



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS
EN LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE JITOMATE (*Solanum
lycopersicum* L.)**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

Eva Beatriz Jiménez Kobs



APROBADA



Bajo la dirección del Dr. J. Jesús Magdaleno Villar



Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, febrero de 2024

**EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN LA
PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

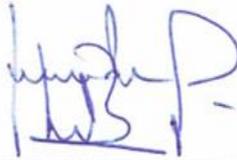
Tesis realizada por **EVA BEATRIZ JIMÉNEZ KOBS** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



Director: _____

Dr. J. Jesús Magdaleno Villar



Co-Director: _____

Dr. Joel Pineda Pineda



Asesor: _____

Dr. Natanael Magaña Lira



Asesora: _____

Dra. María del Rosario García Mateos

LISTA DE CONTENIDOS

LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
DEDICATORIA	ix
AGRADECIMIENTOS	x
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE JITOMATE (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	xii
RESUMEN GENERAL	xii
GENERAL ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Objetivos generales	3
2. REVISIÓN GENERAL DE LITERATURA	4
2.1 Cultivo sin suelo	4
2.2 Cultivo en sustrato	6
2.3 Tipos de sustratos en hidroponía	7
2.3.1 Sustratos orgánicos.....	7
2.3.2 Sustratos inorgánicos.....	8
2.4 Propiedades físicas y químicas de los sustratos	8
2.4.1 Espacio poroso total, capacidad de aireación, capacidad de retención de agua, densidad aparente y densidad real.....	8
2.5 Producción de plántulas en almácigo.....	9
2.6 Sustratos en semillero	11
2.7 Sustratos alternativos a la turba	11
2.8 Sustancias fitotóxicas en los sustratos.....	12
2.9 Compuestos fenólicos en los restos de cultivo	12
3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
SUSTRATOS ALTERNATIVOS EN LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULA DE JITOMATE	19
4. RESUMEN	19
5. INTRODUCCIÓN.....	21
5.1 Objetivos específicos	24
6. MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1 Ubicación y duración del experimento	25

6.2	Tratamientos y diseño experimental	25
6.3	Variables evaluadas	27
6.3.1	Propiedades físicas de los sustratos	27
6.3.2	Extracción y cuantificación compuestos fenólicos	28
6.3.3	Cuantificación de las variables morfológicas del cultivo	29
6.4	Análisis estadístico	29
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
7.1	Caracterización física de sustratos en almácigo.....	30
7.2	Contenido de compuestos fenólicos totales.....	37
7.3	Efecto de los sustratos en el crecimiento de las plántulas	41
8.	CONCLUSIONES	46
9.	RECOMENDACIÓN	48
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN ETAPA DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE BAJO INVERNADERO	53
11.	RESUMEN	53
12.	INTRODUCCIÓN.....	55
12.1	Objetivos específicos	57
13.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	58
13.1	Ubicación y duración del experimento	58
13.2	Tratamientos y diseño experimental	58
13.3	Variables evaluadas	61
13.3.1	Propiedades físicas de los sustratos	61
13.3.2	Cuantificación de las variables morfológicas y de rendimiento del cultivo .	61
	Altura de planta	61
	Diámetro de tallo	61
	Número de hojas.....	62
	Número de flores	62
	Área foliar	62
	Peso de biomasa fresca y seca	62
	Número y peso de frutos por planta.....	62
13.3.3	Cuantificación de las variables de calidad de frutos	62
	Diámetro polar y ecuatorial de frutos	62
	Volumen de frutos	63
	Firmeza y color de frutos	63

Concentración de sólidos solubles totales y Acidez titulable	63
Azúcares solubles totales	63
13.4 Análisis estadístico.....	64
14. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
14.1 Caracterización física de sustratos en producción	65
14.2 Variables de crecimiento.....	72
14.3 Variables de rendimiento y calidad de frutos	75
15. CONCLUSIONES	79
16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Descripción de los tratamientos empleados para producción de plántula de jitomate.....	25
Cuadro 2. Propiedades químicas de los sustratos en almácigo.....	27
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para las propiedades físicas de los sustratos en almácigo.....	30
Cuadro 4. Comparaciones de medias del factor sustrato sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo.....	31
Cuadro 5. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo.....	31
Cuadro 6. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato (S) y el tipo de lavado (L) sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo.....	32
Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza para las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo.....	33
Cuadro 8. Comparaciones de medias del factor sustrato sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo.....	34
Cuadro 9. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo.....	34
Cuadro 10. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado sobre las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo.....	35
Cuadro 11. Cuadrados medios del análisis de varianza del contenido de compuestos fenólicos totales.....	37
Cuadro 12. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento de plántulas en almácigo.....	41
Cuadro 13. Comparaciones de medias del factor sustrato sobre las variables de crecimiento de plántulas en almácigo.....	42
Cuadro 14. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre la altura de plántula, el diámetro del tallo y el número de hojas de plántulas en almácigo.....	42
Cuadro 15. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre el área foliar, peso fresco y peso seco de plántulas en almácigo.....	43
Cuadro 16. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado sobre la altura de plántula, el diámetro del tallo y el número de hojas.....	43
Cuadro 17. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado sobre el área foliar, peso fresco y peso seco de plántulas en almácigo.....	44
Cuadro 18. Descripción de los tratamientos empleados en la producción de jitomate hidropónico bajo invernadero.....	58
Cuadro 19. propiedades químicas de los sustratos empleados en producción de jitomate.....	61
Cuadro 20. Cuadrados medios de las propiedades físicas de los sustratos antes del ciclo de producción de jitomate.....	65
Cuadro 21. Comparación de medias de las propiedades físicas de los sustratos antes del ciclo de producción de jitomate.....	66
Cuadro 22. Cuadrados medios de las propiedades físicas de los sustratos después del	

ciclo de producción de jitomate	66
Cuadro 23. Comparación de medias de las propiedades físicas de los sustratos después del ciclo de producción de jitomate	67
Cuadro 24. Comparación de medias de las propiedades físicas de sustratos en campo antes (AC) y después del ciclo (DC) de producción de jitomate	68
Cuadro 25. Cuadrados medios de las variables de crecimiento de jitomate	73
Cuadro 26. Comparaciones de medias de las variables de crecimiento del jitomate	73
Cuadro 27. Cuadrados medios de las variables de crecimiento de jitomate	74
Cuadro 28. Comparaciones de medias de área foliar, peso fresco y peso seco de jitomate.....	74
Cuadro 29. Cuadrados medios de las variables de rendimiento en los diferentes sustratos utilizados en la producción de jitomate	75
Cuadro 30. Comparaciones de medias de las variables de rendimiento en los diferentes sustratos utilizados en la producción de jitomate	75
Cuadro 31. Cuadrados medios de las variables de tamaño de frutos.....	76
Cuadro 32. Comparaciones de medias de las variables de tamaño de frutos.....	76
Cuadro 33. Cuadrados medios de los parámetros de calidad de frutos	77
Cuadro 34. Comparaciones de medias de los parámetros de calidad de frutos	77

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Curva de liberación de humedad. S1: Turba; S2: Paja de avena; S3: Paja de maíz; SI: Sustrato ideal.	36
Figura 2. Curva de liberación de humedad. S2M1: Paja de avena/sin mezcla; S2M2: Paja de avena/tezontle; S3M1: Paja de maíz/sin mezcla; S3M3: Paja de maíz/tezontle	36
Figura 3. Comparaciones de medias del contenido total de fenoles en los sustratos en almácigo. S1: Turba; S2: paja de avena; S3: paja de maíz. Letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha= 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.	38
Figura 4. Comparaciones de medias del contenido de compuestos fenólicos totales en las interacciones del tipo de sustrato y el tipo de mezcla. S2M1: paja de avena sin mezcla; S2M2: paja de avena/tezontle (50/50 v/v). S3M1: paja de maíz sin mezcla; S3M2: paja de maíz/tezontle (50/50 v/v). Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha= 0.05$) DMSH: diferencia mínima significativa honesta.	39
Figura 5. Comparaciones de medias del contenido de compuestos fenólicos totales en las interacciones del tipo de sustrato y el tipo de lavado. S2L1: paja de avena/sin lavado; S2L2: paja de avena/doble lavado; S2L3: paja de avena/lavado con agua caliente. S3L1: paja de maíz/sin lavado; S3L2: paja de maíz/doble lavado; S3L3: paja de maíz/lavado con agua caliente. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha= 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.	40
Figura 6. Curva de liberación de humedad de sustratos en producción antes y después de ciclo. S1AC: sustrato 1 antes de ciclo; S1DC: sustrato 1 después de ciclo. S2AC: sustrato 2 antes de ciclo; S2DC: sustrato 2 después de ciclo. S3AC: sustrato 3 antes de ciclo; S3DC: sustrato 3 después de ciclo. S4AC: sustrato 4 antes de ciclo; S4DC: sustrato 4 después de ciclo. S5AC: sustrato 5 antes de ciclo; S5DC: sustrato 5 después de ciclo. S6AC: sustrato 6 antes de ciclo; S6DC: sustrato 6 después de ciclo; SI: sustrato ideal.	72

DEDICATORIA

*A la niña que soñó con volar...
Y a quienes acompañaron su vuelo.*

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el otorgamiento de la beca para la realización de la maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y en su nombre a las autoridades, docentes y funcionarios que contribuyeron a mi formación.

A los miembros del comité asesor de esta tesis con quienes ha sido un honor trabajar: Al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar, al Dr. Joel Pineda Pineda, al Dr. Natanael Magaña Lira y a la Dra. María del Rosario García Mateos, por la orientación y los recursos brindados para la ejecución y desarrollo del trabajo.

Con mención especial al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar, quien dirigió la tesis, por su predisposición, guía y apoyo desde la primera propuesta del proyecto.

Al Ing. Ignacio Salazar Salazar, a la Sra. Ma. Inés Acosta Martínez y al Sr. Luis Angel Romero Rivero, por su colaboración en la fase de investigación en campo.

A la Dra. Lyzbeth Hernández Ramos y a la Lic. Itzel Nayelli González por su orientación en las determinaciones de laboratorio.

Con toda estima, a mis compañeros y amigos del posgrado por su acompañamiento en todo este proceso.

De manera entrañable, al M.C. Marcelo Esteban Medina Aquino y en su nombre a todos mis amigos de toda la vida por su confianza y apoyo incondicional en cada etapa.

Y a mi mayor inspiración, mi familia.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombres y apellidos: Eva Beatriz Jiménez Kobs
Fecha de nacimiento: 14 de febrero de 1994.
Lugar de nacimiento: Yatyty-Itapúa / Paraguay.
CURP: JIKE940214MNEMBV05
Profesión: Ingeniera Agropecuaria

Desarrollo académico

Bachillerato: Colegio Nacional Graciela Dávalos Martínez (Paraguay).
Licenciatura: Universidad Nacional de Itapúa (Paraguay).

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)

RESUMEN GENERAL

La elección de sustratos hidropónicos puede ser importante para el manejo del cultivo en la búsqueda de alternativas económicas para mejorar la productividad de jitomate en invernadero. El objetivo de esta investigación fue evaluar la factibilidad de uso de sustratos orgánicos alternativos a los convencionales sobre el desarrollo de plántulas y en la producción de jitomate. Se llevaron a cabo dos experimentos: para el experimento en almácigo se evaluaron sustratos a base de paja de avena y maíz solos y en mezcla con tezontle (50/50 v/v) con diferentes tipos de lavado (sin lavado, doble lavado y agua caliente) y como control se utilizó el sustrato turba/perlita, totalizando trece tratamientos; para el experimento en producción se evaluaron seis tratamientos consistentes en la mezcla de paja de avena o maíz con tezontle en proporciones de (75/25 y 50/50 v/v) y dos tratamientos control: fibra de coco y tezontle. En almácigo se evaluaron las propiedades físicas de los sustratos, el contenido de compuestos fenólicos totales en los sustratos y se cuantificaron algunas variables morfológicas de las plántulas. En producción se evaluaron las propiedades físicas de los sustratos antes y después del ciclo de cultivo, variables morfológicas y de rendimiento de las plantas en producción y parámetros de calidad del fruto. Se encontró que el doble lavado y la mezcla con tezontle disminuyeron el contenido total de compuestos fenólicos, la mezcla también mejoró las características físicas de los sustratos. El sustrato a base de turba tuvo mejores características físicas y en él se desarrollaron mejor las plántulas. Las características físicas de los sustratos en mezcla utilizados en producción mejoraron al final del ciclo, pero no llegaron a los valores ideales. No se encontraron diferencias entre los tratamientos utilizados para las variables de crecimiento, rendimiento y calidad del fruto.

Palabras claves: Cultivos sin suelo, medios de cultivo, semillero, restos de cultivo, compuestos fenólicos.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autora: Eva Beatriz Jiménez Kobs

Director de tesis: Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

EVALUATION OF ALTERNATIVE ORGANIC SUBSTRATES IN THE HYDROPONIC PRODUCTION OF TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.)

GENERAL ABSTRACT

Selection of substrates can be important for crop management in the search for economic alternatives to improve tomato productivity in the greenhouse. The aim of this study was to evaluate the potential of using alternative organic substrates as replacements for conventional ones for tomato seedling and production stages. Two experiments were carried out: in the seedling experiment, substrates made of oat and corn straw were tested alone and in a 50/50 v/v blend with volcanic rock (tezontle), with different washing methods (no washing, double washing, and hot water). The reference substrate used was peat/perlite, resulting in thirteen treatments. In the production experiment, six treatments were tested, consisting of blends of oat or corn straw with tezontle in ratios of 75/25 and 50/50 v/v, and two reference treatments: coconut fiber and tezontle. In nursery stage, the physical properties of the substrates were assessed, the total phenol content in the substrates was measured, and variables related to seedling growth were recorded. In production stage, the physical properties of the substrates before and after the growing cycle, the morphological and yield variables of the plants in production, and the fruit quality parameters were measured. It was found that double washing and mixing with tezontle reduce the total phenol content, while also enhancing the physical characteristics of the substrates. The peat-based substrate showed better physical characteristics and higher seedling growth. The physical properties of the mixed substrates used in production improved at the end of the cycle but did not reach optimal values; no differences were found among the treatments for growth, yield, and quality variables.

Key words: Soilless culture, growing media, nursery, crop remains, phenolic compounds.

Master's degree Thesis, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Eva Beatriz Jiménez Kobs

Advisor: Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), pertenece a la familia Solanaceae. Es una planta herbácea cultivada como planta anual, de origen centro y sudamericano. Actualmente es cosmopolita, cultivada para consumo en fresco e industrializado (Allende et al., 2017). Se distribuye en todo el mundo con el mayor número de especies en las regiones tropicales o subtropicales y especialmente concentradas en Sudamérica. Es originario de la región andina, particularmente de Perú, Ecuador, Bolivia, Chile. Sin embargo, se considera a México como centro de domesticación (Nee, 1986).

De acuerdo con FAOSTAT (2021), México es el noveno país productor de jitomate fresco del mundo con 4.5 millones de toneladas. Este país es el principal exportador a nivel mundial con una participación en el mercado de 25 % del valor total, que se destinan principalmente a los Estados Unidos. Se exporta alrededor de la mitad del volumen de la producción nacional. En 2016, el valor de las exportaciones alcanzó 1773 millones de dólares. En 2017, la superficie de jitomate cultivada en México fue de 37 mil hectáreas en campo abierto y 15 mil hectáreas bajo invernadero.

Entre 2007 y 2017 la producción de jitomate obtenida en invernadero o agricultura protegida aumentó en una tasa promedio anual de 23 %. Esta producción se comercializa a precios superiores a la obtenida en campo abierto. La agricultura protegida ha modificado las formas de producir alimentos y ha generado múltiples ventajas para los productores (Ramos-Fernández et al., 2021).

El jitomate es de gran importancia debido a su elevada demanda por los consumidores. Es la hortaliza más popular y aceptada en la cultura gastronómica del mundo, y se cultiva en más de cien países para consumo en fresco o para su industrialización. La importancia agrícola del cultivo es la gran adaptabilidad que posee para obtener elevadas producciones, ya que permite que se exploten tanto en climas tropicales como en templados de diversas regiones (Steduto et al., 2012; Santiago & Borrego, 1998). Cobra relevancia económica y social al generar divisas y empleos. Los sistemas de producción de esta hortaliza se han ido diversificando con el fin de incrementar el rendimiento, incorporando tecnologías novedosas como cubiertas plásticas, riego por goteo e hidroponía (Ortega-Martinez et al., 2010).

Además de ser una de las hortalizas de mayor consumo a nivel mundial, cada día es mayor el área cultivada de jitomate en invernadero, ya que cada vez se busca encontrar sistemas de producción que incrementen el rendimiento y calidad (Sánchez-Del Castillo et al., 2009; Balaguera-López et al., 2009).

Esta situación, junto con la demanda creciente de alimentos y el deterioro del medio ambiente, ha obligado a los productores a utilizar técnicas que permitan el uso de los recursos de manera más eficiente y sustentable (Espinosa, 2004).

El sistema de producción de cultivos hidropónicos es una tecnología utilizada para producir cosechas donde las plantas del cultivo están en soluciones nutritivas (agua y fertilizantes) con o sin el uso de un sustrato, para proveer el soporte mecánico (Sánchez-Del Castillo & Escalante-Rebolledo, 1988). Actualmente, los sistemas de producción en condiciones de invernadero e hidroponía permiten realizar una fertilización diaria, en función del ciclo de cultivo, del sustrato y del agua de riego (Vargas-Canales et al., 2014).

Utilizar sistemas de cultivo como la hidroponía tiene un alto grado de eficiencia en el uso de agua, ya que se reducen las pérdidas por evaporación y se evita la percolación. Además, es poco el sustrato que debe recibir el riego, porque las raíces no necesitan crecer en exceso para buscar sus nutrientes, pues el método les permite llegar directamente a la raíz en las cantidades necesarias para el óptimo desarrollo de la planta, ya que ésta se encuentra en bolsas de plástico utilizadas como contenedor (Espinosa, 2004). Sin embargo, los cultivos hidropónicos también tienen sus desventajas ambientales y económicas, dependiendo del sistema de producción pueden tener altos costos de inversión (Savvas, 2003).

Por eso la elección de sustratos puede ser importante a la hora de eficientizar la producción y obtener alternativas más económicas. En este sentido, el uso de materiales orgánicos podría ser una buena alternativa ya que se pueden obtener de manera relativamente más barata y se puede abastecer de fuentes naturales (Papadpoulos et al., 2008). Aunque estos materiales también pueden acarrear algunos problemas por su inestabilidad por la actividad biológica y su degradación a través del tiempo (Olle et al., 2012).

La evaluación de diversos materiales como sustratos hidropónicos, puede ser una opción

para encontrar alternativas factibles y económicamente accesibles para los productores, que no solo permitan reducir los costos de producción, sino que posean características y propiedades favorables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

1.1. Objetivos generales

Evaluar la factibilidad de uso de sustratos orgánicos alternativos a los convencionales, solos o en mezcla con sustratos inorgánicos de bajo costo, sobre el desarrollo de plántulas de jitomate en semillero.

Determinar la factibilidad de uso de sustratos orgánicos alternativos a los convencionales, en mezcla con sustratos inorgánicos de bajo costo, sobre los componentes agronómicos en la producción de jitomate hidropónico bajo invernadero.

2. REVISIÓN GENERAL DE LITERATURA

2.1 Cultivo sin suelo

El suelo es el medio natural en el que se desarrollan las raíces de la mayoría de las plantas. En él encuentran anclaje, oxígeno, agua y en esta última los elementos nutritivos disueltos. Sin embargo, una planta es capaz de crecer fuera del suelo, siempre y cuando tenga en una adecuada proporción de lo anteriormente mencionado y que disponga de una rizósfera en la que estén presentes todos los nutrientes necesarios (Cánovas-Martínez & Magán-Cañadas, 2003).

En un invernadero, la producción de cultivos es muy intensiva y para evitar impactos negativos es necesaria la adopción de prácticas y tecnologías adecuadas (Koukounaras, 2020).

El suelo en un invernadero, como medio de natural de crecimiento es heterogéneo, se degrada a causa del monocultivo y el exceso de fertilización, y pueden proliferar patógenos, por eso las ventajas que poseen los sistemas de cultivo sin suelo los posicionan como uno de los componentes tecnológicos más importantes en la producción en invernadero (Gruda et al., 2018).

Cultivo sin suelo es cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo, pudiéndose cultivar en una solución nutritiva, o sobre cualquier sustrato donde se adiciona solución nutritiva (Baixauli & Aguilar, 2002).

Entre las ventajas principales de una producción en sistemas de cultivo sin suelo, se destaca la independencia del suelo como medio de enraizamiento, ya que esto permite la optimización de las características tanto físicas, como químicas en el entorno de la raíz y un control más eficiente de los patógenos (Gruda et al., 2018). Los sistemas de cultivo sin suelo permiten controlar y regular la provisión de agua, nutrientes y oxígeno según las necesidades del sistema radical mediante la solución nutritiva, todo esto, en función de la etapa del cultivo y las necesidades puntuales y reales del cultivo (Pignata et al., 2017).

A pesar de las desventajas que pueden tener los sistemas de cultivo sin suelo que pueden

ser los altos costos de instalación y la necesidad de tener habilidades técnicas para manejarlo; los sistemas de cultivo sin suelo son un método de cultivo flexible que permite tener control total sobre el entorno del cultivo, lo que podría aumentar la eficiencia en el uso de agua y reducir el impacto ambiental de los invernaderos (Putra & Yuliando, 2015).

Con el sistema de cultivo sin suelo es posible obtener hortalizas de excelente calidad y sanidad, con un uso más eficiente del agua y los nutrientes. Basados en la experiencia, esto junto a diferentes factores que afectan el comportamiento agronómico de los cultivos, los rendimientos por unidad de área cultivada son altos debido a una mayor densidad, mayor productividad por planta y eficiencia en el uso de los recursos agua, luz y nutrientes (Beltrano & Gimenez, 2015; Savvas & Gruda, 2018).

El cultivo sin suelo ha evolucionado a través de la utilización de sustratos artificiales en el sistema de hidroponía. Estos sustratos son preferibles en comparación con el suelo debido a sus propiedades fisicoquímicas que permiten un mayor control sobre factores como la disponibilidad de agua, la aireación, el suministro de nutrientes y la distribución de las raíces (Ehret et al., 2001).

Hay dos tipos principales de cultivo sin suelo, teniendo en cuenta la forma de utilización de la solución nutritiva: el sistema cerrado donde la solución nutritiva se recicla y se recircula cuidando las concentraciones de los nutrientes y reequilibrando de ser necesario, y sistema abierto donde es utilizada una nueva solución nutritiva para cada ciclo de riego (El-Kazzaz & El-Kazzaz, 2017). Puede ser con sustrato o sin agregados, donde las raíces de las plantas llegan a una solución nutritiva aireada, que puede ser fluida o estática (Fussy & Papenbrock, 2022).

Dentro de la agricultura sin suelo se pueden encontrar la agricultura hidráulica o hidroponía, agricultura acuática o acuicultura, la agricultura aeróbica o aeroponía y la agricultura en sustrato (Sharma et al., 2018). El término hidroponía deriva del griego hydro que significa agua y ponos que significa trabajo, es decir, 'trabajo del agua' o 'actividad del agua' (Beibel, 1960; Zárate-Aquino, 2014).

Se originó en el siglo XIX como resultado de la investigación sobre cómo las plantas absorben nutrientes, llevada a cabo por fisiólogos como Woodward y De Saussure (Zárate-Aquino, 2014).

En los primeros tiempos de la técnica hidropónica, el sustrato original utilizado fue el agua. Más tarde, se introdujeron sustratos sólidos que simplificaron el manejo. En la actualidad, se practican tres tipos de cultivo: en agua, en grava y en agregados (Zárate-Aquino, 2014).

