P por la planta ya que el Ca aumenta la velocidad de transporte del P (Clarke, 2000) y el Mg es transportador del P en la planta vía enzimática (Fernández, 2007).

Potasio. - El contenido promedio de K foliar es de 10,000 ppm (Salisbury y Ross, 1994) sin embargo, los valores obtenidos representan un incremento de hasta 400% (Figura 8) en el tejido vegetal de chile manzano concordando con Véry y Sentenac (2003) quienes encontraron concentraciones de hasta 60,000 ppm de K en plantas de arroz. Cuando se utilizó composta la concentración de K incrementó en un 24% (T7) con respecto al testigo (T1) (Cuadro A3).

La máxima acumulación de K en tejido vegetal ocurre durante la floración (González-Eguiarte *et al.*, 1991) originado por el fenómeno conocido como consumo superfluo, en el Cuadro A4 se observa que cuando el contenido foliar de K es mayor el contenido de Ca se reduce debido a la interacción K/Ca.

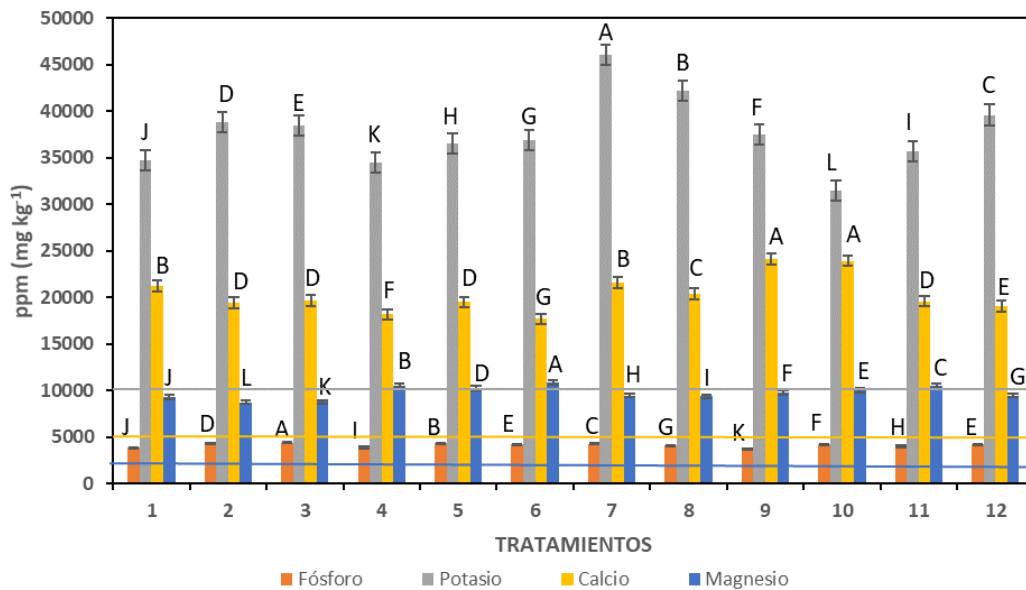


Figura 8. Concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio foliar de chile manzano en etapa de floración.

Calcio. – Las concentraciones elevadas de Ca en la planta se deben a la adición de composta (Cuadro A3) con una $R^2=0.517$ (Cuadro A5) y a la dolomita que al intemperizarse libera el Ca (Fassbender, 1975) ya que a valores neutros de pH ejerce un efecto sinérgico con el K propiciando la absorción del Ca (Alcántar *et al.*, 2016). Se encontraron valores entre 17,702 (T6) y 24,143 (T9) ppm de Ca (Figura 8) superando el contenido de 5,000 ppm mencionando por Salisbury y Ross (1994) en tejido vegetal, contenido considerado como mínimo para que la planta cumpla con su función osmótica sin verse afectada drásticamente.

Magnesio. – La concentración vegetal de Mg fue mayor en T2 (8,769 ppm) y T1 (9,304 ppm) (Cuadro A4) debido a los bajos contenidos de P, K y Ca en el sustrato (Cuadro A11) que desencadenó una reducción en los antagonismos con el Mg (Pratt y Hardling, 1957) de la fracción mineral lo que facilitó su absorción. Jiménez *et al.*, (2005) encontraron contenidos similares de Mg en *C. juncea* cuando se aplicaron como abonos verdes en cafetales.

En las plantas se considera como contenido crítico nutrimental de Mg una concentración de 2,000 ppm en materia seca (Salisbury y Ross, 1994), no obstante, la concentración de Mg en el tejido vegetal de chile manzano superó el rango obteniendo valores de hasta 10,900 ppm (Figura 8) cuando se agregaron $80 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de mezcla mineral, en específico por acción de la dolomita presente.

En general, los trabajos de interacciones entre las bases intercambiables (Ca, Mg y K) han desarrollado un mejor entendimiento de la naturaleza compleja de las relaciones entre los cationes y la importancia del balance de los nutrientes en la producción de cultivos. Este tipo de estudios han sido realizados a través de diferentes técnicas como rendimiento, calidad de cultivos, análisis nutricional de suelo, sustrato y planta, pero pese a esto, su interpretación ha sido difícil debido al efecto de otros factores tales como el estrés hídrico, aplicación de nutrientes a partir de diversas fuentes y el clima.

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- I. Los tratamientos con composta y $40 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de mezcla mineral fueron los que obtuvieron una mayor producción de materia seca.
- II. La incorporación de composta, $40 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de mezcla mineral y la reducción de fertilización potásica aumentaron la concentración foliar de N, P y K lo que mejoró características como la altura, número de nudos y cantidad de botones florales.
- III. Al reducir 50% de la fertilización potásica se incrementa el peso fresco y seco de planta y radical, al igual que el volumen de raíces propiciados por la reducción de antagonismos con el Ca y Mg.
- IV. El testigo, conformado por la mezcla de sustratos de tezontle y aserrín mas el suministro al 100% de la solución nutritiva, presentó los menores valores de altura, proporción de materia seca y peso fresco y volumen de raíz.

VII. LITERATURA CITADA

- Agarwal A., Gupta S. y Ahmed Z. 2007.** Influence of plant densities on productivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under greenhouse in high altitude cold desert of Ladakh. Acta Hort. (ISHS) 756:309-314.
- Alcántar, G. G. y M. V. Sandoval 1999.** Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México. 156 p.
- Alcántar G. G., Trejo-Téllez L. I. y Gómez-Merino F. C. 2016.** Nutrición de cultivos. Ed., México: Colegio de Posgraduados, Mundi-Prensa. Segunda edición 2016. 442 p.
- Álvarez, M. R. 2004.** Estudio sobre producción y desarrollo del pimiento morrón bajo condiciones de fertilización orgánica y química en invernadero. Tesis de licenciatura, UAAAN, Saltillo, Coahuila, México. pp 49-56.
- Almaguer V. G. 1998.** Principios de fruticultura general. Series Textos Agronómicos. Mundi-Prensa. Universidad Autónoma Chapingo. México. 370 pp.
- Baligar, V.C. and Fageria, N.K. 2015.** Nutrient use efficiency in plants: An overview. In Nutrient use efficiency: From basics to advances (pp. 1-14). Springer India.
- Barshad I. 1954.** Cation Exchange in micaceous minerals: II Repleaceability of ammonium and potasium from vermiculite, biotite and montmorillonite. Soil Sci. 78. 57-76.
- Borges G. L; Chuc-Puc, J; Escamilla-Bencomo, A; Medina-Lara, F. 2006.** Cinética de la absorción de potasio por las raíces de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Agrociencia 40:431-440.
- Bujanos M. R. y Arreola T. J. M. 2017.** Estudio de efectividad biológica de NUTRIBOND L-55 para la producción de pimiento (*Capsicum annuum* L.) orgánico en invernadero. Informe técnico de trabajo (no publicado).

- Cardoso, G.L. y Lomônaco, C. 2003.** Variações fenotípicas e potencial plástico de *Eugenia calycina* Cambess. (Myrtaceae) em uma área de transição cerrado-vereda. Revista Brasileira de Botânica 26:131-140.
- Carlos, M. R. 2012.** Fertilización orgánica vs mineral en el rendimiento y contenido de capsaicina en chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.). Tesis Maestría en ciencias agrícolas, Colegio de Postgraduados. México.
- Carpena, O.; A.M. Rodríguez; M.J. Sarro. 1987.** Evaluación de los contenidos minerales de raíz, tallo y hoja de plantas de tomate como índices de nutrición. An. Edafol. Agrobiol. 46: 117-127.
- Castellanos, Z. J. 2004.** Manual de producción hortícola en invernadero 2nd ed. INTAGRI. S.C. Celaya, Gto. México.
- Clarke, J. M. 2000.** Nitrogen and phosphorus uptake, translocation, and utilization efficiency of wheat in relation to environment and cultivar yield and protein levels. Can. J. Plant Sci. (70): p. 965-977.
- Cruz, O. J. 1998.** Enfermedades de las Hortalizas. Universidad Autónoma de Sinaloa. México. 234 p.
- Cruz P. and Lemaire G. 1996.** Diagnosis of the nitrogen status of grass stands. Tropical Grasslands 30(1): 166-173.
- De Longe, M. S., Miles, A. and Carlisle, L. 2016.** Investing in the transition to sustainable agriculture. Environmental Science y Policy, 55, 266-273.
- De Willigen, P.; Van Noordwijk, M. 1987.** Roots, plant production and nutrient use. Wageningen., 282p. Dissertação (mestrado em Horticultura). Wageningen Agricultural University.
- Espinosa-Torres L. E. 2005.** Los Sistemas de Producción de Chile Manzano en México. Una evaluación técnica, financiera y comercial. Tesis de Maestría. Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo. 134 p.

- Espinosa-Torres, L. E.; Pérez-Grajales, M.; Martínez-Damián, M. T.; Castro-Brindis, R. y Barrios-Puente, G. 2010.** Efecto de empaques y temperaturas en el almacenamiento de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.). Rev. Chapingo Serie Horticultura. 115-121.
- FAO. 2006.** Alimentación y agricultura en entornos nacionales e internacionales. Pobreza y agricultura. Roma, Italia: FAO. Anuario estadístico, vol. 1.
- Fassbender H. W. 1975.** Química de suelos. I.I.C.A., O.E.A. Turrialba, Costa Rica. 398 p.
- Fernández JL, Benítez DE, Gómez I, de Souza A, Espinosa R. 2004.** Rendimiento de MS y contenido de proteína bruta del pasto *Panicum maximum* vc likoni en un suelo vertisol de la provincia Granma. Rev. Cubana de Ciencia Agrícola. 38 (4): 417-421.
- Fernández M. T. 2007.** Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. (2): 51-57.
- García O. F. 2008.** Dinámica de nutrientes en el sistema suelo-planta. Jornada de actualización Minga Guazú, Paraguay. International Plant Nutrition Institute. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/8C93069B3977D5D68525797D0054DC75/\\$FILE/Paraguay%20Curso%20Sept%202008%20-%20Dinamica%20Nutrientes.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/8C93069B3977D5D68525797D0054DC75/$FILE/Paraguay%20Curso%20Sept%202008%20-%20Dinamica%20Nutrientes.pdf)
Obtenido el 25/07/2019.
- Gasca, P. R. 2011.** Reflectancia en hojas de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) para estimar contenido de nitrógeno. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- González-Eguiarte D., Alcalde B. S., Castillo M. A. y Ortíz C. J. 1991.** Análisis de la dinámica de producción de materia seca y extracción de N, P y K en trigo bajo diferentes ambientes. Agrociencia 2: 107-131.
- González A., F. y Pita V. J., M. 2001.** Conservación y Caracterización de Recursos Fitogenéticos. Edit. Mundi-Prensa. Madrid, España. 279 p.

- Handreck K. A. and Blanck N. 1994.** Growing Media Ornamental Plants and Turf. Rev. ed. New South Wales University. Kensington, Australia. 542 pp.??
- Hernández I. M., Arozarena N. J. y Chailloux M. 2009.** Rango crítico de nitrógeno y potasio en hojas indicadoras para dos épocas de plantación en el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido HA-3019. Cultivos Tropicales vol 30. (4): 79-86.
- Jaramillo, J. y Lobo, M. 1982.** Pimentón, pp. 121–144. In: Manual de Asistencia Técnica de Hortalizas. Ministerio de Agricultura e Instituto Agropecuario.
- Jiménez S. A. M., Farfán V. F. y Morales L. C. 2005.** Biomasa seca y contenido de nutrientes de *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida* empleadas como abonos verdes en cafetales. Cenicafé 56(2): 93-109.
- Juárez S., L. 2004.** Neoliberalismo y política agropecuaria. Universidad Obrera de México.
- Juárez H. J., Bolaños-Aguilar E. D., Vargas V. L. M. y Medina P. S. 2006.** Contenido de proteína por unidad de materia seca acumulada en diferentes especies de pastos tropicales. En: Barradas LH, Esqueda EV, Tosquy VOH y Rueda MB. Avances en la Investigación Agrícola, Pecuaria, Forestal y Acuícola en el Trópico Mexicano. INIFAP, UV, CP, UACH, ITUG, ITBR y UNAM. Veracruz: 299-320.
- Laborde, J. A. y Pozo, O. 1982.** Presente y pasado del chile en México. Sarinia. México, D. F. 82 p.
- Lee, J. H., E. Heuvelink, and H. Challa. 2002.** Effects of planting date and plant density on crop growth of cut chrysanthemum. J. Hortic. Sci. Biotec. 77: 238-247.
- Macias D. R., Grijalva C. R. L. y Robles C. F. 2012.** Respuesta de la aplicación de estiércol y fertilizantes sobre el rendimiento y calidad del chile jalapeño. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud. Biotecnia. XIV (3):32-38.
- Méndez-Argüello, B.; Lira-Saldivar R.H.; Vera-Reyes I.; Cárdenas-Flores, A. 2015.** Promoción de crecimiento en plantas de tomate por efecto de un biofertilizante zeolítico.

13° Simposio Internacional y 8° Congreso Nacional de Agricultura Sostenible, 23 al 27 de noviembre, Aguascalientes, Ags.

Molina M. 2000. Respuesta productiva de dos variedades de pimiento en diferentes sustratos. Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior. Almería. pp 29-69.

Nuez, F., Gil, R. y Costa, J. 1996. El Cultivo de los Pimientos, Chiles y Ajies. Ediciones Mundiprensa, (20–50 P ISBN 84–7114–609–6).

Pérez G. M. y Castro, R. 1998. Guía para la producción intensiva de chile manzano. Boletín de divulgación Núm.1. Programa Nacional de investigación en Olericultura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). 17 p.

Pérez, G. M. 2002. Estudio genético y fisiológico del crecimiento, rendimiento y calidad del fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens* R y P). Tesis de doctor en Ciencias. Especialidad en genética. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México.

Pérez G. M.; Mendoza, C. M. C. y Peña, V. C. 2004. Physiological characterization of manzano hot pepper (*Capsicum Pubescens* R & P) Landraces. Revista HortSciencie. 129 p.

Pérez G., M.; V.A. González H.; A. Peña L.; J. Sahún C. 2008. Combination hability and heterosis in Manzano hot pepper. Revista chapingo: Serie Horticultura.

Pérez, G. M. y Castro, B. R. 2010. El chile manzano. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). 1a. Reimpresión. 135 p.

Pratt P. F. and Harding R. B. 1957. Loss of magnesium from soil. Californian Agriculture 11:11.

Preciado, R.P; Baca, G.A; Tirado, JL; Kohashi-Shibata, J; Tijerina, L; Martínez, A. 2002. nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón. Terra 20:267-276.

Rêgo, E. R.; Rêgo, M. M.; Cruz, C. D.; Finger, F. L. and Casali, V. W. D. 2009. A diallel study of yield components and fruit quality in chilli pepper (*Capsicum baccatum*). Euphytica. 168(2):275-287.

- Rubio V., B. 2004.** Voces de la desesperanza: La desestructuración alimentaria en México (1994-2004). Instituto de Investigaciones Sociales. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rubio. B.; A.M. Aragonés, M. Chauvet, F. Echanoive, G. Espinoza, A. C. Martínez, C. N. Morales, R. J. Peña y M. C. Ramírez. 2004.** El sector agropecuario mexicano frente al nuevo milenio. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Sociales. Plaza y Valdés, Ed. México. 268 pp.
- Salisbury F. B. y Ross C. W. 1994.** Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamericano S.A. de C.V. México.
- SE. 2017.** Secretaría de Economía. Comercio Exterior/Información Estadísticas y Arancelaria. http://www.economia-snci.gob.mx/sic_php/pages/estadisticas/. Obtenido el 19/03/19.
- SEDAGRO. 2005.** Programa del Sector agropecuario 2005-2010. Gobierno del Estado de Zacatecas.
- SIAP. 2010.** Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Un panorama del cultivo del chile. Delegaciones de la SAGARPA.
- SIAP. 2019.** Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Archivo Producción ganadera, Pesquera y Agrícola. SAGARPA, México. Obtenido el 16/06/19. https://www.gob.mx/siap/archivo/acciones_y_programas
- Statistical Analysis System (SAS) Institute Inc. 2011.** SAS for windows. Release 6-12, version 9.3. SAS Campus Drive. North Carolina, U.S.A.
- Steiner, A.A. 1988.** La composición de las soluciones nutritivas. Horticultura, 41: 97-103.
- Todorova V. 2007.** Fruit characterization and influence of variation factors in pepper kapiya type varieties and breeding lines (*Capsicum annuum* L.). Bulgarian Journal of Agricultural Science 13: 309-315.

- Urbina S. E.; Baca C. G. A.; Núñez E. R.; Colinas L. M. T.; Tijerina C. L. y Tirado T. J. L. 2006.** Cultivo hidropónico de plántulas de jitomate en zeolita cargada con K^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+} y diferente granulometría. *Agrociencia* (40): 419-429.
- Véry A. A. and Sentenac H. 2003.** Molecular mechanisms and regulation of K^+ transport in higher plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 54: 575-603.
- Villanueva C. E.; Alcántar G. G.; Sánchez G. P.; Soria F. M. y Larque S. A. 2010.** Nutrición mineral con nitrógeno, fósforo y potasio para la producción de *Chrysanthemum morifolium* Ramat. con sustratos regionales en Yucatán, México. *Terra* 2010, 28:43-52.
- Wisuma, M. 2003.** How do plants achieve tolerance to phosphorus deficiency?. Small causes with big effects. *Plants Physiol.* (133): p. 1947-1958.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN Y POTENCIAL DE LOS SUSTRATOS EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, todas las ciencias están experimentando avances tecnológicos importantes. Afortunadamente la agricultura también se está beneficiando de toda esta revolución tecnológica. Desde el punto de vista económico, su uso se ha fomentado por la agricultura orgánica, ya que es una respuesta a la mejora en las prácticas agrícolas (Nieto-Garibay *et al.*, 2002). Junto a todos estos cambios tecnológicos se observa como se está sustituyendo, de manera cada vez más importante, el cultivo tradicional en suelo por el cultivo hidropónico y en sustrato (Abad y Noguera, 1997). Lógicamente, este fenómeno ha sido más pronunciado en aquellos sectores más intensivos de la agricultura, como es el caso de la producción hortícola y ornamental. Entre las distintas razones que han ido provocando esta sustitución podría destacarse especialmente la presencia cada vez mayor de factores limitativos para la continuidad de cultivos intensivos en pleno suelo (agentes fitopatógenos, salinidad, etc.) que obliga a adoptar técnicas productivas alternativas (Hashemimajd *et al.*, 2004).

El desarrollo de los sustratos hortícolas tiene su origen en el cultivo de plantas en contenedor (Burés, 1997); parece que la propia demanda desde el sector productivo es la que ha obligado a desarrollar materiales adecuados que puedan ser utilizados satisfactoriamente en el cultivo de plantas en contenedor. El cultivo de plantas en sustrato presenta diferencias sustanciales respecto del cultivo de plantas en pleno suelo (Abad, 1993).

Al cultivar en contenedor las características de éste resultan decisivas en el correcto crecimiento de la planta, ya que se produce una clara interacción entre las características del contenedor y el manejo del complejo planta-sustrato (Abad *et al.*, 2004). En el caso del cultivo de plantas en contenedor el volumen de sustrato es limitado y de él las plantas absorberán el oxígeno, agua y nutrimentos (Favaro *et al.*, 2002). Por otra parte, hay referencias que indican que en el cultivo intensivo de plantas, en el que las temperaturas están controladas y los niveles de nutrimentos en el sustrato acostumbran a ser altos, se produce una mayor absorción de agua y transpiración por parte de la planta, debido a que el tiempo de apertura de estomas es superior (Abad, 1993); esto obliga a regar frecuentemente para que en todo momento exista agua fácilmente

disponible en el sistema radicular, lo que sin duda puede ocasionar problemas por falta de aireación (García *et al.*, 2001). Por lo anterior, es conveniente emplear sustratos con una elevada porosidad. Esta es la causa fundamental de que un suelo agrícola no pueda ser utilizado para el cultivo en contenedor.

La producción en sustratos bajo invernadero aumenta los rendimientos, según se ha observado (Berenguer *et al.*, 2003; Incrocci *et al.*, 2003), es decir, producir en dicho sistema aumentaría la relación beneficio-costos, además elimina algunos de los problemas de la agricultura a campo abierto citados por Gómez *et al.*, (1999), ya que se garantizarían frutos durante todo el año, se evitarían los contratiempos ambientales, daños por contaminación del suelo, uso eficiente del recurso hídrico y, sobretodo, aumentarían las ganancias debido a la mayor productividad con relación a la producción en campo.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

- I. Evaluar los efectos de minerales, material orgánico y fertilización que puedan sustituir parcial o totalmente las formas convencionales de nutrición en agricultura protegida.

Objetivos particulares

- I. Identificar los efectos de la aplicación de minerales y material orgánico en las características físicas y químicas de sustratos inertes.
- II. Sustitución de la concentración de K en la solución nutritiva por la adición de minerales y materia orgánica en los sustratos.

Hipótesis

- I. La materia orgánica y los minerales optimizan la disponibilidad de N, P, K, Ca y Mg en un sistema de producción.
- II. La materia orgánica y los minerales presentan características que, al ser mezclada con sustratos, mejoran las propiedades físicas y químicas.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

Sustrato

El término sustrato se refiere a todo material sólido diferente del suelo que puede ser natural o sintético, mineral u orgánico y que permita el anclaje de la planta a través de su sistema radical. Volke *et al.*, (2010) lo definen como material sólido simple o en mezcla, de síntesis natural, residual, mineral u orgánico utilizados para producir plantas o cultivos en contenedor, el o los cuales cumplen funciones de soporte, aireación, y retención de agua. Pastor (1999) menciona dos clasificaciones de los sustratos, químicamente inertes y químicamente activos, los primeros actúan únicamente como soporte de la planta, mientras que los últimos intervienen en el proceso de adsorción y fijación de nutrimentos.

Materiales utilizados como sustratos

Comúnmente son empleados como sustratos de cultivo diversos materiales orgánicos, minerales o de síntesis. Dentro de los sustratos orgánicos se encuentran materiales generados como subproducto de las actividades forestales como el aserrín y cortezas de pino y como materiales minerales las tobas volcánicas, la perlita y vermiculita, entre otros, como una alternativa al uso de la turba (Baixauli *et al.*, 2002). En México se han ido realizando investigaciones usando sustratos con la finalidad de disminuir el uso del suelo de monte enfocadas hacia el área hortícola, producción de plantas de ornato y forestal (Santiago, 2002).