En un sistema hidropónico con sustrato, las plantas desarrollan sus raíces en medios de soporte sólidos, idealmente inertes, que les proporcionan estabilidad, mientras que los nutrientes se suministran típicamente a través de sistemas de riego (Rodríguez-Delfín, 2011). Esta técnica se denomina medio sólido, cultivo en sustrato o cultivo en agregado (Fussy & Papenbrock, 2022). La producción de cultivos en sustratos que son materiales sólidos, inorgánicos u orgánicos, son relevantes para la producción eficiente e intensiva de plantas hortícolas dentro de sistemas sin suelo (Gruda & Fernández, 2022).

2.2 Cultivo en sustrato

Un sustrato se puede definir como cualquier material sólido, de origen natural o sintético, que reemplaza al suelo y cumple la función de proporcionar soporte mecánico a la planta (Castañares, 2020). Estos materiales deben estar aislados del suelo, y sus características juegan un papel importante en el ciclo de vida de las plantas, como determinar el mantenimiento de la solución nutritiva a niveles correctos (Vinci & Rapa, 2019).

Las propiedades físicas e hidráulicas de la mayoría de los sustratos son superiores a las del suelo. En general, permiten una simultánea optimización de la disponibilidad de agua y oxígeno y la matriz que retiene el agua en los sustratos es mucho más débil que en el suelo por lo que la planta invierte mucho menos energía para obtener agua. Los macroporos de los sustratos se llenan de aire permitiendo que la difusión de oxígeno sea lo suficientemente alta para que la planta no corra riesgo de sufrir deficiencia como puede ocurrir con plantas que crecen en suelos con anegación o cercano a capacidad de campo (Raviv et al., 2019).

En contrapartida, las soluciones del suelo están mejor amortiguadas por reacciones de intercambio iónico, adsorción, disociación y precipitación, así como por el ciclo de nutrientes y mineralización de la materia orgánica. La ausencia de una capacidad amortiguadora similar en los sistemas de cultivo sin suelo requiere el uso de altas

concentraciones de nutrientes (Di Lorenzo et al., 2013). Sin embargo, la disponibilidad de nutrientes para las raíces de las plantas se puede manipular y controlar mejor en cultivos sin suelo que en la mayoría de los suelos cultivables (Raviv et al., 2019).

No existe un sustrato ideal porque ningún sustrato tiene todas las características necesarias: ser químicamente inerte, no compactable, capaz de retener suficiente humedad para suministrar agua y nutrientes para las plantas, no ser salino y ser de fácil acceso y de bajo costo (Rodríguez-Delfín, 2011). Por lo tanto, es apropiado seleccionar cuidadosamente los materiales de acuerdo con las diferentes condiciones en las que se utilizarán: el medio ambiente, las especies a cultivar, la fase y necesidades del cultivo (germinación, enraizamiento de esquejes, producción, fitomejoramiento) y sistema de cultivo (Di Lorenzo et al., 2013).

En algunos casos, es necesario mezclar materiales en diferentes proporciones, para mejorar la retención de agua y la aireación y obtener una mezcla más ligera, como medio de cultivo (Gruda et al., 2016). Los recursos biológicos y las materias primas renovables tienen un gran potencial para su uso como constituyentes de medios de cultivo (Gruda, 2022). Mediante la mezcla de constituyentes orgánicos e inorgánicos en diferentes proporciones se puede lograr satisfacer las demandas fisiológicas específicas de la planta (Gohardoust et al., 2020).

Se pueden utilizar materiales orgánicos o inorgánicos como constituyentes, los sustratos retienen reservas de solución nutritiva, amortiguando así las interrupciones en el suministro de agua y nutrientes, y protegen las raíces de las fluctuaciones de temperatura (Savvas et al., 2013).

2.3 Tipos de sustratos en hidroponía

2.3.1 Sustratos orgánicos

La mayoría de los materiales de los sustratos orgánicos deben pasar por un procedimiento de compostaje con el fin de prepararlos para su uso como sustratos. Algunos ejemplos de estos materiales incluyen cáscaras de arroz, pajas de cereales, fibra de coco, restos de uva, cortezas de árboles, aserrín y virutas de madera, desechos

urbanos sólidos, lodos de tratamiento de aguas residuales, entre otros (Andreau et al., 2015).

2.3.2 Sustratos inorgánicos

Los sustratos inorgánicos pueden ser de origen natural sin modificaciones como la arena y la piedra pómez. También pueden ser de origen sintético que son materiales procesados como la lana de roca, perlita o vermiculita (Bar-Tal et al., 2019).

2.4 Propiedades físicas y químicas de los sustratos

El sustrato está formado por tres fases: fase sólida, constituida por las partículas del sustrato propiamente dicha; fase líquida, constituida por el agua o solución que contiene sustancias disueltas; y fase gaseosa, que es el aire en los poros del sustrato (Andreau et al., 2015).

Las propiedades físicas deseables en los sustratos son porosidad entre 85-95 %, un adecuado balance de macro y microporos, alta capacidad de retención de agua y que esta sea fácilmente disponible. Los niveles hídricos óptimos en los sustratos son: agua fácilmente disponible con valores 20 a 30 %, agua de reserva de 4 a 10 %, agua total disponible de 24 a 40 % y capacidad de aireación (suficiente oxigenación) de 20 a 30%, baja densidad aparente, estructura estable, que impida la compactación del sustrato. Dentro de las propiedades químicas son preferibles sustratos con baja o suficiente capacidad de intercambio catiónico; en función de la fertilización aportada, suficiente nivel de nutrientes asimilables, baja salinidad, elevada capacidad tampón de pH, pH adecuado y lenta velocidad de descomposición (Abad et al., 2005; Castilla, 2013; Torres et al., 2017).

2.4.1 Espacio poroso total, capacidad de aireación, capacidad de retención de agua, densidad aparente y densidad real

La porosidad total y sus componentes se expresan como porcentaje del volumen total del medio. El volumen combinado de las fases acuosa y gaseosa del medio se define como su espacio poroso total. El espacio poroso total está relacionado con la forma, el tamaño

y la disposición de las partículas del medio (Wallach, 2019).

En horticultura, la capacidad de aireación, se define como el porcentaje volumétrico del medio lleno de aire al final del drenaje libre (gravimétrico). La mayoría de los medios y mezclas tienen una capacidad de aireación de 10 - 30 %. Dado que el nivel del agua descansa en el fondo de los contenedores de cultivo después del riego, la capacidad de aireación óptima puede variar mucho según el tamaño del contenedor y la frecuencia de riego (Wallach, 2019).

La capacidad de retención de agua de un medio específico depende de la distribución del tamaño de las partículas y la altura del contenedor. Cuando un medio en particular se ha llenado completamente de agua y se ha permitido que drene por completo, se dice que el medio ha alcanzado su capacidad máxima. El volumen del medio ocupado por el aire a este nivel de humedad es la denominada porosidad de aireación o espacio drenable de poros (Ingram et al., 1993; Acosta-Durán et al., 2004).

Densidad aparente es una medida de la densidad práctica de los sustratos, que consiste en una medida ponderada entre el volumen total del sustrato y la densidad real de las partículas sólidas que la componen junto con el volumen que ocupa el espacio poroso total (Urrestarazu-Gavilán, 2015), mientras que la densidad real o de partículas está representada por el mismo peso con relación al volumen del material sólido (Pire & Pereira, 2003).

2.5 Producción de plántulas en almácigo

Un almácigo es el lugar en donde son sembradas las semillas bajo condiciones semi controladas especialmente temperatura y humedad, donde el desarrollo es monitoreado hasta que las plántulas alcanzan el tamaño adecuado para ser trasladadas al lugar definitivo (Díaz-Royo et al., 2019). La operación en la que las plántulas son trasladadas del almácigo al terreno definitivo se denomina trasplante. Se realiza utilizando plantines con hojas y un sistema radical parcialmente desarrollado. Esta práctica ayuda a anticipar la producción y ahorrar en la cantidad y costo de las semillas (Ramoá, 2013).

La producción de plántulas se puede realizar en bandejas de diferentes materiales, principalmente poliestireno o plástico estas pueden variar según su tamaño y el número

de celdas individuales. Se puede realizar asimismo en bloques de medios de cultivo sin paredes físicas o en contenedores individuales. El número de etapas de producción de trasplantes también puede variar desde una plantación de una etapa, hasta dos etapas para algunas hortalizas de fruto. Dos etapas significan un trasplante adicional de un primer recipiente pequeño a un segundo más grande antes de trasplantar al suelo (Pascual et al., 2018).

La producción de plántulas en almácigos además de conseguir una germinación y crecimiento uniforme y una menor incidencia de enfermedades puede llegar a generar el desarrollo empresarial en las áreas rurales, el desarrollo a pequeña escala de industrias y comercios relacionados, la generación de empleos, difusión de tecnologías como variedades e híbridos y menos pérdidas económicas en la compra de semillas que muchas veces resultan ser muy costosas (Pandiyyaraj et al., 2017).

El uso de trasplantes de alta calidad es fundamental para el éxito en la producción de plantas de invernadero. Una vez trasplantadas, las plántulas deben tolerar los desafíos ambientales y continuar creciendo para lograr un rendimiento óptimo. La técnica ideal para cultivar trasplantes es cultivar la planta de principio a fin mediante un crecimiento lento, constante e ininterrumpido y con un estrés mínimo (Kubato et al., 2013).

Las plántulas de alta calidad generalmente se definen como aquellas con 1) ausencia de infecciones de enfermedades o plagas, 2) capacidad de sobrevivir en ambientes desfavorables después del trasplante, 3) sistema de raíces bien desarrollado y 4) área foliar bien desarrollada sin defectos visibles en las hojas tales como como clorosis o necrosis (Balliu et al., 2017a).

Los factores que afectan a la calidad de las plántulas pueden ser varios y el crecimiento de las mismas es un resumen de muchos factores que interactúan y se moderan entre sí (Balliu et al., 2017b); como por ejemplo la manipulación de la temperatura (Kubato et al., 2013); el tamaño del cepellón, la edad del trasplante y su manejo (Balliu et al., 2017a); el uso de bioestimulantes (Moncada et al., 2020); la manipulación de la irrigación (Ahmed et al., 2000); la solución nutritiva y su combinación con el sustrato (Moncada et al., 2020; Michelon et al., 2021); la formulación del sustrato y sus propiedades físicas y químicas (Ceglie et al., 2015).

2.6 Sustratos en semillero

Uno de los componentes más importantes para la producción de plántulas son los medios de cultivo. Las características del medio de cultivo y la nutrición son los principales factores que afectan la calidad de las plántulas (Tuzel & Ostekin, 2017). El éxito de la producción en viveros depende en gran medida de las propiedades físicas y químicas de los sustratos, la ausencia de plagas y patógenos, la bioestabilidad, así como, la inercia biológica, por lo que la elección de un medio de cultivo debe hacerse teniendo en cuenta estas consideraciones, además debe basarse en la viabilidad económica de los productos a utilizarse (Pandiyaraj et al., 2017; Gruda et al., 2013).

La respuesta de las plantas a diferentes sustratos está estrictamente relacionada con la especie. No todos los materiales son sustratos ideales para el crecimiento de plantas en viveros ya que ciertos factores pueden limitar su uso (Gavilanes-Terán, 2017).

En general, un sustrato debe tener buena porosidad al aire y capacidad de retención de agua, mantener el pH en el intervalo óptimo (de 5,5 a 6,5 en general). Un pH demasiado alto o demasiado bajo puede causar deficiencia de micronutrientes o toxicidad, respectivamente (Kubato et al., 2013).

En condiciones de invernadero y en la producción de plántulas en semillero, el componente principal de los sustratos y que es ampliamente utilizado, es el material a base de turba. Aproximadamente de 14 a 20 % de la turba extraída se entrega al sector de la horticultura y debido al alto costo de extracción, transporte y restricciones ambientales, se han examinado alternativas para este sustrato (Tzortzakis et al., 2022).

2.7 Sustratos alternativos a la turba

Existe la posibilidad de utilizar sustratos fabricados con materiales disponibles localmente, como desechos de la agro-industria, compost de residuos orgánicos variados, cáscara de arroz, entre otros. Estos materiales deben ser estables, estar disponibles en el lugar y durante todo el año, de tamaños homogéneos, libres de semillas de malezas, enfermedades, insectos o sustancias tóxicas para las plantas (Ramoá, 2013).

Cuando se utilizan materiales orgánicos renovables como sustitutos de la turba o la lana mineral, pueden ocurrir varios problemas, como la posible presencia de compuestos orgánicos no deseados y exceso de elementos minerales, una bioactividad descontrolada en la zona radical, la conservación de las propiedades originales del sustrato a lo largo del ciclo de cultivo, y la continua disponibilidad de estos materiales en el mercado. La considerable variabilidad de estos materiales, que depende tanto de la materia prima utilizada como de la técnica de producción, es probablemente una de las mayores barreras para la adopción de sustratos de cultivo orgánicos renovables (Tzortzakis et al., 2022).

2.8 Sustancias fitotóxicas en los sustratos

Se pueden disponer de numerosas mezclas de sustratos; sin embargo, cuando estos se caracterizan por su fitotoxicidad, inestabilidad, alto costo o disponibilidad limitada terminan siendo rechazados (Madjar et al., 2014).

Si se considera la utilización de rastrojos de cultivo, es importante tener en cuenta que existe un tipo de alelopatía que se denomina residual, y este efecto se observa a partir de la descomposición de los residuos de plantas. La descomposición proporciona la mayor cantidad de aleloquímicos que se pueden agregar a la rizósfera; sin embargo, esto depende del vegetal en descomposición, el tipo de suelo o sustrato y la condición de descomposición (Dahiya et al., 2017; Zhang et al., 2021).

Es conocido el potencial alelopático que poseen los cultivos de cereales como el maíz, trigo, arroz, sorgo, entre otros. Este potencial alelopático puede tener efectos nocivos sobre otros cultivos (Jabran & Farooq, 2013). Entre las sustancias conocidas como alelopáticas están los metabolitos secundarios, y entre éstos, los compuestos fenólicos que son capaces de aumentar la permeabilidad de la membrana celular, interrumpir la división celular y alterar las funciones enzimáticas de la planta (Li et al., 2010). Asimismo, pueden reducir la asimilación de nutrientes (Putnam & Duke, 1985).

2.9 Compuestos fenólicos en los restos de cultivo

Los compuestos fenólicos se distribuyen de manera ubicua en la mayoría de los tejidos

vegetales (De la Rosa et al., 2019). Suelen estar presentes en forma soluble o ligada conjugada con azúcares o ácidos orgánicos y son típicamente componentes de estructuras complejas como ligninas y taninos hidrolizables. En los cereales los compuestos fenólicos están presentes en su forma libre y soluble, así como en su forma insoluble y ligada (Adom & Liu, 2002; Lattanzio, 2013). Los compuestos fenólicos mayormente encontrados en los cereales como el de maíz y el trigo son los flavonoides y los ácidos fenólicos entre los cuales están el ácido ferúlico y el ácido p-cumárico (Ishii, 1997; Pan et al., 1998; Torre et al., 2008; Vázquez-Olivo et al., 2019; Bueno-Herrera & Pérez Magariño, 2020).

3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Durán, C. M., Acosta-Peñaloza, D., Cazárez, M., & Martínez, Y. M. (2004). Retención de humedad de materiales para la preparación de sustratos en la producción de plantas en contenedor. *Investigación Agropecuaria*, 1(1), 18-22.
- Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182-6187.
- Ahmed, A. K., Cresswell, G. C., & Haigh, A. M. (2000). Comparison of sub-irrigation and overhead irrigation of tomato and lettuce seedlings. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75(3), 350-354.
- Allende, M., Salinas, L., & Torres, A. (2017). Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. *Boletín INIA*, (12). p112. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6708/Bolet%C3%ADn%20INIA%20N%C2%B0%20377?sequence=1&isAllowed=y>
- Andreau, R., Giménez, D. O., & Beltrano, J. (2015). Soluciones nutritivas I. En J. Beltrano, & D.O. Giménez, (Eds.), *Cultivo en Hidroponía* (pp. 73-90). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Baixaui S., C. & Aguilar O., J.M. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias*. Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Balaguera-López, H. E., Alvarez-Herrera, J. G., Martínez-Arévalo, G. E., & Balaguera, W. A. (2009). El contenido de arcilla del suelo influye en el rendimiento de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2), 199-209.
- Balliu, A., Maršić, N. K., & Gruda, N. (2017a). Seedling production. In W. Baudoin, A. Nersisyan, A. Shamilov, A. Hodder, D. Gutierrez, S. Pascale, ... & J. Tany (Eds.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European Countries—Principles for sustainable intensification of smallholder farms* (pp. 189-206). FAO Plant Production and Protection Paper.
- Balliu, A., Sallaku, G., & Nasto, T. (2017b). Nursery management practices influence the quality of vegetable seedlings. *Italus Hortus*, 24(3), 39-52.
- Bar-Tal, A., Saha, U. K., Raviv, M., & Tuller, M. (2019). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 259-301). Elsevier.
- Beibel, J. P. (1960). *Hydroponics -The science of growing crops without soil*. Department of Agriculture.
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Bueno-Herrera, M., & Pérez-Magariño, S. (2020). Validation of an extraction method for the quantification of soluble free and insoluble bound phenolic compounds in wheat by HPLC-DAD. *Journal of Cereal Science*, 93, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102984>
- Cánovas-Martínez, F., & Magán-Cañada, J.J. (2003). Cultivos sin suelo. En F. Camacho (Ed.), *Técnicas de producción en cultivos protegidos*. Instituto Cajamar.
- Castañares, J. L. (2020). El ABC de la Hidroponía. *INTA Digital*. Recuperado de https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/8023/INTA_Di

reccionNacional_EEAAMBA_Casta%*c*3%*b*1ares_JL_ABC_de_la_hidroponia.pdf
?sequence=1&isAllowed=y

- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*, (2nd ed.). CABI.
- Ceglie, F. G., Bustamante, M. A., Ben Amara, M., & Tittarelli, F. (2015). The challenge of peat substitution in organic seedling production: optimization of growing media formulation through mixture design and response surface analysis. *PLoS One*, *10*(6), 1-14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128600>
- Dahiya, S., Kumar, S., Khedwal, R. S., & Jakhar, S. R. (2017). Allelopathy for sustainable weed management. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *6*(6), 832-837.
- De la Rosa, L. A., Moreno-Escamilla, J. O., Rodrigo-García, J., & Alvarez-Parrilla, E. (2019). Phenolic compounds. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables* (pp. 253–271). Woodhead Publishing.
- Di Lorenzo, R., Pisciotta, A., Santamaria, P., & Scariot, V. (2013). From soil to soil-less in horticulture: quality and typicity. *Italian Journal of Agronomy*, *8*(4), 255-260. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e30>
- Díaz-Royo, P., Chahin, M.G., & Riquelme, I. (2019). Producción de plantines de hortalizas. *Informativo INIA Carillanca*.
- Ehret, D., Alsanus, B., Wohanka, W., Menzies, J., & Utkhede, R. (2001). Disinfestation of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture. *Agronomie*, *21*(4), 323-339.
- El-Kazzaz, K. A., & El-Kazzaz, A. A. (2017). Soilless agriculture a new and advanced method for agriculture development: an introduction. *Agricultural Research & Technology Open Access Journal*, *3*(2), 63-72.
- Espinosa, C. (2004, 13-15 de octubre). *Invernaderos: Diseño, manejo y producción*. [Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura] Torreón, Coahuila. México.
- Fussy, A., & Papenbrock, J. (2022). An overview of soil and soilless cultivation techniques—chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants*, *11*(9), 1-32. <https://doi.org/10.3390/plants11091153>
- Gavilanes-Terán, I., Jara-Samaniego, J., Idrovo-Novillo, J., Bustamante, M. A., Pérez-Murcia, M. D., Pérez-Espinosa, A., & Paredes, C. (2017). Agroindustrial compost as a peat alternative in the horticultural industry of Ecuador. *Journal of Environmental Management*, *186*, 79-87.
- Gohardoust, M. R., Bar-Tal, A., Effati, M., & Tuller, M. (2020). Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy*, *10*(9), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>
- Gruda, N. S, Qaryouti, M. M., & Leonardi, Ch. (2013). Growing media. In W. Baudoin, R. Nono-Womdim, N. Lutaladio, A. Hodder, N. Castilla, Ch. Leonardi, ... & M. Qaryouti (Eds.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas* (pp. 271-302). FAO Plant Production and Protection Paper.
- Gruda, N. S, Prasad, M., & Maher, M. J. (2016). Growing media. In: R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (3rd ed.). Taylor & Francis.
- Gruda, N. S. (2022). Advances in Soilless Culture and Growing Media in Today's Horticulture—An Editorial. *Agronomy*, *12*(11), 1-6. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112773>

- Gruda, N. S., & Fernández, J. A. (2022). Optimising soilless culture systems and alternative growing media to current used materials. *Horticulturae*, 8(4), 1-4. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040292>
- Gruda, N. S., Savvas, D., Colla, G., & Roupshael, Y. (2018). Impacts of genetic material and current technologies on product quality of selected greenhouse vegetables—A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 319-328. | <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.5>
- Ingram, D. L., Henley, R. W., & Yeager, T. H. (1993). *Growth media for container grown ornamental plants*. University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Sciences.
- Ishii, T. (1997). Structure and functions of feruloylated polysaccharides. *Plant Science*, 127(2), 111-127.
- Jabran, K., & Farooq, M. (2013). Implications of potential allelopathic crops in agricultural systems. In Z. A. Cheema, M. Farooq & A Wahid (Eds.), *Allelopathy* (pp. 349-385). Springer.
- Koukounaras, A. (2020). Advanced greenhouse horticulture: New technologies and cultivation practices. *Horticulturae*, 7(1), 1.
- Kubato, C., Balliu, A., & Nicola, S. (2013). Quality of planting materials. In W. Baudoin, R. Nono-Womdim, N. Lutaladio, A. Hodder, N. Castilla, Ch. Leonardi, ... & M. Qaryouti (Eds.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas* (pp.355-378). *FAO Plant Production and Protection Paper*.
- Lattanzio, V. (2013). Phenolic compounds: introduction. *Journal of Natural Products*, 1543-1580.
- Li, Z. H., Wang, Q., Ruan, X., Pan, C. D., & Jiang, D. A. (2010). Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*, 15(12), 8933-8952.
- Madjar, R. M., Scaeteanu, G. V., Mihalache, M., Calin, C., Dan, V. S., & Peticila, A. G. (2014). Nutrition intensity in ternary diagrams interpretation for some ornamental species cultivated on organic substrate with increased biological activity. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42(2), 573-578.
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2021). Optimization of substrate and nutrient solution strength for lettuce and chinese Cabbage Seedling Production in the Semi-Arid Environment of Central Myanmar. *Horticulturae*, 7(4), 1-15.
- Moncada, A., Vetrano, F., Esposito, A., & Miceli, A. (2020). Fertigation management and growth-promoting treatments affect tomato transplant production and plant growth after transplant. *Agronomy*, 10(10), 1-24.
- Nee, M. (1986). *Flora de Veracruz. Solanaceae*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos.
- Olle, M., Ngouajio, M., & Siomos, A. (2012). Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. *Agriculture*, 99(4), 399-408.
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *Cultivos y productos de ganadería. Tomates, frescos*. FAOSTAT. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., Salcido-Ramos, B. A., & Manzo-Ramos, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo

- condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3), 339-346.
- Pan, G. X., Bolton, J. L., & Leary, G. J. (1998). Determination of ferulic and p-coumaric acids in wheat straw and the amounts released by mild acid and alkaline peroxide treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(12), 5283-5288.
- Pandiyaraj, P., Vijayakumar, S., & Nimbolkar, P. K. (2017). Modern nursery raising systems in vegetables. *International Journal of Agriculture Sciences*, 9(52), 4889-4892.
- Papadopoulos, A. P., Bar-Tal, A., Silber, A., Saha, U. K., & Raviv, M. (2008). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp.505-544). Elsevier.
- Pascual, J. A., Ceglie, F., Tuzel, Y., Koller, M., Koren, A., Hitchings, R., & Tittarelli, F. (2018). Organic substrate for transplant production in organic nurseries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(3), 1-23.
- Pignata, G., Casale, M., & Nicola, S. (2017). Water and nutrient supply in horticultural crops grown in soilless culture: resource efficiency in dynamic and intensive systems. In F. Tel, S. Nicola & P. Benincasa (Eds.), *Advances in research on fertilization management of vegetable crops* (pp. 183-219). Springer.
- Pire, R., & Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1), 55-64.
- Putnam, A. R., & Duke, S. O. (1985). *Weed allelopathy*. CRC Press.
- Putra, P. A., & Yuliando, H. (2015). Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: a review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 283-288.
- Ramoa, M. V. (2013). Producción de plantines. *Voces y Ecos*, 30, 53-55.
- Ramos-Fernández, J., Ayala-Garay, O. J., Pérez-Grajales, M., Sánchez-del Castillo, F., & Magdaleno-Villar, J. J. (2021). Efecto del paclobutrazol sobre el crecimiento de la planta, rendimiento y calidad de fruto en tomate. *Revista BioAgro*, 33(1), 59-64. doi: 10.51372/bioagro331.8
- Raviv, M., Lieth, J. H., & Bar-Tal, A. (2019) Significance of soilless culture in agriculture. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp.3-14). Elsevier.
- Rodríguez-Delfín, A. (2011, 15 al 19 de mayo). *Advances of hydroponics in Latin America*. [II International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics]. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Sánchez-Del Castillo, F., & Escalante-Rebolledo, E. (1988). *Hidroponía*. (3ª ed.), Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. D. C., & Cruz-Arellanes, E. L. (2009). Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15(1), 67-73.
- Santiago, J., y Borrego, F. (1998). Evaluación de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 59-65.
- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 1(1), 80-86.
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern

- greenhouse industry—A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280-293.
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tüzel, & Gruda, N. (2013). Soilless culture. In W. Baudoin, R. Nono-Womdim, N. Litaladio, A. Hodder, N. Castilla, Ch. Leonardi, ... & M. Qaryouti (Eds.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas* (pp. 303-354). FAO Plant Production and Protection Paper.
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. FAO.
- Torre, P., Aliakbarian, B., Rivas, B., Domínguez, J. M., & Converti, A. (2008). Release of ferulic acid from corn cobs by alkaline hydrolysis. *Biochemical Engineering Journal*, 40(3), 500-506.
- Torres, O. G. V., Patiño, M. L. D., Pérez, M. A., Rodríguez, M. A., Nava, H. S., Rangel, M. G. M., ... & Salazar, M. D. C. M. (2017). *Sustrato como material de última generación*. OmniaScience.
- Tuzel, Y., & Oztekin, G. B. (2017). Organic seedling production. *Acta Horticulturae*, 1170, 1141-1148.
- Tzortzakis, N., Massa, D., & Vandecasteele, B. (2022). The tripartite of soilless systems, growing media, and plants through an intensive crop production scheme. *Agronomy*, 12(8), 1896.
- Urrestarazu-Gavilán, M. (2015). *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Vargas-Canales, J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A., & Avitia-García, E. (2014). Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(1), 71-88.
- Vázquez-Olivo, G., López-Martínez, L. X., Contreras-Angulo, L., & Heredia, J. B. (2019). Antioxidant capacity of lignin and phenolic compounds from corn stover. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 95-102.
- Vinci, G., & Rapa, M. (2019). Hydroponic cultivation: life cycle assessment of substrate choice. *British Food Journal*, 121(8), 1801-1812.
- Wallach, R. (2019). Physical characteristics of soilless media. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 33-112). Elsevier.
- Zárate-Aquino, M. A. (2014). *Manual de hidroponía*. Editorial Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zhang, Z., Liu, Y., Yuan, L., Weber, E., & van Kleunen, M. (2021). Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 24(2), 348-362.

SUSTRATOS ALTERNATIVOS EN LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULA DE JITOMATE

4. RESUMEN

En los almácigos o semilleros hortícolas, los sustratos representan el primer uso generalizado para cultivos en la producción vegetal. Para este experimento los objetivos fueron: 1) Evaluar la factibilidad de uso de sustratos orgánicos alternativos a los convencionales, solos o en mezcla con sustratos inorgánicos de bajo costo, sobre el desarrollo de plántulas de jitomate en semillero; 2) Determinar las propiedades físicas de los sustratos, 3) Cuantificar el contenido total de compuestos fenólicos en los sustratos, y 4) Medir algunas variables morfológicas de las plántulas. Se utilizó un diseño de parcelas subdivididas. Las parcelas principales consistieron en los tipos de sustrato (S1: turba S2: maíz, S3: avena), las subparcelas en las mezclas (M1: sin mezcla, M2: mezcla 50/50 paja-tezontle) y las sub-subparcelas en los tipos de lavados (L1: sin lavado, L2: doble lavado, L3: lavado con agua caliente). Se determinaron las propiedades físicas de los sustratos: densidad aparente, porosidad total, capacidad de aireación, capacidad de retención de humedad, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible y agua total disponible. Se cuantificó el contenido de compuestos fenólicos totales y las variables morfológicas: altura de plántula, diámetro del tallo, área foliar, peso fresco y peso seco de plántula. Se observaron variaciones en las propiedades físicas en la interacción sustrato y tipo de mezcla, M2 mejoró algunas características hidráulicas, sin llegar a valores óptimos. El tipo de lavado L3 afectó la densidad aparente y la disponibilidad de agua. S2 tuvo el mayor contenido de compuestos fenólicos, éste a su vez fue reducido en M2 y L2. El sustrato en mezcla mejoró el crecimiento de plántulas para S2 y S3, también el tipo de lavado L2 para S2. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios en comparación con el control S1 que presentó el mejor desarrollo de plántulas. Se concluyó que los sustratos alternativos utilizados no son ideales para el almácigo.

Palabras claves: Medios de cultivo, restos de cultivo, sustancias fitotóxicas, compuestos fenólicos.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autora: Eva Beatriz Jiménez Kobs

Director de tesis: Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

ALTERNATIVE SUBSTRATES IN TOMATO SEEDLINGS PRODUCTION

ABSTRACT

In horticultural nurseries, substrates are the most common medium for crop production in plant growing. The purpose of this study was to evaluate the possibility of using organic substrates as replacements for conventional ones, either by themselves or in combination with low-cost inorganic substrates, for the growth of tomato seedlings in the nursery. The objectives included assessing the physical properties of the substrates, measuring the total phenol content in the substrates, and recording the morphological variables of the seedlings. A split-plot design was used, with main plots representing substrate types (S1: peat, S2: corn, S3: oat), subplots indicating mixtures (M1: no mixture, M2: 50/50 blend of straw-tezontle), and sub-subplots indicating washing types (L1: no washing, L2: double washing, L3: hot water washing). The physical properties of the substrates were assessed, such as bulk density, total porosity, aeration capacity, moisture retention capacity, easily available water, buffering water, remaining water, and available water. Furthermore, the total phenol content and morphological variables such as seedling height, stem diameter, leaf area, fresh weight, and dry weight were measured. Variations in physical properties were observed in the substrate and mixture type interaction, with M2 enhancing some hydraulic characteristics without achieving optimal values. Washing type L3 influenced bulk density and water availability. S2 showed the highest content of phenolic compounds, which was lowered in M2 and L2. The blended substrate improved seedling growth for S2 and S3, as did washing type L2 for S2. However, the outcomes were not satisfactory compared to the control S1, which exhibited the best seedling growth. In conclusion, the alternative substrates used are not suitable for the nursery.

Key words: Growing media, crop remains, phytotoxic substances, phenol content.

Master's degree Thesis, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Eva Beatriz Jiménez Kobs

Advisor: Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

5. INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la principal hortaliza cultivada, tanto a cielo abierto como en invernadero, en todo el mundo. Posee un sabor ligeramente ácido, es de forma generalmente redonda y achatada, excepto algunas variedades de fruto alargado, como el saladette (Mora-García et al., 2019). México es el principal proveedor a nivel mundial de este producto con una participación de 19 % de las exportaciones mundiales por arriba de España o Países Bajos (Montaño-Méndez et al., 2021).

La técnica del trasplante presenta numerosas ventajas sobre la siembra directa, como un menor uso en la cantidad de semillas, por lo tanto, menor costo, mayor uniformidad de crecimiento, mayor tolerancia a estreses biológicos afectando el sistema vascular y radical, floración temprana y precocidad de la producción (NeSmith, 1999).

Las condiciones de producción de las plántulas son cruciales para obtener un buen desarrollo del cultivo y tienen gran influencia sobre el rendimiento y calidad del fruto del jitomate (Yilmaz et al., 2017; Meiramkulova et al., 2021). Por lo tanto, cuando las plántulas están bien desarrolladas, el establecimiento y el crecimiento a partir del trasplante son una estrategia para el éxito de la siembra (Diel et al., 2022), y para ello tener un buen semillero es fundamental.

El semillero, es el lugar donde se preparan las condiciones necesarias para colocar las semillas con la finalidad de garantizar su germinación para su posterior trasplante (INATEC, 2018). Se realizan en pequeñas áreas donde se aplican las técnicas necesarias para obtener plántulas sanas, por eso es importante tomar en cuenta ciertos aspectos como la ubicación, preparación y elaboración del semillero, para garantizar su eficacia (Irigoyen & Cruz-Vela, 2005).

Entre las ventajas que ofrece un semillero es mejorar las condiciones ambientales para favorecer la germinación, de manera que el sustrato seleccionado y su grado de humedad se mantengan constantes. En este sentido, el lugar seleccionado para su construcción debe tener buen drenaje, ventilación y su orientación debe garantizar buena luminosidad, protección de agentes climatológicos adversos como viento y lluvia. Según el caso, es necesaria la colocación de barreras rompe vientos, protección fitosanitaria preventiva,

aislando las plántulas de focos de contaminación (Cárdenas-Zorro et al., 2012).

Otras ventajas son que en el almácigo se observa la mayor precocidad y homogeneidad del cultivo, un manejo más eficiente de la semilla como insumo y la oportunidad de seleccionar las plantas más aptas para ser sembradas en campo o invernadero (Quesada-Roldán & Méndez-Soto, 2005).

En los semilleros hortícolas, los sustratos representan el primer uso generalizado para cultivos en la producción vegetal (Masaguer, 1997). En ese contexto, en el cultivo de jitomate, la obtención de plántulas vigorosas permite reducir la pérdida de plantas después del trasplante, aunado a ello, se tiene la alternativa de utilizar sustratos disponibles en las regiones productoras de la especie (Ortega-Martínez et al., 2010).

El tipo de sustrato utilizado es uno de los factores que influyen en la calidad y costo de producción de una planta. Por ello, resulta trascendental buscar opciones que reduzcan los costos y garanticen la calidad de planta y que a su vez otorgue el soporte físico y químico que ésta requiere para su desarrollo (Arteaga-Martínez et al., 2003), además de satisfacer la necesidad de obtener plántulas sanas y en buenas condiciones para la producción (Masaguer, 1997).

Un aspecto importante en la producción de plántulas, es la utilización de sustrato orgánico o inorgánico, donde, una manera de reducir los costos por el concepto de sustratos es llevar a cabo mezclas de diferentes materiales, lo cual también puede contribuir en la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas de un material determinado (Cruz-Crespo et al., 2013). La elección de los sustratos depende de varios factores que afectan el crecimiento de la plántula; retención de agua, fácil drenaje y una apropiada aireación (Fernandes & Corá, 2004).

Los sustratos empleados para producción de plántulas deben contar con las condiciones físicas, químicas y características biológicas requeridas para germinar y crecer plantas en sus primeras etapas (Ortega-Martínez et al., 2010; Pascual et al., 2018; De Sousa-Antunes et al., 2019). En México, para producir plántulas, se utilizan como sustratos principales el bonote de coco y la turba (Muratalla-Lua et al., 2006). Sin embargo, aunque la turba tenga excelentes características, es un sustrato no renovable y tiene un muy alto costo de adquisición (Hernández-Rodríguez et al., 2017; Martínez-Rodríguez et al.,

2017).

La búsqueda de sustratos alternativos que puedan reemplazar a los productos comerciales en la producción de plántulas de jitomate es de fundamental importancia para la reducción de costos en esta fase inicial del cultivo (Souza et al., 2013). Una forma de satisfacer la demanda de sustratos es utilizar residuos y subproductos de composición orgánica que están disponibles localmente (Pereira et al., 2020).

En México en el año 2018 fueron producidos alrededor de treinta millones de toneladas de cereales entre maíz, trigo y arroz (CEDRSSA, 2020) cuyos desechos podrían ser potencialmente útiles para ser utilizados como sustrato en almácigo.

Sin embargo, entre otros cereales, el maíz, el trigo y el arroz suelen tener fuerte potencial alelopático que puede contribuir a controlar malezas, pero ocasionalmente, también se pueden esperar algunos efectos nocivos sobre otros cultivos (Jabran & Farooq, 2013). La alelopatía implica la liberación al entorno por parte de una planta de un compuesto químico que ocasiona un efecto sobre otra (Sobrero & Acciaresi, 2014). Existen diferentes tipos de alelopatía entre ellos la alelopatía residual que es el efecto que puede ser provocado por los residuos de un cultivo anterior sobre la planta en crecimiento (Dahiya et al., 2017) y según Zhang et al. (2021), los aleloquímicos liberados por los residuos de plantas ejercen los efectos más negativos.

Este es uno de los principales problemas en el uso de sustratos orgánicos, como paja de maíz y otros cereales, la liberación de sustancias que causan toxicidad e inhibición en la germinación y desarrollo de las plántulas; estos compuestos se forman a partir de la degradación de la lignina e hidrólisis de los taninos localizados en el rastrojo (Lemaire et al., 2003). Las sustancias reportadas como responsables de desórdenes fisiológicos en el desarrollo de las plántulas son los ácidos fenólicos, entre ellos: p-hidroxibenzoico, ferúlico y p-coumárico (Putnam, 1994). Sin embargo, la toxicidad está influenciada por una variedad de factores, incluida la concentración, la tasa de flujo, la edad, el estado metabólico de la planta, la especie, el cultivar y las condiciones climáticas y ambientales predominantes (Dahiya et al., 2017).

Investigar acerca de la factibilidad del uso de sustratos orgánicos mezclados con sustratos inorgánicos podría darles un uso alternativo a productores, tanto de plántulas

de cualquier tipo, como productores hortícolas en su producción. De darse resultados positivos, se tendría una alternativa de bajo costo, con materiales económicos y de fácil disponibilidad.

Es por ello que esta investigación se realizó con el objetivo de determinar la factibilidad de uso de sustratos orgánicos alternativos a los convencionales, solos o en mezcla con sustratos inorgánicos de bajo costo, sobre el desarrollo de plántulas de jitomate en invernadero.

5.1 Objetivos específicos

Determinar las propiedades físicas de los sustratos: densidad aparente, porosidad total, capacidad de aireación, capacidad de retención de humedad, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible y agua total disponible de distintos sustratos orgánicos con respecto a los convencionales, solos o en mezcla con sustratos inorgánicos.

Cuantificar el contenido total de compuestos fenólicos en los sustratos orgánicos, solos o en mezcla con sustratos inorgánicos.

Cuantificar las variables morfológicas de las plántulas: altura de planta, diámetro del tallo, número de hojas, área foliar, peso fresco y seco, mediante la utilización de distintos sustratos orgánicos solos o en mezcla con sustratos inorgánicos.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación y duración del experimento

El experimento fue realizado en un invernadero semitecnificado del Campo Agrícola Experimental del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Chapingo, Estado de México, geográficamente ubicado en los 19° 20' LN y 98° 53' LW, a 2250 msnm.

6.2 Tratamientos y diseño experimental

Se emplearon semillas del híbrido de jitomate tipo saladette Bullseye de la empresa Seminis®; que fueron sembradas en charolas de poliestireno de 200 cavidades con capacidad individual de 25 mL.

Los 13 tratamientos se conformaron de la combinación de dos tipos de sustrato orgánico (paja de avena y rastrojo de maíz), solo o combinado con tezontle y tres tipos de lavado (sin lavado, doble lavado con agua normal, lavado con agua hirviendo), además de un control con sustrato comercial (turba perlita) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos empleados para producción de plántula de jitomate.

Tratamiento	Descripción
T1	Turba/perlita/Sin lavado (Control)
T2	Paja de avena polvo/Sin lavado
T3	Paja de avena polvo/Tezontle (50/50, v/v) /Sin lavado
T4	Paja de avena polvo/Doble lavado
T5	Paja de avena polvo/Tezontle (50/50, v/v) /Doble lavado
T6	Paja de avena polvo/Lavado con agua hirviendo
T7	Paja de avena polvo/Tezontle (50/50, v/v) /Lavado con agua hirviendo
T8	Rastrojo de maíz polvo/Sin lavado
T9	Rastrojo de maíz polvo/Tezontle (50/50, v/v) /Sin lavado
T10	Rastrojo de maíz polvo/Doble lavado
T11	Rastrojo de maíz polvo/Tezontle (50/50, v/v) /Doble lavado
T12	Rastrojo de maíz polvo/Lavado con agua hirviendo
T13	Rastrojo de maíz polvo/Tezontle (50/50, v/v) /Lavado con agua hirviendo

Para el tratamiento control, fueron usados los sustratos de turba en mezcla con perlita a una proporción de 2:1 (v/v). Los sustratos orgánicos empleados fueron pajas de los cultivos de maíz y avena (restos de tallos y hojas) extraídos del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, solos o en mezcla con arena de tezontle obtenida de mina (50/50 v/v).

Para obtener el tamaño de partícula deseado en los sustratos orgánicos, se empleó un molino (Thomas - Willey Laboratory Mill Model 4) con cribas de dos mm. El tezontle fue tamizado para lograr el mismo tamaño de partículas. Con el fin de disminuir la fitotoxicidad de los rastrojos de cultivo para los tratamientos con doble lavado con agua simple, cada tipo de paja fue colocado en un recipiente en el cual se agregó agua 1:2 (v/v) y se dejó macerando por un periodo de 48 h luego del cual se dejó filtrar el líquido y se repitió el mismo procedimiento una segunda vez para luego dejar las pajas secar al sol. En relación a los tratamientos con agua hirviendo, las pajas fueron colocadas por separado en costales de rafia tejida, que a su vez se colocaron en ollas con agua hirviendo 1:2 (v/v) por un periodo de 20 min, para luego drenar el líquido y dejarlas secar al sol. Una vez secas, se procedió a realizar las mezclas respectivas con tezontle.

Para la desinfección fue utilizado peróxido de hidrógeno a 1 % que fue aplicado un día antes de la siembra en los sustratos, previamente humedecidos. La siembra se realizó el 25 de septiembre de 2022, las semillas fueron colocadas en el centro de cada cavidad y fueron cubiertas por una capa fina de vermiculita. El riego se realizó en la mañana y en la tarde hasta el momento de la emergencia. Una vez emergidas las plántulas fueron regadas con solución nutritiva de Steiner (1984) diluida a 50 %.

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas 3x2x3 con trece tratamientos y seis repeticiones. Cada repetición se constituyó de 50 alvéolos o cavidades. Las parcelas grandes consistieron en los sustratos (S) con tres niveles, las parcelas medianas en las mezclas (M) con dos niveles y las parcelas chicas en los tipos de lavado (L) con tres niveles.

La emergencia de las plántulas se produjo siete días después de la siembra (DDS). Como medidas de manejo se aplicó el fungicida sistémico propamocarb 0.63 mL/L+ fosetil 0.37 mL/L (Previcur®) en la base del tallo de las plántulas, a los 10 DDS. Además, se aplicó

una mezcla del mismo fungicida con el insecticida a base de imidacloprid 7.5 mL/L + deltametrina 0.01 mL/L + ingredientes inertes 0.91 mL/L (New Leverage®) en dosis de 1 mL/L, a los 22 DDS. El experimento se mantuvo hasta 40 DDS.

Las propiedades químicas de los sustratos empleados se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Propiedades químicas de los sustratos en almácigo

Sustrato	pH	CE (dS·m ⁻¹)	CIC (cmol(+)kg ⁻¹)
Turba (S1)	6.60	0.57	157.90
Paja avena (S2)	6.88	1.33	70.07
Paja maíz (S3)	7.02	0.99	63.12

pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico.

6.3 Variables evaluadas

6.3.1 Propiedades físicas de los sustratos

Los parámetros medidos fueron los siguientes: densidad aparente (Dap), capacidad de retención de humedad (CRH), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y agua total disponible (ATD) por el método de De Boodt et al. (1974). Antes de establecer el cultivo se tomaron muestras por triplicado de cada sustrato en estudio. Fueron utilizados embudos büchner con una capacidad en volumen conocido, conectados a mangueras llenas de agua hasta llegar al filtro poroso sin que quedaran burbujas de aire y colocadas al nivel del filtro. Las muestras fueron formadas por dos litros de sustrato los cuales fueron hidratados por 24 h para luego ser colocados en los embudos. Una vez colocados los sustratos, estos fueron totalmente saturados con agua y dejados por un período de 24 h cubiertos con bolsa plástica para evitar la evaporación. Comprobado que el sustrato estaba totalmente saturado al observar una película de agua en la superficie se procedió a tomar las primeras muestras a 0 cm de tensión en la columna de agua, las muestras fueron colocadas en cilindros de metal, fueron pesadas para determinar el peso húmedo y fueron colocadas en una estufa a 70 °C durante 72 h, para luego finalizar el secado a 105 °C durante una h y determinar el peso seco.

A partir del primer muestreo, para cada uno de los siguientes a 10, 50 y 100 cm de tensión fueron medidos los centímetros desde la mitad del contenido de los sustratos, bajando la manguera a nivel para que se produzca la succión, cada muestreo se realizó una vez que el menisco del agua quedara bajo el borde de la manguera, todas las muestras fueron pesadas en estado húmedo y luego secadas en estufa como fue descrito. Una vez obtenidos los datos, fueron realizados los cálculos para cada variable.

6.3.2 Extracción y cuantificación compuestos fenólicos

La determinación se realizó mediante la metodología descrita por Vázquez-Olivo et al. (2019) con algunas modificaciones. Para la extracción de compuestos fenólicos libres se pesaron 0.5 g de muestra por triplicado de cada sustrato previamente molido y se colocaron en tubos para centrífuga de 15 mL, posteriormente fueron agregados 10 mL de metanol a 80 % y se procedió a homogeneizar para luego sonicar por 20 min a temperatura ambiente (25 °C) en un sonicador (Cole-Parmer® 8892). Las muestras fueron dejadas en reposo por 24 h y fueron sometidas a centrifugación a 4000 rpm durante 30 min en una centrífuga (Cole – Parmer®), el sobrenadante fue recuperado en viales y almacenado a -20 °C para su posterior análisis.

Para la extracción de compuestos fenólicos conjugados, al residuo de muestra de la primera extracción se le adicionaron 10 mL de NaOH 2 N en tubos de fondo plano y fueron agitados en un vortex. Posteriormente, fueron colocados a baño maría durante 30 min a 95 °C para lograr una hidrólisis alcalina agitando los tubos cada cinco minutos. Seguidamente los tubos fueron colocados en un agitador rotatorio (Thermo Scientific MAXQ 2000) a temperatura ambiente durante una hora a 200 rpm, luego fueron adicionados 2 mL de HCL concentrado y homogeneizado en un vortex. Se realizó la filtración del de la mezcla y el residuo sobrante fue sometido a cinco lavados con 10 mL de acetato de etilo en cada uno. Finalmente, el extracto de cada muestra se evaporó durante 24 h a temperatura ambiente. El extracto se disolvió en 2 mL de metanol a 80 % para la determinación del contenido los compuestos fenólicos conjugados.

Para la cuantificación de compuestos fenólicos libres y compuestos fenólicos conjugados, en cada extracto fue tomada una alícuota de 150 µL de extracto, se le adicionaron 2400

μL de agua destilada y $150 \mu\text{L}$ del reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma - Aldrich) 2 N. A los tres minutos fue detenida la reacción mediante la adición de $300 \mu\text{L}$ de Na_2CO_3 4 N y se dejó incubando en oscuridad dos horas. Finalmente, la lectura se realizó a una absorbancia de 763 nm en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv scanning®). Se preparó una curva de calibración a base de ácido gálico ($y = 0.005x + 0.0515$; $R^2 = 0.98$) para el cálculo del contenido de los compuestos fenólicos libres y conjugados que se expresó como los mg equivalentes de ácido gálico (EAG) por cada 100 g de peso seco de muestra ($\text{mg EAG } 100 \text{ g}^{-1} \text{ p. s.}$), finalmente la concentración obtenida de los compuestos fenólicos libres y la de los compuestos fenólicos conjugados se sumó para determinar el contenido de compuestos fenólicos totales.

6.3.3 Cuantificación de las variables morfológicas del cultivo

Se eligieron al azar 20 plántulas de cada unidad experimental. La altura de plántula (AP) fue medida de la base del tallo al ápice con un flexómetro y se expresó en cm. Para el diámetro del tallo (DT) la medida fue tomada 1 cm arriba del cuello de la planta con un vernier, esta fue registrada en mm. La variable número de hojas (NH) se realizó para cada plántula y el área foliar fue determinado mediante un integrador de área foliar (Licor®, modelo LI 300 A) y fue expresado en cm^2 . Para la obtención del peso del peso fresco (PF) las plántulas fueron retiradas de los sustratos y las raíces fueron lavadas para proceder a pesar, después de esto fueron sometidas a temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h en una estufa para obtener el peso seco (PS), los datos fueron expresados en gramos. Todos los datos obtenidos fueron promediados para su posterior análisis.

6.4 Análisis estadístico

Los resultados de las variables fueron sometidos al análisis de varianza (ANOVA), se empleó la prueba del test de Tukey con un nivel de significancia de 5 %.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización física de sustratos en almácigo

Para la mayoría de las variables físicas, hubo efecto altamente significativo en al menos uno de los factores y de las interacciones entre estos: tipo de sustrato (turba, paja de avena y paja de maíz), tipo de mezcla (con y sin mezcla) y tipo de lavado (sin lavado, doble lavado y lavado con agua caliente) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para las propiedades físicas de los sustratos en almácigo

FV	GL	Dap (g·cm ⁻³)	CRH (%)	CA (%)	EPT (%)
S	2	0.20 **	614.48 **	162.36 **	201.25 **
M	1	2.16 **	1454.47 **	160.23 **	2580.20 **
SxM	1	0.00 ns	35.43 **	0.33 ns	28.92 **
L	2	0.00 **	0.21 ns	0.16 ns	0.04 ns
SxL	2	0.00 *	1.27 ns	1.93 **	3.03 *
MxL	2	0.00 **	2.67 ns	2.56 **	0.52 ns
SxMxL	2	0.00 ns	4.92 **	2.56 **	2.38 ns
Error	26	0.00	0.82	0.25	0.74
Total	38				
CV %		2.53	1.73	2.71	1.22

** altamente significativo con $p \leq 0.01$, * significativo con $p \leq 0.05$, ns: no significativo. S: factor tipo de sustrato; M: factor mezcla; L: factor lavado. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total. FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Las comparaciones de medias de las propiedades físicas del factor sustrato presentaron diferencias estadísticas significativas para todas las variables en cada tipo de sustrato empleado (Cuadro 4). Para el factor tipo de sustrato, la variable densidad aparente (Dap g·cm⁻³) presentó diferencia estadística significativa, donde el mayor valor lo obtuvo el sustrato a base de paja de maíz (S3), que superó al de paja de avena (S2), el cual a su vez fue mayor que el sustrato (S1) a base de turba.

Referente a la variable capacidad de retención de humedad (% CRH) se observó que la turba (S1) tuvo mayor porcentaje, S2 y S3 fueron estadísticamente similares. La mayor capacidad de aireación (% CA) se vio en el sustrato (S3) a base de paja de maíz y la

menor en el sustrato a base de turba (S1). El mayor espacio poroso total (% EPT) se vio en el sustrato a base de turba (S1) y el menor para S2 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparaciones de medias del factor sustrato sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo

S	Dap (g.cm ⁻³)	CRH (%)	CA (%)	EPT (%)
Turba (S1)	0.14 c	68.76 a	6.48 c	75.25 a
Paja avena (S2)	0.36 b	50.99 b	18.06 b	69.04 c
Paja maíz (S3)	0.38 a	50.45 b	20.78 a	71.23 b
DMSH	0.01	1.22	0.68	1.16

Letras diferentes en la misma columna para cada sustrato indican diferencia significativa (Tukey $\alpha = 0.05$). S: factor tipo de sustrato. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La interacción entre el tipo de mezcla y el tipo de sustrato mostró diferencias significativas sobre todas las variables, de acuerdo a las comparaciones de medias (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo

M	Dap (g.cm ⁻³)		CRH (%)		CA (%)		EPT (%)	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3	S2	S3
M1	0.12 b	0.13 b	58.34 a	55.82 a	20.07 b	22.98 B	78.41 a	78.80 a
M2	0.61 a	0.63 a	43.64 b	45.09 b	16.04 a	18.57 A	59.68 b	63.66 b
DMSH	0.01		0.88		0.48		0.83	

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de mezcla indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. M1: sin mezcla; M2: mezcla con tezontle (50/50 v/v). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La interacción entre el tipo de mezcla (M) y el tipo de sustrato (S) influyó sobre la densidad aparente (Dap g.cm⁻³) de los sustratos S2 y S3, la adición de tezontle aumentó este parámetro (Cuadro 5), lo cual se debe a la mayor Dap del sustrato mineral que los sustratos orgánicos y también a que las partículas más finas tienden a ocupar los espacios porosos de las partículas más gruesas provocando que las mezclas sean más densas, influyendo además en las otras propiedades de los sustratos (Bar-Tal et al., 2019). El intervalo señalado como adecuado para sustratos es de 0.19 a 0.7 g.cm⁻³ (Bilderback et al., 2013a).

El tipo de mezcla también afectó la capacidad de retención de humedad (% CRH), la capacidad de aireación (% CA) y el espacio poroso total (% EPT) de los sustratos S2 y S3, disminuyendo estas propiedades en la mezcla con tezontle (M2). La capacidad de retención de humedad (% CRH) debe estar en un intervalo de 45 a 65 %, la capacidad de aireación (% CA) en un intervalo de 10 a 30 % y la porosidad total (% EPT), de acuerdo con Ansorena (1994), Abad et al. (2004), Block et al. (2019), el sustrato ideal debe ser superior al 85 % en sustratos para producción de plantas, aunque en plántulas consideran de 50 a 85 % (Bilderback, 2005; Bilderback et al., 2013b). En este contexto, la mayoría de los sustratos tuvieron un espacio poroso total (% EPT) adecuado, y con excepción de la turba, también presentaron un intervalo adecuado de capacidad de aireación (% CA) y todos, capacidad de retención de humedad (% CRH) dentro del intervalo normal (Cuadro 3 y 4).

Respecto a la interacción entre el tipo de lavado y el tipo de sustrato, las comparaciones de medias presentan diferencias estadísticas significativas para los parámetros densidad aparente (Dap, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y capacidad de aireación (% CA) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato (S) y el tipo de lavado (L) sobre las propiedades físicas de los sustratos en almácigo

L	Dap ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		CRH (%)		CA (%)		EPT (%)	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3	S2	S3
L1	0.35 b	0.36 b	51.20 a	49.95 a	18.02 ab	21.08 a	69.22 a	71.03 a
L2	0.35 b	0.38 b	50.75 a	50.78 a	17.68 b	20.98 ab	68.43 a	71.76 a
L3	0.39 a	0.40 a	51.02 a	50.64 a	18.47 a	20.28 b	69.49 a	70.92 a
DMSH		0.01		1.30		0.71		1.23

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de lavado indica diferencia significativa (Tukey, $\alpha=0.05$). Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. L1: sin lavado; L2: doble lavado, L3: lavado con agua caliente. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La interacción entre el tipo de lavado y el tipo de sustrato tuvo efecto sobre la densidad aparente (Dap $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), el lavado con agua caliente aumentó esta propiedad en los sustratos a base de paja de avena y de maíz (S2 y S3) (Cuadro 4), esto pudo deberse a que la temperatura del agua modificó la estructura y el acomodo de las partículas del sustrato, cuanto más pequeñas son las partículas más denso es el sustrato (Barbaro et al., 2014; Mixquititla-Casbis et al., 2022). No se observaron diferencias de esta interacción sobre la capacidad de retención de humedad (% CRH). En contraste, la

capacidad de aireación (% CA) fue afectada para S2 y S3 al presentarse diferencias estadísticas entre los tipos de lavados. No se observaron diferencias en la variable espacio poroso total (% EPT) para la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado (Cuadro 6). Para la mayoría de las variables hidráulicas de los sustratos, hubo efecto altamente significativo en al menos uno de los factores y de las interacciones entre estos: tipo de sustrato (turba, paja de avena y paja de maíz), tipo de mezcla (con y sin mezcla) y tipo de lavado (sin lavado, doble lavado y lavado con agua caliente) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza para las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo

FV	GL	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
S	2	49.83 **	1.75 *	284.64 **	69.81 **
M	1	28.97 **	25.32 **	2357.33 **	108.47 **
SxM	1	0.08 ns	4.48 **	69.64 **	5.73 **
L	2	4.27 **	1.68 *	0.64 ns	0.89 ns
SxL	2	2.00 ns	0.83 ns	0.34 ns	0.35 ns
MxL	2	9.12 **	2.04 *	0.40 ns	4.70 **
SxMxL	2	6.78 **	1.44 *	1.63 ns	4.01 **
Error	26	0.62	0.42	0.54	0.42
Total	38				
CV %		5.10	18.70	2.21	3.43

** altamente significativo con $p \leq 0.01$, * significativo con $p \leq 0.05$, ns: no significativo. S: factor tipo de sustrato; M: factor mezcla; L: factor lavado. AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible; FV: Fuente de variación; GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación.

El tipo de sustrato presentó diferencias significativas sobre las fracciones de agua. Los porcentajes de agua fácilmente disponible (% AFD), agua de reserva (% AR), agua difícilmente disponible (% ADD) y agua total disponible (% ATD) fueron mayores estadísticamente en el sustrato de turba (S1) que en los sustratos a base de paja de avena y de maíz (S2 y S3), los cuales, fueron similares entre sí en los mismos parámetros, con excepción del agua total disponible (% ATD) donde el S3 tuvo menor porcentaje (Cuadro 8).

Cuadro 8. Comparaciones de medias del factor sustrato sobre las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo

S	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
1	21.27 a	6.10 a	41.39 a	27.37 a
2	15.40 b	3.40 b	32.19 b	18.79 b
3	14.49 b	3.10 b	32.87 b	17.59 c
DMSH	1.06	0.88	0.99	0.88

Letras diferentes en la misma columna para cada sustrato indican diferencia significativa (Tukey $\alpha = 0.05$). S: Factor tipo de sustrato. AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

El agua puede estar disponible para las plantas a diferentes tensiones en el sustrato. El agua fácilmente disponible (% AFD) es el volumen de agua liberado entre 10 y 50 cm de columna de agua, el agua de reserva (% AR) es el volumen de agua liberada entre 50 y 100 cm de columna de agua, el agua total disponible (% ATD) es la suma de las dos anteriores y el agua difícilmente disponible (% ADD) es el volumen de agua que permanece en el sustrato por encima de una tensión de 100 cm de columna de agua y que no está disponible para la planta (Schafer & Lerner, 2022).

Cuadro 9. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo

M	AFD (%)		AR (%)		ADD (%)		ATD (%)	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3	S2	S3
M1	14.45 b	13.64 b	2.21 b	2.61 b	41.68 a	39.57 a	16.66 b	16.25 b
M2	16.34 a	15.34 a	4.59 a	3.59 a	22.71 b	26.17 b	20.93 a	18.92 a
DMSH	0.76		0.63		0.71		0.63	

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de mezcla indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. M1: sin mezcla; M2: mezcla con tezontle (50/50 v/v). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

En la interacción tipo de sustrato por tipo de mezcla (Cuadro 9) se observó que en los sustratos a base de paja de avena y maíz (S2 y S3) hubo una mejora en el porcentaje de agua fácilmente disponible (% AFD) al mezclarlos con tezontle, pero sin llegar a los valores deseados, resultados similares pero un tanto más bajos, fueron obtenidos por Pérez-López et al. (2014) que utilizaron sustratos a base de residuos lignocelulósicos de caña de azúcar y café en mezcla con tezontle (40/60 v/v) donde obtuvieron valores de 12.25 a 13.50 % de agua fácilmente disponible (% AFD). También la mezcla con tezontle

(M2) mejoró el porcentaje de agua de reserva (% AR) para los sustratos S2 y S3 acercándose a los valores considerados adecuados. El intervalo deseado para sustratos hortícolas para AFD y AR es de 20 a 30 % y de 4 a 10 %, respectivamente (Urrestarazu, 2015; Shafer et al., 2015). Respecto al porcentaje de agua difícilmente disponible (% ADD) y agua total disponible (% ATD), M2 también mejoró estas propiedades para los tipos de sustrato S2 y S3 que llegaron a tener valores cercanos a los valores ideales que van del 25 al 30 % para ambos parámetros (Shafer et al., 2015; Schafer & Lerner, 2022).

Cuadro 10. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado sobre las propiedades hidráulicas de los sustratos en almácigo

L	AFD (%)		AR (%)		ADD (%)		ATD (%)	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3	S2	S3
L1	15.15 b	13.77 b	3.71 a	3.56 a	32.34 a	32.62 a	18.86 a	17.33 a
L2	14.74 b	14.78 ab	3.66 a	2.78 a	32.35 a	33.22 a	18.41 a	17.55 a
L3	16.30 a	14.92 a	2.82 a	2.96 a	31.90 a	32.76 a	19.12 a	17.88 a
DMSH		1.13		0.93		1.05		0.93

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de lavado indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. L1: sin lavado; L2: doble lavado, L3: lavado con agua caliente. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La interacción tipo de lavado con el tipo de sustrato solo tuvo efecto sobre la propiedad agua fácilmente disponible (% AFD), donde L3 fue mejor para ambos tipos de sustrato (Cuadro 10). Para las demás propiedades no se observaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

Las Figuras 1 y 2 muestran las curvas de retención de humedad de los tipos de sustratos utilizados y de las interacciones de sustrato mezcla con respecto al sustrato ideal según la curva establecida por De Boodt et al. (1974). Es importante que el sustrato tenga equilibrio entre la capacidad de retención de humedad y la capacidad de aireación (Urrestarazu et al., 2006). Aunque es posible que un sustrato guarde un buen equilibrio entre tales parámetros, es necesario conocer las distintas fracciones de agua, especialmente AFD y AR que van a ser determinantes en el manejo del sustrato (Raviv & Heinrich, 2008).

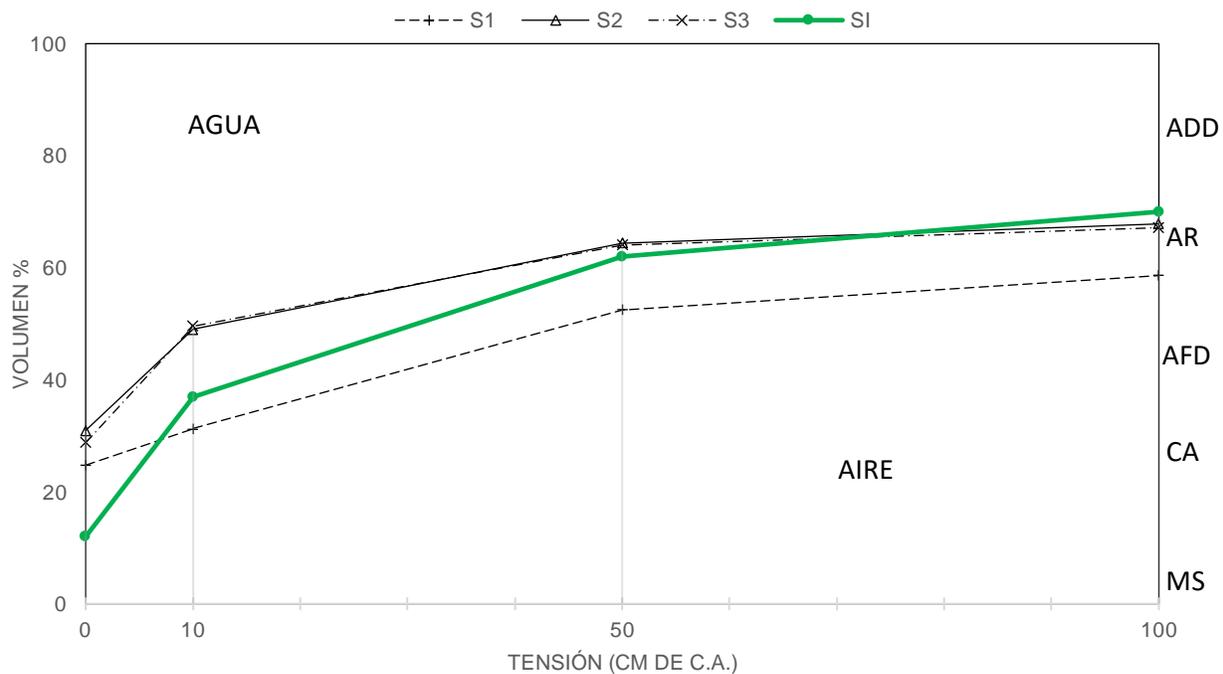


Figura 1. Curva de liberación de humedad. S1: Turba; S2: Paja de avena; S3: Paja de maíz; SI: Sustrato ideal.

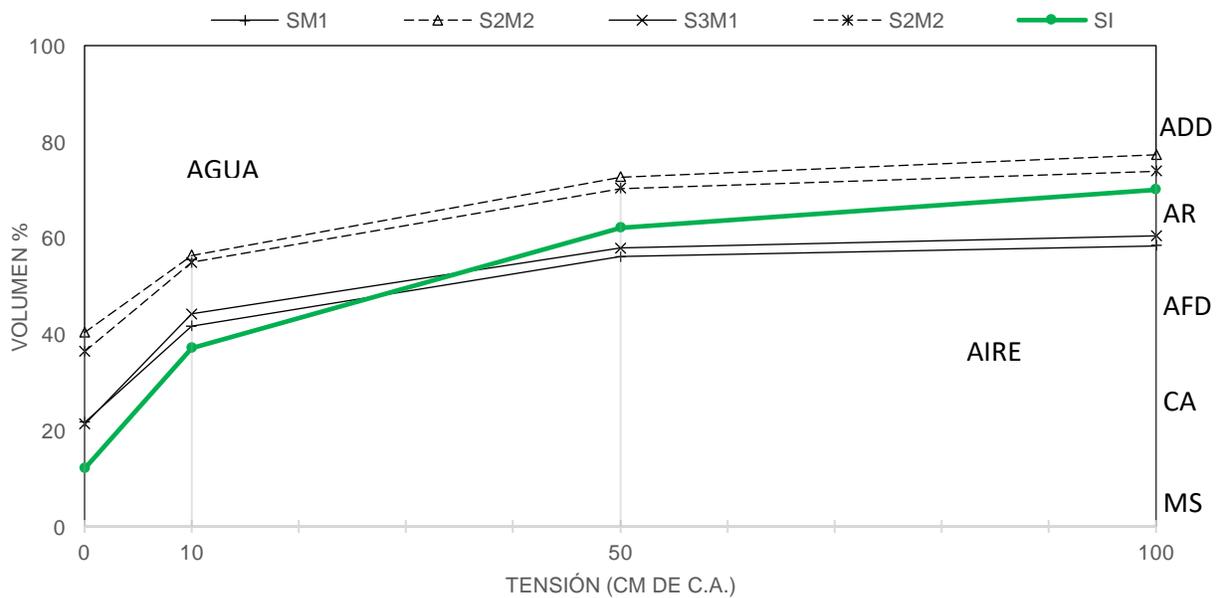


Figura 2. Curva de liberación de humedad. S2M1: Paja de avena/sin mezcla; S2M2: Paja de avena/tezontle; S3M1: Paja de maíz/sin mezcla; S3M3: Paja de maíz/tezontle

7.2 Contenido de compuestos fenólicos totales

De acuerdo con el análisis de varianza el contenido de compuestos fenólicos totales presentó efecto altamente significativo en al menos uno de los factores y de las interacciones: tipo de sustrato (turba, paja de avena y paja de maíz), tipo de mezcla (sin mezcla y con mezcla) y tipo de lavado (sin lavado, doble lavado y lavado con agua caliente) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Cuadrados medios del análisis de varianza del contenido de compuestos fenólicos totales

FV	GL	Compuestos fenólicos totales (mg EAG 100 g ⁻¹)	
S	2	10645.58	**
M	1	1917675.50	**
SxM	1	24544.95	**
L	2	11947.00	**
SxL	2	139.90	ns
MxL	2	7123.02	**
SxMxL	2	121.07	ns
Error	26	113.20	
Total	38		
CV %		4.50	

**altamente significativo con $p \leq 0.01$, * significativo con $p \leq 0.05$, ns: no significativo. S: factor tipo de sustrato; M: factor mezcla; L: factor lavado; FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

En la Figura 3, se presentan las comparaciones de medias del contenido de los compuestos fenólicos totales de sustratos en almácigo, donde se observaron diferencias estadísticas significativas entre todos los tipos de sustrato. El sustrato a base de paja de avena (S2) tuvo mayor contenido de compuestos fenólicos totales que el sustrato a base de maíz (S3), que a su vez fue estadísticamente diferente al sustrato a base de turba (S1) el cual presentó el menor contenido de compuestos fenólicos totales.