Aserrín

Mastelerz (1977) afirma que el aserrín es el sustrato más común y ampliamente utilizado por que tienen muchas características que lo hacen deseable para la preparación de los medios de crecimiento, todos los tipos de aserrín mejoran las características físicas de los medios de crecimiento, además el tamaño de partículas es fácilmente manejable con otros componentes del medio y, por su elevado contenido de ligninas y compuestos lignocelulósicos, se descompone lentamente (Búres, 1997) lo que indica que ofrece condiciones y estabilidad favorables para ciclos largos de cultivo (Mora, 1999).

Las características químicas del aserrín varían según la especie, posee baja capacidad amortiguadora, contenido de sales variable, pH ácido, por lo que liberan pocos nutrientes, su CIC

y aporte de nutrientes aumenta a medida que se descompone (Burés, 1997). El aserrín tiene una gran capacidad de humedecimiento por tener partículas finas (Mora, 1999) por lo que puede provocar la aparición de hongos, reducir el nivel de oxígeno de las plantas por lo que se recomienda hacer mezclas con materiales más gruesos con el fin de proporcionarle porosidad (Andrade, 2008).

Tezontle

Es un material considerado químicamente inerte, tiene una alta capacidad de aireación, su extracto de saturación es próximo a la neutralidad de pH y tiene poca capacidad de retención de humedad (Abad *et al.*, 1993) que es dependiente del tamaño de las partículas; no contiene sustancias tóxicas y presenta una buena estabilidad física (Bastida, 1999). Cuando se utiliza en mezcla con materiales orgánicos sus propiedades mejoran notablemente (Abad *et al.*, 1993).

Funciones del sustrato

Los sustratos tienen cuatro funciones principales: proveer de agua suficiente a la semilla y posteriormente a la plántula, suministrar los nutrimentos necesarios para el buen desarrollo y crecimiento de la plántula, permitir el buen intercambio gaseoso entre la atmósfera y el sustrato, anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz (Rodríguez *et al.*, 2010). Desde el punto de vista hortícola, la finalidad del sustrato de cultivo es producir una planta o cosecha abundante y de buena calidad, en un periodo corto, con los menores costos de producción. Además, el sustrato utilizado no debe provocar un impacto ambiental de importancia (Abad *et al.*, 2005).

Características físicas de los sustratos

La caracterización física considera la distribución volumétrica del material sólido, agua y aire, así como su variación en función del potencial matricial (Abad y Noguera, 1998), composición granulométrica, densidad aparente y proporción y tamaño de poros (Abad, 1991).

La estructura física de un sustrato está formada básicamente por un esqueleto sólido que conforma un espacio de poros, los cuales pueden estar llenos de agua; el esqueleto sólido depende del tipo de material y de su distribución granulométrica y mezclado (Burés, 1997). Raramente se utilizan para crecimiento definitivo de las plantas sustratos de un solo material, puesto que es difícil que reúnan las características físicas y químicas deseadas para un cultivo (Burés, 1997). Por lo

tanto, no existe un sustrato que pueda ser empleado en todos los casos y en todas las especies (Cruz, 2010).

Densidad aparente

Fernández *et al.*, (2006) definen a la densidad aparente de un sustrato como la masa de un material sólido por unidad de volumen del sustrato, incluido el espacio poroso de las partículas.

Granulometría

Se refiere a la proporción del tamaño de las partículas que conforman un sustrato, puede caracterizarse utilizando una muestra seca colocada en la superficie de una columna de tamices, recolectando cada una de las fracciones retenidas en cada tamiz y cuantificando su peso, cada una de las fracciones se expresa con base en su proporción en relación con el peso inicial (Díaz, 2004).

Porosidad

La porosidad de un medio es definida como la proporción de su volumen que no se encuentra ocupado por la fase sólida (Ansorena, 1994).

Curva de liberación de la humedad

Descrito por De Boodt *et al.*, (1974) con la finalidad de estimar los datos de agua fácilmente disponible, agua difícilmente disponible, agua de reserva, material sólido y capacidad de aire de un sustrato.

Características químicas de los sustratos

Bunt (1988) menciona que es importante conocer las propiedades químicas de los sustratos o las mezclas porque de ellas depende el buen desarrollo de las plántulas; las propiedades químicas que debe de poseer un sustrato son: pH ligeramente ácido, una baja concentración de sales, baja fertilidad y que estén libres de plagas y enfermedades.

Conductividad eléctrica

Es el valor recíproco de la resistencia eléctrica de una columna de solución. Se expresa en dS m^{-1} , el cual está relacionado con la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato (Burés, 1997).

Lemaire (1993) indica que las sales solubles pueden afectar a las plantas de distintas formas, como en la absorción de nutrientes y el balance nutricional que es necesario para el óptimo crecimiento.

pH

Se considera pH como el logaritmo negativo del ion hidrógeno en una solución acuosa, es una propiedad química muy importante, porque indica que tan ácida o alcalina es la solución que es donde las raíces toman los nutrientes (Osorio, 2012).

Los materiales utilizados en los medios de cultivo varían en pH de un material a otro. El pH que se tiene al final del sustrato, depende del manejo de la fertilización y riego que se realice en el vivero. Ansorena (1994) menciona que el sustrato debe de tener un pH óptimo entre 5.2 a 6.3 para que las plantas crezcan sin deficiencias nutrimentales, siempre y cuando las concentraciones de nutrientes disponibles se mantengan en niveles suficientes, lo que no excluye que puedan crecer fuera de este intervalo.

Bases intercambiables

Se refiere a los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} intercambiables. La suma de las bases intercambiables es equivalente a la CIC aplicado como indicador de la fertilidad del medio de crecimiento en las plantas.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se define como la suma de los cationes intercambiables que un material puede absorber por unidad de peso o volumen del sustrato. Una elevada CIC, permite mayor flexibilidad en el manejo de nutrientes, y una cierta capacidad para contrarrestar posibles excesos de sales al sustrato (Abad *et al.*, 2004). Se expresa en centimoles carga del catión por kilogramo de sustrato.

Los materiales utilizados para sustratos presentan baja y diferente CIC, por lo tanto, se requiere de una aplicación más frecuente de fertilizantes (Lax *et al.*, 1986).

Relación Carbono/Nitrógeno

Se ha tomado tradicionalmente como un indicador en la evolución del proceso de mineralización. Abad *et al.*, (1993) consideran óptima una relación C/N inferior a 20 para cultivos.

Materiales que tienen carbono formando parte de compuestos resistentes como las ligninas permiten relaciones C/N más elevadas (≤ 100) (Burés, 1997) lo que indica una mayor estabilidad biológica de los materiales.

Uso de potencializadores de la fertilidad en la agricultura

La fertilidad es la capacidad que tiene el medio para sustentar el crecimiento de las plantas y optimizar el rendimiento de los cultivos, ello puede potenciarse por medio de fertilizantes orgánicos y minerales que nutran al sustrato.

Las zeolitas se han aplicado como mejorador de diferentes características de suelos y cultivos, provocando en estos un incremento de la capacidad de intercambio catiónico y mayores contenidos de fósforo y potasio (Febles *et al.*, 2014). De acuerdo con De Campos *et al.*, (2003) estas pueden actuar como abonos de liberación lenta incrementando el uso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo o como enmiendas al aumentar la capacidad de retención de humedad.

La dolomita cumple con algunas de las características deseables para aumentar el contenido de calcio y magnesio (Osorio, 2006) pero su uso tiene poco desarrollo dentro de la agricultura (Alvarado y Loarte, 2004) ya que su principal función es la corrección del pH (Zapata, 2004).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los sustratos

Físicas:

Porosidad

A cada una de las mezclas se determinó la porosidad total (PT), porosidad de aireación (Pai) y la porosidad de retención de humedad (Prh), siguiendo la metodología descrita por Landis *et al.*, (1990), el sustrato se hidrató por 24 horas, transcurrido el tiempo, se procedió a llenar los permeámetros con la mezcla hidratada e inmediatamente se tomó cada uno de los pesos con la mezcla; se dejó drenar y se obtuvo el peso drenado, después se vaciaron las mezclas del permeámetro y se colocaron en una estufa con circulación de aire a una temperatura de 70 °C durante 78 horas, finalmente se obtuvo el peso seco de cada muestra.

Densidad aparente

Se utilizaron permeámetros con capacidad de 500 mL, se llenaron con sustrato saturado hasta el volumen conocido, se dejó drenar, posteriormente se procedió a secar el sustrato a temperatura de 70 °C durante 78 horas, con la finalidad de obtener el peso seco que junto con el volumen se obtuvo la densidad aparente expresada en Mg cm^{-3} .

Granulometría

La distribución del tamaño de partículas que componen un material se expresa en una curva granulométrica que se generara mediante las proporciones de material atrapado en cada malla de una columna de tamices (CP Física, 2019). Para este trabajo se realizó por medio de 7 tamices con los diámetros de 6.36, 4.76, 3.36, 2.00, 1.00, 0.5, 0.25 mm y el receptor. Se utilizó una muestra de 500 g de cada mezcla con 4 repeticiones, se tomó el peso de cada uno de los tamices posteriormente fue colocada en el primer tamiz de la columna que se sometió a una vibración durante cinco minutos en un agitador mecánico; transcurrido el tiempo se pesó cada uno de los tamices con el sustrato contenido, el mismo procedimiento fue aplicado para cada una de las muestras.

Curva de liberación de humedad

Se utilizaron embudos de succión con una placa filtrante conectados a una manguera, se colocó la muestra de los sustratos previamente saturados y se sometió a succiones de 10, 50 y 100 cm de columna de agua, hasta estabilizarse, se tomó una muestra obteniendo el peso húmedo y peso seco a 70 °C de cada una de las mezclas. Con la finalidad de estimar los datos de la curva se obtuvieron los datos de agua fácilmente disponible (AFD), agua difícilmente disponible (ADD), agua de reserva (AR) y capacidad de aire (CA).

Químicas:

Conductividad eléctrica y pH

Se determinó mediante extracto en relación 1:5 mediante conductímetro propuesto por Ansorena en 1994. La medición del pH fue realizada por la metodología de Ansorena (1994) mediante extracto acuoso relación 1:2.

Bases intercambiables y Capacidad de intercambio catiónico

Las bases intercambiables se determinaron por el método del acetato de amonio (NH_4Ac) pH 7 1 N. El método consistió en saturar la muestra con un catión que normalmente no forma parte de los iones, como el NH_4Ac , con el que se logra obtener, después del lavado del exceso de la solución con alcohol, la capacidad total del cambio de cationes en la muestra (NOM-021-SEMARNAT-2000, Fassbender, 1987). La determinación de potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) se realizó con el método de espectrofotometría de absorción atómica (Page, 1982) y consistió en el pesado de 5.0 g por muestra y agregar 100 mL, dividido en 3 etapas, de solución extractora de acetato de amonio (NH_4Ac) pH 7 1 N después de agitar y filtrar se obtuvo el extracto (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Relación Carbono/Nitrógeno

Es un valor numérico que determina la proporción de C y N; es calculada con base al análisis del carbono y nitrógeno total.

Contenido de materia orgánica y carbono orgánico

El contenido de materia orgánica del sustrato se calculó por el método de ignición a 450 °C por 24 horas, y el carbono orgánico con base en los resultados de la materia orgánica mediante el factor 0.5 (Douglas, 2010).

Contenido total de nitrógeno

Se realizó con el método micro Kjeldahl (modificado por Bremner en 1965, citado por Fernández, 2006), que consiste en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico, en el cual se produce amonio que es cuantificado por destilación y posterior titulación.

Fósforo (P)

Se determinó por colorimetría mediante el método Bray en la mezcla de tezontle y aserrín, y mediante el método Olsen para la mezcla de tezontle, aserrín y composta. El método Olsen es empleado cuando el pH de la muestra resultase con $\text{pH} > 7$ y Bray para $\text{pH} < 7$ (Fernández, 2006).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó a través del programa estadístico SAS versión 9.3, en el que se ejecutó un análisis de varianza mediante el procedimiento proc GLM, posteriormente se realizaron comparaciones de medias con la prueba Tukey ($p < 0.05$).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características física y química de los sustratos

Para la evaluación de los parámetros físicos y químicos de los sustratos se efectuaron las mediciones de 4 contenedores representativos por tratamiento seleccionados al azar, siendo evaluados los siguientes parámetros:

Físicas:

Porosidad

Los tipos de porosidad de los sustratos y su respuesta a los factores de estudio se presentan en el Cuadro A7, no se obtuvieron diferencias estadísticamente distintas en la interacción de tratamientos.

El valor más alto de porosidad total (PT) se obtuvo con el T5 (83%) y el menor se presentó en el T2 con 70.5% (Cuadro A8), ambos tratamientos no contenían composta, resultados similares reportó Zapata *et al.*, (2005) en corteza de pino mezclada con residuos sólidos urbanos. Abad (1995) y Restrepo *et al.*, (2013) mencionan que el rango ideal de PT es de 70 a 85%, con base en lo anterior, los resultados de PT obtenidos en los sustratos analizados se encuentran dentro del intervalo adecuado. La Figura 9 muestra los porcentajes de las distintas porosidades en los tratamientos.

La porosidad de aireación (PA) es una de las características más importantes de los sustratos ya que de ella depende la difusión de oxígeno para evitar problemas de anoxia radicular (Bunt, 1988; Pire y Pereira, 2003). Melgar y Pascual (2010) mencionan que cuando se agrega un 40% de material orgánico de fácil degradación se presenta un aumento en la cantidad de poros de aireación, sin embargo, todos los tratamientos, incluso aquellos que no contenían composta, presentaron valores dentro del rango ideal para favorecer el intercambio gaseoso de las raíces (De Boodt y Verdonck, 1974) señalando valores de PA entre 10 y 30% (Cuadro A8).

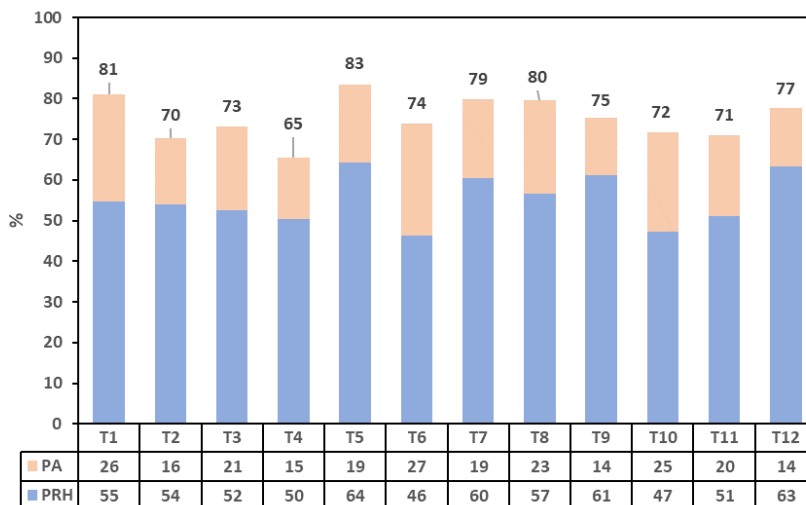


Figura 9. Proporción de las distintas porosidades en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.

Debido a que la porosidad de retención de humedad (PRH) corresponde a la cantidad de agua en el sustrato después de ser drenado, esta influirá sobre las condiciones de riego. Al mezclar materiales orgánicos e inorgánicos se presentan diferentes tipos de poros que difieren las propiedades de porosidad (Pape y Lager, 1994) los tratamientos con adición de composta y 80 $\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$ de mezcla mineral obtuvieron los mayores valores de PRH (Cuadro A8) ya que, como menciona Gutiérrez-Castorena *et al.*, (2011), el PRH disminuye cuando en el sustrato se encuentran partículas de 1 a 2 mm de diámetro.

Densidad aparente

No se encontraron diferencias estadísticas significativas en la variable de densidad aparente (Dap) y se debe al uso de material orgánico (Pire y Pereira, 2003) (Cuadro A7 y A8). La Dap es importante como indicador de la manipulación y estado actual de los sustratos, es un complemento importante para la determinación de otras variables.

Los valores obtenidos fueron, generalmente, mayores a los reportados por Hernández *et al.*, (2008) en vermicomposta de frutos de palma de aceite mezclada por estiércol bovino (0.35 Mg m^{-3}). Se encontraron valores dentro del rango por Handreck y Blanck (1994) y Ansorena (1994) donde se proponen valores menores a 0.60 Mg m^{-3} de Dap para sustratos.

Melgar y Pascual (2010) quienes, al comparar mezclas con proporciones crecientes de lombricompost observaron un aumento de la densidad aparente y una disminución de la porosidad total, que coincide con los resultados obtenidos (Cuadro A8). La Dap de los sustratos evaluados mostraron una $R^2= 0.932$ con respecto a la PT de los mismos (Cuadro A12).

Granulometría

El tamaño de partículas (TP), representado por su diámetro medio ponderado, de los sustratos presentó diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos (Cuadro A8). En los T9 y T12, que contenían composta y el mayor contenido de mezcla mineral, obtuvieron los menores valores de TP con 1.90 y 1.42 mm, la presencia de la composta contribuyó como acelerador de la mineralización del sustrato lo que provocó la disminución del diámetro del material orgánico con mayor bioestabilidad, en este caso del aserrín, lo que concuerda con Lemaire (1997) y Gutiérrez-Castorena *et al.*, (2001) quienes obtuvieron resultados similares al evaluar distintos tipos de materiales orgánicos mezclados con materiales inorgánicos. El efecto por adición de la mezcla mineral se vio influenciado por el mayor contenido de la misma y el TP del material.

Las partículas que componen los sustratos pueden tener tamaños muy variados (Burés, 1997) la importancia radica en que estas definen el tamaño de los poros y el balance entre el contenido de agua y aire del sustrato (Quintero *et al.*, 2011). De acuerdo con Abad y Noguera (1998), los materiales más adecuados para cultivos hortícolas son aquellos con un TP de 0.25 a 2.50 mm para asegurar la suficiente retención de agua y una aireación óptima, teniendo en cuenta lo anterior todos los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo recomendando.

Curva de liberación de la humedad

Para el abastecimiento de agua de las dos mezclas de sustrato se tomaron como referencia los datos obtenidos de la mezcla T:A ya que hubo diferencias en el contenido de material sólido, porosidad total (PT), agua difícilmente disponible (ADD), agua de reserva (ADR) y capacidad de aireación (CA); lo que causó una diferencia de agua fácilmente disponible (AFD) entre las mezclas de 0.17%.

En la Figura 10 se muestra la curva de liberación donde se expone un 19% de AFD, lo que se traduce en un suministro de 1,900 mL de solución nutritiva al día para tener un contenido óptimo

de humedad en el sustrato (10 L), los cuales se dividieron en 6 riegos de 5 minutos al día durante todo el periodo del experimento con la finalidad de mantener el sustrato con humedad todo el tiempo para que el cultivo establecido pudiera desarrollarse sin carencias de humedad ni, en caso de riegos excesivos, desarrollar enfermedades fúngicas. Para determinar el número de riegos y tiempo de cada uno se realizó la medición del gasto por minuto de las estacas utilizadas en el sistema de riego lo que nos arrojó un valor promedio de 63 mL por minuto.

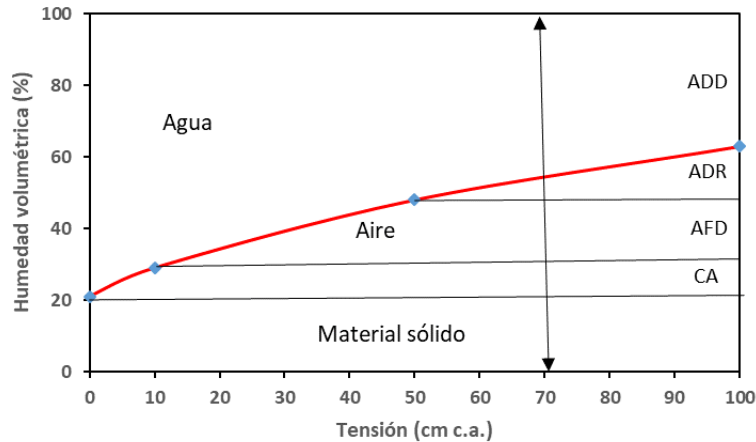


Figura 10. Curva de liberación de la humedad de las mezclas de sustratos al inicio del experimento.

Al finalizar en experimento, en la mezcla de sustratos con T:A (Figura 11) los cambios más significativos se mostraron en un cambio de volumen del material sólido debido, probablemente, al reacomodo de partículas y la producción de raíces, lo cual incrementó un 6% con respecto al contenido inicial (21%), el cambio más significativo se mostró en el porcentaje de AFD (14%) donde se redujo 26%, los porcentajes bajos pueden indicar que los sustratos tienen partículas finas que retienen el agua y se limita la disposición para las plantas (Hernández-Zarate *et al.*, 2014). El contenido de ADD presente decreció 31% en comparación con el valor inicial (45%) debido a la mayor presencia de aserrín. En cuanto a la PT, se observó un cambio de 71% a 68% mismo que está asociado con una baja CA por la presencia de macroporos que contienen agua y a una reducción brusca en el contenido de AFD (Raviv *et al.*, 2002).

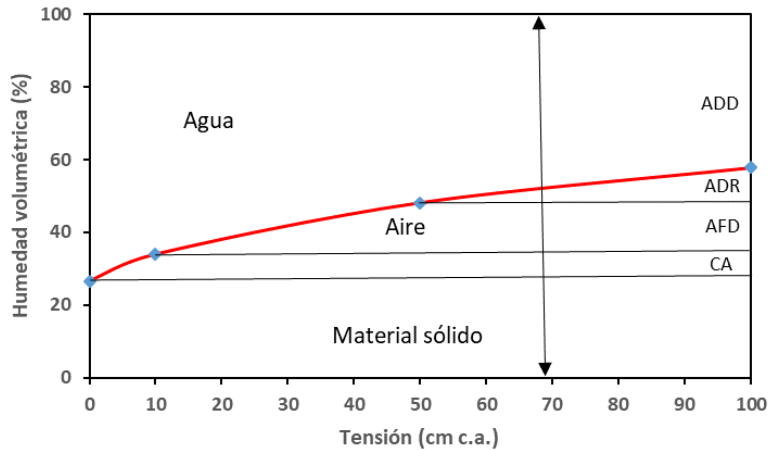


Figura 11. Curva de liberación de la humedad de la mezcla de sustratos de tezontle y aserrín (T:A) al final del experimento.

Al final del experimento, la mezcla de sustratos que contenía composta (Figura 12) presentó un valor de 10% de CA lo cual indica un incremento en la CA de 43% con respecto al valor inicial (7%). De igual manera se presentó una mayor PT (82%), ambas variables explican una diferencia en los volúmenes de agua y aire del sustrato. Heiskanen (1997) encontró que el contenido de agua y aire se ven afectados por la compactación y porosidad del sustrato. El porcentaje de AFD disminuyó en comparación con el valor inicial en un 37% a causa de la presencia de materiales con una menor estabilidad biológica (Sánchez-Córdova *et al.*, 2008).