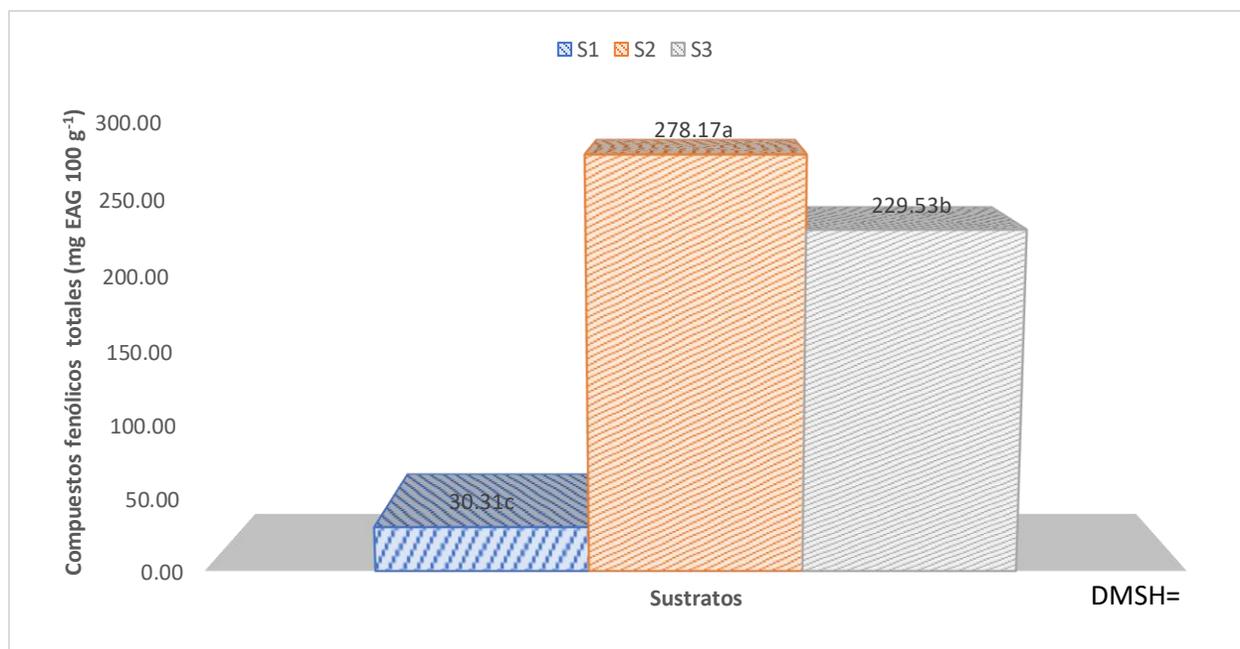


Figura 3. Comparaciones de medias del contenido de compuestos fenólicos totales en los sustratos en almácigo. S1: Turba; S2: paja de avena; S3: paja de maíz. Letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Vázquez-Olivo et al. (2019), cuantificaron el contenido total de compuestos fenólicos en rastrojos de maíz donde obtuvieron 578.25 y 933.82 mg EAG 100 g⁻¹ de materia seca en hojas y tallo de maíz, respectivamente, valores superiores a lo obtenido en la cuantificación de estos metabolitos en el sustrato a base de rastrojo de maíz sin mezcla del presente experimento (Figura 4).

En otro estudio realizado en plántulas de maíz y plántulas de trigo hallaron contenido total de compuestos fenólicos de 404.05 y 495.66 mg EAG 100 g⁻¹ de peso seco, respectivamente, y encontraron variaciones en los niveles de estos metabolitos dependiendo del número de días de crecimiento de las plántulas (Niroula et al., 2019). El contenido de compuestos fenólicos en hojas de cereales, como en las de trigo también puede variar según el genotipo y las condiciones de estrés, o las diferentes etapas de desarrollo del cultivo (Liu et al., 2018). Cuando se trata de compuestos fenólicos en cereales, la mayor parte de la literatura se enfoca en el contenido en granos y existen diferentes métodos de análisis por lo que es difícil hacer comparaciones (Đorđević et al., 2019).

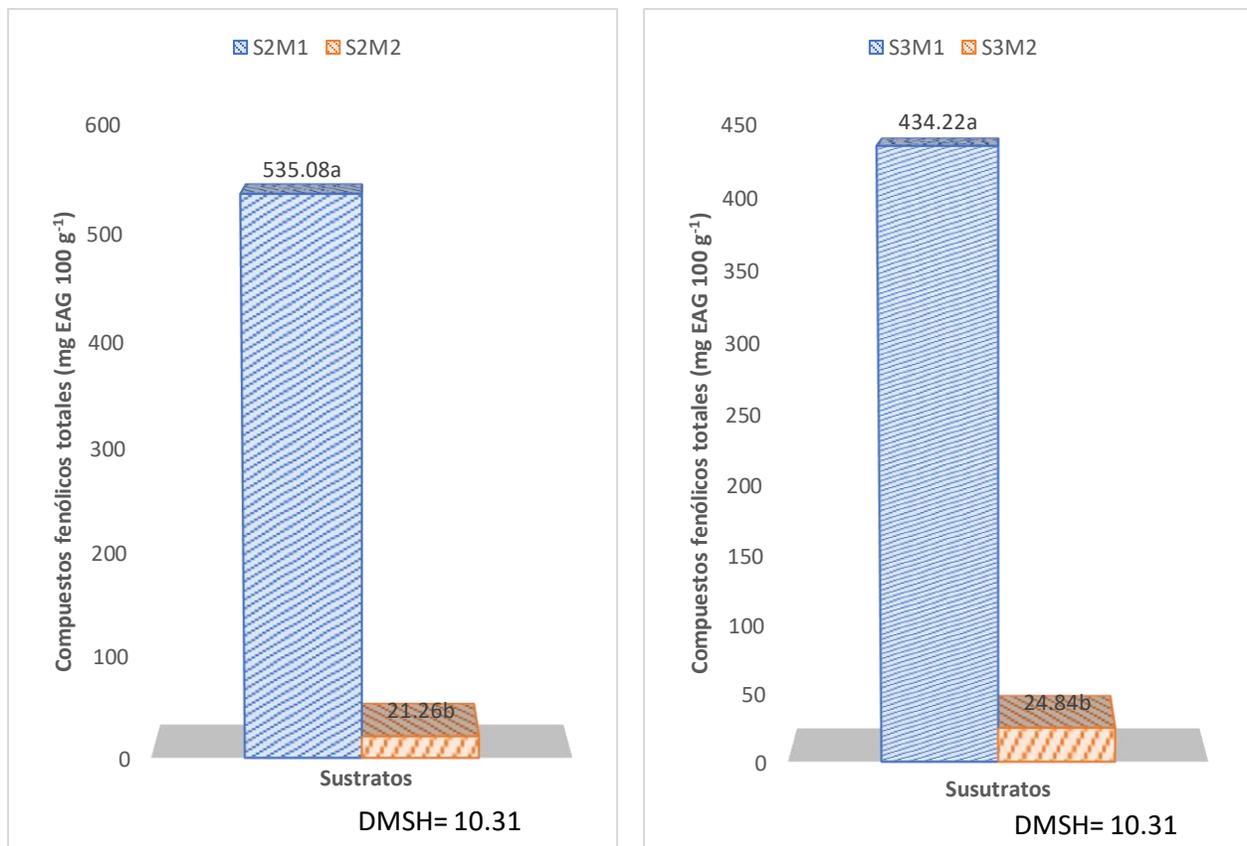


Figura 4. Comparaciones de medias del contenido de compuestos fenólicos totales en las interacciones del tipo de sustrato y el tipo de mezcla. S2M1: paja de avena sin mezcla; S2M2: paja de avena/tezontle (50/50 v/v). S3M1: paja de maíz sin mezcla; S3M2: paja de maíz/tezontle (50/50 v/v). Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$) DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla tuvo diferencias significativas sobre el contenido de compuestos fenólicos totales. Tanto para el sustrato a base de paja de avena (S2) y el sustrato a base de paja de maíz (S3) en mezcla con tezontle (M2), las lecturas mostraron una cantidad mucho menor de estos compuestos comparado con los sustratos sin mezcla (M1). La disminución del contenido de compuestos fenólicos por la interacción de la mezcla fue un efecto esperado puesto que se realizaron mezclas (50/50 v/v) con tezontle. La presencia de moléculas orgánicas, como los compuestos fenólicos establecen interacciones con otras moléculas de polaridad similar y también con minerales (Gao et al., 2017); en este contexto, la adsorción e interacción de los compuestos fenólicos con el tezontle podrían explicar las diferencias observadas en estos resultados.

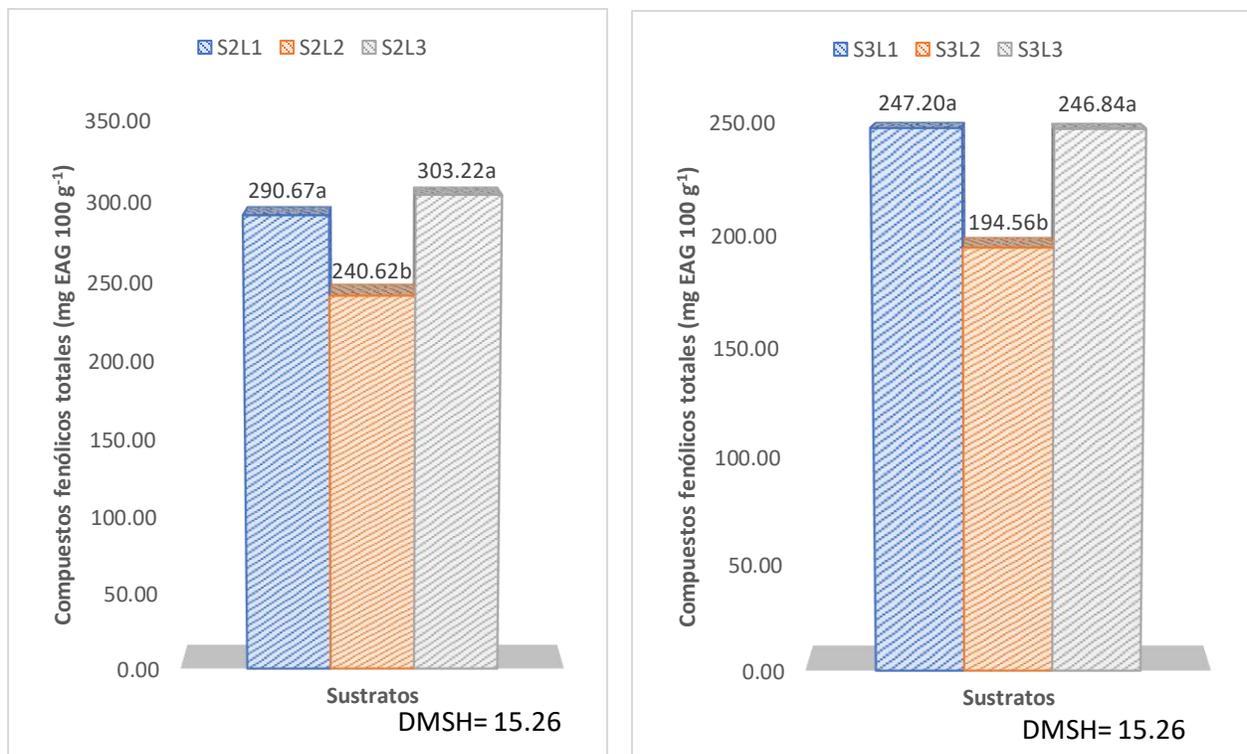


Figura 5. Comparaciones de medias del contenido de compuestos fenólicos totales en las interacciones del tipo de sustrato y el tipo de lavado. S2L1: paja de avena/sin lavado; S2L2: paja de avena/doble lavado; S2L3: paja de avena/lavado con agua caliente. S3L1: paja de maíz/sin lavado; S3L2: paja de maíz/doble lavado; S3L3: paja de maíz/lavado con agua caliente. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha=0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Para la interacción de los tipos de sustrato con los tipos de lavado, no hubo diferencia significativa entre los tipos de lavado: sin lavado y lavado con agua caliente (L1 y L3), pero el doble lavado (L2) sí mostró diferencia entre los dos anteriores para los dos tipos de sustrato (S2 y S3) donde se redujo la cantidad de compuestos fenólicos (Figura 3). La reducción de la cantidad de compuestos fenólicos en el tipo de lavado dos pudo deberse a que el sustrato fue sometido a maceración en agua por 48 h y escurrido en dos ocasiones para luego secarlo, a diferencia del tipo de lavado tres que fue sometido a hervor por 20 min y escurrido por una sola vez y secado. Los compuestos fenólicos son hidrosolubles y esta propiedad puede aumentar con el número de grupos hidroxilo en su estructura, lo que explica su solubilidad en agua, más aún si se encuentran conjugados formando glicósidos (Ringuelet & Viña, 2013).

7.3 Efecto de los sustratos en el crecimiento de las plántulas

Para la mayoría de las variables en plántulas, hubo efecto altamente significativo en al menos uno de los factores y de la interacción entre los factores tipo de sustrato (turba, paja de avena y paja de maíz), tipo de mezcla (con y sin mezcla) y tipo de lavado (sin lavado, doble lavado y lavado con agua caliente) (Cuadro 12).

Cuadro 12. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento de plántulas en almácigo

FV	GL	AP (cm)	DT (mm)	NH	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)
Bloque	5	2.66	0.00	0.02	3.88	0.08	0.00
S	2	847.30 **	2.65 **	6.71 **	6183.84 **	36.84 **	0.22 **
Ea	10	0.92	0.00	0.01	4.81	0.04	0.00
M	1	105.03 **	1.46 **	1.43 **	1272.70 **	2.55 **	0.02 **
SxM	1	29.63 **	0.33 **	0.01 ns	302.18 **	0.47 **	0.00 **
Eb	10	0.26	0.01	0.01	0.85	0.01	0.00
L	2	12.75 **	0.06 **	0.56 **	68.33 **	0.28 **	0.00 **
SxL	2	6.62 **	0.02 ns	0.24 **	62.25 **	0.16 **	0.00 **
MxL	2	6.17 **	0.03 ns	0.02 ns	18.94 **	0.02 ns	0.00 ns
SxMxL	2	2.39 **	0.00 ns	0.05 ns	22.33 **	0.02 ns	0.00 ns
Ec	40	0.27	0.01	0.03	3.40	0.02	0.00
Total	77						
CV %		6.43	7.84	6.61	13.09	14.57	19.76

**altamente significativo con $p \leq 0.01$, ns: no significativo. S: factor tipo de sustrato; M: factor mezcla; L: factor lavado. AP: altura de plántula; DT: diámetro del tallo; NH: número de hojas; AF: área foliar; PF: peso fresco; PS: peso seco; FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Según las comparaciones de medias, el factor sustrato tuvo influencia sobre todas las variables, donde el sustrato a base de turba (S1) se mostró superior a los otros (S2 y S3) (Cuadro 13), los que, a su vez, fueron estadísticamente diferentes, el sustrato de paja de avena superó al de paja de maíz en todas las variables, con excepción del número de hojas donde no hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 13. Comparaciones de medias del factor sustrato sobre las variables de crecimiento de plántulas en almácigo

S	AP (cm)	DT (mm)	NH	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)
1	26.24 a	2.44 a	4.23 a	64.95 a	4.99 a	0.39 a
2	7.92 b	1.32 b	2.37 b	13.23 b	0.84 b	0.08 b
3	5.22 c	1.21 c	2.30 b	6.49 c	0.57 c	0.06 c
DMSH	1.01	0.06	0.12	2.31	0.22	0.02

Letras diferentes en la misma columna para cada sustrato indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). S: Factor tipo de sustrato. AP: altura de plántula; DT: diámetro del tallo; NH: número de hojas; AF: área foliar; PF: peso fresco; PS: peso seco. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Las plántulas menos desarrolladas fueron las que crecieron en el sustrato a base de paja de maíz (S3). Esto no coincide con lo encontrado en un experimento similar realizado por Chen et al. (2018), donde lograron mejorar el crecimiento de plántulas de jitomate con un sustrato hecho a base de tallos de maíz triturado en combinación con zeolita 70:30 v/v en comparación con el tratamiento control que fue turba/vermiculita en una proporción de 2:1. Los autores mencionan que es posible mejorar las características del sustrato a base de maíz con la adición de zeolita, las mejoras en las características también se observaron en este estudio con la combinación de los sustratos a base de paja de avena y de maíz con tezontle (Cuadros 5 y 9). Sin embargo, el desarrollo de las plántulas no fue satisfactorio.

Cuadro 14. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre la altura de plántula, el diámetro del tallo y el número de hojas de plántulas en almácigo.

M	AP (cm)		DT (mm)		NH	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3
M1	6.07 b	4.66 b	1.11 b	1.13 b	2.22 b	2.17 b
M2	9.77 a	5.79 a	1.53 a	1.28 a	2.53 a	2.43 a
DMSH		0.38		0.05		0.07

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de mezcla indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). AP; altura de plántula; DT; diámetro del tallo; NH: número de hojas. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. M1: sin mezcla; M2: mezcla con tezontle (50/50 v/v). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La interacción del tipo de mezcla con el tipo de sustrato arrojó diferencias significativas para todas las variables estudiadas, donde la mezcla con tezontle (M2) aumentó la altura de plántula, el diámetro del tallo, el número de hojas, el área foliar, el peso de masa fresca

y el peso de masa seca de las plántulas (Cuadros 14 y 15) para los dos tipos de paja empleados (S2 y S3).

Cuadro 15. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de mezcla sobre el área foliar, peso fresco y peso seco de plántulas en almácigo.

M	AF (cm ²)		PF (g)		PS (g)	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3
M1	6.97 b	4.33 b	0.57 b	0.46 b	0.05 b	0.04 b
M2	19.48 a	8.64 a	1.11 a	0.68 a	0.10 a	0.07 a
DMSH		0.68		0.08		0.01

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de mezcla indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). AF: área foliar; PF: peso fresco; PS: peso seco. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. M1: sin mezcla; M2: mezcla con tezontle (50/50 v/v). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Respecto a la interacción del tipo de lavado con el tipo de sustrato se pudo observar diferencias significativas en todas las variables para el sustrato a base de paja de avena (S2), el doble lavado (L2) favoreció en alguna medida a todas las variables de crecimiento. En cambio, para el sustrato a base de paja de maíz (S3) solo se observaron diferencias en el número de hojas y en el área foliar (Cuadros 16 y 17).

Cuadro 16. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado sobre la altura de plántula, el diámetro del tallo y el número de hojas

L	AP (cm)		DT (mm)		NH	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3
L1	6.62 c	5.03 a	1.23 b	1.18 a	2.23 b	2.36 a
L2	9.13 a	5.44 a	1.39 a	1.22 a	2.64 a	2.37 a
L3	8.00 b	5.20 a	1.34 ab	1.23 a	2.25 b	2.16 b
DMSH		0.52		0.11		0.16

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de lavado indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). AP: altura de plántula; DT: diámetro del tallo; NH: número de hojas. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. L1: sin lavado; L2: doble lavado, L3: lavado con agua caliente. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Estas diferencias en las variables medidas en plántulas podrían deberse al contenido de compuestos fenólicos de los sustratos, puesto que se observó que tanto para S2 como S3 con el L2 disminuyó su contenido (Figura 5).

Cuadro 17. Comparaciones de medias de la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de lavado sobre el área foliar, peso fresco y peso seco de plántulas en almácigo

L	AF (cm ²)		PF (g)		PS (g)	
	S2	S3	S2	S3	S2	S3
L1	9.59 b	6.44 ab	0.63 b	0.54 a	0.05 b	0.05 a
L2	15.19 a	7.47 a	0.98 a	0.61 a	0.10 a	0.06 a
L3	14.91 a	5.55 b	0.93 a	0.56 a	0.08 a	0.06 a
DMSH		1.83		0.15		0.02

Letras diferentes en la misma columna para cada tipo de lavado indica diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). AF: área foliar; PF: peso fresco; PS: peso seco. S2: paja de avena; S3: paja de maíz. L1: sin lavado; L2: doble lavado, L3: lavado con agua caliente. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

En un experimento conducido por Đorđević et al. (2019) determinaron el contenido total de compuestos fenólicos de extractos de pajas de trigo y de maíz y su potencial alelopático sobre tres especies de malezas *Abutilon theophrasti*, *Chenopodium album* y *Asclepias syriaca*; encontraron mayor contenido de éstos compuestos en trigo que en maíz, no obstante, observaron los mismos efectos fitotóxicos sobre el crecimiento de las plántulas de las primeras dos especies e incluso más alto efecto del maíz sobre la última, los autores sugieren que podrían existir otros compuestos alelopáticos además de los identificados en su experimento. Esos resultados podrían compararse al obtenido en este experimento ya que las determinaciones arrojaron mayor contenido de compuestos fenólicos en el sustrato a base de avena (Figura 3) pero el menor crecimiento de las plántulas se vio en el sustrato a base de maíz (Cuadro 13).

Si bien los efectos negativos sobre el crecimiento de las plántulas pudieran atribuirse a las propiedades físicas de los sustratos (Cuadros 4 y 5), más específicamente a las propiedades hidráulicas (Cuadro 6), o a los efectos del contenido de compuestos fenólicos; también pueden influir otros factores importantes al tratarse de materia orgánica. Los sustratos de origen orgánico pueden inmovilizar al nitrógeno especialmente en las primeras semanas de uso (Blok et al., 2019). Pineda-Pineda et al. (2019) encontraron inmovilización de nitrógeno y retención de fósforo y potasio durante los primeros dos meses de cultivo de jitomate en sustratos de aserrín de pino en combinación con tezontle 70/30 v/v. Los restos de cereales como maíz y avena suelen tener relaciones

de C/N superiores a 30:1, lo que ocasiona un proceso de inmovilización (Lynch et al., 2016; Singh et al., 2021), algo similar pudo haberse presentado en esta investigación.

8. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas del sustrato a base de turba estuvieron dentro de los parámetros deseados, excepto para la densidad aparente y la capacidad de aireación que estuvieron por debajo.

Las propiedades físicas de los sustratos a base de paja de avena y maíz mostraron variaciones al mezclarlos con tezontle, éstos presentaron mayor densidad aparente, menor capacidad de retención de humedad, menor capacidad de aireación y menor espacio poroso total. En general la mezcla mejoró las propiedades hidráulicas de los sustratos sin llegar a los valores óptimos.

La interacción de los sustratos con el tipo de lavado también tuvo influencia sobre algunas propiedades físicas de los sustratos a base de paja de avena y maíz, el lavado con agua caliente aumentó la densidad aparente y el agua fácilmente disponible para los dos tipos de sustrato.

El mayor contenido de compuestos fenólicos totales se observó en el sustrato a base de paja de avena. La mezcla con tezontle redujo las cantidades de compuestos fenólicos en los sustratos a base de pajas, así como con el doble lavado.

El mejor desarrollo de plántulas se vio en el sustrato a base de turba.

Los sustratos a base de paja de avena y maíz mezclados con arena de tezontle, favorecieron el desarrollo de las plántulas, comparados con los sustratos solos, sin que estas llegaran a tener las características morfológicas deseadas.

El doble lavado de los sustratos mostró resultados favorables en todos los parámetros medidos del sustrato a base de paja de avena, mientras que para el sustrato a base de paja de maíz solo se observaron diferencias en el número de hojas y en el área foliar.

Los resultados de esta investigación demostraron que la mezcla de las pajas de avena y maíz y el lavado pueden mejorar las características físicas de los sustratos al mismo tiempo que reducir los compuestos fenólicos y por consiguiente mejorar el desarrollo de las plántulas, no obstante, estos resultados no llegaron a ser satisfactorios al no

equipararse a los resultados obtenidos con el control por lo que se puede concluir que los sustratos utilizados no son factibles para el uso en semillero.

9. RECOMENDACIÓN

Continuar con esta línea de investigación, evaluar la inmovilización nutrimental y probar si aumentando los niveles de nutrimentos que son inmovilizados se puede favorecer el desarrollo óptimo de las plántulas.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, M., Noguera, P., & Carrión, C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. *Tratado de cultivo sin suelo*, 3, 113-158.
- Ansorena J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Mundi Prensa.
- Arteaga-Martínez, B. A., León, S., & Amador, C. (2003). Efecto de la mezcla de sustratos y fertilización sobre el crecimiento de *Pinus durangensis* Martínez en vivero. *Foresta Veracruzana*, 5(2), 9-16.
- Barbaro, L. A., Mazzoni, A. O., Karlanian, M., Fernandez, M. N., & Morisigue, D. E. (2014). Cenizas del volcán Puyehue como sustrato para plantas. *Asociación Argentina de Horticultura* 33(81), 44-53.
- Bar-Tal, A., Saha, U. K., Raviv, M., & Tuller, M. (2019). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 259-301). Elsevier.
- Bilderback, T. E., Riley, E. D., Jackson, B. E., Kraus, H. T., Fonteno, W. C., Owen Jr, J. S., Altralnd, J., & Fain, G. B. (2013a). Strategies for developing sustainable substrates in nursery crop production. *Acta Horticulturae*, 1013, 43-56.
- Bilderback, T. E., Warren, S. L., Owen, J. S., & Albano, J. P. (2005). Healthy substrates need physicals too!. *HortTechnology*, 15(4), 747-751.
- Bilderback, T., Boyer, C., Chappell, M., Fain, G., Fare, D., Gilliam, C., & Yeager, T. (2013b). *Best management practices: Guide for producing nursery crops*. Southern Nursery Assn.
- Block, C., Baumgarten, A., Baas, R., Wever, G., & Lohr, D. (2019). *Analytical methods used with soilless substrates*. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 509-564). Elsevier.
- Cárdenas-Zorro, G. A., Pinzón-Ramírez, H., Pulido, S. P., Gomez de Enciso, C., Henriquéz-Henriquéz, J. E., & Pulido, S. P. (2012). *Manual para el cultivo de hortalizas*. Produmedios.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (2020). *Reporte distribución de granos básicos: Lugar de adquisición o compra*. CEDRSSA Recuperado de: http://www.cedrssa.gob.mx/post_n-distribucionin_de_granos_bnosicos-n_lugar_de_adquisicinin_o_compra.htm
- Chen, S., Song, S., Zhao, C., Zhao, J., & Li, Y. (2018). Effects of mixed corn stalk substrates on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Acta Horticulturae*, (1227), 463-469.
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Sandoval-Villa, M., Bugarín-Montoya, R., Robles-Bermúdez, A., & Juárez-López, P. (2013). Sustratos en la horticultura. *Revista Bio Ciencias*, 2(2), 17-26
- Dahiya, S., Kumar, S., Khedwal, R. S., & Jakhar, S. R. (2017). Allelopathy for sustainable weed management. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 832-837.
- De Boodt, M., Verdonck, O., & Cappaert, I. (1974). Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, 2054-2063.
- De Sousa-Antunes, L. F., da Siva, D. G., Correia, M. E. F., & de Almeida-Leal, M. A. (2019). Avaliação química de substratos orgânicos armazenados e sua eficiência

- na produção de mudas de alface. *Revista Científica Rural*, 21(2), 139-155.
- Diel, M. I., Lúcio, A. D. C., Tartaglia, F. D. L., Tischler, A. L., Lambrecht, D. M., Zemolin, J. A., & Marques, L. E. (2022). Novas descobertas sobre a influência da qualidade de mudas de tomate na produção de frutos cultivados em substrato. *Ciência Rural*, 52(12), 1-10.
- Đorđević, T., Sarić-Krsmanović, M., & Gajić Umiljendić, J. (2019). Phenolic compounds and allelopathic potential of fermented and unfermented wheat and corn straw extracts. *Chemistry & Biodiversity*, 16(2), 1-15. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201800420>.
- Fernandes, C., & Corá, J. E. (2004). Bulk density and relationship air/water of horticultural substrate. *Scientia Agricola*, 61, 446-450.
- Gao, J., Jansen, B., Cerli, C., Helmus, R., Mikutta, R., Dultz, S., & Kalbitz, K. (2017). Competition and surface conditioning alter the adsorption of phenolic and amino acids on soil minerals. *European Journal of Soil Science*, 68(5), 667-677.
- Hernández-Rodríguez, A., Robles-Hernández, L., Ojeda-Barrios, D., Prieto-Luévano, J., González-Franco, A. C., & Guerrero-Prieto, V. (2017). Semicompost and vermicompost mixed with Peat moss enhance seed germination and development of lettuce and tomato seedlings. *Interciencia*, 42(11), 774-779.
- Instituto Nacional Tecnológico. (2018). Manual del protagonista. Cultivos de hortalizas. (2ª ed.). IIICA.
- Irigoyen, N. J., & Cruz-Vela, M. A. (2005). Guía técnica de semilleros y viveros frutales. (1ª ed.). IICA
- Jabran, K., & Farooq, M. (2013). *Implications of potential allelopathic crops in agricultural systems*. In Z. A. Cheema, M. Farooq & A. Wahid (Eds.), *Allelopathy* (pp. 349-385). Springer.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Charpentier, S., Riviere, L. M., Morel, P. (2003). *Cultures en pots et conteneurs*. (2e édition). Institut National de la Recherche Agronomique.
- Liu, H., Bruce, D. R., Sissons, M., Able, A. J., & Able, J. A. (2018). Genotype-dependent changes in the phenolic content of durum under water-deficit stress. *Cereal Chemistry*, 95(1), 59-78.
- Lynch, M. J., Mulvaney, M. J., Hodges, S. C., Thompson, T. L., & Thomason, W. E. (2016). Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti. *SpringerPlus*, 5, 1-9.
- Martínez-Rodríguez, O. G., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., & García-Paredes, J. D. (2017). Influencia del riego y sustrato en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 53-65.
- Masaguer, G. A. (1997). Los sustratos en los semilleros hortícolas. *Vida rural*, (47), 52-55.
- Meiramkulova, K., Tanybayeva, Z., Kydyrbekova, A., Turbekova, A., Aytkhozhin, S., Zhantasov, S., & Taukenov, A. (2021). The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*, 13(16), 1-11.
- Mixquititla-Casbis, G. M., Torres, Ó. G. V., Rodríguez, M. A., & Nava, H. S. (2022). Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 8, 1-9. <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081007>
- Montaño-Méndez, I. E., Valenzuela-Patrón, I. N., & Villavicencio-López, K. V. (2021). Competitividad del tomate rojo de México en el mercado internacional: análisis

- 2003-2017. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1185-1197.
- Mora-García, M., Mires-Arriaga, A., & Hernandez-Ruiz, J. (2019). *Rendimiento y costos de producción de jitomate saladette con acolchado en macro túnel*. [XXXII Congreso Internacional y II Congreso Iberoamericano en Administración de Empresas Agropecuarias], Guanajuato, México.
- Muratalla-Lúa, S., de las Nieves Rodríguez-Mendoza, M., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., Santizo-Rincón, J. A., & López-Jiménez, A. (2006). Paja de maíz como sustrato en el crecimiento de plántulas de jitomate. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 319-325.
- NeSmith, D. S. (1999). Root distribution and yield of direct seeded and transplanted watermelon. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(5), 458-461.
- Niroula, A., Khatri, S., Khadka, D., & Timilsina, R. (2019). Total phenolic contents and antioxidant activity profile of selected cereal sprouts and grasses. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 427-437.
- Ortega-Martínez, L. D.; Sánchez-Olarte, J.; Díaz-Ruiz, R. y Ocampo-Mendoza, J. (2010). Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Ra Ximhai*, 6(3), 365-372.
- Pascual, J. A., Ceglie, F., Tuzel, Y., Koller, M., Koren, A., Hitchings, R., & Tittarelli, F. (2018). Organic substrate for transplant production in organic nurseries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(3), 1-23.
- Pereira, C., De Sousa-Antunes, L. F., de Aquino, A. M., & Leal, M. D. A. (2020). Sustrato à base de esterco de coelho na produção de mudas de alface. *Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 8(1), 58-65.
- Pérez-López, H., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., García-Morales, S., & Rivera-Olivares, L. Y. (2014). Agricultural lignocellulosic waste and volcanic rock combinations differentially affect seed germination and growth of pepper (*Capsicum annuum* L.). *BioResources*, 9(3), 3977-3992.
- Pineda-Pineda, J., Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. D. C., Valdez-Aguilar, L. A., Castillo-González, A. M., Ramírez-Árias, A., & Vargas-Canales, J. M. (2019). Inmovilización y retención nutrimental en aserrín de pino como sustrato agrícola. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 261-271.
- Putnam, A. R. (1994). Phytotoxicity of plant residues. Managing agricultural residues. In: Unger, P. W. (Ed.), *Managing agricultural residues. Agricultural research service*. Lewis Publications.
- Quesada-Roldán G., & Méndez-Soto, C. (2005). Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana*, 16(2), 171-183.
- Raviv, M., & Heinrich, J. L. (2008). *Soiless culture: Theory and practice*. Elsevier.
- Ringuelet, J. A., & Viña, S. Z. (2013). *Productos naturales vegetales*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Schafer, G., & Lerner, B. L. (2022). Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*, 28, 181-192.
- Schafer, G., de Souza, P. V. D., & Fior, C. S. (2015). An overview of the physical and chemical properties of substrates used in horticulture at southern Brazil. *Ornamental Horticulture*, 21(3), 299-306.
- Singh, S., Sharma, P. K., Singh, S., & Kumar, A. (2021). Addition of crop residues with different C:N ratios on the release pattern of available nitrogen and sulfur in

- different soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(22), 2912-2920.
- Sobrero, M. T., & Acciaresi, H. A. (2014). Interferencia cultivo-maleza: la alelopatía y su potencialidad en el manejo de malezas. In O. A. Fernández, E. S. Leguizamón, & H. A. Acciaresi (Eds.), *Malezas e Invasoras de la Argentina: Ecología y Manejo* (pp- 307-329). EdiUNS.
- Souza, E. G. F., Barros Júnior, A. P., Silveira, L. M. D., Santos, M. G. D., & Silva, E. F. D. (2013). Emergência e desenvolvimento de mudas de tomate IPA 6 em substratos, contendo esterco ovino. *Revista Ceres*, 60, 902-907.
- Steiner, AA. 1984. *The universal nutrient solution*. Sixth international congress on soilless culture, Lunteren, Netherlands. International Society for Soilless Culture (ISOSC). Wageningen, Holanda.
- Urrestarazu, M. (2015). *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Urrestarazu, M., Mazuela, P.C. Alarcón, A.L. (2006). Cultivo en sustratos alternativos. In A. L. Alarcón (Ed.), *Cultivos sin suelo. Compendios de horticultura* (pp. 147-173). Ediciones de Horticultura.
- Vazquez-Olivo, G., López-Martínez, L. X., Contreras-Angulo, L., & Heredia, J. B. (2019). Antioxidant capacity of lignin and phenolic compounds from corn stover. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 95-102.
- Yilmaz, E., Nil, O. Z., & Ozen, M. O. (2017). Determination of changes in yield and quality of tomato seedlings (*Solanum lycopersicon* cv. Sedef F1) in different soilless growing media. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 30(2), 163-168.
- Zhang, Z., Liu, Y., Yuan, L., Weber, E., & van Kleunen, M. (2021). Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 24(2), 348-362.

SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN ETAPA DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE BAJO INVERNADERO

11. RESUMEN

Existe gran variedad de materiales que pueden ser adecuados como sustratos de cultivo, pero se deben considerar sus características físicas, químicas y biológicas. La mezcla de la mayoría de los materiales inorgánicos y orgánicos juega un papel importante en la obtención de uno nuevo, dado que la materia orgánica es un componente activo y su incorporación en el sustrato inorgánico puede ayudar a mejorar sus características. Se propuso como objetivo determinar la factibilidad de uso de sustratos orgánicos alternativos a los convencionales, en mezcla con sustratos inorgánicos de bajo costo, sobre los componentes agronómicos en la producción de jitomate hidropónico bajo invernadero. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y seis tratamientos (S1: paja de avena/tezontle 75/25 v/v, S2 paja de avena/tezontle 50/50 v/v, S3 paja de maíz/tezontle 75/25 v/v, S4 paja de maíz/tezontle 50/50 v/v y S5 Fibra de coco y S6: tezontle, como controles). Se evaluaron las propiedades físicas de los sustratos antes y después del ciclo de cultivo, variables morfológicas de las plantas, rendimiento y calidad de frutos. Como resultados, la densidad aparente fue afectada por la proporción de las mezclas y aumentaron al finalizar el ciclo. La fibra de coco mostró la mayor porosidad, esta propiedad también fue mayor en los sustratos en mezcla en proporción 75/25 v/v. Los sustratos en mezcla y la fibra de coco tuvieron alta capacidad de aireación con bajos porcentajes de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua totalmente disponible. Al final del ciclo, los sustratos en mezcla mejoraron debido a la descomposición de la materia orgánica, el S6 se mantuvo estable. No hubo diferencias en crecimiento, rendimiento y calidad de frutos. Los sustratos no alcanzaron características físicas ideales, pero permitieron un ciclo de cultivo de jitomate normal.

Palabras claves: *Solanum lycopersicum* L, cultivo sin suelo, hidroponía, restos de cultivo.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autora: Eva Beatriz Jiménez Kobs

Director de tesis: Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

ALTERNATIVE ORGANIC SUBSTRATES IN TOMATO PRODUCTION STAGE UNDER GREENHOUSE

ABSTRACT

A wide range of materials can be appropriate as growing substrates, but their physical, chemical, and biological features must be taken into account. The combination of most inorganic and organic materials is important for obtaining a new substrate, as organic matter is a dynamic component, and its addition to the inorganic substrate can help enhance its features. The goal was to evaluate the potential of using alternative organic substrates to conventional ones, in conjunction with low-cost inorganic substrates, on agronomic aspects in hydroponic tomato production under greenhouse conditions. An experimental design of randomized complete blocks with four replications and six treatments (S1: oat straw/tezontle 75/25 v/v, S2: oat straw/tezontle 50/50 v/v, S3: corn straw/tezontle 75/25 v/v, S4: corn straw/tezontle 50/50 v/v, S5: Coconut fiber, and S6: Tezontle, as controls) was applied. The physical properties of the substrates were assessed before and after the growing cycle, morphological variables of the plants, yield, and fruit quality. Results indicated that bulk density was influenced by the mix ratios and increased at the end of the cycle. Coconut fiber showed the highest porosity, which was also higher in the substrates in a 75/25 v/v mixture. Mixed substrates and coconut fiber had high aeration capacity with low percentages of easily available water, buffering water, and available water. By the end of the cycle, mixed substrates improved due to the breakdown of organic matter, while S6 stayed stable. There were no differences in growth, yield, and fruit quality. The substrates did not achieve optimal physical features but enabled a normal tomato growing cycle.

Key words: *Solanum lycopersicum* L, soilless culture, hydroponics, crop remains.

Master's degree Thesis, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Eva Beatriz Jiménez Kobs

Advisor: Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

12. INTRODUCCIÓN

El cultivo sin suelo tiene numerosos beneficios, desde la optimización del uso de los espacios con un menor impacto en el ambiente, la protección de la biodiversidad, la reducción del uso de productos químicos, mayor eficiencia en el uso del agua y fertilizantes, hasta poder lograr una mayor densidad de plantas y mayor rendimiento (Pomoni et al., 2023) y debido al incremento de los sistemas de producción agrícola bajo ambiente protegido y a las limitantes físicas (profundidad, textura, pedregosidad, compactación), químicas (salinidad, alcalinidad, acidez, inmovilización y fijación nutrimental) y biológicas (contaminación con patógenos y nematodos) que presentan muchos suelos, se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos hidropónicos (Pineda-Pineda et al., 2012).

Existe gran variedad de materiales que pueden ser adecuados como sustratos de cultivo, pero se deben considerar sus características físicas, químicas y biológicas, la disponibilidad y el costo, la especie vegetal a propagar, el tipo de propágulo, época de siembra, las necesidades del cultivo, así como la compleja interacción de procesos y fenómenos que se suscitan en la relación contenedor–sustrato–planta–ambiente (Hudson et al., 2002; Hartmann & Kester, 2002; Pineda-Pineda et al., 2012). En cuanto a sus características, Burés (1997) considera que para cumplir correctamente sus funciones de regulación del suministro de agua y de aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad total y capacidad de retención de agua, unidos a un drenaje rápido y buena aireación.

Los sustratos más utilizados en el cultivo de jitomate y que han mostrado buenos resultados en crecimiento, desarrollo y producción son la turba, lana de roca y la fibra de coco; sin embargo, son costosos (Ortega-Martínez et al., 2010). En investigaciones se observó que, menores relaciones beneficio costo se obtuvieron con fibra de coco y tezontle, por lo que se hace necesario buscar sustratos que tengan buenas características sin afectar de forma significativa el rendimiento y reduzcan los costos de producción en el cultivo de jitomate bajo condiciones protegidas (Ortega-Martínez et al., 2016).

A partir de la incorporación de sustratos en la hidroponía, se ha encontrado aplicación

como medios de crecimiento a materiales que son subproductos o residuos de desecho de muy diversas actividades agrícolas, urbanas e industriales (Resh, 1998; Sánchez-Del Castillo & Escalante-Rebolledo, 1988; Maher et al., 2008). La incorporación de estos materiales posibilita tener medios de crecimiento más baratos y, a largo plazo, un impacto ecológico positivo. Kennard et al. (2020) afirman que se pueden encontrar oportunidades para aumentar la sostenibilidad de los sistemas hidropónicos identificando fuentes de desechos disponibles localmente que pueden reutilizarse como materia prima para medios de cultivo sin suelo. Esto ofrece una alternativa a la gestión de desechos que apoya las economías circulares y la producción local de alimentos.

Además, la mezcla de la mayoría de los materiales inorgánicos y orgánicos juega un papel importante en la obtención de uno nuevo, dado que la materia orgánica es un componente activo y su incorporación en el sustrato inorgánico mejora el espacio poroso puede incrementar la retención de humedad y capacidad de intercambio catiónico (Park et al., 2011).

Entre las pajas de maíz, las pajas de sorgo y de trigo representan poco más de 81 % de los residuos de cultivos en México. Además de los cereales ya mencionados, agregando la cebada, representan el 24 % de materia seca (SAGARPA, 2015; Borja et al., 2013). Velázquez et al. (2015) mencionan que se generan importantes cantidades de paja de trigo y cáscara de avena como subproductos del cultivo y procesamiento agroindustrial, respectivamente. En 2018 fueron producidos en México alrededor de treinta millones de toneladas de cereales (CEDRSSA, 2020). Ruilova-Cueva y Hernández-Monzón (2014), mencionan que, en la industria de la producción de setas comestibles, los sustratos más usados son los provenientes de rastrojo de maíz, paja de trigo y de bagazo de caña de azúcar. Estos residuos también podrían ser potencialmente útiles en el cultivo hidropónico de hortalizas.

Con base a lo antes expuesto, con la presente investigación se buscó evaluar sustratos orgánicos alternativos que sean económicos y fáciles de conseguir, utilizarlos en mezcla para mejorar las características de sustratos inorgánicos también de bajo costo para reducir los costos en la producción de jitomate hidropónico.

12.1 Objetivos específicos

Evaluar el uso de paja de maíz y paja de avena combinados con arena volcánica como posibles sustratos hidropónicos para la etapa de producción de jitomate bajo invernadero.

Determinar algunas propiedades físicas de los sustratos: porosidad total, densidad aparente, capacidad de retención de humedad, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua retenida, agua difícilmente disponible y agua total disponible.

Evaluar algunos parámetros morfológicos durante la etapa de desarrollo de la planta de jitomate: altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y área foliar en sustratos alternativos y compararlos con sustratos comerciales.

Cuantificar parámetros de rendimiento en el cultivo de jitomate (número de flores, número de frutos, peso de frutos por planta), y calidad de fruto (volumen de fruto, diámetro polar y ecuatorial, firmeza, color, sólidos solubles totales, acidez titulable y azúcares solubles totales de los frutos en los racimos 2 y 3); además, se determinará biomasa fresca y seca de la planta completa.

13. MATERIALES Y MÉTODOS

13.1 Ubicación y duración del experimento

La investigación se realizó entre los meses de marzo a julio de 2023 en un invernadero semitecnificado del Campo Agrícola Experimental del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, geográficamente ubicado en los 19° 20´ LN y 98° 53´ LW, a 2250 msnm.

Las condiciones meteorológicas del invernadero se dieron de la siguiente manera, en los primeros dos meses, temperaturas mínimas promedio entre 10 y 12 °C, mientras que las temperaturas máximas promedio fueron entre 44 y 40 °C, la humedad relativa osciló entre 44 y 57 % en promedio. Para los dos últimos meses del experimento, las mínimas temperaturas en promedio se dieron entre 13 y 14 °C, mientras que las máximas promedio se dieron entre 39 y 37 °C, y la humedad relativa promedio fue entre 54 y 68 %. Los datos fueron tomados cada hora con un *datalogger* (Extech RHT10).

13.2 Tratamientos y diseño experimental

Se tuvieron cuatro tratamientos donde se combinaron sustratos orgánicos e inorgánicos en distintas proporciones además dos controles, uno orgánico con sustrato comercial de fibra de coco y otro inorgánico con arena de tezontle (Cuadro 18). Fue utilizado el sistema de cultivo hidropónico en bolsas sin recirculación del drenaje.

Cuadro 18. Descripción de los tratamientos empleados en la producción de jitomate hidropónico bajo invernadero.

Sustrato	Descripción
S1 (A/T 75/25)	Cubos de paja de avena/Tezontle 75/25 v/v
S2 (A/T 50/50)	Cubos de paja de avena/Tezontle 50/50 v/v
S3 (M/T 75/25)	Cubos de paja de maíz/Tezontle 75/25 v/v
S4 (M/T 50/50)	Cubos de paja de maíz/Tezontle 50/50 v/v
S5 (FC)	Fibra de coco
S6 (T)	Tezontle

Se empleó el diseño experimental de bloques completos al azar, con seis tratamientos y cuatro repeticiones. La unidad experimental estuvo constituida por 10 plantas

trasplantadas en bolsas de 12 L, distribuidas en, dos hileras y separadas por 30 cm entre plantas y 50 cm entre hileras. La densidad utilizada fue de seis plantas/m². Las bolsas fueron colocadas sobre camas de 1 m de ancho por 20 m de longitud rellenas con tezontle y cubiertas por un acolchado plástico gris/plata.

Las plántulas se produjeron en bandejas de poliestireno expandido de 200 celdas, sembradas en sustrato comercial de la mezcla de turba/perlita en proporción 2:1 (v/v), a la que previamente se le agregó agua hasta llegar a capacidad de campo. Posteriormente, las semillas fueron cubiertas con una capa fina de vermiculita. El riego se realizó con agua en la mañana y en la tarde hasta el momento de la emergencia. Una vez emergidas, se regó con la solución nutritiva de Sánchez y Escalante (1988), diluida a 50 %.

En la preparación de los diferentes tratamientos para obtener el tamaño de partícula deseado en ambas pajas, se empleó un molino (Azteca 20) con dos tamaños de cribas 25 mm y 50 mm para ser mezcladas posteriormente. La desinfección de sustratos orgánicos se realizó utilizando vapor de agua por un periodo de 1 h colocando los costales con las pajas en destiladores. La fibra de coco utilizada fue de una marca comercial y el tezontle utilizado fue reciclado de un ciclo anterior. Una vez realizadas las mezclas correspondientes que se describen en la tabla, se realizó una segunda desinfección de todos los tratamientos utilizando peróxido de hidrógeno a al 0.25%.

El material vegetal empleado fue el híbrido Bullseye de la empresa Seminis, el cual es de tipo saladette y hábito de crecimiento determinado, con cuatro racimos de producción. La siembra fue realizada el 10 de marzo del 2023 y el trasplante el 10 de abril del 2023.

Previo al trasplante se realizó la aplicación preventiva de imidacloprid 7.5 mL/L + deltametrina 0.01 mL/L + ingredientes inertes 0.91 mL/L (New Leverage®) y propamocarb 0.63 mL/L+ fosetil 0.37 mL/L (Previcur®), a las raíces de plántulas. Se realizaron dos aplicaciones en drench de imidacloprid 1.5 mL/L (Confidor®) a los cinco días después del trasplante (DDT) y a los 22 DDT, teniendo en cuenta la población de mosca blanca. También se realizaron tres aplicaciones preventivas del fungicida oxiclورو de cobre 3 g/L (Cupravit®) + surfactante/coadyuvante 1 mL/L (Inex-A®) teniendo en cuenta las condiciones predisponentes para la aparición de enfermedades. Y fueron hechas dos

aplicaciones foliares de spinetoram 0.75 mL/L (Fidato®) + surfactante/coadyuvante 1 mL/L (Inex-A®) para mitigar la presencia de mosca blanca. A partir de los 10 DDT se detectó la aparición de síntomas de deficiencias en los tratamientos a base de paja de maíz por lo que se tomó la decisión de aplicar fertilización foliar cada 15 días durante todo el ciclo del cultivo a todos los tratamientos utilizando un concentrado soluble a base de 9% Nitrógeno + 7% Pentóxido de fósforo + 6% Óxido de potasio + microelementos a razón de 3mL/L (Bayfolan®) + surfactante/coadyuvante 1 mL/L (Inex-A®).