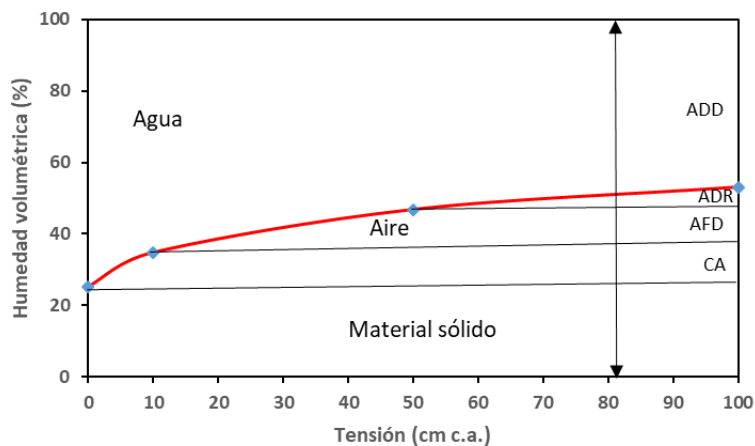


Figura 12. Curva final de liberación de la humedad de la mezcla de sustratos de tezontle, aserrín y composta (T:A:C) al final del experimento.

En ambas mezclas de sustratos los valores de AFD fueron menores a los reportados por Abad *et al.*, (1993) como óptimos y cuyo rango es de 20 a 30%. Sin embargo, con la distribución de los riegos durante el día se mantuvo el sustrato con un contenido adecuado de humedad lo que permitió la disponibilidad de agua y nutrientes para el cultivo.

Químicas:

Conductividad eléctrica y pH

La conductividad eléctrica (CE) y el pH de los sustratos presentaron diferencias estadísticas significativas por efectos de la solución nutritiva al 100% y contenido de 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, principalmente por acción de la dolomita (Cuadro A8) y entre el efecto por tratamientos (Cuadro 9A).

Para la CE, los tratamientos que contenían composta presentaron mayores valores de correlación ($R^2=0.675$) (Figura 13, Cuadro A12) debido a que cuando se aplican abonos orgánicos a los sustratos se incrementa ligeramente la CE por el contenido de sales solubles (López *et al.*, 2001; Salazar-Sosa *et al.*, 2007). Para el caso del efecto del 100% fertilización en la CE, de acuerdo con Terés (2001) y Ansorena (1994), la causa se debió a la alta concentración de sales en la solución nutritiva, principalmente el K, que superó a las cantidades absorbidas por la planta más la pérdida por lixiviación. El suministro de los riegos se realizó conforme el resultado de la CLH lo cual elimina los excesos de agua y las pérdidas por lixiviación en gran medida.

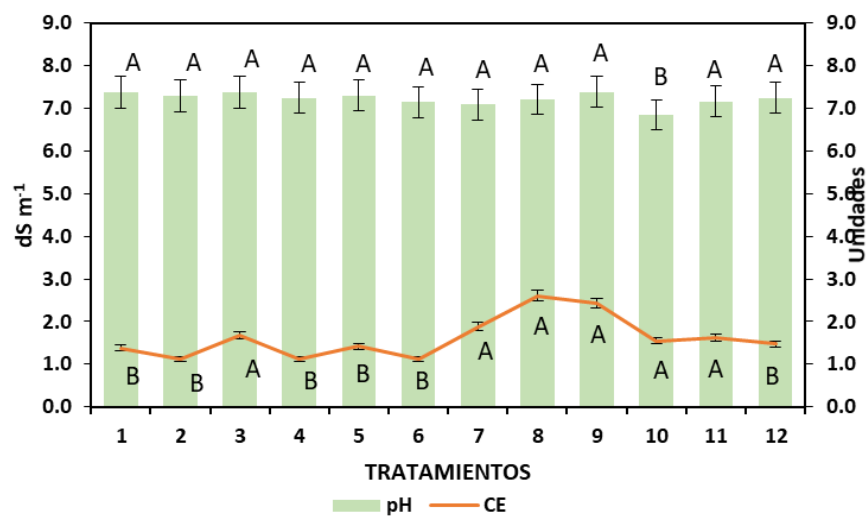


Figura 13. pH y conductividad eléctrica en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.

El T10 contenía composta y obtuvo el menor pH (Cuadro A7), ya que la presencia de material orgánico provoca pH ligeramente ácido por la digestión anaeróbica (Tringovska y Dintcheva, 2012). El efecto del 100% de fertilización presentó valores cercanos al 7.3 (Cuadro A7) lo que permitió tener un pH cercano al óptimo para el cultivo de chile morrón (Soler *et al.*, 2002). Cuando el contenido de mezcla mineral fue de $40 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ se elevó la retención de humedad (Cuadro A7) y por lo tanto se incrementa la concentración del ion H^+ (Unger *et al.*, 1991) y la liberación del carbonato de calcio de la dolomita teniendo como respuesta un pH neutro.

De acuerdo con Abad y Noguera (1998), el rango óptimo de pH en sustratos es de 5.5 a 6.8 y la concentración de sales en un intervalo de 0.76 a 2.0 dS m^{-1} (Todd *et al.*, 2000); todos los sustratos evaluados se encontraron sobre el límite superior de pH, pero no se excluye que algunas especies puedan desarrollarse fuera de este intervalo, de igual manera para T8 y T9 que presentaron valores superiores a los óptimos de CE, sin embargo, el cultivo de chile presenta una tolerancia a la salinidad de hasta 2.62 dS m^{-1} (Huez-López *et al.*, 2011) lo que no causó problemas en el desarrollo del cultivo.

Bases intercambiables y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Ernani *et al.*, (2001) mencionan que los contenidos de Ca y Mg disueltos en el suelo ocuparán los sitios de intercambio la acidez presente en el suelo y de su capacidad de intercambio catiónico.

La respuesta de los tratamientos con composta obedeció a la presencia de material orgánico ($R^2=0.956$) (Cuadro A12) y la liberación de nutrientes que favorecieron un incremento en la CIC (Rubio, 2007).

Ansorena (1994) recomienda que cuando se utilice solución nutritiva se cuenten con sustratos con una baja CIC ($<20 \text{ Cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), bajo éste enfoque, los sustratos con tratamiento de composta son los más apropiados para evitar pérdidas nutrimentales por efecto de lixiviado.

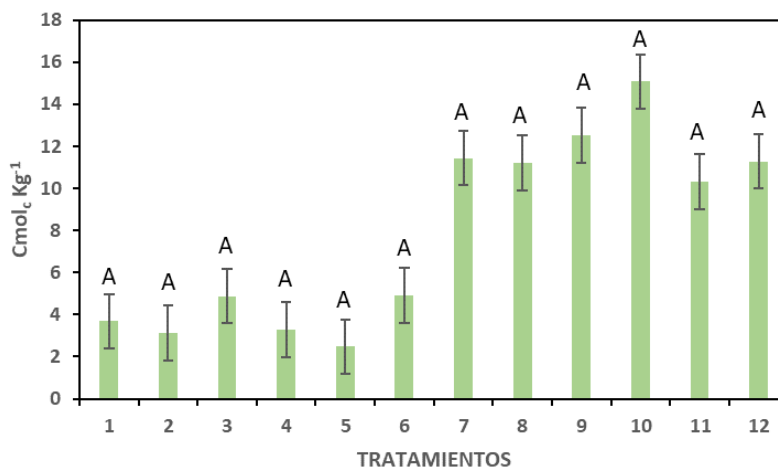


Figura 14. Capacidad de intercambio catiónico final en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.

Relación Carbono/Nitrógeno

El Cuadro A10 muestra que la variable relación C/N de los sustratos presentó diferencias estadísticas significativas por la acción de la composta y el decremento en el contenido de mezcla mineral.

En los tratamientos que contenían composta obtuvieron los menores valores de relación C/N (Cuadro A11) debido al menor contenido de aserrín, por lo tanto, la presencia de fibras lentamente degradables (Rodríguez *et al.*, 2010) no fue significativa, sin embargo, Quintero *et al.*, (2011) y Fricke y Vogtmann (1993) mencionan que valores inferiores a 20 de relación C/N es indicador de madurez del material orgánico debido a la rápida mineralización de la materia orgánica y del nitrógeno. Cuando menores son los valores de C/N mayor será la deficiencia de N en el sustrato por lo cual se necesita un aporte extra de N para satisfacer los requerimientos de las plantas (Terés, 2001).

Los tratamientos sin composta contenían una mayor proporción de ligninas (aserrín) lo cual repercute en valores elevados de relación C/N. Abad y Noguera (1998) mencionan que una relación C/N mayor a 30 es considerada adecuada para cultivos en sustrato por la estabilidad del material, siendo estos tratamientos recomendables para ciclos de cultivo más prolongados.

Contenido de materia orgánica (MO)

Todos los tratamientos que no contenían la mezcla mineral presentaron el mayor contenido de materia orgánica (MO) (Cuadro A10 y A11) cuyos valores fluctuaron entre 31.5 y 37% fueron estadísticamente iguales entre sí, pero significativamente diferentes a los tratamientos con contenido de mezcla mineral que obtuvieron valores entre 23.5 y 27%; lo que se debe, de acuerdo con (Rodríguez *et al.*, 2010), a la presencia de materiales no oxidables en la incineración. Los resultados concuerdan con los reportados por Márquez *et al.*, (2008), Moreno *et al.*, (2005) y Cruz-Lázaro (2009) quienes probaron distintas mezclas de biocompost, vermicompost de cabra y rastrojo de maíz mezclados con suelo.

Mayor presencia de MO en los sustratos permite considerarlos como materiales bioestables (Durán y Henríquez, 2007). La bioestabilidad es, de acuerdo con Lemaire (1997), la propiedad de un material orgánico de perder poco peso y conservar sus características físicas y químicas durante varios meses, especialmente cuando en él crecen plantas.

Carbono orgánico (CO)

El Cuadro A11 muestra las diferencias estadísticas significativas en la variable de carbono orgánico (CO) donde los tratamientos con composta presentaron los menores valores ($R^2=0.723$) (Cuadro A12) por la respuesta a una mayor mineralización del elemento orgánico (El Kader *et al.*, 2007).

Los valores obtenidos fueron menores a los reportados por Íñiguez *et al.*, (2011) en bagazo de agave tequilero (42.7 a 51.6%), sin embargo, Abad *et al.*, (1993) mencionan que debido al proceso de degradación del material orgánico el contenido de CO de los sustratos disminuye con el tiempo. De igual manera, la presencia de la mezcla mineral causó disminución del CO por el aumento en el contenido de minerales (Gallardo, 2001).

Contenido de nitrógeno (NT)

El uso de composta y 40 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral provocaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de nitrógeno (N) (Cuadro A10). La utilización de abonos orgánicos y mejoradores de suelo contribuye al incremento de MO y nutrientes como el N, en este caso, el

N presentó una $R^2= 0.864$ (Cuadro A12) con la adición de composta ya que contenidos elevados de N se asocia con la incorporación de material orgánico (Castellanos *et al.*, 2000).

El bajo contenido de nitrógeno (N) se relacionó con los tratamientos que no contenían mezcla mineral (Cuadro A11). Martínez-Guerrero *et al.*, (2009) y Martínez-Guerrero *et al.*, (2012) reportaron respuestas similares al contenido de N en sustratos de cáscara de almendra y de maguey mezcalero y lo atribuyen a la pérdida de N en forma amoniacal durante el proceso de mineralización.

Salazar-Sosa *et al.*, (2007) y Barber *et al.*, (1992) señalan que concentraciones elevadas de N indica una alta actividad microbiológica, pero niveles altos de N y el uso de materiales orgánicos conlleva riesgos de lixiviación de nitratos (Anken *et al.*, 2004) por el efecto residual de la mineralización (Castellanos *et al.*, 2000) propiciando una absorción sincronizada por la planta e incrementando su contenido foliar (Cuadro A4).

Fósforo (P)

Con respecto a la concentración de fósforo (P), los tratamientos que contenían composta obtuvieron los mayores valores (Cuadro A10, Figura 15) debido a que la presencia de abonos orgánicos en el suelo aumenta el contenido de P (Fuentes *et al.*, 2006). Los datos obtenidos comprueban lo anterior al mostrar una $R^2= 0.603$ cuando se agregó composta a los sustratos (Cuadro A12). Los valores menores de P entre tratamientos (Cuadro A11) pueden asociarse a una mayor mineralización debido a la disponibilidad de oxígeno en el sustrato (Tiquia *et al.*, 2002) (Cuadro A8).

De acuerdo con los rangos de contenido de P en sustratos propuestos por Ansorena (1994) y Warncke (1986) quienes mencionan como adecuado un contenido de 10 ppm, las concentraciones de P en los sustratos de este trabajo se situaron muy por debajo del nivel óptimo (Cuadro A11). Los contenidos de P en tejido vegetal (Cuadro A4) se elevaron, ya que, de acuerdo con Lindsay (1979), a valores de pH entre 6.5 y 7.5 el P se encuentra en mayor disponibilidad para su absorción.

Potasio (K)

La concentración de K varió de 1.85 (T6) a 6.26 (T9) $\text{Cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ de sustrato (Cuadro A11, Figura 15), el bajo contenido del elemento se atribuye a un proceso de lixiviación aunado con la reducción de K aplicado en el T6 (50% K) que limitó su concentración en el sustrato con respecto al 100% de K ($R^2=0.782$) aplicado al T9.

Cuando el suministro de K es bajo puede provocar un fuerte desequilibrio en las relaciones iónicas que guarda con el Ca (Tisdale *et al.*, 1994) en la etapa fenológica de floración (González-Eguiarte *et al.*, 1991).

Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

Se presentaron diferencias estadísticamente significativas en todos los tratamientos, la mayor concentración de Ca en el sustrato se presentó en el T1 con $7.53 \text{ Cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (Figura 15) debido a que el tezontle tiene capacidad de absorción de Ca para formar concreciones de CaCO_3 (Allaway, 1945) sin presentar deficiencias del elemento para la planta. El contenido elevado de Ca en los sustratos se favoreció por la intemperización de la dolomita (Fassbender, 1975) lo que fue favorable para el incremento de Ca en el tejido vegetal (Cuadro A4).

Todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas para la concentración de Mg en los sustratos. El T12 obtuvo una concentración de Mg (Figura 15) de $4.25 \text{ Cmol}_c \text{kg}^{-1}$ por aportación de la composta ($R^2= 0.956$) y a un mayor contenido de mezcla mineral ($80 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$), principalmente por el aporte de la dolomita. De acuerdo con Farnham *et al.*, (1985) el Mg es retenido por el sustrato y no es fácilmente lixiviable lo que provoca que quede disponible por periodos largos y sea absorbido por la planta, satisfaciendo sus requerimientos e incrementando la absorción y el contenido foliar de Mg.

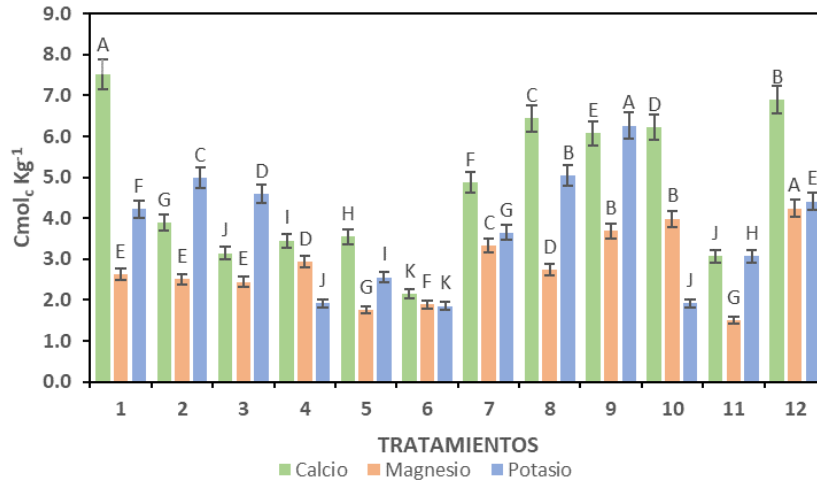


Figura 15. Concentración de calcio, magnesio y potasio en sustratos con diferentes fuentes de nutrición.

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- I. Los sustratos que contenían composta presentaron una baja relación C/N debido a una alta mineralización y una concentración mayor de K lo que propició una mayor concentración de K en el tejido vegetal.
- II. Los sustratos con composta y mayor contenido de mezcla mineral ($80 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$) presentaron un incremento en el Ca y Mg debido a la dolomita, aumentando la disponibilidad y su concentración en la planta.
- III. El uso de composta provocó un aumento de la CIC de los sustratos, en conjunto con la acción de la zeolita de la mezcla mineral, provocando incrementos en la concentración vegetal de Ca.
- IV. Los sustratos que no contenían composta y mezcla mineral presentaron bajos niveles de N, P, Ca y Mg.
- V. La fertilización, la composta y la dolomita de la mezcla mineral no causaron efectos considerables en pH y CE en los sustratos.
- VI. La disminución del tamaño de partículas de los sustratos se vio influenciado por su baja relación C/N y por la presencia de la mezcla mineral provocando una reducción en la porosidad de aireación y aumentando la porosidad de retención de humedad de los sustratos.
- VII. Los tratamientos que no contenían composta presentaron un mayor contenido de N vegetal y bajos contenidos de N, Ca y Mg en el sustrato, nutrientes que deberán suministrarse en mayor cantidad durante la fertilización.
- VIII. Dadas las características físicas y químicas, se recomienda utilizar la mezcla de tezontle, aserrín y composta con la adición de $40 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de mezcla mineral como sustrato alternativo a turbas comerciales.

VII. LITERATURA CITADA

- Abad, M.1991.** Los sustratos hortícolas y las técnicas de cultivo sin suelo. In: La Horticultura Española en la C.E.L. Rallo y F. Nuez (eds). Ediciones de Horticultura S.L. Reus. Madrid, España. pp: 271-280.
- Abad, M. 1993.** Sustratos. Características y propiedades. pp. 47-62. In: Cultivos sin suelo. F. Cánovas y J.R. Díaz. (ed.). Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA.
- Abad, M., P. F. Martínez, M. D. Martínez y J. Martínez. 1993.** Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. Actas de Horticultura 11:141-154.
- Abad B. M. 1995.** Sustratos para el cultivo sin suelo. En Nuez F (Ed.) El Cultivo del Tomate. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 131-265.
- Abad, M. y P. Noguera. 1997.** Los sustratos en los cultivos sin suelo. pp. 101-150. In: Manual de cultivo sin suelo. M. Urrestarazu (ed.). Universidad de Almería. Servicio de Publicaciones.
- Abad, M y P. Noguera 1998.** Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. In: Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. C. Cadahia (coord.). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp:287-342.
- Abad, M., B. Noguera, M. P., Carrión, B. C. 2004.** Los sustratos en los cultivos sin suelo en Urrestarazu G., M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 22 p.
- Abad B., M., Noguera M., P. y Carrión B., C. 2005.** Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. In: Cadahía L., C. (Ed.) Fertirrigación, cultivos hortícolas frutales y ornamentales, 3ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. pp. 299-354.
- Allaway W. H. 1945.** Availability of remplace calcium from different types of colloids as affected by degree of calcium saturation. Soil Sci. 59: 207-217.

- Alvarado A. y Loarte J. 2004.** La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* I.F.) en suelos ácidos de Costa Rica. <http://www.accessmylibrary.com.../summaryO286-5063246ITM> Obtenido el 30/06/19.
- Andrade S., G. 2008.** Resíduos regionais usados como substratos na região sul da Bahia. Anais do VI Encontro Nacional sobre Substratos para Plantas (ENSub). Materiais regionais como substrato. 9 a 12 de setembro de 2008, Fortaleza, CE. Brasil.
- Anken, T., P. Atamp, W. Richner, and U. Walther. 2004.** Plant development, nitrogen dynamics and nitrate leaching from ploughed and direct-sown plots. Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik No. 63. Zürich, Switzerland.
- Ansorena M. J. 1994.** Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid España. pp. 11-168-169.
- Baixauli S., C. Aguilar O., J. Mora. 2002.** Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Serie de divulgación técnica. Genetalitat Valencia. Valencia, España. pp. 15-26.
- Barber, K.L., L.D. Maddux, D.E. Kissel, G.M. Pierzynski y B.R. Bock. 1992.** Corn responses to ammonium and nitrate-nitrogen fertilization. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1166-1171.
- Bastida, A. 1999.** El medio de cultivo de las plantas. Sustratos para hidroponía y producción de plantas ornamentales. Serie de Publicaciones AGRIBOT Núm. 4 Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Preparatoria Agrícola. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 72 p.
- Berenguer, J. J.; Escobar, I.; Cuartero, J. 2003.** Gastos de cultivos de tomate tipo cereza en invernadero. Actas de Horticultura (ISHS) 39: 47-48.
- Bunt, A. C. 1988.** Media and mixes for container-Grown Plants (2nd ed.), Unwin Hyman. London, UK. 309 p.
- Burés, S. 1997.** Sustratos. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. p 342.

- Bremner, J.M. 1965.** Inorganic forms of nitrogen. pp. 1179-1232 In: C.A. Black et al. (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr.9.ASA, Madison, WI.
- Castellanos R., J.Z., J. Etchevers B., A. Aguilar S. y R. Salinas J. 2000.** Efecto de largo plazo de la aplicación de estiércol de ganado lechero sobre el rendimiento de forrajes y las propiedades de un suelo en una región irrigada del norte de México. Terra 14: 151-158.
- Colegio de Postgraduados. 2019.** Protocolo de Laboratorio de Física de Suelos. Posgrado de Edafología.
- Cruz-Lázaro, E de la.; Estrada-Botello, M. A.; RobledoTorres, V.; Osorio-Osorio, R.; Márquez-Hernández, C. y Sánchez-Hernández, R. 2009.** Producción de tomate en invernadero con composta y vermicompost como sustrato. Universidad y Ciencia. 25:59-67.
- Cruz C., E. 2010.** Mezclas de vermicompost y tezontle, diseñadas mediante un programa de optimización en SAS, para el cultivo de tomate bajo invernadero e hidroponía. Tesis doctoral. Colegio de Posgraduados, Montecillo, México. 15 p.
- De Boodt M, Verdonck O, Cappaert I. 1974.** Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. Acta Horticulturae 37:2054-2062.
- De Campos B. A.C., Anchao, O. P.P., De Melo M. M.B. y Souza-Barros, F. 2013.** Brazilian sedimentary zeolite use in agricultura. Microporus and Mesoporus Materials. 167, 16-21.
- Díaz S., F. R. 2004.** Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero. Memorias del IV simposio Nacional de Horticultura, Invernaderos diseño, manejo y producción. Torreón, Coahuila, México.
- Douglas W. P. 2010.** A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. Geoderma. 156: 75-83.
- Durán L. y Hernández C. 2007.** Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. Agron. Costarric. 31: 41-51.