La planta se condujo a un solo tallo y para mantener erectas las plantas, se realizó el tutorado, sujetando cada planta, mediante un anillo plástico, a una cinta de rafia amarrada a un alambre galvanizado sostenido de la estructura superior del invernadero a una altura aproximada de 2 m. Se realizó el retiro de los brotes laterales de manera semanal y el retiro de las hojas inferiores de la planta una vez que finalizó el llenado de frutos del primer racimo.

Para la nutrición se empleó una solución nutritiva completa, con la concentración nutrimental siguiente (mg/L): 200 de N, 45 de P, 225 de K, 220 de Ca, 50 de Mg, > 100 de S, 3 de Fe, 1 de Mn, 0.5 de B, 0.1 de Cu y 0.1 de Zn (Sánchez & Escalante, 1988).

El riego se realizó con base en radiación acumulada, con un equipo Priva NutriFit®. La activación de riego se programó para radiación alta (40 Klux) y baja (35 Klux), con CE de 1.6 y 2.0 mS/cm, respectivamente, con un total de 8-9 riegos por día.

Las propiedades químicas de los sustratos utilizados se describen en el Cuadro 19.

Cuadro. 19 propiedades químicas de los sustratos empleados en producción de jitomate

S	Antes del ciclo			Después de ciclo		
	pH	CE dS·m ⁻¹	CIC cmol(+) ⁻¹ kg ⁻¹	pH	CE dS·m ⁻¹	CIC cmol(+) ⁻¹ kg ⁻¹
1	7.11	0.37	6.1	6.8	0.35	9.4
2	7.45	0.26	9.9	6.81	0.36	8.3
3	7.73	0.41	16	7.09	0.22	9.4
4	7.33	0.26	8.8	7.34	0.25	9.4
5	6.06	1.92	71	6.77	1.37	73
6	6.29	0.45	7.2	6.72	0.29	9.2

S: sustrato. pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico.

13.3 Variables evaluadas

13.3.1 Propiedades físicas de los sustratos

Fueron medidos, antes y después del ciclo de cultivo, los parámetros siguientes: densidad aparente (Dap), capacidad de retención de humedad (CRH), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y agua total disponible (ATD) por el método de De Boodt et al. (1974).

13.3.2 Cuantificación de las variables morfológicas y de rendimiento del cultivo

Para cuantificar las variables morfológicas se seleccionaron 10 plantas al azar y se tomó medida a los 30 y 60 DDT, considerando lo siguiente:

Altura de planta

Se midió la altura (en cm) de la base del tallo al ápice de crecimiento de la planta con un flexómetro.

Diámetro de tallo

El diámetro de tallo fue medido (en mm) con un vernier por debajo del primer racimo.

Número de hojas

Se contabilizó el total de las hojas de 10 plantas de cada tratamiento.

Número de flores

Se contabilizó el total de las flores de 10 plantas de cada tratamiento.

Área foliar

Para cuantificar el área foliar (en cm^2), se tomaron la segunda y tercera hoja de 5 plantas de cada unidad experimental y se llevaron a un integrador de área foliar (Licor ®, modelo LI 300 A).

Peso de biomasa fresca y seca

Posterior a la cosecha de frutos, fueron cortadas 5 plantas por tratamiento a la altura del cuello y pesadas inmediatamente en una balanza digital al finalizar el ciclo. Posteriormente fueron colocadas en una estufa a 70 °C hasta obtener peso constante, para finalmente obtener el peso seco. Los datos fueron expresados en gramos.

Número y peso de frutos por planta

Esta variable fue tomada del primer, segundo y tercer racimo en tres cortes. En el momento de la maduración comercial, se cosecharon los frutos de 10 plantas por racimo por tratamiento, estos fueron cuantificados y pesados en una balanza digital. Posteriormente se calculó la media del peso fresco de los frutos de jitomate. Los datos fueron expresados en gramos.

13.3.3 Cuantificación de las variables de calidad de frutos

Diámetro polar y ecuatorial de frutos

Para esta variable se midió (en mm) con un vernier el largo y ancho de 5 frutos comerciales de cada racimo en maduración comercial.

Volumen de frutos

Se tomaron 5 frutos de tamaño y maduración comercial de cada tratamiento y repetición, éstos se sumergieron en una probeta graduada con un volumen conocido de agua, por desplazamiento se determinó el volumen de cada fruto y se obtuvo el promedio. Los valores fueron expresados en cm^{-3} .

Firmeza y color de frutos

Se tomaron 5 frutos de tamaño y maduración comercial de cada tratamiento y repetición y se determinó la firmeza de cada uno mediante un penetrómetro (Mecmesin Compact Gauge) y se expresó en newtons (N). Para determinar el color se utilizó un colorímetro digital (ColorTec-PCM™).

Concentración de sólidos solubles totales y Acidez titulable

Se tomaron 5 frutos de tamaño y maduración comercial de cada tratamiento y repetición y se formaron muestras compuestas por triplicado de 5 gramos, se procedió a licuar y a agregar a una probeta con 50 mL de agua destilada tomado el volumen total, se realizó la filtración, se utilizó una gota para determinar la concentración de sólidos solubles totales con un refractómetro digital (Atago Pocket refractometer Pa^{-1}), los valores se expresaron en °Brix. Posteriormente, se tomó una alícuota de 10 mL de muestra a la cual se le agregaron 2 gotas del indicador fenolftaleína a 1 % en etanol a 50 % y se procedió a titular con una solución de NaOH 0.1 N; los valores fueron expresados en % de ácido cítrico (AOAC, 1990).

Azúcares solubles totales

La determinación se realizó por el método de Antrona descrito por Witham et al. (1971). Para la obtención del extracto se tomaron cinco frutos de tamaño y maduración comercial de cada tratamiento y repetición y se formaron muestras compuestas por triplicado de 1 gramo las cuales fueron colocadas en tubos de fondo plano donde se agregaron 10 mL de etanol a 70 %. Los tubos fueron llevados a ebullición por tres minutos luego se realizó el filtrado y aforado a 10 mL con etanol a 70 % que posteriormente se llevó a evaporación.

Para la recuperación de los azúcares se agregaron 5 mL de agua destilada. Una vez obtenido el extracto acuoso, se tomó una alícuota de 0.5 mL de muestra en un tubo de fondo plano y se le adicionaron 1.5 mL de agua y 3 mL de antrona (0.4 g/100 mL de H₂SO₄ concentrado) con ayuda de una bureta y en un recipiente con agua con hielo para bajar la temperatura de reacción. Luego los tubos fueron llevados a ebullición por 3 min, para posteriormente enfriarlos y realizar la lectura con un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv scanning®) a 600 nm. La concentración de azúcares se calculó a partir de una curva patrón a base de glucosa ($y=0.0006x-0.0134$; $R^2= 0.98$).

13.4 Análisis estadístico

Los resultados de las variables fueron sometidos al análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación de medias Tukey, con un nivel de significancia de 5 %.

14. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

14.1 Caracterización física de sustratos en producción

En los Cuadros 20 y 22, se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza de las propiedades físicas de los sustratos empleados antes y después del ciclo de producción, respectivamente, donde se aprecian las diferencias estadísticas significativas para todas las variables estudiadas.

Cuadro 20. Cuadros medios de las propiedades físicas de los sustratos antes del ciclo de producción de jitomate

FV	GL	Dap (g·cm ⁻³)	CRH (%)	EPT (%)	CA (%)	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
S	5	0.36 **	22.31 **	422.99 **	415.18 **	9.47 **	3.62 **	81.04 **	23.55 **
Error	12	0.00	0.26	0.49	0.69	0.21	0.05	0.07	0.32
Total	17								
CV%		1.64	1.68	0.99	2.04	7.63	9.62	1.21	6.89

** altamente significativo con $p \leq 0.01$. S: sustrato. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

En los Cuadros 21 y 23, se presentan las pruebas de medias de las propiedades físicas de los sustratos empleados antes y después del ciclo de producción, respectivamente, donde se observa que las variables evaluadas presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos.

Cuadro 21. Comparación de medias de las propiedades físicas de los sustratos antes del ciclo de producción de jitomate

Sustrato	Dap (g·cm ⁻³)	CRH (%)	EPT (%)	CA (%)	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
1	0.40 e	31.28 ab	75.24 b	43.96 b	4.61 cd	1.75 bc	24.92 b	6.36 cd
2	0.69 b	32.84 a	71.65 c	38.81 c	6.86 b	1.97 bc	24.02 c	8.82 b
3	0.44 d	31.93 ab	69.75 c	37.82 c	4.27 d	1.53 c	26.13 a	5.80 d
4	0.64 c	32.49 ab	64.26 c	31.76 d	5.56 c	1.45 c	25.49 ab	7.00 cd
5	0.10 f	28.64 c	90.90 a	62.26 a	5.46 cd	2.18 b	21.00 d	7.64 cb
6	1.13 a	25.85 d	55.39 e	29.54 d	9.11 a	4.38 a	12.36 e	13.49 a
DMSH	0.03	1.40	1.93	2.28	1.25	0.58	0.74	1.55

Letras diferentes en la misma columna para cada sustrato indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). 1: A/T 75/25; 2: A/T 50/50; 3: M/T 75/25; 4: M/T 50/50; 5: Fibra de coco; 6: Tezontle. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 22. Cuadrados medios de las propiedades físicas de los sustratos después del ciclo de producción de jitomate

FV	GL	Dap (g·cm ⁻³)	CRH (%)	EPT (%)	CA (%)	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
S	5	0.40 **	225.83 **	496.36 **	595.17 **	59.74 **	10.73 **	156.90 **	112.66 **
Error	12	0.00	0.67	0.94	1.29	0.93	0.70	0.53	0.76
Total	17								
CV %		1.76	2.00	1.56	5.29	8.17	17.70	2.99	5.28

** altamente significativo con $p \leq 0.01$. S: sustrato. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. FV: Fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Cuadro 23. Comparación de medias de las propiedades físicas de los sustratos después del ciclo de producción de jitomate

Sustrato	Dap (g·cm ⁻³)	CRH (%)	EPT (%)	CA (%)	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
1	0.71 d	48.76 a	63.65 b	14.89 c	15.69 a	5.04 a	28.03 b	20.73 a
2	0.98 b	42.80 b	53.82 c	11.02 d	14.90 a	6.41 a	21.50 c	21.31 a
3	0.69 d	50.59 a	64.72 b	14.13 cd	15.32 a	6.14 a	29.13 b	21.46 a
4	0.91 c	37.21 c	49.62 d	12.41 cd	11.58 b	4.20 a	21.44 c	15.78 b
5	0.10 e	38.86 c	85.69 a	46.83 a	4.57 d	1.21 b	33.08 a	5.78 c
6	1.15 a	26.78 d	56.00 c	29.22 b	8.64 c	5.29 a	12.85 d	13.93 b
DMSH	0.04	2.24	2.67	3.11	2.64	2.29	2.00	2.39

Letras diferentes en la misma columna para cada sustrato indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). S: sustrato; 1: A/T 75/25; 2: A/T 50/50; 3: M/T 75/25; 4: M/T 50/50; 5: Fibra de coco; 6: Tezontle. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; CA: capacidad de aireación; EPT: espacio poroso total; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

La densidad aparente de los sustratos en mezcla (S1, S2, S3 y S4) aumentó de acuerdo con las proporciones de los componentes de las mezclas, a mayor proporción de tezontle la densidad aparente fue más alta y hubo un aumento en la densidad aparente transcurrido el tiempo, debido a la degradación de los sustratos orgánicos. Los valores de Dap en los tratamientos (S1 y S3) cuyas mezclas fueron de una proporción 75/25 v/v, se mantuvieron dentro del intervalo antes y después del ciclo (0.19 a 0.7 g·cm⁻³) (Bilderback et al., 2013a). La densidad aparente para los Sustratos 5 y 6 se mantuvieron estables antes y después del ciclo, pero fuera del intervalo ideal. La Dap es una propiedad física importante que afecta la retención de agua y aire e influye en la penetrabilidad de las raíces de las mezclas de sustrato (Bar-tal, 2019).

En el Cuadro 24, se presenta la prueba de medias de las propiedades físicas de los sustratos empleados antes y después del ciclo de producción de jitomate, cabe destacar que se observaron diferencias significativas entre todas las variables, excepto en el sustrato de tezontle donde las propiedades físicas se mantuvieron sin variación.

Cuadro 24. Comparación de medias de las propiedades físicas de sustratos en campo antes (AC) y después del ciclo (DC) de producción de jitomate

S	Ciclo	Dap (g·cm ⁻³)	CRH (%)	EPT (%)	CA (%)	AFD (%)	AR (%)	ADD (%)	ATD (%)
1	AC	0.40 b	31.28 b	75.24 a	43.96 a	4.61 b	1.75 b	24.92 b	6.36 b
	DC	0.71 a	48.76 a	63.65 b	14.89 b	15.69 a	5.04 a	28.03 a	20.73 a
DMSH		0.03	1.85	2.01	3.50	1.28	1.56	1.99	2.32
2	AC	0.69 b	32.84 b	71.65 a	38.81 a	6.86 b	1.97 b	24.02 a	8.82 b
	DC	0.98 a	42.80 a	53.82 b	11.02 b	14.90 a	6.41 a	21.50 b	21.31 a
DMSH		0.01	1.00	2.59	2.06	1.86	1.98	0.63	1.09
3	AC	0.44 b	31.93 b	69.75 a	37.82 a	4.27 b	1.53 b	26.13 b	5.80 b
	DC	0.69 a	50.59 a	64.72 b	14.13 b	15.32 a	6.14 a	29.13 a	21.46 a
DMSH		0.02	2.13	1.78	1.49	2.35	1.70	0.62	2.01
4	AC	0.64 b	32.49 b	64.26 a	31.76 a	5.56 b	1.45 b	25.49 a	7.01 b
	DC	0.91 a	37.21 a	49.62 b	12.41 b	11.58 a	4.20 a	21.44 b	15.78 a
DMSH		0.04	1.86	2.01	2.73	1.91	0.65	1.35	2.19
5	AC	0.10 a	28.64 b	90.90 a	62.26 a	5.46 a	2.18 a	21.00 b	7.64 a
	DC	0.10 a	38.86 a	85.69 b	46.83 b	4.57 a	1.21 b	33.08 a	5.78 b
DMSH		0.00	1.01	1.67	1.07	1.03	0.31	1.50	0.96
6	AC	1.13 a	25.85 a	55.39 a	29.54 a	9.11 a	4.38 a	12.36 a	13.49 a
	DC	1.15 a	26.78 a	56.00 a	29.22 a	8.64 a	5.29 a	12.85 a	13.93 a
DMSH		0.04	0.94	1.20	1.77	1.48	1.29	0.70	0.56

Letras diferentes en la misma columna para cada ciclo indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). S: sustrato; 1: A/T 75/25; 2: A/T 50/50; 3: M/T 75/25; 4: M/T 50/50; 5: Fibra de coco; 6: Tezontle. AC: antes de ciclo; DC: después de ciclo. Dap: densidad aparente CRH: capacidad de retención de humedad; EPT: espacio poroso total; CA: capacidad de aireación; AFD: agua fácilmente disponible; AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; ATD: agua total disponible; DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Hubo baja capacidad de retención de humedad en la mayoría de los sustratos, pero esta propiedad mejoró después del ciclo de producción para los sustratos con componente orgánico (S1, S2, S3, S4 y S5), el intervalo recomendado de esta propiedad es de 45 a 65 % (Bilderback, 2005), el cual se alcanzó en los sustratos con mayor proporción orgánica (S1 y S3). En relación al porcentaje de espacio poroso total (% EPT), cuanto mayor era el volumen de paja en la proporción de la mezcla, fue mayor el EPT tanto al inicio como al final de ciclo. El tratamiento con fibra de coco, fue el que presentó mayor porcentaje EPT tanto al inicio como al final del ciclo. Cabe mencionar que hubo una disminución en el espacio poroso total después del ciclo por la diferencia de tamaño de partículas, porque las partículas pequeñas provenientes de la descomposición de la fracción orgánica del sustrato tienden a acomodarse entre los macroporos (Cruz-Crespo

et al., 2017), mientras que el tezontle (S6) se mantuvo estable. Para Schafer y Lerner (2022), un sustrato ideal debe tener 85 % de EPT, lo cual fue logrado solo por la fibra de coco (S5), mientras que para Bilderback et al. (2013), los valores deseados pueden ir de 50 a 85 %, en este caso, todos los sustratos lo obtuvieron.

La capacidad de aireación al inicio del cultivo en los Sustratos 1, 2, 3 y 4 fue muy elevada, pero presentó una abrupta disminución al final del ciclo, a pesar de ello, se mantuvo dentro del intervalo aceptable. En el caso del S5 al finalizar el ciclo siguió estando muy por encima de los valores deseados, mientras que el S6 se mantuvo estable. La capacidad de aireación para especies muy demandantes de oxígeno debería de ir de 20 a 30 % pero puede ser aceptable a partir del 10 % (Urrestarazu, 2015).

Los sustratos con contenido orgánico tienen la desventaja de no tener mucha estabilidad, al tener actividad biológica sufren descomposición (Carlile et al., 2019). Cuando son utilizadas mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos se debe tener a consideración ese factor dado que con el envejecimiento se producen cambios de distribuciones y tamaño de poros que a su vez modifican las propiedades fisicoquímicas de los sustratos, en especial las propiedades hidráulicas y de aireación (Bar-Tal et al., 2019). El tamaño de partículas disminuye con la descomposición aumentando la capacidad de retención de humedad y disminuyendo la capacidad de aireación (Mixquititla-Casbis et al., 2022). Otro factor que afecta las propiedades hidráulicas de los sustratos orgánicos es su hidrofobicidad y su compresibilidad al secarse que suelen afectar negativamente el contenido de humedad en el sustrato (Michel, 2015).

El contenido de humedad en los sustratos es afectado también por el tamaño y distribución de las partículas, la superficie de las partículas y el tamaño de poros que estas forman (Lieth & Oki, 2019). Al-Ajlouni et al. (2017) encontraron que cuanto mayor es el tamaño de partículas de arena volcánica, menor será la capacidad de retención de humedad y menor la densidad aparente, partículas de 0 a 2 mm tuvieron una capacidad de retención de humedad de 35.88 %, partículas de 0 a 8 mm tuvieron una capacidad de retención de humedad de 28.12 % y partículas de 2 a 4 mm, 22.36 % de CRH los últimos con valores similares al T6 de este experimento. En tanto que Cruz-Crespo et al. (2017) encontraron que el tezontle con tamaño de partículas de 2 a 7 mm tuvo un porcentaje de

AFD de 7.06 %, AR de 18.72 %, ATD de 25.78 % y ADD de 9.92 %, valores distintos a los observados en esta investigación, debido a que se empleó tezontle con partículas menores a 5 mm.

Por lo que corresponde a la fibra de coco presentó cierta estabilidad por lo que no sufrió cambios muy importantes durante el cultivo. Tiene diferentes propiedades físicas según la presentación en la que es comercializada y en su grado de descomposición. Cuando las fibras de este sustrato son largas o contiene fragmentos grandes de la cáscara del coco (5-15 mm) su capacidad de retención de humedad suele ser menor (Carlile et al., 2019). La razón por la que el S5 a base de fibra de coco mostró propiedades hidráulicas poco deseables pudo deberse también al tamaño de partículas. En este sentido, García-Barreto y Testezlaf (2014), observaron que la capacidad de retención de humedad fue afectada por el tamaño de partículas de la fibra de coco debido a la irregularidad del tamaño y el patrón de las partículas y la presencia de fibras largas que afectaron la uniformidad del acomodo de las partículas en el contenedor, estas características son similares al sustrato de fibra de coco utilizado en este experimento.

En los Sustratos 1, 2, 3 y 4, el porcentaje de agua fácilmente disponible y de agua de reserva fue muy baja al inicio del cultivo, propiedades que mejoraron con el tiempo, aunque AFD igualmente no llegó a un valor deseado. El contenido de agua total disponible mejoró al final del ciclo, pero no llegó al intervalo ideal. En los Sustratos 5 y 6, los porcentajes de AFD fueron bajos y se mantuvieron hasta el final del ciclo. Los valores recomendados para AFD, AR y ATD son de 20 a 30 %, 4 a 10 % y 24 a 30 %, respectivamente (De Boodt et al., 1974; Ansorena, 1994; Abad et al., 1998; Handreck & Black, 2002). Valores orientativos que se toman desde el punto de vista de facilitar el manejo y que dependen del sistema de cultivo elegido (Barbaro & Karlanián, 2020).

Aunque aumentó la capacidad de retención de humedad (CRH) en el Sustrato 5, la fracción de agua en que se concentró mayormente fue en el agua difícilmente disponible (ADD). El agua difícilmente disponible suele estar fuertemente unida a las superficies de las partículas siendo menos disponible para las plantas y esto sucede a medida que el sustrato se seca y el potencial hídrico del sustrato se vuelve más negativo (Fields et al., 2018). El agua difícilmente disponible aumentó al final del cultivo en los sustratos con

mayor contenido de materia orgánica (S1, S3 y S5) y disminuyó en los Sustratos 2 y 4 que contienen igual proporción de paja y tezontle, estas diferencias podrían deberse a la proporción de materia orgánica en la mezcla y a su descomposición formando sustancias húmicas. Estas sustancias pueden aumentar la retención de humedad en los sustratos al cambiar la estructura de las partículas, y en su proceso de formación pueden interaccionar muchos factores como las características del material, la actividad microbiana, temperatura, pH, humedad, oxígeno, la relación carbono nitrógeno y la humedad (Guo et al., 2019).

Para el agua total disponible (ATD), Schafer y Lerner, (2022) mencionan que un intervalo ideal es del 25 al 30 %. Sin embargo, a pesar de que al final de ciclo mejoró el ATD, ningún sustrato utilizado, incluyendo los sustratos 5 y 6, alcanzaron el intervalo ideal para esta variable.

Según Cruz-Crespo et al. (2017) cuando un sustrato tiene un porcentaje de AFD baja y una CA alta los riegos deben ser más frecuentes y en menor volumen para asegurar la disponibilidad de agua para las plantas.

En la Figura 6, se pueden observar las curvas de liberación de humedad de los diferentes sustratos antes y después de ciclo, comparados con la curva del sustrato ideal De Boodt et al. (1974). Puede notarse que los sustratos no tienen un buen equilibrio entre su capacidad de retención de humedad y su capacidad de aireación, siendo esta última mucho mayor. Al final de ciclo hubo alguna mejoría en algunos sustratos que se fueron acercando un poco más al valor ideal.