- El Kader N. A., Robin P., Paillat J.-M. y Leterme P. 2007.** Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. *Bioresource Technol.* 98, 2619-2628.
- Ernani, P.R.; Bayer, C. & Steckling, C. 2001.** Características químicas de solo e rendimento de matéria seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:939-946.
- Farnham, D.S.; Hasek, R.F.; Paul, J.L. 1985.** Water quality; Its effects on ornamental plants. Cooperative Extension Leaflet No. 2995. University of California, USA. 15 p.
- Fassbender H. W. 1975.** Química de suelos. I.I.C.A., O.E.A. Turrialba, Costa Rica. 398 p.
- Fassbender, H. E. 1987.** Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica.
- Favaro JC, Buyatti MA y Acosta MR. 2002.** Evaluación de sustratos a base de serrín de Salicáceas (*Salix* sp.) compostados para la producción de plantones. *Investigación Agrícola* 2002; 17: 367-373.
- Febles, J., Borsatto, F. y Soca, M. 2014.** Fercel-Clinoptilolite natural product to optimize the fertilization and reduce environmental pollution. p 156-160. En. *Memorias 16th World Fertilizer Congress of CIEC. Technological Innovation for a Sustainable Tropical Agriculture.* Río de Janeiro, Brasil.
- Fernández, L.M. 2006.** Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Fernández C., J., E. Cora y L. T. Braz. 2006.** Desempenho de sustratos no cultivo do tomateiro do grupo cereja. *Horticultura Brasileira* 24: 42-46.
- Fuentes B, Bolan N, Naidu R, Mora M. 2006.** Phosphorus in organic waste-soil systems. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 6(2): 64-83.

- Fricke K. and Vogtmann H. 1993.** Quality of source separated compost. *BioCycle*. ProQuest Agriculture Journals 34(10): 64.
- Gallardo L. J. F. 2001.** Mineralización y humificación de la materia orgánica del suelo: Consecuencias sobre la contaminación. Memorias del X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Medellín, Colombia.
- García G, Cabrera R, Gavi R y Volke V. 2001.** Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisi* cultivadas en maceta. *Terra* 2001; 19: 249-258.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Hernández-Escobar J., Ortiz-Solorio C. A., Anicua-Sánchez R. y Hernández-Lara M. E. 2001.** Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Rev. Chapingo Serie Horticultura*. 17(3): 183-196.
- Gómez, T. L.; Gómez, C. M. A.; Schwentesius, R. R. 1999.** Producción y comercialización de hortalizas orgánicas en México, pp. 121-158. In: *Agricultura de exportación en tiempos de globalización, el caso de las hortalizas, flores y frutos*. GRAMONT DE C., H.; GÓMEZ C., M. A.; GONZÁLEZ, H.; SCHWENTESIUS R., R. (eds.). CIEESTAM/UACH. Chapingo, Estado de México.
- González-Eguiarte D., Alcalde B. S., Castillo M. A. y Ortíz C. J. 1991.** Análisis de la dinámica de producción de materia seca y extracción de N, P y K en trigo bajo diferentes ambientes. *Agrociencia* 2: 107-131.
- Handreck K. A. y Blanck N. 1994.** *Growing Media Ornamental Plants and Turf*. Rev. ed. New South Wales University. Kensington, Australia. 542 pp.??
- Hashemimajd K, Kalbasi M, Golchin A, Shariatmadari H. 2004.** Comparison of vermicompost and compost as potting media for growth of tomatoes. *J. Plant Nutr.* 27: 1107-1123.
- Heiskanen, J. 1997.** Air filled porosity of eight growing media based on Sphagnum peat during drying from container capacity. *Acta Hort.* 450: 277-286.

- Hernández A. J., Guerrero L. F., Mármol C. L., Bárcenas B. J. y Ender S. 2008.** Caracterización física según granulometría de dos vermicompost derivados de estiércol bovino puro y mezclado con residuos de fruto de la palma aceitera. *Interciencia* 33: 668-671.
- Hernández-Zarate L., Aldrete A., Ordaz-Chaparro V. M., López-Upton J. y López-López M. Á. 2014.** Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb. en vivero influenciado por diferentes mezclas de sustratos. *Agrociencia*. 48:627-637.
- Huez-López M. A., Ulery A. L., Samani Z., Picchioni G. y Flynn R. P. 2011.** Respuesta de plantas de Chile al estrés salino y fuentes orgánicas e inorgánicas de nitrógeno: II. Eficiencias en el uso del agua y de nitrógeno y tolerancia a las sales. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14: 757-763.
- Incrocci, A. P.; Campiotti, C. A.; Balducchi, R.; Giunchi, L. 2003.** Energy, water and fertilizer requirement of a closed loop soilless culture of greenhouse cherry tomato in Sicily. *Acta de Horticultura (ISHS)* 614: 189-192.
- Íñiguez G., Lange S. E. y Rowell R. M. 2001.** Utilization of by-products from the tequila industry: Part 2: Potential value of Agave tequilana Weber azul leaves. *Bioresource Technol.* 77, 101-108.
- Landis, T.D., R.W. Tunus, S.E. McDonald, and J.P. Barnett. 1990.** The Container Tree Nursery Manual. Containers and Growing Media. Vol. 2. Agric. Handbook. 674. Washington: USDA. Forest Service. 88 p.
- Lax, A., A. Roig and F. Costa. 1986.** A method for determining the cation- Exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil* 94:349-355.
- Lemaire, F. 1993.** Emploi des matieres organiques comme substrat dans les cultures hors sol. *PHM Revue Horticoles* 336:10-17.
- Lemaire F. 1997.** The problem of bioestability in organic substrates. *Acta Hort.* 450: 63-69.
- Lindsay W. L. 1979.** Chemical equilibria in soils. Wiley Interscience. 181 p.

- López M., J. D., A. Díaz E., E. Martínez R. y R. D. Valdez C. 2001.** Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento de maíz. *Terra* 19: 293-299.
- Martínez-Gutiérrez G. A., Ortiz-Hernández. Y. D., Urrestarazu M., Salas S. J. y Escamiroso T. C. 2009.** La rotación de cultivos y las propiedades de la cáscara de almendra como sustrato. *Rev. Fitotec. Mex.* 32, 135-142.
- Martínez-Gutiérrez G. A., Zárate Altamirano, G. y Urrestarazu M. 2012.** Maguey bagasse waste: a sustainable substrate in soilless culture by melon and tomato crop. *J. Plant Nutr.* 35, 2135-2144.
- Márquez Hernández, C.; Cano Ríos, R. y Rodríguez Dimas, N. 2008.** Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. *Agric. Téc. Méx.* 34:69-74.
- Mastelerz, J. W. 1977.** The greenhouse environment. John Wiley and Sons New York. USA. 629 p.
- Melgar R. R., y A.M.I. Pascual. 2010.** Characterization and use of a vegetable waste vermicompost as an alternative component in substrates for horticultural seedbeds. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(4):1174-1182.
- Mora, L. 1999.** Sustratos para el cultivo sin suelo o hidroponía. In: Bertsch H.C., G. Garcia J., C. Rivera J., B. Mujica F., y A. Badillo N. (Edit). XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. III Congreso Nacional del Suelo. San José, Costa Rica. Pp. 95100.
- Moreno R. A. y Valdés Perezgasga, Ma. T. 2005.** Desarrollo de tomate en sustratos de vermicompost/ arena bajo condiciones de invernadero. *Agric. Téc. Méx.* 65:26-34.
- Nieto-Garibay A, Murillo-Amador B, Troyo-Diéguez E, Larrinaga-Mayoral JA, García-Hernández JL. 2002.** El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del chile (*Capsicum annum* L.) en zonas áridas. *Interciencia* 27(8): 417-421.

- NOM-021-SEMARNAT-2000.** Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial, 31 de diciembre, 2002.
- Osorio C. 2006.** Efecto de la roca fosfórica, dolomita y cal sobre el pH, la acidez cambiante, el contenido de fósforo, potasio, calcio y magnesio en un suelo muy ácido de Satipo. Instituto de Investigación - Facultad de Ciencias Agrarias Satipo.
- Osorio, N. W. 2012.** pH del Suelo y Disponibilidad de Nutrientes. Revista Manejo integral del suelo y Nutrición Vegetal 1: 1-4.
- Page, A.L. 1982.** Methods of Soil Analysis Part 2. Second Ed. ASA.
- Pape, T. H.; Lagger, D. 1994.** Manual for soil descriptions and classification. Department of Soil Science and geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Pastor S. J. N. 1999.** Utilización de sustratos en viveros. Terra Latinoamericana 17:231-235.
- Pire R. y Pereira A. 2003.** Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. Bioagro 15: 55-63.
- Quintero C., M.F., González M., C.A. y Guzmán P., J.M. 2011.** Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 79-108.
- Raviv, M; R Wallach; A Silber & A Bar-Tal. 2002.** Substrates and their analysis (2) Pp. 25-101. In: D Savvas (ed). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo publications. Atenas. 463 pp.
- Restrepo, A.P., E. Medina, A. Pérez-Espinosa, E. Agulló, M.A. Bustamante, C. Mininni. 2013.** Substitution of peat in horticultural seedlings: suitability of digestate-derived compost from cattle manure and maize silage codigestion. Communications in Soil Science and Plant Analysis 44:668-677.

- Rodríguez-Macías, R.; Alcántar-Gonzales, E. G.; Iñiguez-Covarrubias, G.; Zamora Natera, J. F.; García-López, P. M.; Ruiz-López, M. A.; Salcedo-Pérez E. 2010.** Caracterización física y química de sus-tratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia* 35: 515-520.
- Rubio M., D. 2007.** La utilización del estiércol en la agricultura y su uso potencial en la Comarca Lagunera. *Seminarios Técnicos* 4 (5): 22. Centro de Investigación Agrícola del Noreste-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Torreón, Coahuila, México.
- Salazar-Sosa, E., H. I. Trejo Escareño, C. Vázquez-Vázquez y J. D. López-Martínez. 2007.** Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Rev. Int. Bot. Exp.* 76: 169-185.
- Sánchez-Córdova T., A Aldrete, V M Cetina-Alcalá, y J López-Upton. 2008.** Caracterización de medio de crecimiento compuesto por corteza de pino y aserrín. *Madera y Bosques* 14 (2): 41-49.
- Santiago T., O. 2002.** Evaluación del crecimiento en vivero de plántulas de cinco especies de coníferas producidas en tres mezclas de sustratos y tres tamaños de contenedores. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 241 p.
- Soler, R.; Brunetti, P. and Senesi, N. 2002.** Comparative chemical and spectroscopic characterization of humic acid from sewage sludges and sludgeamended soils. *Soil Sci.* 167:235-245.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute Inc. 2011.** SAS for windows. Release 6-12, version 9.3. SAS Campus Drive. North Carolina, U.S.A.
- Terés T. V. 2001.** Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 483p.

- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton y J.H. Havlin. 1993.** Soil fertility and fertilizers. MacMillan. New York.
- Tiquia S.M., Richard T.L. y Honeyman M.S. 2002.** Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 62, 15-24.
- Todd J. Cavins, Brian E. Whipker, William C. Fonteno, Beth Harden, Ingram McCall, and James L. Gibson. 2000.** Monitoring and Managing pH and EC Using the PourThru Extraction Method.; North Carolina State University Horticulture Information Leaflet 590.
- Tringosvska, I. and T. Dintcheva. 2012.** Vermicompost as substrate amendment for tomato transplant production. *Sustainable Agriculture Research* 1(2):115-122.
- Unger, P. W., B. A Stewart, J. F. Parr, and R. P. Singh. 1991.** Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semi-arid regions. *Soil Tillage Res.* 20: 219-240
- Volke, H. V. H., Cruz, C.E., Sandoval, V. M. 2010.** Mezcla de materiales para la obtención de sustratos mediante la programación. In: 1er curso Nacional de sustratos. Colegio de Postgraduados. 1-5 septiembre.
- Warncke D. D. 1986.** Analyzing greenhouse growth media by the saturation extraction method. *HortScience* 21: 223-225.
- Zapata H. R. 2004.** Química de la acidez del suelo. 1 ed. España. 179 p.
- Zapata N., Guerrero F., Polo A. 2005.** Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de sustrato de cultivo. *Agric. Técn.* 4: 378-387.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE SUSTRATOS MEDIANTE LA LIBERACIÓN DE CO₂ BAJO FERTILIZACIÓN NITROGENADA

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se tiene conciencia sobre el resguardo y recuperación de nuestros principales recursos naturales (Rosell, 1999). Entre ellos, la materia orgánica es un constituyente esencial ya que por su constitución y propiedades es la responsable de la mayoría de los procesos fisicoquímicos y biológicos edáficos (Aguilera *et al.*, 1999).

Durante la descomposición de la materia orgánica los nutrientes orgánicos se convierten en formas inorgánicas disponibles para las plantas (Guerrero-Ortiz *et al.*, 2012). Esta conversión se conoce como mineralización (Steubing *et al.*, 2001). La evolución del CO₂ es un parámetro ligado al manejo de materiales orgánicos el cual representa una medición integral de la respiración del suelo, conocida como respiración edáfica basal, es decir, representa la estimación de la actividad microbiana (García y Rivero, 2008). Frankenberger y Dick (1983), mencionan que existe una relación estrecha entre la actividad biológica y la fertilidad, por lo que parámetros vinculados a la primera han sido propuestos como indicadores apropiados del mencionado impacto, uno de ellos es la liberación de CO₂ (Ajwa *et al.*, 1999).

Para evitar problemas de contaminación ambiental y de degradación de los recursos, los esfuerzos se dirigen a la búsqueda y aplicación de diferentes alternativas que permitan mantener altos rendimientos en la producción agrícola (Martín y Rivera, 2004) sustituyendo, el cultivo tradicional en suelo por el cultivo hidropónico y el uso de fracciones orgánicas como sustrato. Al cultivar en sustrato las características físicas resultan decisivas en el correcto crecimiento de la planta. Por ejemplo, la temperatura controlada y los niveles de nutrimentos en el sustrato producen una mayor absorción de agua y transpiración por parte de la planta, debido a que el tiempo de apertura de estomas es superior (Abad, 1993).

Stamatakis *et al.*, (2001) indican que el uso de minerales del tipo aluminosilicatos hidratados (zeolitas, andesitas, etc.) como sustrato en hidroponía ha sido desarrollado a poca escala, esto se debe probablemente a que su uso principal ha sido en distintas actividades industriales (Bosch y

Schifter, 1998). En México se ha dado poca importancia a este recurso, mientras que en otros países se puede conseguir con cierta facilidad para su uso como sustrato en cultivos hidropónicos (Rivero y Rodríguez, 1988; Steinberg *et al.*, 2000; Stamatakis *et al.*, 2001 y Ostroumov *et al.*, 2005). Ante esto, se requiere ampliar el conocimiento sobre su manejo y posibilidades de uso, considerando que tales minerales tienen alta capacidad de intercambio catiónico, ventaja que podría ser aprovechada en la combinación con sustrato para cultivos hidropónicos.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

- I. Cuantificar la mineralización en sustratos a partir del flujo de CO₂ por la incorporación de composta, minerales y fertilización nitrogenada.

Objetivos particulares

- I. Evaluar el flujo de CO₂ en sustratos con distintos contenidos de nitrógeno, humedad, zeolita y dolomita.
- II. Analizar la dinámica de la liberación de CO₂ en sustratos con la adición de distintas dosis de composta.
- III. Identificar la acción de la adición de zeolita y dolomita sobre la liberación de CO₂ como indicador de la mineralización de la materia orgánica de los sustratos.

Hipótesis

- I. Contenidos elevados de nitrógeno en el sustrato aceleran la mineralización de la fracción orgánica.
- II. El incremento en el contenido de humedad gravimétrica acelera la mineralización de la fracción orgánica de los sustratos.
- III. La adición de minerales contribuye a reducir la mineralización de la fracción orgánica de los sustratos.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

La materia orgánica y el carbono orgánico del sustrato

El contenido de materia orgánica se ha asociado comúnmente con la productividad (Bauer y Black, 1994; Guo y Gofford, 2002; Tiessen *et al.*, 1994; Wilhelm *et al.*, 2004). Esto se debe a su efecto positivo sobre algunas propiedades físicas y fisicoquímicas como la densidad aparente, la capacidad de almacenamiento de agua y la capacidad de intercambio catiónico (Bell, 1993) y sobre propiedades químicas como la cantidad de nitrógeno total y mineralizable para los cultivos (Körschens *et al.*, 1998).

Al valora la calidad del sustrato, el contenido de materia orgánica y carbono orgánico son algunos de los parámetros químicos utilizados. En cuanto a la calidad de los sustratos asociada a la materia orgánica, varios autores argumentan que en condiciones de temperatura elevada se limita su acumulación (Khalil *et al.*, 2005; Bonde y Rosswall, 1987; Hadas *et al.*, 1983) pudiendo existir una intensa oxidación y, por ende, una alta pérdida de carbono en sustratos bajo contenedor.

El carbono en los sustratos

El carbono juega un papel crítico en las interacciones agrícolas porque se encuentra estrechamente ligado a los ciclos bioquímicos (Paredes, 2016). La mineralización de la fracción orgánica forma parte de los principales componentes de la respiración del mismo (Lou y Zhoy, 2006) y tiene relevancia en el sistema agrícola ya que la mayor parte de la materia orgánica puede reciclarse con el material vegetal y someterse a procesos de compostaje para su reutilización.

Resulta de interés definir un valor máximo de carbono orgánico, con base en su contenido, y fracciones (lábil, o resistente) para mantener la calidad del sustrato. Sierra *et al.*, (2015) mencionan que en climas áridos o semiáridos este parámetro suele tener tiempos de respuesta a largo plazo, siendo necesario establecer indicadores estado bioquímico del sustrato.

El nitrógeno en los sustratos

En el caso del nitrógeno, este pasa de N orgánico a N mineral, fundamentalmente en forma de nitratos (Rivera *et al.*, 1999). Los factores que determinan las tasas de mineralización del

nitrógeno de los residuos orgánicos son la temperatura, relación C/N, pH, mineralogía de las arcillas, humedad, biota y manejo del material orgánico (Argenta, 2001).

Otro aspecto a tener en cuenta y que influye sobre la mineralización del nitrógeno es que aumenta por la adición de fertilizantes de origen mineral y orgánico (George, 2000). Este comportamiento se debe a que inicialmente se estimula la actividad de los microorganismos, los que fijan el N incorporado con las distintas fuentes, debido a la necesidad de nutrientes demandada por su metabolismo (Dwyer y Gregorich, 1999).

Humedad del sustrato como control de la liberación de CO₂

La relación entre el incremento de la humedad del sustrato y flujo de CO₂ establece que este último es bajo en condiciones secas, sin embargo, alcanza su máxima tasa en niveles intermedios de humedad y decrece en contenidos altos de humedad (Shi *et al.*, 2011). El contenido de agua óptimo se encuentra a capacidad de contenedor, en donde los macroporos se encuentran llenos de aire y los microporos llenos de agua facilitando la difusión de oxígeno, agua y nutrientes (Lou y Zhoy, 2006).

La mineralización en alternancia de periodos secos y húmedos es el doble de la obtenida en condiciones de humedad constante. La mayoría de los sistemas agrícolas tropicales pasan por estos períodos, lo que probablemente favorece su actividad microbiana, o tal vez, una mayor accesibilidad del humus a los microorganismos por la contracción o hinchamiento de los minerales arcillosos (Coutinho, 2001).

Descomposición de la fracción orgánica

La descomposición provoca una disminución de la fracción orgánica ya que es transformada en nutrientes inorgánicos y CO₂ (Chapin *et al.*, 2011), la descomposición resulta de la diferencia entre la masa inicial y la final después de un periodo de incubación. El proceso de descomposición involucra tres etapas: lixiviación, fragmentación y la alteración química, la cual produce CO₂, nutrientes minerales que son incorporados a la materia orgánica viva y residuos de complejos orgánicos (Chapin *et al.*, 2011).

La descomposición es el resultado de la acción de la biota sobre los componentes del sustrato, de tal forma que la calidad varía de acuerdo a las condiciones climáticas, las propiedades del sustrato. Coleman y Crossley (2004) hacen mención a que los carbohidratos (C lábil) son

compuestos de fácil digestión por parte de los microorganismos y fauna presentes en el medio, sin embargo, los compuestos como taninos y ligninas ricos en polifenoles (C recalcitrante) resultan de lenta descomposición.

Impacto de los minerales en la mineralización

Una de las contribuciones más importante de la materia orgánica es su capacidad de suplir nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, y aumentar la capacidad de retención de humedad y porosidad de los sustratos. El uso de minerales puede afectar de manera positiva o negativa la degradación de la materia orgánica del sustrato dependiendo de la mineralogía y actividad química del mejorador (Gilloway *et al.*, 2003). Cuando se utilizan minerales con altos contenidos de nitrógeno y/o fósforo, la actividad microbiana del sustrato aumenta actuando como sumidero y fuente de nutrimentos (Milosevic *et al.*, 2013), lo que contribuye significativamente a la CIC y la mineralización ocurre más rápidamente (Febles *et al.*, 2014).

Minerales con contenido dominante de Ca y Mg, como la dolomita, influyen determinando las cargas positivas de la materia orgánica y la fijación de Ca y Mg durante un periodo prolongado de tiempo (Corpoica, 2005) cuando su tamaño de partícula es ≤ 0.210 mm y el pH se mantiene en valores ligeramente ácidos para facilitar la disolución del mineral. En la presencia de materiales con alta capacidad de fijación y absorción de los nutrientes como la zeolita, el proceso de mineralización es lento por la competencia entre los microorganismos y el mineral poroso teniendo una sincronía entre el nutrimento absorbido por la planta y el suministrado, lo que conlleva a un menor porcentaje de mineralización de los materiales orgánicos.

El uso de minerales con tamaño de partícula menores a 1 mm provoca aumentos en la porosidad de aireación y la disminución de la porosidad de retención de humedad en los sustratos (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2011). La porosidad de retención de humedad es muy importante al momento de realizar la calendarización de los riegos pues de ella depende la cantidad de agua a aplicar para evitar enfermedades y lixiviación de nutrientes.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este ensayo se utilizaron dos mezclas de sustratos: 1) tezontle y aserrín (1:2) y 2) tezontle, aserrín y composta (1:2:2), ambos con distintos contenidos de mezcla mineral de zeolita y dolomita (0, 40 y 80 cm³ L⁻¹). Se manejaron dos concentraciones de nitrógeno (50 y 100%) teniendo como referencia la Solución Universal de Steiner suministrada al sustrato en dos niveles de humedad (15 y 30%). Las muestras fueron humedecidas en base a su peso cada 7 días hasta la finalización del ensayo. La descripción de los tratamientos se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Descripción de los tratamientos para la evaluación de la liberación de CO₂ en sustratos bajo fertilización nitrogenada.

Tratamiento	Sustrato		Factores		
	T:A	C (v:v)	SN (N%)	MM (cm ³ L ⁻¹)	%hg
1	1:2	0	100	0.0	$\frac{15}{30}$
2	1:2	0	100	40.0	$\frac{15}{30}$
3	1:2	0	100	80.0	$\frac{15}{30}$
4	1:2	0	50	0.0	$\frac{15}{30}$
5	1:2	0	50	40.0	$\frac{15}{30}$
6	1:2	0	50	80.0	$\frac{15}{30}$
7	1:2	2	100	0.0	$\frac{15}{30}$
8	1:2	2	100	40.0	$\frac{15}{30}$
9	1:2	2	100	80.0	$\frac{15}{30}$
10	1:2	2	50	0.0	$\frac{15}{30}$
11	1:2	2	50	40.0	$\frac{15}{30}$
12	1:2	2	50	80.0	$\frac{15}{30}$

Dónde: T.- Tezontle, A.- Aserrín, SN.- Solución nutritiva, C.- Composta, MM.- Mezcla mineral y %hg.- Proporción de humedad gravimétrica.

pH y Conductividad eléctrica (CE)

La medición del pH fue realizada por la metodología de Ansorena (1994) mediante extracto acuoso relación 1:2. La CE se determinó mediante extracto en relación 1:5 mediante conductímetro propuesto por Ansorena en 1994.

Materia orgánica y carbono orgánico

El contenido de materia orgánica del sustrato se calculó por el método de ignición y el carbono orgánico con base en los resultados de la materia orgánica mediante el factor 0.5 (Douglas, 2010).

Nitrógeno total

Se realizó con el método micro Kjeldahl (modificado por Bremner en 1965, citado por Fernández, 2006), que consiste en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico, en el cual se produce amonio que es cuantificado por destilación y posterior titulación.

Relación Carbono/Nitrógeno

Es un valor numérico que determina la proporción de C/N y es calculada con base al análisis del carbono y nitrógeno total.

Emisión, flujo, acumulación y tasas de mineralización de CO₂

Se determinó mediante la respiración potencial del sustrato por medio de un analizador de gases IRGA, cámara estática (PP Systems). Para comparar los valores de CO₂, fueron estandarizados en función de la cantidad de carbono orgánico y del porcentaje de humedad de cada mezcla de sustrato.

La liberación diaria de CO₂ se midió durante un periodo de incubación de 86 días. La acumulación de CO₂ se obtuvo de la suma de las partes por millón (ppm de CO₂) que se determinaban en cada lectura con las ppm de CO₂ de los días anteriores. La tasa relativa de mineralización se obtuvo del promedio de las ppm de las dos humedades dividido entre 1,000 para obtener los g de CO₂, después se dividieron los g de CO₂ entre el peso de la muestra de sustratos para tener los g de CO₂/g de sustrato. Posteriormente se sumaron los g de CO₂/g de sustrato de cada día para obtener el valor acumulado al final del ensayo. La tasa absoluta de mineralización se calculó mediante la transformación de las ppm de CO₂ a g de CO₂ m⁻³, lo que se obtuvo

multiplicando las ppm de CO₂ por el coeficiente 1.9379 (Ecuación 1 y 2) para después dividirlo entre 1,000 y obtener los g de CO₂, posteriormente se dividió entre el peso de la muestra de sustrato para obtener los g de CO₂/g de sustrato.

Dónde:

Peso molecular del CO₂= 44 g mol⁻¹

Constante de los gases ideales a 1 bar de presión y 0° C= 22.71108 L mol⁻¹

1 m³= 1,000 L

$$\text{Ecuación 1} \quad 1 \text{ ppm CO}_2 = \frac{\left(\frac{22.71108 \frac{\text{L}}{\text{mol}}}{\text{m}^3} \right)}{\left(\frac{44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{\text{m}^3} \right)} = 0.516 \text{ ppm}$$

$$\text{Ecuación 2} \quad \frac{\frac{1 \text{ ppm CO}_2}{\text{m}^3}}{\frac{0.516 \text{ ppm CO}_2}{\text{m}^3}} = 1.9379$$

Teniendo en cuenta el resultado de la ecuación 1, cuando se agrega 1 ppm de CO₂ en 1 m³ se tienen realmente 0.516 ppm de CO₂ debido a la dinámica de las partículas y la desprotonación del CO₂. Siguiendo la razón de tener una concentración de 1 ppm de CO₂ en 1 m³, se realiza la ecuación 2 donde se obtiene el coeficiente de corrección de 1.9379 que nos dice la cantidad de CO₂ a agregar en 1 m³ para tener 1 ppm de CO₂ m⁻³. El factor se multiplica por las ppm de CO₂ y se tiene la concentración real de mg de CO₂ m⁻³.

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó a través del programa estadístico SAS versión 9.3, en el que se ejecutó un análisis de varianza mediante el procedimiento proc GLM para un diseño completamente al azar, posteriormente se realizaron comparaciones de medias con la prueba de Tukey (p<0.05).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emisión de CO₂ con el 15 y 30% de humedad

Durante los primeros 7 días de incubación y 15% de humedad gravimétrica (hg) (Figura 16), el CO₂ desprendido presentó variaciones principalmente en los tratamientos que no contenían composta ya que la presencia de material orgánico era prácticamente nula en comparación con los tratamientos que contenían composta, los cuales presentaron mayor variación a partir de día 25 siendo producto de la presencia de material orgánico lábil (Durán y Henríquez, 2007) y rico en sustancias fácilmente degradables (Lerch *et al.*, 1992). Los valores máximos de CO₂ se presentaron de los días 33 al 36, obteniendo la mayor emisión el T8 y T12 con 6,125.33 y 4,030.67 mg m⁻³/día de CO₂, ambos tratamientos contenían composta la cual fue la causante de los altos valores emitidos. El porcentaje de CO₂ emitido por el tratamiento 8 es 89% mayor que el emitido por el T6, tratamiento con ausencia de composta y mayor contenido de mezcla mineral, cuyo valor fue de 681 mg m⁻³/día de CO₂ en el punto máximo de emisión; lo cual concuerda con Velasco y De Mingo (1981) que mencionan que la mineralización del carbono es aproximadamente 80% mayor en medios que contienen materia orgánica de fácil degradación. Esto representa un aumento de la liberación de CO₂ en la mezcla de sustratos de tezontle, aserrín y composta con el 15% de hg favorecida, además, por la ausencia de la mezcla mineral.

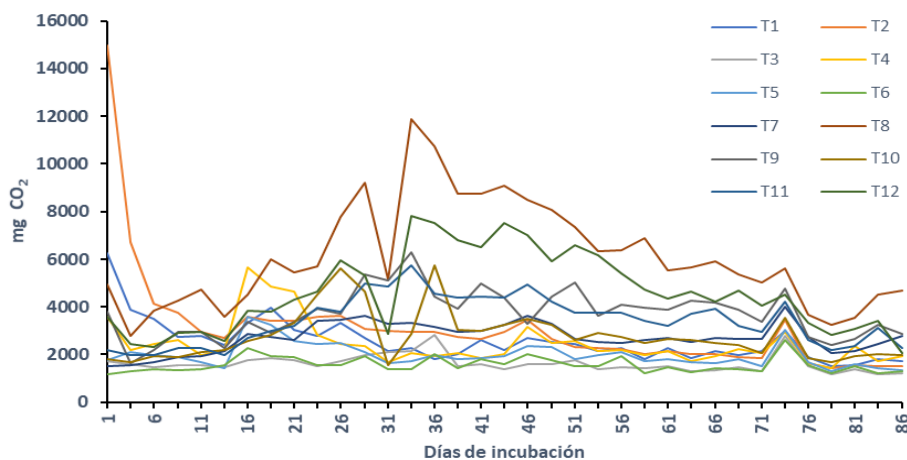


Figura 16. Evolución del CO₂ en sustratos con 15% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.

Después de los 14 días de incubación, cuando el sustrato contenía 30% de hg (Figura 17), el CO₂ desprendido fue mayor en los tratamientos que contenían composta. Los valores máximos de CO₂ se presentaron entre los días 26 al 38, obteniendo la mayor emisión los T8 y T9 con 4,975.33 y 3,320.33 mg m⁻³/día de CO₂, ambos tratamientos contenían composta y fertilización nitrogenada al 100% lo que favoreció la mineralización del sustrato, la diferencia de emisiones entre los dos tratamientos se debe a la presencia de dolomita de la mezcla mineral en el T9, al ser un material no soluble en pH alcalino. La menor emisión de CO₂ emitido lo obtuvo el T6 cuyo valor fue de 681 mg m⁻³/día de CO₂ en el punto máximo de emisión e influenciado por la presencia de materia orgánica recalcitrante (aserrín), siendo el T8 89% mayor que el emitido por el T6 que concuerda con Velasco y De Mingo (1981) que mencionan que la mineralización del carbono es aproximadamente 80% mayor en medios que contienen materia orgánica de fácil degradación.

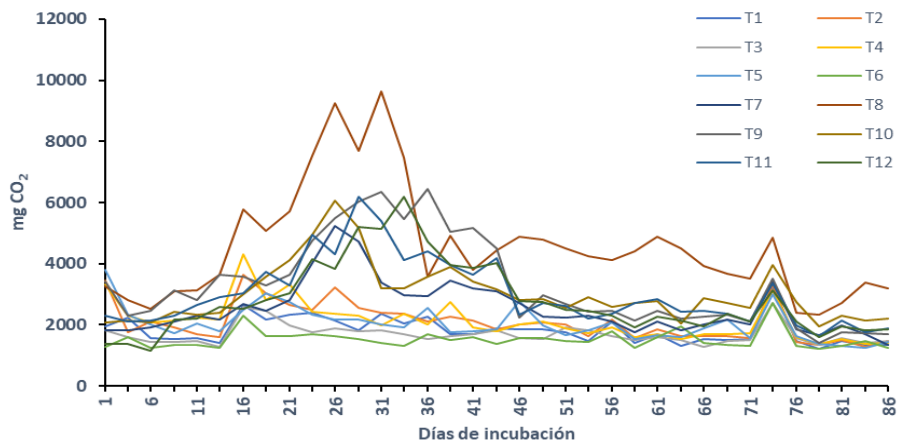


Figura 17. Evolución del CO₂ en sustratos con 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.

Bajo el contenido de 15 y 30% de hg en ambas mezclas de sustrato causó el desprendimiento de concentraciones mayores a 2,000 ppm de CO₂/día. Lorenzo (2012) menciona que para lograr la mayor tasa fotosintética en el cultivo de pimiento se debe tener una concentración de 1,000 ppm, lo que comúnmente se aplica mediante inyectores de CO₂ siendo éste un método costoso (Antón *et al.*, 2011). El uso de las mezclas de sustratos de tezontle, aserrín, composta y 40 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral son los más recomendados para suplir la inyección de CO₂ ya que, debido a su alta liberación de CO₂/día, supera las necesidades de concentración de CO₂ en el ambiente lo que provoca aumentos en la tasa fotosintética del cultivo de chile manzano durante todo el ciclo de

cultivo y un aumento en los ingresos ya que cuando se suple la demanda de CO₂ por la planta se incrementa la producción entre un 20 a 24% (Blom *et al.*, 2002).

Acumulación de CO₂ en 15 y 30% de humedad

Los T8 y T12 con el 15% de humedad (Figura 18) acumularon un desprendimiento mayor CO₂ a los 86 días de incubación (110,103.67 y 82,933.00 mg CO₂/g de sustrato, respectivamente) por la actividad biológica del material orgánico lábil presente que propicia un incremento en la respiración (Santibáñez *et al.*, 2006) en comparación con el T3 cuya acumulación emitida fue de 29,500.33 mg CO₂/g de sustrato y el T6 con 28,427.33 mg CO₂/g de sustrato; los cuales, al contener aserrín, indican que la materia orgánica se encuentra más estable y la emisión de CO₂ y la actividad microbiana fue menor (Acosta *et al.*, 2006) ya que existe menos material de fácil descomposición lo que impide la degradación por parte de los microorganismos (Guerrero-Ortiz *et al.*, 2012).

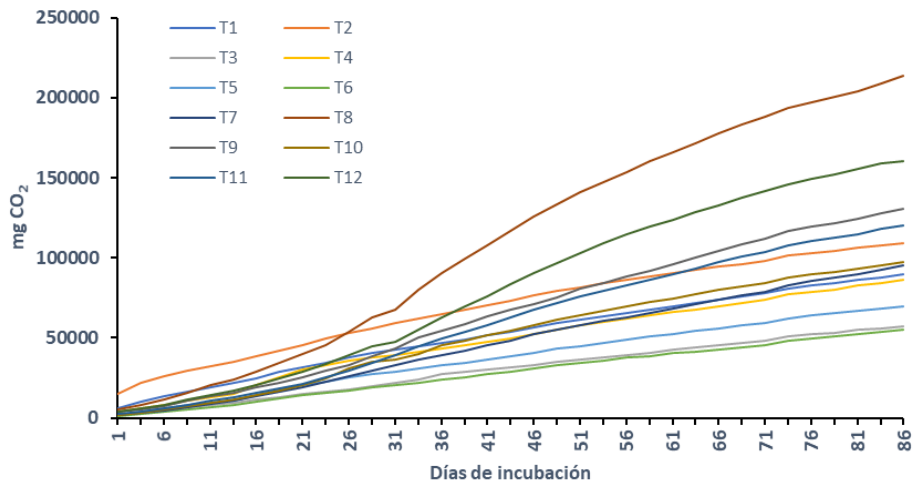


Figura 18. Acumulado del CO₂ en sustratos con 15% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.

Bajo el contenido de 30% de humedad (Figura 19), los tratamientos que obtuvieron una mayor acumulación de CO₂ al término del experimento fueron el T8 con 82,372.67 mg CO₂/g de sustrato y el T9 con 59,773.00 mg CO₂/g de sustrato, Six y Jastrow (2002) lo atribuyen a la mayor presencia de humedad que tiene efectos directos sobre la mineralización de la materia orgánica; en comparación con el T6 cuya emisión fue de 27,478.33 mg CO₂/g de sustrato y el T3 con 30,457.00 mg CO₂/g de sustrato; los cuales, al contener mayor contenido de componentes

recalcitrantes como lignina y taninos, inhiben la actividad de los microorganismos, retardando las tasas de descomposición y mineralización de la materia orgánica (Satti *et al.*, 2003).

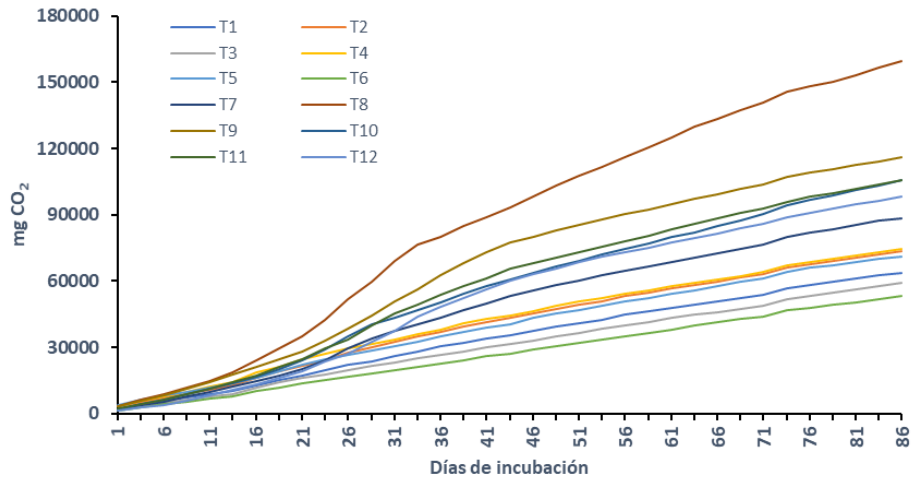


Figura 19. Acumulado del CO₂ en sustratos con 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición en 86 días de incubación.

Tasa de mineralización absoluta en 15 y 30% de humedad

A partir de la tasa de liberación del CO₂ se puede determinar la mineralización (Guerrero-Ortiz *et al.*, 2012). Las tasas de liberación de CO₂ del sustrato con 15% de humedad fluctuaron entre 0.63 y 2.24 g CO₂/g de sustrato. En lo que respecta al sustrato con 30% de humedad, las tasas de liberación fluctuaron entre 0.61 y 1.68 g CO₂/g de sustrato (Figura 20). Considerando el periodo de la incubación, el T8 expuso la tasa absoluta de mineralización mayor para las humedades de 15% y 30% con 2.24 y 1.68 g CO₂/g de sustrato, respectivamente; seguido por el T12 con una liberación de 1.69 g CO₂/g de sustrato y el T2 con 1.25 g CO₂/g de sustrato, ambos con el 15% de humedad. La transformación de los residuos orgánicos ocurre por acción directa de la humedad y las reacciones ácidas o básicas del suelo (Carmona *et al.*, 2006). Los resultados muestran la tendencia a liberar mayores contenidos de CO₂ cuando la humedad presente es menor debido a que el espacio ocupado por agua es menor en relación con el espacio poroso total, Or y Weaigh (2000) menciona que los sustratos elevan su capacidad de retención de humedad gravimétrica al aumentar el porcentaje de porosidad total, espacio que es ocupado por los gases presentes en la atmósfera, pero liberan fácilmente la humedad por la presencia de macroporos atribuido a la

presencia de poros de empaquetamiento compuestos (Hillel, 1998), en los tratamientos con mayor contenido de humedad el espacio poroso es menor y por ende la cantidad de gases es menor.

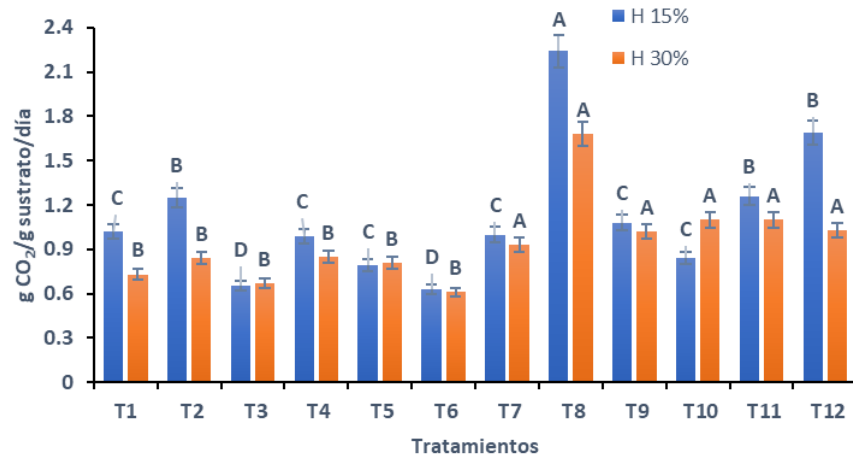


Figura 20. Tasa absoluta de mineralización de los sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Tasa de mineralización absoluta en 50 y 100% de fertilización nitrogenada

La tasa de mineralización de los tratamientos que contenían material orgánico lábil (7-12) muestran las mayores emisiones de CO₂ para ambos niveles de nitrógeno con fluctuaciones de 0.96 a 1.96 g CO₂/g de sustrato. En los tratamientos con el 50% de nitrógeno (Figura 21) se presentan los mayores valores debido a que el nitrógeno está potencialmente disponible para el aprovechamiento de los microorganismos, caso contrario para los tratamientos con el 100% de nitrógeno (Figura 21) donde nitrógeno presenta inmovilización biótica para consumo por parte de los microorganismos (Ritter *et al.*, 2005), y está relacionado con el contenido de materia orgánica lo que influye en una mayor tasa de inmovilización (Pérez *et al.*, 1998). La inmovilización abiótica del N se relaciona con la retención del N-NH₄⁺ por las arcillas y la reacción química de N-NH₄⁺ con la materia orgánica, dependiente del pH (Rivas *et al.*, 2009).

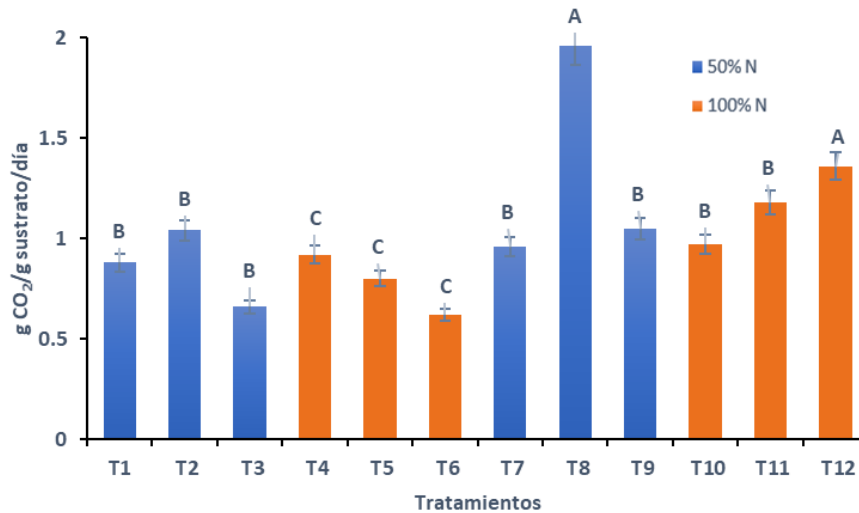


Figura 21. Tasa absoluta de mineralización de los sustratos con 50 y 100% de nitrógeno y diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Tasa de mineralización absoluta en sustratos con incorporación de 0, 40 y 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral de zeolita y dolomita

La tasa de mineralización de los tratamientos que contenían 6.5 ml de la mezcla mineral (T2, T5, T8 y T11) muestran las mayores emisiones de CO₂ con valores que van desde 0.80 a 1.96 g CO₂/g de sustrato (Figura 22). En los tratamientos con 40 cm³ L⁻¹ de la mezcla mineral presentan los mayores valores cuando había composta debido a que el carbono de la materia orgánica tuvo un efecto de dilución sobre la fracción arcillosa, este efecto supone que el aporte de materia orgánica se distribuye homogéneamente en la matriz mineral (Matus *et al.*, 1998). Para los tratamientos que no contenían mezcla mineral la tasa de mineralización no presentó diferencias estadísticamente significativas aun con la adición de composta, Hassink y Whitmore (1997) apoya la idea de que la mineralización depende del grado de saturación de carbono lábil y del contenido de arcillas lo que refuerza lo mencionado por Scott *et al.*, (1996) quienes establecen que para que la mineralización ocurra de manera estable primero deben ser metabolizados los residuos por la acción microbiana y luego estabilizados por los coloides minerales.

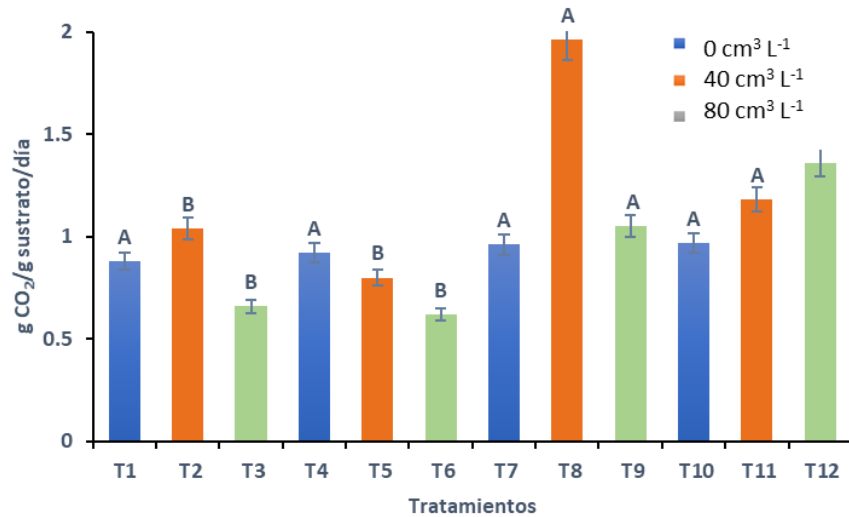


Figura 22. Tasa absoluta de mineralización de los sustratos con 0, 40 y 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral y diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Tasa relativa de mineralización total de los sustratos

La tasa de mineralización relativa depende de la acumulación de carbono y se expresa con el porcentaje de carbono inicial que se mineraliza en un periodo de tiempo determinado (Guerrero-Ortiz *et al.*, 2012). En la Figura 23 se observa que el T8 presentó la tasa de mineralización relativa más elevada con 1.96 g CO₂/g de sustrato debido al contenido de materia orgánica lábil donde, de acuerdo con Acosta *et al.*, (2006), la actividad biológica resulta muy activa por la presencia de materiales orgánicos lábiles. El mayor contenido de materiales con alta relación C/N en los T1, T3, T4, T5 y T6 se reflejó en menores tasas de mineralización relativa con variaciones de 0.62 a 0.92 g CO₂/g de sustrato.