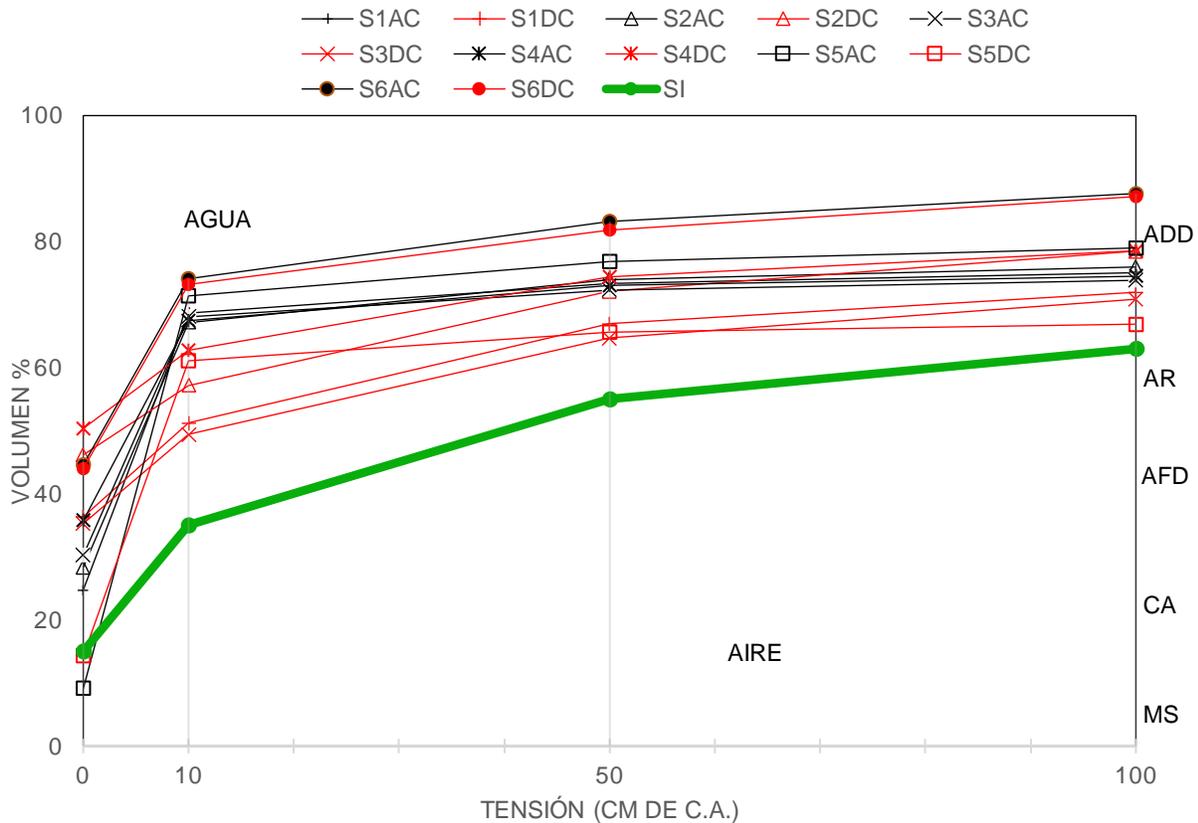


Figura 6. Curva de liberaci3n de humedad de sustratos en producci3n antes y despu3s de ciclo. S1AC: sustrato 1 antes de ciclo; S1DC: sustrato 1 despu3s de ciclo. S2AC: sustrato 2 antes de ciclo; S2DC: sustrato 2 despu3s de ciclo. S3AC: sustrato 3 antes de ciclo; S3DC: sustrato 3 despu3s de ciclo. S4AC: sustrato 4 antes de ciclo; S4DC: sustrato 4 despu3s de ciclo. S5AC: sustrato 5 antes de ciclo; S5DC: sustrato 5 despu3s de ciclo. S6AC: sustrato 6 antes de ciclo; S6DC: sustrato 6 despu3s de ciclo; SI: sustrato ideal.

14.2 Variables de crecimiento

Para las variables de crecimiento de jitomate en el primer muestreo, hubo efecto altamente significativo sobre la altura de plantas (AP) y efecto significativo sobre el di3metro del tallo. No se observaron diferencias para el n3mero de hojas (NH) y n3mero de flores (NF) (Cuadro 25). En el segundo muestreo s3lo se observ3 efecto altamente significativo en el di3metro del tallo (DT), mientras que en el resto de las variables no se presentaron diferencias.

Cuadro 25. Cuadros medios de las variables de crecimiento de jitomate

FV	GL	Primer muestro				Segundo muestro			
		AP (cm)	DT (mm)	NH	NF	AP (cm)	DT (mm)	NH	NF
B	3	18.38	0.03	0.03	0.12	10.43	0.03	0.04	0.32
S	5	11.94 **	0.17 *	0.20 ns	0.61 ns	2.64 ns	0.68 **	0.34 ns	1.86 ns
Error	15	1.86	0.05	0.13	0.29	1.45	0.04	0.12	0.90
Total	23								
CV %		2.09	2.44	2.81	4.67	1.72	1.61	2.60	6.91

** altamente significativo con $P \leq 0.01$; * significativo con $P \leq 0.05$; ns: no significativo. B: bloque. S: sustrato AP: altura de planta; DT: diámetro del tallo; NH: número de hojas; NF: número de flores. FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Para altura de planta (AP) como se presenta en el Cuadro 26, se observó que la mayor altura en promedio fue con el Tratamiento 3 con 66.19 cm, aunque este tratamiento no tuvo diferencias significativas con los Sustratos 1, 2, 4 y 5; sin embargo, sí presentaron diferencias estadísticas altamente significativas con el Sustrato 6, donde este tratamiento tuvo una altura en promedio de 61.77 cm, siendo estadísticamente diferente que los demás tratamientos.

En el diámetro de tallo (DT) de jitomate para el primer muestreo tratados con diferentes sustratos, se observó que el Sustrato 4 fue el de mayor diámetro con 9.85 mm en promedio, mientras que el menor promedio se observó en el Sustrato 6 con 9.30 mm (Cuadro 26).

Cuadro 26. Comparaciones de medias de las variables de crecimiento del jitomate

S	Primer muestro				Segundo muestro			
	AP (cm)	DT (mm)	NH	NF	AP (cm)	DT (mm)	NH	NF
1	66.02 a	9.37 a	13.15 a	11.13 a	71.24 a	11.07 d	13.40 a	14.48 a
2	66.00 a	9.73 ab	13.00 a	11.40 a	71.01 a	11.35 cd	13.03 a	12.78 a
3	66.19 a	9.55 ab	13.08 a	11.65 a	69.99 a	11.99 ab	13.40 a	14.40 a
4	66.10 a	9.85 a	12.95 a	12.13 a	69.49 a	12.01 ab	13.08 a	13.78 a
5	65.04 a	9.61 ab	13.43 a	11.05 a	70.10 a	11.62 bc	13.65 a	13.60 a
6	61.77 b	9.30 b	12.75 a	11.40 a	69.20 a	12.09 ab	12.88 a	13.10 a
DMHS	3.13	0.54	0.84	1.23	2.77	0.43	0.79	2.17

Letras diferentes en la misma columna para cada sustrato indican diferencias significativas (Tukey $\alpha = 0.05$). S: sustrato; 1: A/T 75/25; 2: A/T 50/50; 3: M/T 75/25; 4: M/T 50/50; 5: Fibra de coco; 6: Tezontle. AP: altura de planta; DT: diámetro del tallo; NH: número de hojas; NF: número de flores. DMHS: diferencia mínima significativa honesta.

Para la segunda lectura, el mayor diámetro de tallo se observó en el Tratamiento 6, con 12.09 mm en promedio, mientras que el Tratamiento 1 fue el tratamiento con menor diámetro en promedio con 11.07 cm (Cuadro 26), para ambos tratamientos se presentó diferencias estadísticas altamente significativas entre sí.

Cuadro 27. Cuadrados medios de las variables de crecimiento de jitomate

FV	GL	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)
B	3	247424.25	3662.46	58.63
S	5	202430.49 ns	8254.57 ns	85.66 ns
Error	15	98789.84	3349.29	49.16
Total	23			
CV %		6.44	6.03	5.48

ns: no significativo. B: bloque. S: sustrato. AF: área foliar; PF: peso fresco; PS: peso seco. FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

No hubo efecto significativo sobre las variables área foliar (AF), peso fresco (PF) y peso seco (PS) por planta (Cuadro 28). Vargas-Canales et al. (2014), no observaron diferencias estadísticas en variables de biomasa al utilizar tezontle en mezcla con aserrín, coincidiendo con lo observado en este experimento.

Cuadro 28. Comparaciones de medias de área foliar, peso fresco y peso seco de jitomate.

Sustrato	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)
1 A/T 75/25	4689.1 a	902.41 a	122.9 a
2 A/T 50/50	4907.2 a	1003.31 a	131.6 a
3 M/T 75/25	4886.8 a	990.27 a	132.3 a
4 M/T 50/50	5125 a	997.09 a	130.8 a
5 Fibra de coco	5101.4 a	954 a	129.1 a
6 Tezontle	4553.2 a	907.04 a	121.6 a
DMSH	722.07	132.95	16.11

Letras iguales en la misma columna para cada sustrato indican resultados estadísticamente similares (Tukey $\alpha = 0.05$). AF: área foliar; PF: peso fresco; PS: peso seco. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

14.3 Variables de rendimiento y calidad de frutos

Para las variables de rendimiento, el análisis de varianza indicó que no hubo diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Cuadro 29). No se observaron diferencias significativas entre las medias de las variables número de frutos y el peso de frutos (Cuadro 30).

Cuadro 29. Cuadrados medios de las variables de rendimiento en los diferentes sustratos utilizados en la producción de jitomate

FV	GL	Número de frutos por planta	Peso de frutos por planta
B	3	0.24	4821.38
S	5	1.29 ns	28311.89 ns
Error	15	0.47	8807.42
Total	23		
CV %		3.94	3.85

ns: no significativo. B: bloque; S: sustrato FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Cuadro 30. Comparaciones de medias de las variables de rendimiento en los diferentes sustratos utilizados en la producción de jitomate

Sustrato	Número de frutos por planta	Peso de frutos por planta
1 A/T 75/25	17.00 a	2343.89 a
2 A/T 50/50	16.43 a	2342.75 a
3 M/T 75/25	17.75 a	2426.18 a
4 M/T 50/50	17.93 a	2547.40 a
5 Fibra de coco	17.53 a	2502.73 a
6 Tezontle	17.70 a	2472.21 a
DMSH	1.57	215.6

Letras iguales en cada columna indican resultados estadísticos similares (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Vargas-Canales et al. (2014), al mezclar tezontle con aserrín proveniente de distintas fuentes no encontraron diferencias significativas en la mayoría de las variables agronómicas y de rendimiento de jitomate. Los mismos autores mencionan que observaron una tendencia marcada de superioridad para la mayoría de los tratamientos donde hubo mezclas, coincidiendo en ese sentido con lo observado en este experimento.

Los rendimientos obtenidos para esta investigación para la variedad Bullseye fueron similares a otras investigaciones, ya que en trabajos hechos por Sánchez-Del Castillo et al. (2020) y Sánchez-del Castillo et al. (2021), encontraron promedios similares en relación a rendimiento, independientemente del tipo de tratamiento utilizado.

Referente a variables de calidad de frutos tampoco hubo diferencias estadísticas significativas en los parámetros medidos (Cuadro 31, 32, 33 y 34).

Cuadro 31. Cuadrados medios de las variables de tamaño de frutos

FV	GL	V (cm ³)	DP (mm)	DE (mm)
S	5	193.90 ns	12.24 ns	2.35 ns
Error	18	172.03	5.63	2.30
Total	23			
CV %		6.64	3.11	2.78

ns: no significativo. S: sustrato. V: volumen; DP: diámetro polar; DE: diámetro ecuatorial. FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Cuadro 32. Comparaciones de medias de las variables de tamaño de frutos

Sustrato	V (cm ³)	DP (mm)	DE (mm)
1 A/T 75/25	189.25 a	73.36 a	53.83 a
2 A/T 50/50	193.50 a	75.76 a	54.23 a
3 M/T 75/25	199.00 a	76.28 a	55.91 a
4 M/T 50/50	194.50 a	76.64 a	54.14 a
5 Fibra de coco	199.25 a	76.28 a	55.16 a
6 Tezontle	209.50 a	78.62 a	54.60 a
DMSH	29.47	5.33	3.41

Letras iguales en la misma columna para cada sustrato indican resultados estadísticos similares. V: volumen; DP: diámetro polar; DE: diámetro ecuatorial. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 33. Cuadrados medios de los parámetros de calidad de frutos

FV	GL	F (N)	Croma	HUE	SST (°Brix)	AT (%)	AST (g/100g)
S	5	6.44 ns	1.09 ns	10.11 ns	0.10 ns	0.00 ns	0.03 ns
Error	18	2.54	3.45	14.80	0.16	0.00	0.03
Total	23						
CV							
%		8.85	4.21	7.12	8.97	7.48	3.92

ns: no significativo. S: sustrato. F: firmeza; SST: sólidos solubles totales; AT: acidez titulable; AST: azúcares solubles totales. FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación.

Cuadro 34. Comparaciones de medias de los parámetros de calidad de frutos

S	F (N)	Croma	HUE	SST (°Brix)	AT (%)	AST (g/100 g)
1	17.39 a	44.88 a	51.14 a	4.45 a	0.28 a	4.55 a
2	17.38 a	44.00 a	54.01 a	4.73 a	0.27 a	4.60 a
3	17.67 a	43.48 a	55.62 a	4.56 a	0.26 a	4.72 a
4	18.40 a	44.61 a	53.91 a	4.28 a	0.24 a	4.68 a
5	16.88 a	43.99 a	55.35 a	4.39 a	0.26 a	4.68 a
6	20.40 a	43.78 a	53.92 a	4.40 a	0.27 a	4.52 a
DMSH	3.58	4.18	8.64	0.90	0.04	0.41

Letras iguales en la misma columna para cada sustrato indican resultados estadísticos similares. 1: A/T 75/25; 2: A/T 50/50; 3: M/T 75/25; 4: M/T 50/50; 5: Fibra de coco; 6: Tezontle. F: firmeza. SST: sólidos solubles totales. AT: acidez titulable; AST: azúcares solubles totales. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

El tamaño, la firmeza y el color del jitomate son parámetros visuales importantes que determinan la calidad de los frutos en el momento de su comercialización y consumo, además de una buena apariencia en color, forma y textura también es exigido que los frutos tengan cualidades internas deseables como el contenido de sólidos solubles y acidez, y otros factores que determinan su aroma y sabor (Huang et al., 2018; Kumar et al., 2022). Los resultados indican que los parámetros de calidad están dentro de lo deseable para frutos de jitomate pues existen reportes con medias de valores similares en la literatura (Vázquez et al., 2015; Martínez-Rodríguez, 2017; Kaur et al., 2018; Ilahy et al., 2018).

De acuerdo con los resultados de la investigación, las propiedades de los sustratos empleados, aunque no son ideales (De Boodt et al., 1974; Ansorena, 1994; Abad et al.,

1998; Handreck & Black, 2002), son aceptables y permitieron que el ciclo de cultivo se completara sin contratiempos, lo cual se vio reflejado en los parámetros de producción y calidad evaluados que no mostraron diferencias entre los tratamientos. El empleo de un híbrido como el Bullseye, de ciclo corto y crecimiento determinado, permitió que a lo largo del ciclo de cultivo no se pudieran apreciar las variaciones que los sustratos iban presentando al paso del tiempo. Es decir, de implementar esta investigación en un ciclo de producción largo, es muy probable que se manifiesten los efectos de las propiedades cambiantes de los sustratos sobre el desarrollo del cultivo y por ende de su producción.

15. CONCLUSIONES

La densidad aparente de los sustratos a base de paja de avena y de maíz aumentó con la mezcla con tezontle, siendo esta mayor cuando se incrementó la proporción del componente inorgánico.

La fibra de coco presentó mayor porosidad que el resto de los sustratos evaluados. En cuanto a las mezclas, el espacio poroso total fue mayor en las mezclas con más proporción del componente orgánico.

La alta capacidad de aireación antes de ciclo de cultivo en los sustratos orgánicos alternativos de residuos de cereales disminuyó considerablemente al final de este. No así en los sustratos comerciales fibra de coco y tezontle.

Los porcentajes de Agua Fácilmente Disponible, Agua de Reserva y Agua Totalmente Disponible fueron bajos para los sustratos estudiados.

Al final de ciclo se observaron cambios en las propiedades físicas de los sustratos en mezcla y la fibra de coco, mientras que no hubo cambios para el tezontle. Los sustratos en mezcla mostraron baja estabilidad por la descomposición de la materia orgánica. Estos cambios mejoraron la mayoría de las características físicas de dichos sustratos, excepto la capacidad de aireación.

No se observaron diferencias en el crecimiento de la planta, ni en el rendimiento y calidad de frutos entre los sustratos alternativos y los sustratos comerciales evaluados.

Los sustratos utilizados no llegaron a tener las características físicas óptimas; sin embargo, fue posible llevar a cabo un ciclo corto de producción de jitomate adecuado.

16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, M., Noguera, P., & Carrión, C. (1998). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales*. Mundi-Prensa.
- Al-Ajlouni, M. G., Ayad, J. Y., & Othman, Y. A. (2017). Particle size of volcanic tuff improves shoot growth and flower quality of Asiatic hybrid lily using soilless culture. *HortTechnology*, 27(2), 223-227.
- Ansorena J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Mundi Prensa.
- Association of Official Analytical Chemists International. (1990, AOAC). AOAC Official Method 2007.01.
- Barbaro, L. A., & Karlanián, M. A. (2020). Efecto de las propiedades físicas del sustrato sobre el desarrollo de plantines florales en maceta. *Ciencia del Suelo*, 38(1), 01-11.
- Bar-Tal, A., Saha, U. K., Raviv, M., & Tuller, M. (2019). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 259-301). Elsevier.
- Bilderback, T. E., Riley, E. D., Jackson, B. E., Kraus, H. T., Fonteno, W. C., Owen Jr, J. S., Altralnd, J., & Fain, G. B. (2013). Strategies for developing sustainable substrates in nursery crop production. *Acta Horticulturae*, 1013, 43-56.
- Bilderback, T. E., Warren, S. L., Owen, J. S., & Albano, J. P. (2005). Healthy substrates need physicals too!. *HortTechnology*, 15(4), 747-751.
- Borja, B., Reyes, M., Espinosa, G., & Vélez, I. (2013). *Producción y consumo de rastrojos en México. Rastrojos manejo, uso y mercado en el centro y sur de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Burés, S. (1997). *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas.
- Carlile, W. R., Raviv, M., & Prasad, M. (2019). Organic soilless media components. *Soilless Culture*, 303-378.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (2020). *Reporte distribución de granos básicos: Lugar de adquisición o compra*. CEDRSSA. Recuperado de: http://www.cedrssa.gob.mx/post_n-distribucionin_de_granos_bnosicos-n_lugar_de_adquisicinin_o_compra.htm
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, Á., Pineda-Pineda, J., Moreno-Velázquez, D., Aguilar-Benítez, G., & García-Paredes, J. D. (2019). Relación entre las propiedades físicas de mezclas de lombricompost con tezontle, piedra pómez y cascarilla de arroz. *Agrociencia*, 53(1), 1-12.
- De Boodt, D. Verdonck, O., & Cappaert, I. (1974). Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, 2054-2062.
- Fields, J. S., Owen, J. S., Altland, J. E., Van Lersel, M. W., & Jackson, B. E. (2018). Soilless substrate hydrology can be engineered to influence plant water status for an ornamental containerized crop grown within optimal water potentials. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 143(4), 268-281.
- García-Barreto, C. V., & Testezlaf, R. (2014). Particle size distribution effects on physical characteristics of coconut and pine bark substrates. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 13(3), 327-336.

- Guo, X. X., Liu, H. T., & Wu, S. B. (2019). Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of the Total Environment*, 662, 501-510.
- Handreck, K. A., & Black, N. D. (2002). *Growing media for ornamental plants and turf*. UNSW press.
- Hartmann, H., y Kester, D. (2002). *Plant propagation. Principles and practices*. Prentice Hall.
- Huang, Y., Lu, R., & Chen, K. (2018). Prediction of firmness parameters of tomatoes by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 222, 185-198.
- Hudson, T., Dale, E., Fred, T., & Robert, L. (2002). *Hartmann and Kester's plant propagation: Principles and practice*. (8th ed.), Pearson.
- Ilahy, R., Siddiqui, M. W., Tlili, I., Montefusco, A., Piro, G., Hdider, C., & Lenucci, M. S. (2018). When color really matters: horticultural performance and functional quality of high-lycopene tomatoes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 37(1), 15-53.
- Kaur, H., Bedi, S., Sethi, V. P., & Dhatt, A. S. (2018). Effects of substrate hydroponic systems and different N and K ratios on yield and quality of tomato fruit. *Journal of Plant Nutrition*, 41(12), 1547-1554.
- Kennard, N., Stirling, R., Prashar, A., & Lopez-Capel, E. (2020). Evaluation of recycled materials as hydroponic growing media. *Agronomy*, 10(8), 1092.
- Kumar, R., Paul, V., Pandey, R., Sahoo, R. N., Gupta, V. K., Asrey, R., & Jha, S. K. (2022). Reflectance based non-destructive assessment of tomato fruit firmness. *Plant Physiology Reports*, 27(3), 374-382.
- Lieth, J. H., & Oki, L. R. (2019). *Irrigation in soilless production*. In M. Raviv, J.H. Lieth & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 381-424). Elsevier
- Maher, M., Prasad, M., & Raviv, M. (2008). Organic soilless media components. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp.505-536). Elsevier.
- Martínez-Rodríguez, O. G., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., & García-Paredes, J. D. (2017). Influence of irrigation and substrate on yield and quality of tomato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 53-65.
- Michel, J. C. (2015). Wettability of organic growing media used in horticulture: A review. *Vadose Zone Journal*, 14(6), 1-6. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0124>
- Mixquititla-Casbis, G. M., Torres, Ó. G. V., Rodríguez, M. A., & Nava, H. S. (2022). Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 8, 1-9. <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081007>
- Ortega-Martínez, L. D., Martínez-Valenzuela, C., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., & Pérez Armendáriz, B. (2016). Eficiencia de sustratos en el sistema hidropónico y de suelo para la producción de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 643-653.
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., Salcido-Ramos, B. A., & Manzo-Ramos, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3), 339-346.
- Park, J. H., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N., & Chung, J. W. (2011).

- Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 549-574.
- Pineda-Pineda, J., Sánchez del Castillo, F., Ramírez-Arias, A., Castillo-González, A. M., Valdés-Aguilar, L. A., & Moreno- Pérez, E. D. C. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 18(1), 95-111.
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. *Energies*, 16(4), 1690.
- Resh, H. (1998). *Cultivos hidropónicos*. Editorial Mundi-Prensa.
- Ruilova-Cueva, M. B., & Hernández-Monzón, A. (2014). Evaluación de residuos agrícolas para la producción del hongo *Pleurotus ostreatus*. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 48(1), 54-59.
- Sánchez-Del Castillo, F., & Escalante-Rebolledo, E. (1988). *Hidroponía*. (3ra ed.). Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez-Del Castillo, F., Cabañas-Díaz, A., Pineda-Pineda, J., González-Molina, L., & Moreno-Pérez, E. D. C. (2021). Evaluación de métodos de recirculación de solución nutritiva para la producción de jitomate en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 433-445.
- Sánchez-Del Castillo, F., Portillo-Márquez, L., Moreno-Pérez, E. D. C., Magdaleno-Villar, J. J., & Vázquez-Rodríguez, J. C. (2021). Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 27(2), 71-84.
- Schafer, G., & Lerner, B. L. (2022). Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*, 28, 181-192.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). *Plan de Manejo de residuos generados en actividades agrícolas. Primera Etapa: Diagnóstico Nacional*. SAGARPA.
- Urrestarazu, M. (2015). *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Vargas-Canales, J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A., & Avitia-García, E. (2014). Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 20(1), 71-88.
- Vázquez, P. V., López, M. Z. G., Cortez, M. C. N., & Hernández, D. G. (2015). Efecto de la composta y té de composta en el crecimiento y producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36, 1351-1356.
- Velásquez, A., Marnet, P. G., & Arias, R. (2015). Mejoramiento de la calidad nutritiva de alimentos fibrosos a través de la digestión in vitro con *Aspergillus niger*. *Ciencia e Investigación Agraria*, 42(1), 45-55.
- Witham, F. H., Blaydes, D. F., Devlin, R. M. (1971). *Experiments in plant physiology*. Van Nostrand Reinhold Company.