En relación al periodo de incubación, el T8 (tezontle, aserrín, composta y 40 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral) fue el que tuvo mayor liberación de C con 0.53 g de C/g de sustrato/día, seguido por el T12 (tezontle aserrín, composta y 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral) con 0.37 g de C/g de sustrato/día. Lo anterior resalta que cuando se incrementa la emisión de CO₂ por el uso de composta se libera más C al ambiente y se reduce en función de la cantidad de minerales suministrado. En aquellos tratamientos que contenían tezontle, aserrín y 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral (T3 y T6) la fertilización nitrogenada no influyó en incrementar el desprendimiento de CO₂, y, por consiguiente, de C al ambiente ya que los valores fueron mucho menores (<0.20 g C/g de sustrato/día).

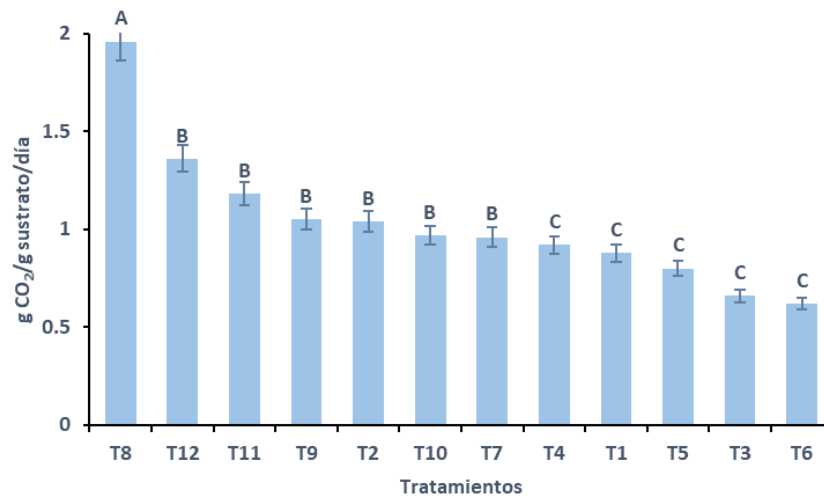


Figura 23. Tasa relativa de mineralización de sustratos con diferentes fuentes de nutrición a los 86 días de incubación. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

pH y Conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1})

Para los dos niveles de humedad, el valor más alcalino de pH (Figura 24 y 25) los obtuvo el T9 (7.74 y 7.89) (Cuadro A15) debido a que los materiales orgánicos presentes sufrieron un proceso de degradación donde el pH se eleva por acción del desprendimiento de amoníaco (Soliba, 1998) y por la liberación del carbonato de calcio intemperizado de la dolomita; mientras que los más ácidos los presentaron los T1 y T5 con 6.04 y 6.21, respectivamente.

El nivel óptimo para el desarrollo y crecimiento de plantas en sustratos orgánicos es de 5.0 a 5.5, pero no se excluye que algunas especies puedan desarrollarse fuera del rango propuesto por Bunt (1988). Se observaron cambios de 0.15 a 0.8 unidades de pH entre niveles de humedad y contenido de dolomita, Cepeda (1991) menciona que ocurre debido a que el calcio reemplaza dos iones de H^+ en el complejo de intercambio catiónico lo que provoca que los iones H^+ se combinen con los iones hidroxilos para formar agua; en esta forma el pH aumenta debido a que la concentración de los iones H^+ disminuye. Por ello Alvarado y Fallas (2004) mencionan que la dolomita es una alternativa para reducir la acidez. El pH se relaciona con el contenido de materia orgánica ya que al ser suministrada el pH se mantiene en valores ligeramente neutro y alcalinos (Bohn y Neal, 1993).

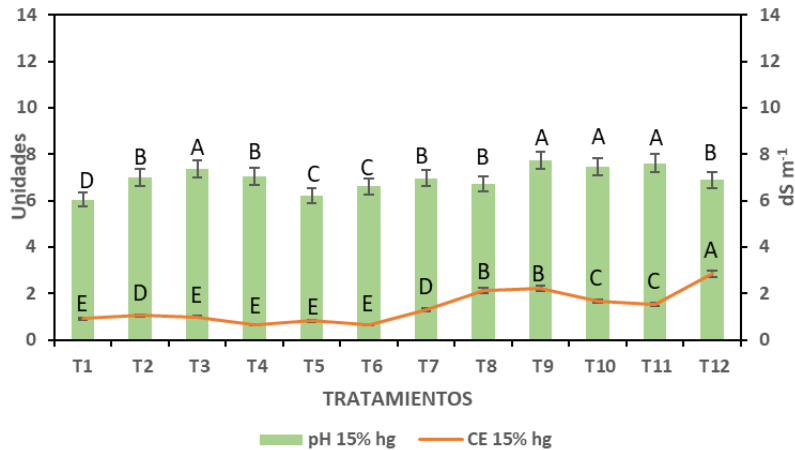


Figura 24. pH y conductividad eléctrica de sustratos bajo 15% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Los tratamientos que contenían composta presentaron la CE más alta (Figura 24 y 25) en comparación con los tratamientos que no contenían composta, atribuible a que el contenido de sales incrementa a medida que avanza la descomposición de los materiales orgánicos, presentándose una mayor concentración por la pérdida de masa (Rodríguez *et al.*, 2010).

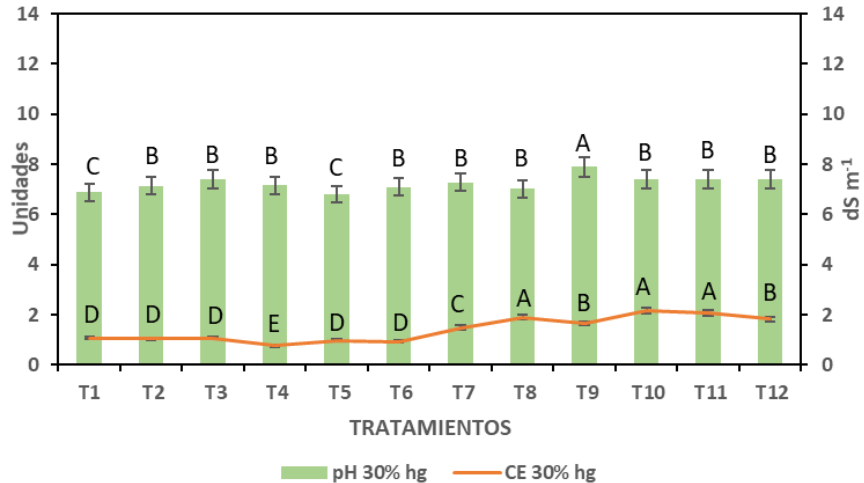


Figura 25. pH y conductividad eléctrica de sustratos bajo 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

La respuesta de la CE en los sustratos depende de las condiciones ambientales, manejo nutricional del sustrato y características de la materia orgánica. De acuerdo con Quesada y Marín (2014), contenidos elevados de humedad, en conjunto con la cantidad de fertilizantes aplicados,

provoca que la CE se incremente por una mayor concentración de sales disueltas en la solución del sustrato, lo que podría traer problemas de salinidad y su repercusión en el rendimiento si se establecen cultivos sensibles a la presencia de sales.

La mayoría de los tratamientos con los dos niveles de humedad se encontraron dentro de los intervalos que propone Bunt (1988) para el adecuado desarrollo de plantas en sustratos, el cual es de 0 a 1.15 dS m⁻¹.

Materia orgánica (%MO)

En general, los tratamientos que contenían composta presentaron el menor contenido de MO al manejarse con 15% de humedad (Figura 26, Cuadro A15) presentando diferencias estadísticamente significativas. (Rodríguez *et al.*, 2010), a la adición y/o presencia de materiales no combustibles en la incineración. Los tratamientos que no contenían de composta obtuvieron valores entre 22.23 y 37%.

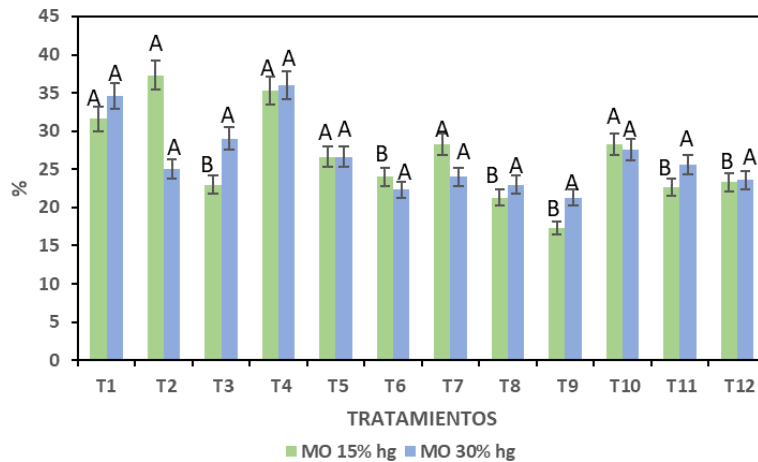


Figura 26. Contenido de materia orgánica de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Cuando el contenido de humedad fue de 30% (Figura 26, Cuadro A15) el contenido de MO fue estadísticamente igual para todos los tratamientos con valores que fluctuaron entre 21.33 y 36.0%. De acuerdo con Gomero (1999), la incorporación de mayor humedad aumenta la mineralización lo que se refleja en contenidos de MO más estables. Mayor presencia de MO en los sustratos permite considerarlos como materiales bioestables (Durán y Henríquez, 2007).

Carbono orgánico (%CO)

Los tratamientos con el 15% de humedad (Figura 27, Cuadro A15) reflejaron diferencias estadísticas significativas en el contenido de CO siendo el T9 el menor con 8.66%, el T2 fue el que mayor contenido de carbono presentó con 37.33%.

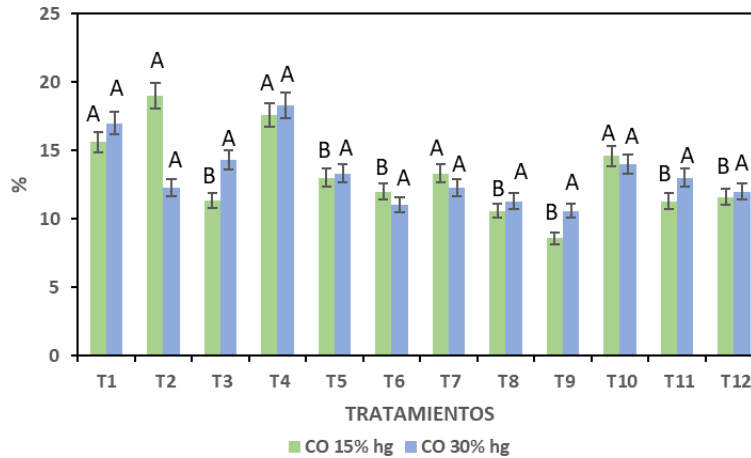


Figura 27. Contenido de carbono orgánico de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Valores menores en el contenido de CO se asocian a una mayor mineralización debido a una mayor disponibilidad de oxígeno en el medio (Tiquia *et al.*, 2002). Cuando el contenido de humedad fue de 30% no se presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos, fluctuando los valores entre 10.66 y 18.33% (Cuadro A15).

Nitrógeno total (%NT)

El mayor contenido de NT, para los dos niveles de humedad, lo presentó el T7 (Figura 28) siendo estadísticamente diferente a los demás tratamientos. Los valores bajos de NT de los tratamientos que no contenían composta se relacionan con una alta relación C/N (Rodríguez *et al.*, 2010), por consiguiente, los sustratos de esos tratamientos presentan una estabilidad mayor y un proceso de mineralización más lento.

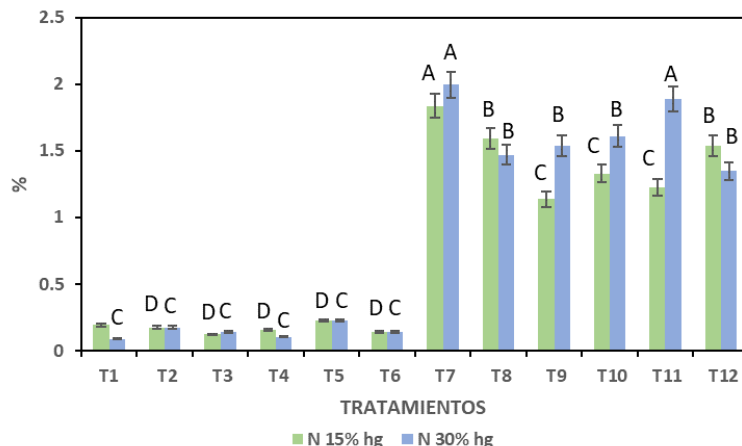


Figura 28. Nitrógeno total de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

Relación Carbono/Nitrógeno

Para ambos niveles de humedad (Figura 29), los tratamientos que no contenían composta presentaron los mayores valores de relación C/N debido al gran contenido de material fibroso que no sufrió degradación (Lemaire, 1997). Mientras que los tratamientos que si contenían composta presentaron valores que fluctuaron entre 6.50 y 10.50 (Cuadro A15).

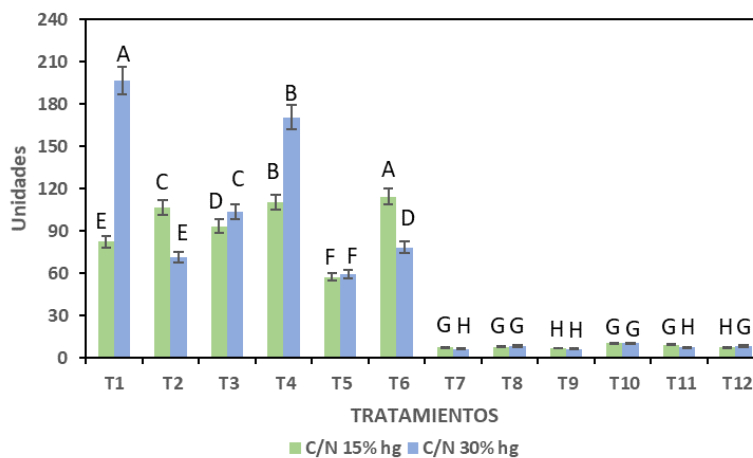


Figura 29. Relación carbono/nitrógeno de sustratos con 15 y 30% de humedad y diferentes fuentes de nutrición. Columnas con letras distintas presentan significancia estadística diferente ($p \leq 0.05$).

En general, se considera una relación C/N de 5 a 20 como indicador de madurez y estabilidad (Terés, 2001) lo que concuerda con Abad y Noguera (1998) quienes mencionan que una relación

C/N óptima para la producción de cultivos en sustratos es >30 , siendo los sustratos de los tratamientos que contenían composta los más apropiados para la producción de cultivos.

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- I. El uso de composta, minerales y fertilización nitrogenada favoreció la mineralización de la fracción orgánica reflejado en el incremento en las ppm de CO₂ y su correspondiente transformación a mg de CO₂ m⁻³.
- II. Para ambos contenidos de humedad, el pH de los sustratos no tuvo efectos numéricos significativos por la presencia de dolomita, manteniéndose dentro del rango apropiado para la producción en sustratos y; la CE fue menor en los tratamientos que no contenían composta ni fertilización nitrogenada por la poca presencia de sales suministradas.
- III. Cuando se agregó un 30% de humedad se incrementó el contenido de nitrógeno total en el sustrato lo que se refleja en una mayor mineralización disminuyendo el contenido de materia orgánica.
- IV. En los tratamientos sin composta el contenido de nitrógeno total fue bajo y su relación C/N fue elevada reduciendo la mineralización y limitando el flujo de CO₂.
- V. El contenido de humedad de 15% causó un retraso en el comienzo del desprendimiento del CO₂, aunque también fue apropiado para la mayor liberación de CO₂ en los tratamientos con composta.
- VI. El tratamiento 8 presentó la mayor acumulación de CO₂ liberado por su rápida mineralización por lo cual su sustitución sería con mayor frecuencia en la producción agrícola.
- VII. El uso de 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral retrasa la mineralización de la materia orgánica y el flujo de CO₂ por la reducción de carbono orgánico del sustrato.
- VIII. Se determinó el coeficiente de corrección para calcular la concentración de las ppm del CO₂ en relación a un volumen de 1 m³, que permite la transformación de ppm de CO₂ a mg de CO₂ m⁻³.
- IX. La magnitud de la liberación de CO₂ determinada en los sustratos evaluados-cuestiona la importancia del aporte de este gas en la producción bajo sistema intensivo como alternativa al suministro vía comercial.

VII. LITERATURA CITADA

- Abad, M. 1993.** Sustratos. Características y propiedades. pp. 47-62. In: Cultivos sin suelo. F. Cánovas y J.R. Díaz. (ed.). Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA.
- Abad B. M. y Noguera P. 1998.** Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En Cadahia C (Ed.) Fertirrigación de Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 282-342.
- Acosta, Y., J. Cayama, E. Gómez, N. Reyes, D. Rojas y H. García. 2006.** Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. Multiciencias 6: 220-227.
- Aguilera, S.M., Borie, G., Peirano, P. 1999.** Dinámica del carbono en suelos con distintos sistemas de labranza. Frontera Agrícola Vol. 5 N° 1-2: p 33-38.
- Ajwa, H.A., C.J. Dell and C.W. Rice. 1999.** Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization. Soil Biol. Biochem. 31: 769-777.
- Alvarado, A. y Fallas, J. 2004.** La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona Grandis* L.F.) en suelos ácidos de Costa Rica.
- Ansorena, M., 1994.** Sustratos propiedades y caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Argenta, G. 2001.** Maize nitrogen fertilization in no-tillage system following black oat. Resinsumos. (2): 295-303.
- Bauer A. and Black A. L. 1994.** Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 185-193.
- Bell, M.A. 1993.** Organic matter, soil properties, and wheat production in the high valley of Mexico. Soil Sci. 156:86-93.
- Bohn, B. y Neal, A. 1993.** Química del suelo. 1era edición, impreso en México 371 p.

- Bonde T. A. and Rosswall T. 1987.** Seasonal variation of potentially mineralizable nitrogen in four cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* 51 (6), 1508-1514.
- Bosch, P. e I. Schiffter. 1998.** La zeolita una piedra que hierve. La ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.
- Bremner, J.M. 1965.** Inorganic forms of nitrogen. pp. 1179-1232 In: C.A. Black et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr.9.ASA, Madison, WI.*
- Bunt A. C. 1988.** Media and Mixes for Container-Grow Plants. Unwin Hyman. Londres, RU. 77 pp.
- Carmona, M., M. Aguilera, C. Pérez e I. Serey. 2006.** Actividad Respiratoria en el horizonte orgánico de suelos de ecosistemas forestales del centro y sur de Chile. *Gayana Bot.* 63: 1-12.
- Cepeda D. J. M. 1991.** Química de suelos. Segunda Edición. Editorial Trillas S.A. de C.V. México, D.F.
- Chapin III F. S., Matson P. A. y Vitousek P. 2011.** Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer Science & Business Media.
- Coleman D. C. y Crossley Jr, D. A. 2004.** Fundamentals of soil ecology. Academic press.
- Corpoica V. 2005.** Efectos de la aplicación de cal dolomítica y yeso agrícola en cafetales (*Coffea arabica*) afectados con Mal de Viñas en Guatemala. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología.* Costa Rica. 76 p.
- Coutinho, J. 2001.** Efeito da secagem e re-humedecimento do solo: modelos cinéticos de estimativa do N mineralizável. En Congreso Latinoamericano y Cubano de la Ciencia del Suelo. (15, 5 nov. 11-16, Varadero).
- Douglas W. P. 2010.** A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma.* 156: 75-83.

- Durán L. y Henríquez C. 2007.** Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agron. Costarric.* 31: 41-51.
- Dwyer M. B.L. and L. M. y Gregorich, G. E. 1999.** Soil nitrogen amendment effects on seasonal nitrogen mineralization and nitrogen cycling in maize production. *Agronomy Journal.* vol. 91, no. 6, p. 1003-1009.
- Febles J., Borsatto F. and Soca M. 2014.** Fercel-Clinoptilolite natural product to optimize the fertilization and reduce environmental pollution. p 156-160. In: *Memorias 16th World Fertilizer Congress of CIEC. Technological Innovation for a Sustainable Tropical Agriculture.* Río de Janeiro, Brasil.
- Fernández, L.M. 2006.** Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Frankenberger W. and Dick W. 1983.** Relationships Between Enzyme Activities and Microbial Growth and Activity Indices in Soil1. *Soil Science Society of America Journal - SSSAJ.* 47. 10.2136.
- García, A. y C. Rivero. 2008.** Evaluación del carbono microbiano y la respiración basal en respuesta a la aplicación de lodo papelerero en los suelos de la Cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 34: 215-229.
- George, T. 2000.** Recycling in situ of legume-fixed and soil nitrogen in tropical lowland rice. *Agron J.*, 90:429-437. 1998.
- Gilloway R., Weaver R. and Ming D. 2003.** Nitrification in zeoponic substrate. *Plant and Soil.* 256:341-378.
- Gomero, O. 1999.** Manejo ecológico de suelos; conceptos, experiencias y técnica. Lima, Perú. 95 p.

- Guerrero-Ortiz, P.L., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G.S. y Sánchez-Colín, M.J. 2012.** Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de *Lupinus*. *Terra Latinoamericana* 30 (4): 355-362.
- Guo, L.B. and Gofford, M. 2002.** Soil carbon stock and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8: 345-360.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Hernández-Escobar J., Ortiz-Solorio C. A., Anicua-Sánchez R. y Hernández-Lara M. E. 2001.** Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Rev. Chapingo Serie Horticultura*. 17(3): 183-196.
- Hadas A., Bar-Yosef B., Davidov S. and Sofer M. 1983.** Effect of pelleting, temperature, and soil type on mineral nitrogen release from poultry and dairy manures. *Soil Science Society of America Journal* 47 (589), 1129-1133.
- Hassink, J. and Whitmore, A. P. 1997.** A model of the physical protection of soil organic matter in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 131-139.
- Hiller, D. 1998.** *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, C.A. 771 pp.
- Khalil M. I., Hossain M. B. and Schmidhalter U. 2005.** Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. *Soil Biology and Biochemistry* 37 (8), 1507-1518.
- Körschens M., Weigel A., Schulz E. 1998.** Turnover of soil organic matter (SOM) and longterm balances-tools for evaluating sustainable productivity of soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 161: 409-424.
- Lemaire F. 1997.** The problem of bioestability in organic substrates. *Acta Hort.* 450: 63-69.
- Lerch, R. N., K. A. Barbarick, L. E. Sommers, and D. G. Westfall. 1992.** Sewage sludge proteins as labile carbon and nitrogen sources. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 1470-1476.
- Lou Y. and Zhoy X. 2006.** *Soil Respiration and the Environment*. Elsevier.

- Martín, G.M. y Rivera, R. 2004.** Mineralización del nitrógeno incorporado con abonos verdes y su participación en la nutrición de cultivos de importancia económica. *Cultivos Tropicales*, vol. 25, núm. 3, pp. 89-96.
- Matus, F. J.; Maire, C. and Villalobos, M. P. 1998.** Interaction between soil texture and organic matter of clay and silt particles from arable and non-arable soils. 16° World Congress of Soil Science. Montpellier, France. 1-24 agost. Symposia N° 4. p. 110.
- Milosevic T., Milosevic N. and Glisic I. 2013.** Tree growth, yield, fruit quality attributes and leaf nutrient content of “Roxana” apricot as influenced by natural zeolite, organic and inorganic fertilisers. *Scientia Horticulturae*. 156:131-139.
- Or, D.; Weaight, J. M. 2000.** Soil water content and water potential relationships. A-53 – A83 pp. In *Handbook of soil Science*. SUMMER, M.E. (ed). CRC press. Wastington, D.C.
- Ostroumov M. F., H. Ortiz y C. P. Corona. 2005.** Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. <http://smm.iim.umich.mx/zeolitas.htm> Obtenido el 25/01/19.
- Paredes G. S. S. 2016.** Respiración microbiana del suelo en sitios con diferente cobertura arbórea en el bosque de *Abies religiosa* en la cuenca del río Magdalena, D.F., México. Tesis de licenciatura en biología. Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez B., P., G. Ouro, A. Merino y F. Macías. 1998.** Descomposición de materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO₂ en un suelo forestal bajo diferentes manejos sevícolas. *Edafología* 5: 83-93.
- Quesada R. G. y Marín T. F. 2014.** Una metodología para la evaluación de sustratos para la agricultura protegida. Programa Nacional de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos. Costa Rica. 24 p.
- Rivas Y., Oyarzún C., Godoy R. y Valenzuela E. 2009.** Mineralización del nitrógeno, carbono y actividad enzimática del suelo en un bosque de *Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst y una

plantación de *Pinus radiata* D. Don. del centro-sur de Chile. Revista Chilena de Historia Natural. 82:119-134.

Rivera, R.; Martín G. M. y Pérez, D. 1999. Efecto de la temperatura sobre la mineralización del nitrógeno de dos especies de abonos verdes en suelo Ferralítico Rojo. Cultivos Tropicales. vol. 20, no. 2, p. 15-19.

Rivero, G. y G. Rodríguez F. 1988. Cuban experience with the use of natural zeolite substrates in soilless culture. pp. 405-416. In: International Society for Soilless Culture: Proceedings of the Seventh International Congress on Soilless Culture. Flevohof, The Netherlands.

Ritter E., M. Starr and L. Vesterdal. 2005. Losses of nitrate from gaps of different sizes in a managed beech (*Fagus sylvatica*) forest. Canadian Journal of Forest Research 35: 308-319.

Rodríguez Macías, Ramón, Alcantar González, Ernesto G., Iñiguez Covarrubias, Gilberto, Zamora Natera, Francisco, García López, Pedro M., Ruiz López, Mario A., Salcedo Pérez, Eduardo. 2010. Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. Interciencia, 35.

Rosell, R.A. 1999. Materia Orgánica, Fertilidad de Suelos y Productividad de Cultivos. Proceed. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile.

Santibañez, C., M. T. Varnero y R. Ginocchio. 2006. Mineralización de carbono y nitrógeno en relaves mineros acondicionados con biosólidos. pp. 337-343. In: J. F. Gallardo L. (ed). Medio ambiente en Iberoamerica. Visión desde la física y la química en los árboles del siglo XXI. Tomo III. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Badajoz, España.

Satti P., M. Mazzarino, M. Gobbi, F. Funes and L. Rroselli. 2003. Soil N dynamics in relation to leaf litter quality and soil fertility in north-western Patagonian forests. Journal of Ecology 91: 173-181.

Scott, N.; Cole, C.; Elliott, E.T. and Huffman, S. 1996. Soil textural control on decomposition and soil organic matter dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 11021109.

- Shi W. Y., Tateno R., Zhang J. G., Wang Y. L., Yamanaka N. and Du S. 2011.** Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest–grassland transition zone of the Loess Plateau. *Agricultural and forest meteorology*, 151: 854-863.
- Sierra C. A., Trumbore S. E., Davidson E. A., Vicca S. and Janssens I. 2015.** Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 7 (1), 335-356.
- Six J. and J. Jastrow. 2002.** Organic matter turnover. En: R. Lal (ed) *Encyclopedia of Soil Science* 936-942. Marcel Dekker, New York, USA.
- Soliba M. 1998.** Aplicación del compostaje a la obtención de productos alternativos a los sustratos tradicionales. En Pastor S, J Narciso (eds) *Tecnología de Sustratos. Aplicación a la Producción Viverística Ornamental, Hortícola y Forestal*. Universidad de Leida, España. pp. 51-65.
- Stamatakis, M.G., N. Koukouzas, C. Vassilatos, E. Kamenou, and K. Samantouros. 2001.** The zeolites from Evros region, Northern Greece: A potential use as cultivation substrate in hydroponics. *Acta Hort.* 548: 93-103.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute Inc. 2011.** SAS for windows. Release 6-12, version 9.3. SAS Campus Drive. North Carolina, U.S.A.
- Steinberg, S. L., D. W. Ming, K. E. Henderson, C. Carrier, J. E. Gruener, D. J. Barta, and D. L. Henninger. 2000.** Wheat response to differences in water and nutritional status between zeoponic and hydroponic growth systems. *Agron. J.* 92: 353-360.
- Steubing, L., R. Godoy y M. Alberdi. 2001.** *Métodos de ecología vegetal*. Universitaria. Santiago, Chile.

- Terés T., V. 2001.** Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 483p.
- Tiessen H., Cuevas E., Chacon P. 1994.** The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371: 783-785.
- Tiquia S.M., Richard T.L. and Honeyman M.S. 2002.** Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 62, 15-24.
- Velasco F. y De Mingo P. 1981.** Distribución de la materia orgánica libre y ligada, y de las fracciones de humina en suelos climácicos y en suelos degradados. *An Edafol Agrobiol* 40, 179-190.
- Wilhelm W.W., Johnson J.M.F., Hatfield J.L., Voorhees W.B., Linden D.R. 2004.** Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agron. J.* 96: 117.

CONCLUSIONES GENERALES

En el presente experimento se evaluaron doce tratamientos en condiciones de agricultura protegida y bajo el mismo manejo agronómico para evaluar el efecto del uso de una mezcla mineral de zeolita y dolomita, composta y la reducción de la fertilización potásica en la morfología del chile manzano y las características físicas y químicas en los sustratos. Con base en los resultados se concluye lo siguiente:

- I. El uso de minerales como la zeolita y dolomita propicia un aumento en el contenido, disponibilidad y absorción de los nutrientes como el calcio, magnesio, nitrógeno y potasio; lo que aumenta su contenido en el tejido vegetal mejorando la morfología de las plantas.
- II. La incorporación de composta incrementa el contenido de N y K en la planta y reduce el porcentaje de fertilización potásica a aplicar al cultivo sin mostrar efectos negativos en las plantas, es recomendable realizar análisis nutrimental de la composta para conocer el contenido de los elementos disponibles y realizar el programa de fertilización más apto.
- III. En el estudio se encontró que el sistema de producción en sustratos utilizando minerales, zeolita y dolomita, que actúen como potencializadores de la fertilidad es idóneo para mejorar las características morfológicas del chile manzano, en comparación con los sistemas tradicionales de producción en los cuales el suministro de nutrientes es solamente a través de solución nutritiva.
- IV. Utilizar $40 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de mezcla mineral mejoró considerablemente el porcentaje de los distintos tipos de porosidad lo que mostraría un ahorro de solución nutritiva con la aplicación de riego óptimo manifestando mejores condiciones para el crecimiento y desarrollo de las plantas, abastecimiento de nutrientes como Ca y Mg, una reducción en la acumulación de sales en el sustrato, control de la mineralización del sustrato y, por ende, menor impacto de salidas económicas por fertilización al productor.
- V. Un menor contenido de aserrín, junto con la presencia de composta, causó una menor relación C/N del sustrato lo que eleva su fertilidad al contener un mayor porcentaje de nutrientes disponibles para el aprovechamiento de las plantas.

- VI. El uso de composta, minerales y fertilización nitrogenada favoreció la mineralización de la fracción orgánica reflejado en el incremento en las ppm de CO₂ y su correspondiente transformación a mg de CO₂ m⁻³.
- VII. Se determinó el coeficiente de corrección para calcular la concentración de las ppm del CO₂ en relación a un volumen de 1 m³, que permite la transformación de ppm de CO₂ a mg de CO₂ m⁻³.
- VIII. La magnitud de la liberación de CO₂ determinada en los sustratos evaluados cuestiona la importancia del aporte de este gas en la producción bajo sistema intensivo como alternativa al suministro vía comercial.
- IX. La calidad y origen de los componentes del sustrato en conjunto con el uso de zeolita y dolomita, repercute en el desprendimiento de CO₂ por lo cual, es recomendable utilizar una combinación de materiales orgánicos e inorgánicos para tener un sustrato adecuado para la producción agrícola.
- X. La caracterización del mineral permitió determinar que el contenido total de la mezcla mineral fue de 48% de dolomita, 16% de zeolita, 22% de cuarzo y el restante 14% comprendió filosilicatos de tipo caolinita y micas, lo que causó que la CIC se elevara por el contenido de K por parte de la zeolita y del Ca que conformaba la dolomita.

ANEXOS

Cuadro A.1. Cuadrados medios de las variables de altura, número de nudos, botones florales, peso fresco radical, peso seco radical, volumen de raíz y producción de materia seca en chile manzano.

FV	GL	Alt	NNud	NBF	PFR	PSR	VR	MS
Repeticiones	3	408.94	1.516	124.23	2119.21	37.444	1313.03	32.00
NS	1	41328.32**	87.588**	3277.56**	10536.13*	135.240	8855.79**	120.33**
Error A	3	1225.73	1.754	308.60	1247.84	62.149	652.00	7.20
NC	1	6954.30*	24.825	5482.26**	1108.12	35.449	2187.00	27.00**
NS*NC	1	16806.07	58.830**	864.28	12947.17**	274.419	7040.75**	56.33**
Error B	6	1052.46	6.165	509.04	1206.04	35.098	1268.36	9.33
NMM	2	151.14	2.565	280.70	408.59	5.443	675.09	60.33*
NS*NMM	2	1940.82	5.176	60.96	1267.46	25.564	2091.89	26.33
NC*NMM	2	122.49	0.945	391.42	491.61	14.881	482.07	21.00*
NS*NC*NMM	2	104.11	0.158	365.07	24.19	1.200	27.52	12.33**
Error C	24	1595.69	3.278	257.44	1083.25	38.290	768.82	2.00
Total	47							
CV (NS, %)		14.69	15.07	33.78	13.61	12.01	12.74	13.08
CV (NC, %)		6.02	7.95	43.67	4.43	6.13	6.34	6.20
CV (NMM, %)		1.08	3.14	12.10	3.29	2.95	4.31	11.36

Dónde: **FV.** - Fuente de variación, **NS.** - Nivel de solución nutritiva, **NC.** - Nivel de composta, **NMM.** - Nivel de mezcla mineral, **CV.** - Coeficiente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **Alt.** - Altura de planta, **NNud.** - Número de nudos, **NBF.** - Número de botones florales, **PFR.** - Peso fresco de raíz, **PSR.** - Peso seco de raíz, **VR.** - Volumen de raíz y **MS.** - Proporción de materia seca.

Cuadro A. 2. Cuadrados medios de las variables de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en tejido vegetal de chile manzano.

FV	GL	N	P	K	Ca	Mg
Repeticiones	3	0.187*	28.34	0.4**	84650.43	0.05
NS	1	1.122**	22148.07**	177542865.9**	23499847.12**	13255801.63**
Error A	3	0.015	21.55	0.1	84663.36	0.03
NC	1	0.039	52980.25**	52761667.3**	56768561.40**	7386.31**
NS*NC	1	4.344**	47299.01**	72789583.5**	680469.81**	4074939.40**
Error B	6	0.060	26.44	0.2	24011.23	0.03
NMM	2	2.819**	63120.50**	12212043.3**	9569563.59**	60823.60**
NS*NMM	2	5.740**	43731.81**	59273115.8**	13413661.06**	244000.39**
NC*NMM	2	0.286**	608390.20**	12327117.8**	7974849.78**	520236.08**
NS*NC*NMM	2	0.123	211952.40**	80646652.3**	19569613.31**	1207890.41**
Error C	24	0.040	15.70	0.1	46806.2	0.07
Total	47					
CV (NS, %)		3.25	0.73	7.20	4.85	7.59
CV (NC, %)		0.65	1.13	3.93	7.54	0.17
CV (NMM, %)		6.43	1.49	2.31	3.79	0.62

Dónde: **FV.** - Fuente de variación, **NS.** - Nivel de solución nutritiva, **NC.** - Nivel de composta, **NMM.** - Nivel de mezcla mineral, **CV.** - Coeficiente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **N.** – Nitrógeno total, **P.** - Fósforo, **K.** - Potasio, **Ca.** – Calcio y **Mg.** – Magnesio.

Cuadro A. 3. Medias de la acción de los factores de estudio a las variables de respuestas morfológicas y contenido nutrimental en tejido vegetal.

Factor	Alt	NNud	NBF	PFR	PSR	VR	MS	N	P	K	Ca	Mg
	(cm)			(g)	(cm ³)	(%)	(%)	(ppm)				
S100	252.97 b	11.36 b	26.33 b	138.55 a	18.04 a	136.91 b	15.50 b	6.67 a	4129 b	39647 a	21074 a	9263 b
S50	311.66 a	14.07 a	42.86 a	168.18 a	21.39 a	164.04 a	18.66 a	6.37 b	4172 a	35800 b	196745 a	10314 a
DMS (p≤0.05)	32.16	1.21	16.13	32.45	7.24	23.45	2.16	0.11	4.26	0.22	267.31	0.15
C0	270.28 b	12.00 b	23.91 b	148.55 a	18.86 a	143.74 a	16.33 b	6.55 a	4184 a	36675 b	19287 b	9776 b
C2	294.35 a	13.43 a	45.28 a	158.16 a	20.57 a	157.24 a	17.83 a	6.59 a	4117 b	38772 a	21462 a	9801 a
DMS (p≤0.05)	22.9	1.75	15.93	24.53	4.18	25.15	0.86	0.17	3.63	0.27	109.45	0.12
MM0	285.63 a	13.17 a	38.59 a	158.36 a	20.39 a	157.74 a	19.25 a	6.14 c	4079 c	36722 c	21237 a	9859 a
MM1	279.56 a	12.54 a	34.95 a	148.25 a	19.38 a	145.20 a	15.50 c	6.97 a	4197 a	38326 a	19743 c	9752 c
MM2	281.74 a	12.43 a	30.24 a	153.48 a	19.38 a	148.54 a	16.50 b	6.45 b	4176 b	38123 b	20144 b	9754 b
DMS (p≤0.05)	35.26	1.59	14.16	29.06	5.46	24.48	0.81	0.17	2.49	0.21	191.02	0.23

Dónde: **S100.** - Solución nutritiva al 100%, **S50.**- Solución nutritiva al 50%, **C0.**- Sin contenido de composta, **C2.**- Contenido de composta, **MM0.**- Sin contenido de mezcla mineral, **MM1.**- 40 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, **MM2.**- 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, **Alt.** - Altura de planta, **NNud.** - Número de nudos, **NBF.** - Número de botones florales, **PFR.** - Peso fresco de raíz, **PSR.** - Peso seco de raíz, **VR.** - Volumen de raíz, **MS.**- Proporción de materia seca, **N.** – Nitrógeno total, **P.** - Fósforo, **K.** - Potasio, **Ca.** - Calcio, **Mg.** – Magnesio y **ppm.** – Partes por millón. **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 4. Prueba de medias para los tratamientos de estudio y el efecto en las variables de respuesta en la morfología y contenido nutrimental en tejido vegetal.

Tratamientos	Alt	Nud	Bot	PFR	PSR	VR	MS	N	P	K	Ca	Mg
	(cm)			(g)	(cm ³)	(%)	(%)	(ppm)				
1	210.37 c	9.46 b	11.17 b	112.42 a	13.78 a	112.33 b	17.50 b	6.26 d	3873 j	34788 j	21231 b	9305 j
2	225.13 b	8.95 b	7.42 b	121.81 a	16.32 a	119.08 a	9.50 g	8.19 a	4281 d	38865 d	19428 d	8769 l
3	231.17 b	10.21 b	15.63 a	117.73 a	14.25 a	122.75 a	12.50 c	6.56 c	4426 a	38448 e	19659 d	8803 k
4	330.71 a	15.54 a	50.63 a	194.51 a	24.54 a	186.67 a	20.50 a	5.84 d	3904 i	34542 k	18192 f	10585 b
5	314.61 a	14.16 a	29.71 a	176.27 a	22.90 a	170.00 a	19.50 a	5.74 d	4355 b	36526 h	19512 d	10294 d
6	309.68 a	13.66 a	28.92 a	168.62 a	21.33 a	151.67 a	15.50 b	6.70 c	4262 e	36883 g	17702 g	10900 a
7	288.75 a	13.20 a	45.75 a	154.70 a	20.86 a	151.67 a	17.50 b	5.81 d	4305 c	46037 a	21573 b	9481 h
8	276.19 a	13.16 a	45.67 a	150.83 a	21.24 a	147.67 a	14.50 c	7.42 b	4127 g	42201 b	20413 c	9400 i
9	295.21 a	13.21 a	32.38 a	173.80 a	21.76 a	168.08 a	19.50 a	5.79 d	3761 k	37543 f	24143 a	9818 f
10	321.69 a	14.50 a	46.83 a	171.81 a	22.37 a	180.42 a	19.50 a	6.63 c	4234 f	31521 l	23953 a	10066 e
11	302.33 a	13.66 a	57.04 a	144.11 a	17.04 a	144.08 a	16.50 b	6.52 c	4024 h	35714 i	19619 d	10545 c
12	290.92 a	12.66 a	44.04 a	153.76 a	20.17 a	151.67 a	17.50 b	6.66 c	4253 e	39616 c	19073 e	9494 g
DMS (p≤0.05)	89.56	4.60	42.21	85.62	15.54	73.54	2.80	0.57	10.76	0.79	548.08	0.60

Dónde: **Alt.** - Altura de planta, **NNud.** - Número de nudos, **NBF.** - Número de botones florales, **PFR.** - Peso fresco de raíz, **PSR.** - Peso seco de raíz, **VR.** - Volumen de raíz, **MS.** - Proporción de materia seca, **N.** - Nitrógeno total, **P.** - Fósforo, **K.** - Potasio, **Ca.** - Calcio y **Mg.** - Magnesio. **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 5. Matriz de correlación de los factores de estudio a las variables de respuestas morfológicas y de contenido nutrimental en tejido vegetal.

	NS	NC	NMM	Alt	NNud	NBF	VR	PFR	PSR	MS	N	P	K	Ca	Mg
NS	1	0.000	0.000	-0.749	-0.681	-0.526	-0.599	-0.600	-0.500	-0.520	0.305	-0.109	0.530	0.366	-0.787
NC	0.000	1	0.000	0.335	0.362	0.681	0.298	0.170	0.256	0.246	-0.138	-0.158	0.288	0.517	0.018
NMM	0.000	0.000	1	-0.065	-0.152	-0.217	-0.166	-0.129	-0.123	-0.369	0.183	0.194	0.157	-0.251	-0.064
Alt	-0.749	0.335	-0.065	1	0.976	0.788	0.933	0.921	0.886	0.694	-0.584	-0.061	-0.211	-0.004	0.828
NNud	-0.681	0.362	-0.152	0.976	1	0.844	0.922	0.909	0.870	0.741	-0.630	-0.139	-0.180	0.020	0.817
NBF	-0.526	0.681	-0.217	0.788	0.844	1	0.686	0.611	0.616	0.573	-0.386	-0.161	0.034	0.044	0.568
VR	-0.599	0.298	-0.166	0.933	0.922	0.686	1	0.961	0.936	0.759	-0.629	-0.161	-0.263	0.187	0.672
PFR	-0.600	0.170	-0.129	0.921	0.909	0.611	0.961	1	0.954	0.767	-0.649	-0.243	-0.237	0.064	0.764
PSR	-0.500	0.256	-0.123	0.886	0.870	0.616	0.936	0.954	1	0.633	-0.513	-0.084	-0.035	0.065	0.620
MS	-0.520	0.246	-0.369	0.694	0.741	0.573	0.759	0.767	0.633	1	0.206	0.148	-0.322	-0.237	-0.237
N	0.305	-0.138	0.183	-0.584	-0.630	-0.386	-0.629	-0.649	-0.513	-0.865	1	0.206	0.148	-0.322	-0.535
P	-0.109	-0.158	0.194	-0.061	-0.139	-0.161	-0.161	-0.243	-0.084	-0.399	0.206	1	0.315	-0.312	-0.237
K	0.530	0.288	0.157	-0.212	-0.180	0.034	-0.263	-0.237	-0.035	-0.355	0.148	0.315	1	-0.101	-0.434
Ca	0.366	0.517	-0.251	-0.004	0.020	0.044	0.187	0.064	0.065	0.278	-0.322	-0.312	-0.101	1	-0.196
Mg	-0.787	0.018	-0.064	0.828	0.817	0.568	0.672	0.764	0.620	0.626	-0.535	-0.237	-0.434	-0.196	1

Dónde: NS. - Nivel de solución nutritiva, NC. - Nivel de composta, NMM. - Nivel de mezcla mineral, Alt. - Altura de planta, NNud. - Número de nudos, NBF. - Número de botones florales, PFR. - Peso fresco de raíz, PSR. - Peso seco de raíz, VR. - Volumen de raíz, N. – Nitrógeno total, P. - Fósforo, K. - Potasio, Ca. – Calcio y Mg. – Magnesio.

Cuadro A. 6. Cuadrados medios de las variables de potencial hidronio, conductividad eléctrica, porosidad total, porosidad de aireación, porosidad de retención de humedad y densidad aparente en sustratos.

FV	GL	pH	CE	Gr	PT	PA	PRH	Dap
Repeticiones	3	0.0061	0.1491	0.0003	4.1666	0.3750	4.1666	0.0001
NS	1	0.2106**	2.5208**	0.1120**	48.1666	0.0416	42.6666	0.0026
Error A	3	0.0065	0.0847	0.0002	130.6666	100.0416	0.6666	0.0063
NC	1	0.2028**	4.6875**	0.9922**	10.6666	18.3750	54.0000	0.0007
NS*NC	1	0.0027	1.0680*	0.1066**	20.1666	3.3750	37.5000	0.0003
Error B	6	0.0497	0.1475	0.0003	66.7500	37.7083	92.0833	0.0040
NMM	2	0.0907**	0.2088	0.0549**	3.1666	10.0416	21.8750	0.0013
NS*NMM	2	0.0347	0.2637	0.1333**	126.1666*	21.2916	64.5416	0.0052
NC*NMM	2	0.1592**	0.1711	0.3996**	12.1666	105.8750	162.1250	0.0005
NS*NC*NMM	2	0.0099	0.3809	0.1041**	117.1666*	90.1250	73.6250	0.0034
Error C	24	0.0153	0.2515	0.1730	26.3333	13.8333	41.6250	0.0029
Total	47							
CV (NS, %)		1.27	20.20	4.54	2.66	0.31	3.41	3.82
CV (NC, %)		1.27	27.23	12.97	1.25	6.20	3.83	1.88
CV (NMM, %)		1.07	7.18	3.75	0.83	5.62	2.87	4.05

Dónde: **FV.** - Fuente de variación, **NS.** - Nivel de solución nutritiva, **NC.** - Nivel de composta, **NMM.** - Nivel de mezcla mineral, **CV.** - Coeficiente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **pH.** - Potencial hidronio, **CE.** - Conductividad eléctrica, **Gr.**- Granulometría, **PT.**- Porosidad total, **PA.** - Porosidad de aireación, **PRH.** - Porosidad de retención de humedad y **Dap.** - Densidad aparente.

Cuadro A. 7. Prueba de medias de los factores de estudio a las variables fisicoquímicas y físicas de los sustratos.

Factor	pH	CE (dS m⁻¹)	Gr (mm)	PT (%)	PA (%)	PRH (%)	Dap (Mg m⁻³)
S100	7.28 a	1.84 a	2.11 b	76.75 a	19.91 a	56.58 a	0.38 a
S50	7.15 b	1.38 b	2.25 a	73.91 a	20.00 a	53.91 a	0.36 a
DMS (p≤0.05)	0.07	0.26	0.08	59.29	51.88	4.23	0.41
C0	7.28 a	1.30 b	2.38 a	74.66 a	20.83 a	53.75 a	0.37 a
C2	7.15 a	1.92 a	1.98 b	76.00 a	19.08 a	56.75 a	0.38 a
DMS (p≤0.05)	0.15	0.27	0.39	14.35	10.78	16.85	0.11
MM0	7.13 b	1.48 a	2.16 b	74.75 a	21.25 a	53.37 a	0.38 a
MM1	7.24 ab	1.69 a	2.27 a	76.00 a	19.37 a	56.50 a	0.39 a
MM2	7.28 a	1.67 a	2.11 c	75.25 a	19.25 a	55.37 a	0.36 a
DMS (p≤0.05)	0.10	0.44	0.02	7.33	5.31	9.21	0.07

Dónde: **S100.** - Solución nutritiva al 100%, **S50.**- Solución nutritiva al 50%, **C0.**- Sin contenido de composta, **C2.**- Contenido de composta, **MM0.**- Sin contenido de mezcla mineral, **MM1.**- 40 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, **MM2.**- 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, **pH.** - Potencial hidronio, **CE.** - Conductividad eléctrica, **Gr.**- Granulometría, **PT.**- Porosidad total, **PA.** - Porosidad de aireación, **PRH.** - Porosidad de retención de humedad y **Dap.** - Densidad aparente. **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 8. Prueba de medias para los tratamientos de estudio y el efecto en las variables fisicoquímicas y físicas de los sustratos.

Tratamientos	pH	CE (dS m⁻¹)	Gr (mm)	PT (%)	PA (%)	PRH (%)	Dap (Mg m⁻³)
1	7.37 a	1.37 b	2.26 e	81.5 a	26.5 a	55.0 a	0.42 a
2	7.29 a	1.10 b	2.07 g	70.5 a	16.0 a	54.0 a	0.36 a
3	7.37 a	1.66 a	2.43 c	73.5 a	21.0 a	52.5 a	0.36 a
4	7.24 a	1.13 b	2.29 d	65.5 a	15.0 a	50.5 a	0.31 a
5	7.30 a	1.41 b	2.56 b	83.0 a	19.0 a	64.0 a	0.42 a
6	7.14 a	1.12 b	2.72 a	74.0 a	27.5 a	46.5 a	0.37 a
7	7.08 a	1.88 a	1.97 h	80.0 a	19.0 a	60.5 a	0.42 a
8	7.21 a	2.60 a	2.07 g	79.5 a	23.0 a	56.5 a	0.41 a
9	7.39 a	2.43 a	1.90 i	75.5 a	14.0 a	61.0 a	0.36 a
10	6.85 b	1.54 a	2.12 f	72.0 a	24.5 a	47.5 a	0.37 a
11	7.16 a	1.63 a	2.41 c	71.0 a	19.5 a	51.5 a	0.37 a
12	7.24 a	1.47 b	1.42 j	77.0 a	14.5 a	63.5 a	0.37 a
DMS (p≤0.05)	0.34	1.13	0.05	25.0	19.3	26.1	0.22

Dónde: **pH.** - Potencial hidronio, **CE.** - Conductividad eléctrica, **Gr.**- Granulometría, **PT.**- Porosidad total, **PA.** - Porosidad de aireación, **PRH.** - Porosidad de retención de humedad y **Dap.** - Densidad aparente. **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 9. Cuadrados medios de las variables de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno en sustratos.

FV	GL	N	P	K	Ca	Mg	CIC	MO	C	CN
Repeticiones	3	0.0021	0.000009	0.392	0.001	0.001	0.0003	13.50	1.04	125.26
NS	1	0.1351**	0.0028**	48.44**	14.476**	0.492**	0.069**	4.16	6.00**	212.83
Error A	3	0.00003	0.00002	0.332	0.0007	0.002	0.0005	8.16	0.041	9.04
NC	1	4.5144**	0.0104**	3.477*	32.703**	9.398**	819.226**	2.66	0.166	385109.73**
NS*NC	1	0.1409**	0.0009**	2.813*	5.796**	0.388**	1.992**	2.66	0.166	182.65
Error B	6	0.0011	0.00016	0.333	0.0002	0.001	0.002	0.00003	0.041	74.94
NMM	2	0.1850**	0.0017**	5.975**	6.992**	5.347**	13.499**	270.04**	44.041**	2150.52**
NS*NMM	2	0.1313**	0.0025**	0.169	3.321**	2.218**	7.109**	1.54	0.875**	77.15
NC*NMM	2	0.1804**	0.0013**	3.778**	15.491**	3.236**	8.003**	21.29	5.291**	1438.26**
NS*NC*NMM	2	0.1282**	0.0013**	0.655	18.010**	0.617**	7.928**	1.79	1.791**	66.04
Error C	24	0.0017	0.00006	0.333	0.0004	0.002	0.001	3.66	0.041	122.14
Total	47									
CV (NS, %)		21.77	11.60	39.06	16.30	4.78	0.72	2.06	5.08	2.95
CV (NC, %)		126.01	21.55	10.36	24.48	22.43	74.40	1.66	0.86	126.01
CV (NMM, %)		31.22	11.19	17.00	13.84	20.53	11.69	20.44	16.85	11.53

Dónde: **FV.** - Fuente de variación, **NS.** - Nivel de solución nutritiva, **NC.** - Nivel de composta, **NMM.** - Nivel de mezcla mineral, **CV.** - Coeficiente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **N.** - Nitrógeno, **P.** - Fósforo, **K.** - Potasio, **Ca.** - Calcio, **Mg.** - Magnesio, **CIC.** - Capacidad de intercambio catiónico, **MO.** - Materia orgánica, **C.** - Carbono y **C/N.** - Relación carbono/nitrógeno.

Cuadro A. 10. Prueba de medias de los factores de estudio a las variables de respuestas químicas de los sustratos.

Factor	N	P	K	Ca	Mg	CIC	MO	C	C/N
	(%)	(Cmol _c Kg ⁻¹)					(%)		
S100	0.412 b	0.145 a	4.62 a	5.32 a	2.90 a	7.81 b	28.83 a	14.41 a	139.19 a
S50	0.562 a	0.123 a	2.61 b	4.22 b	2.71 b	7.89 a	28.00 a	13.41 a	145.14 a
DMS (p≤0.05)	0.028	0.026	0.52	0.02	0.04	0.02	14.82	1.05	15.59
C0	0.053 b	0.114 b	3.35 b	3.94 b	2.36 b	3.72 b	28.08 b	13.83 a	268.84 a
C2	0.920 a	0.155 a	3.88 a	5.59 a	3.25 a	11.98 a	28.75 a	14.00 a	15.49 b
DMS (p≤0.05)	0.060	0.022	0.40	0.01	0.02	0.03	0.65	0.35	15.20
MM0	0.324 c	0.142 a	2.91 b	5.50 a	3.22 a	8.36 b	35.12 a	16.62 a	160.32 a
MM1	0.625 a	0.144 a	3.91 a	4.22 c	2.15 c	6.79 c	25.00 b	12.62 b	128.43 b
MM2	0.511 b	0.117 b	4.03 a	4.58 b	3.06 b	8.40 a	25.12 b	12.50 b	137.74 b
DMS (p≤0.05)	0.058	0.011	0.50	0.01	0.04	0.03	2.73	0.29	15.79

Dónde: **S100.** - Solución nutritiva al 100%, **S50.** - Solución nutritiva al 50%, **C0.** - Sin contenido de composta, **C2.** - Contenido de composta, **MM0.** - Sin contenido de mezcla mineral, **MM1.** - 40 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, **MM2.** - 80 cm³ L⁻¹ de mezcla mineral, **N.** - Nitrógeno, **P.** - Fósforo, **K.** - Potasio, **Ca.** - Calcio, **Mg.** - Magnesio, **CIC.** - Capacidad de intercambio catiónico, **MO.** - Materia orgánica, **C.** - Carbono y **C/N.** - Relación carbono/nitrógeno., **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 11. Prueba de medias de los tratamientos de estudio a las variables de respuestas químicas de los sustratos.

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg	CIC	MO	C	C/N
	(%)			(Cmolc kg ⁻¹)			(%)		
1	0.051 c	0.110 c	4.20 f	7.53 a	2.63 e	3.67 a	35.0 a	17.20 a	290.07 a
2	0.056 c	0.159 b	4.99 c	3.86 g	2.52 e	3.13 a	24.5 b	12.75 c	244.40 b
3	0.058 c	0.087 d	4.59 d	3.16 j	2.43 e	4.89 a	27.0 b	13.25 c	254.85 b
4	0.051 c	0.106 c	1.92 j	3.44 i	2.95 d	3.27 a	31.5 a	14.25 b	314.04 a
5	0.054 c	0.111 c	2.54 i	3.55 h	1.74 g	2.49 a	24.5 b	12.25 c	244.54 b
6	0.050 c	0.111 c	1.86 k	2.16 k	1.90 f	4.91 a	26.0 b	13.25 c	265.16 b
7	0.152 c	0.221 a	3.63 g	4.89 f	3.32 c	11.43 a	37.0 a	17.75 a	18.13 c
8	1.198 a	0.168 b	5.06 b	6.43 c	2.76 d	11.21 a	25.5 b	13.25 c	12.41 c
9	0.957 b	0.129 c	6.25 a	6.09 e	3.82 b	12.53 a	24.0 b	12.50 c	15.30 c
10	1.043 b	0.133 c	1.92 j	6.22 d	3.98 b	8.07 a	37.0 a	17.25 a	19.05 c
11	1.195 a	0.138 b	3.05 h	3.08 j	1.52 g	10.33 a	25.5 b	12.50 c	12.41 c
12	0.979 b	0.143 b	4.42 e	6.94 b	4.25 a	11.29 a	23.5 b	11.25 d	15.69 c
DMS (p≤0.05)	0.154	0.033	0.05	0.08	0.22	11.36	8.18	1.40	40.70

Dónde: N.- Nitrógeno total, P.- Fósforo, K.- Potasio, Ca. - Calcio, Mg.- Magnesio, CIC. - Capacidad de intercambio catiónico, MO.- Materia orgánica, C.- Carbono y C/N.- Relación carbono/nitrógeno. **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 12. Matriz de correlación de los factores de estudio a las variables de respuestas físicoquímicas, físicas y químicas del sustrato.

	NS	NC	NMM	pH	CE	PT	PA	PRH	Dap	Gr	N	P	K	Ca	Mg	CIC	MO	CN	C
NS	1	0.000	0.000	0.448	0.492	0.260	-0.018	0.257	0.344	-0.196	-0.149	0.321	0.782	0.321	0.103	-0.010	0.084	-0.023	0.000
NC	0.000	1	0.000	-0.448	0.675	0.163	-0.169	0.257	0.185	-0.614	0.864	0.603	0.253	0.482	0.956	0.956	0.050	-0.989	0.517
NMM	0.000	0.000	1	0.422	0.167	0.039	-0.207	0.175	-0.162	-0.052	0.151	-0.297	0.400	-0.225	-0.808	0.002	-0.808	-0.072	-0.514
pH	0.448	-0.448	0.442	1	0.078	0.160	-0.370	0.442	0.012	0.024	-0.328	-0.377	0.606	-0.004	-0.248	-0.557	-0.521	0.430	-0.873
CE	0.492	0.675	0.167	0.078	1	0.376	-0.077	0.401	0.367	-0.331	0.615	0.377	0.607	0.440	0.269	0.631	-0.146	-0.684	0.153
PT	0.260	0.163	0.039	0.160	0.376	1	0.243	0.675	0.932	-0.121	0.018	0.267	0.257	0.455	0.009	0.089	0.030	-0.207	-0.027
PA	-0.018	-0.169	-0.207	-0.370	-0.077	0.243	1	-0.547	0.394	0.559	-0.086	-0.166	-0.386	-0.006	-0.337	-0.032	0.391	0.166	0.374
PRH	0.257	0.257	0.175	0.442	0.401	0.675	-0.547	1	0.509	-0.512	0.090	0.331	0.532	0.408	0.247	0.089	-0.276	-0.294	-0.328
Dap	0.344	0.185	-0.162	0.012	0.367	0.932	0.394	0.509	1	0.010	0.015	0.400	0.198	0.389	-0.124	0.115	0.185	-0.234	0.155
Gr	-0.196	-0.614	-0.052	0.024	-0.331	-0.121	0.559	-0.512	0.010	1	-0.469	-0.495	-0.525	-0.705	-0.839	-0.561	0.007	0.594	-0.170
N	-0.149	0.865	0.151	-0.328	0.615	0.018	-0.086	0.090	0.015	-0.469	1	0.249	0.240	0.442	0.354	0.830	-0.222	-0.860	0.256
P	0.321	0.603	-0.297	-0.377	0.377	0.267	-0.166	0.331	0.400	-0.495	0.249	1	0.227	0.261	0.293	0.494	0.234	-0.615	0.571
K	0.782	0.253	0.400	0.606	0.607	0.257	-0.386	0.532	0.198	-0.525	0.240	0.227	1	0.456	0.269	0.182	-0.380	-0.292	-0.302
Ca	0.321	0.482	-0.225	-0.004	0.440	0.455	-0.006	0.408	0.389	-0.705	0.442	0.261	0.456	1	0.696	0.492	0.285	-0.444	0.207
Mg	0.103	0.528	-0.076	-0.248	0.269	0.009	-0.337	0.247	-0.124	-0.839	0.354	0.293	0.269	0.696	1	0.621	0.315	-0.481	0.397
CIC	-0.101	0.956	-0.002	-0.557	0.631	0.089	-0.032	0.089	0.115	-0.561	0.830	0.494	0.182	0.492	0.621	1	0.171	-0.944	0.633
MO	0.084	0.050	-0.808	-0.521	-0.146	0.030	0.391	-0.276	0.185	0.007	-0.222	0.234	-0.380	0.285	0.315	0.178	1	0.019	0.723
CN	-0.023	-0.989	-0.072	0.430	-0.684	-0.207	0.166	-0.294	-0.234	0.594	-0.860	-0.615	-0.292	-0.444	-0.481	-0.944	0.019	1	-0.492
C	0.000	0.517	-0.514	-0.873	0.153	-0.027	0.374	-0.328	0.155	-0.170	0.571	0.571	-0.302	0.397	0.397	0.633	0.723	-0.492	1

Dónde: **NS.** - Nivel de solución nutritiva, **NC.** - Nivel de composta, **NZ.** - Nivel de mezcla mineral, **CV.** - Coeficiente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **pH.** - Potencial hidronio, **CE.** - Conductividad eléctrica, **PT.**- Porosidad total, **PA.** - Porosidad de aireación, **PRH.** - Porcentaje de retención de humedad, **Dap.** - Densidad aparente, **Gr.**- Granulometría, **N.** - Nitrógeno, **P.** - Fósforo, **K.**- Potasio, **Ca.**- Calcio, **Mg.** - Magnesio, **CIC.**- Capacidad de intercambio catiónico, **MO.** – Materia orgánica, **C/N.**- Relación carbono/nitrógeno y **C.** – Carbono.

Cuadro A. 13. Cuadrados medios de las variables de pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno en sustratos con 15% de humedad gravimétrica.

FV	GL	pH	CE	N	C	MO	C/N
Tratamientos	11	0.828**	1.47**	0.949**	27.15**	104.34**	4440.86**
Error	24	0.033	0.024	0.003	4.08	15.27	0.58
CV (%)		2.63	11.14	7.46	15.25	14.68	1.49

Dónde: **FV.** - Fuente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **pH.** - Potencial hidrógeno, **CE.** - Conductividad eléctrica, **N.-** Nitrógeno total, **C.-** Carbono orgánico, **MO.** - Materia orgánica, **C/N.-** Relación carbono/nitrógeno y **CV (%)**. – Coeficiente de variación.

Cuadro A. 14. Cuadrados medios de las variables de pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno en sustratos con 30% de humedad gravimétrica.

FV	GL	pH	CE	N	C	MO	C/N
Tratamientos	11	0.256**	0.729**	1.280**	16.45	65.38	8989.03**
Error	24	0.009	0.011	0.004	12.52	47.38	0.50
CV (%)		1.37	7.61	7.45	26.60	25.86	1.16

Dónde: **FV.** - Fuente de variación, **GL.** - Grados de libertad, **pH.** - Potencial hidrógeno, **CE.** - Conductividad eléctrica, **N.-** Nitrógeno total, **C.-** Carbono orgánico, **MO.** - Materia orgánica, **C/N.-** Relación carbono/nitrógeno y **CV (%)**. – Coeficiente de variación.

Cuadro A. 15. Prueba de medias de las propiedades químicas de los sustratos con 15 y 30% de humedad gravimétrica.

Tratamiento	15% hg						30% hg					
	pH	CE (dS m ⁻¹)	N	C (%)	MO	C/N	pH	CE (dS m ⁻¹)	N	C (%)	MO	C/N
1	6.04 d	0.91 e	0.192 d	15.66 a	31.66 a	82.5 e	6.87 c	1.07 d	0.087 c	17.00 a	34.66 a	196.5 a
2	7.00 b	1.05 d	0.175 d	19.00 a	37.33 a	106.5 c	7.14 b	1.03 d	0.175 c	12.33 a	25.00 a	71.5 e
3	7.36 a	0.99 e	0.122 d	11.33 b	23.00 b	93.5 d	7.41 b	1.06 d	0.140 c	14.33 a	29.33 a	103.5 c
4	7.04 b	0.66 e	0.157 d	17.66 a	35.33 a	110.5 b	7.15 b	0.76 e	0.105 c	18.33 a	36.00 a	170.5 b
5	6.21 c	0.82 e	0.227 d	13.00 b	26.66 a	57.5 f	6.80 c	0.97 d	0.227 c	13.33 a	26.66 a	59.5 f
6	6.61 c	0.65 e	0.140 d	12.00 b	24.00 b	114.5 a	7.09 b	0.92 d	0.140 c	11.00 a	22.33 a	78.5 d
7	6.96 b	1.31 d	1.837 a	13.33 a	28.33 a	7.5 g	7.28 b	1.49 c	1.995 a	12.33 a	24.00 a	6.5 h
8	6.71 b	2.12 b	1.592 b	10.66 b	21.33 b	8.0 g	7.02 b	1.90 a	1.470 b	11.33 a	23.00 a	8.5 g
9	7.74 a	2.21 b	1.137 c	8.66 b	17.33 b	7.0 h	7.89 a	1.65 b	1.540 b	10.66 a	21.33 a	6.5 h
10	7.47 a	1.67 c	1.330 c	14.66 a	28.33 a	10.5 g	7.38 b	2.15 a	1.610 b	14.00 a	27.66 a	10.5 g
11	7.61 a	1.54 c	1.225 c	11.33 b	22.66 b	9.5 g	7.38 b	2.06 a	1.890 a	13.00 a	25.66 a	7.5 h
12	6.90 b	2.86 a	1.540 b	11.66 b	23.33 b	7.5 h	7.40 b	1.82 b	1.347 b	12.00 a	23.66 a	8.5 g
DMS (p≤0.05)	0.54	0.46	0.239	5.94	11.50	3.03	0.29	0.31	0.264	10.42	20.26	2.80

Dónde: pH. - Potencial hidrógeno, CE. - Conductividad eléctrica, N.- Nitrógeno total, C.- Carbono orgánico, MO. - Materia orgánica, C/N.- Relación carbono/nitrógeno y hg.- Humedad gravimétrica. **DMS (p≤0.05).** - Diferencia mínima significativa con una probabilidad estadística del 5%. Tratamientos con letras distintas presentan significancia estadística diferente (p≤0.05).

Cuadro A. 16. Matriz de correlación de los factores de estudio a las variables de respuestas químicas del sustrato con 15% de humedad gravimétrica.

	15% hg									30% hg								
	NS	NC	NMM	pH	CE	N	MO	CN	C	NS	NC	NMM	pH	CE	N	MO	CN	C
NS	1	0.000	0.000	0.024	-0.029	0.054	-0.109	-0.033	-0.093	1	0.000	0.000	0.092	-0.071	0.010	-0.518	0.141	-0.210
NC	0.000	1	0.000	0.558	0.826	0.966	-0.437	-0.961	-0.421	0.000	1	0.000	0.544	0.902	0.976	-0.250	-0.853	-0.443
NMM	0.000	0.000	1	0.281	0.319	-0.089	-0.569	0.021	-0.574	0.000	0.000	1	0.353	-0.015	-0.083	-0.532	-0.253	-0.143
pH	0.024	0.558	0.281	1	0.465	0.402	-0.438	-0.445	-0.460	0.092	0.544	0.353	1	0.437	0.529	-0.278	-0.474	-0.050
CE	-0.029	0.826	0.319	0.465	1	0.768	-0.509	-0.795	-0.485	-0.071	0.902	-0.015	0.437	1	0.860	-0.243	-0.769	-0.360
N	0.054	0.966	-0.089	0.402	0.768	1	-0.323	-0.938	-0.308	0.010	0.976	-0.83	0.529	0.860	1	-0.181	-0.853	-0.383
MO	-0.109	-0.437	-0.569	-0.438	-0.509	-0.323	1	0.408	0.995	-0.518	-0.250	-0.532	-0.278	-0.243	-0.181	1	0.149	0.614
CN	-0.033	-0.961	0.021	-0.445	-0.795	-0.938	0.408	1	0.383	0.141	-0.853	-0.253	-0.474	-0.769	-0.853	0.149	1	0.326
C	-0.093	-0.421	-0.574	-0.460	-0.485	-0.308	0.995	0.383	1	-0.210	-0.443	-0.143	-0.050	-0.360	-0.383	0.614	0.326	1

Dónde: **NS.** - Nivel de solución nutritiva, **NC.** - Nivel de composta, **NMM.** - Nivel de mezcla mineral, **pH.** - Potencial hidronio, **CE.** - Conductividad eléctrica, **N.**- Nitrógeno total, **MO.** – Materia orgánica, **CN.** – Relación carbono/nitrógeno, **C.**- Carbono orgánico y **hg.**- Humedad gravimétrica.