

Efecto de la granulometría del tezontle en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) en acuaponía
Effect of tezontle particle diameter in tomato (*Solanum lycopersicum* L.), cucumber (*Cucumis sativus* L.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.) in aquaponics

Andrés Valenzuela-Antelo¹ , Manuel Sandoval-Villa^{1†} , Juan J. Almaraz-Suárez¹ ,
Gabriel Alcántar-González¹ y Rafael Bórquez-López²

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

² Instituto Tecnológico de Sonora. 5 de febrero 818 sur, Colonia Centro. 85000. Ciudad Obregón, Sonora. México.

[†] Autor para correspondencia (msandoval@colpos.mx)

Editor de Sección: Dra. María Cristina Nally

RESUMEN

En la acuaponía el uso de sustrato permite la colonización de bacterias nitrificantes y actúa como biofiltro. El diámetro de partículas del sustrato puede ser determinante en la colonización del sustrato por las bacterias y puede afectar el desarrollo y rendimiento de las plantas; razón por la que en esta investigación se planteó la hipótesis de que tamaño de partícula del tezontle afecta la colonización de bacterias y el desarrollo y crecimiento de las plantas. El experimento consistió de recipientes de 120 L como estanques para los peces, y de 12 tinas de 240 L para el sustrato y una bomba para oxigenación auxiliar a los estanques de los peces. Se establecieron 3 cultivos en cada tina: tomate, pepino y lechuga. Estos cultivos fueron trasplantados en 3 granulometrías de tezontle: diámetro menor a 1 cm, mayor a 5 cm y mezcla 50:50% de ambos tamaños con tres repeticiones por tratamiento. Se realizó un análisis de la varianza y prueba de Tukey. No hubo efecto del diámetro de partícula del sustrato en la altura, diámetro de tallo y lecturas SPAD en las plantas de tomate, pepino y lechuga. El diámetro de partícula del sustrato no afectó el rendimiento ni firmeza, acidez titulable y grados Brix en los frutos de tomate. Tampoco hubo efecto sobre rendimiento y de calidad de frutos de pepino. En lechuga el peso fresco correspondiente al sustrato con partículas menores a 1 cm fue 55% mayor al de partículas mayores a 5 cm: 89.87 y 50.12 g por planta, respectivamente. El diámetro de partícula no afecta el rendimiento ni la calidad de los cultivos establecidos, sin embargo, en términos prácticos el tezontle fino menor a un cm es recomendable porque tiene mayor capacidad retención de humedad y mayor superficie para que las bacterias colonicen el medio.

Palabras clave: diámetro de partícula, bacterias nitrificantes, peces, vegetales.



Cita recomendada:

Valenzuela-Antelo, A., Sandoval-Villa, M., Almaraz-Suárez, J. J., Alcántar-González, G., & Bórquez-López, R. (2023). Efecto de la granulometría del tezontle en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) en acuaponía. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-11. e1598. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1598>

Recibido: 4 de junio de 2022.
Aceptado: 17 de agosto de 2022.
Artículo. Volumen 41.
Enero de 2023.

SUMMARY

In aquaponics, the use of substrate allows the colonization of nitrifying bacteria and may act as a biofilter. The diameter of substrate particles can be decisive in the colonization of substrate by bacteria and can affect the development and yield of plants. Thus, in this research, we raised the hypothesis that the particle diameter of tezontle affects the development and yield of plants, as well as the bacterial colonization of substrate. The experiment consisted of 12 fish ponds of 120 L, 12 tubs of 240 L for the substrate and a pump as auxiliary oxygenation for the fish ponds. Three crops were established in each tub: tomato, cucumber, and lettuce. The crops seedlings were transplanted into three tezontle granulometries: <1 cm, >5 cm and a 50:50 mix of both sizes with three replications per treatment. An analysis of variance and a Tukey's test were

performed. There was no effect of substrate particle diameter on the height, stem diameter and SPAD readings in tomato, cucumber, and lettuce plants. In addition, the particle diameter of the substrate did not affect the yield, firmness, titratable acidity, or Brix degrees in the tomato fruits. Furthermore, there was no effect on the yield and quality of cucumber fruits. In contrast, for lettuce, the fresh weight of the substrate consisting of particles <1 cm in diameter was 55% higher than that of particles >5 cm in diameter (89.87 and 50.12 g per plant, respectively). The particle diameter does not affect the yield or quality of the established crops, however, in practical terms, the tezontle particles <1 cm in diameter are recommended due to their greater moisture retention capacity and higher surface area for bacteria colonization.

Index words: *particle diameter, nitrifying bacteria, fish, vegetables.*

INTRODUCCIÓN

La acuaponía es un sistema de producción de alimentos donde se producen simultáneamente peces y vegetales (Rakocy, Masser y Losordo, 2006), sus inicios se remontan a principios de 1970 (Goddek, Joyce, Kotzen y Burnell, 2020) El sistema de producción mencionado, funciona utilizando el efluente proveniente de un sistema acuícola rico en nutrientes para la fertilización de cultivos vegetales, y es un sistema de producción sustentable (Yep y Zheng, 2019).

La elección de un sistema hidropónico es crucial en el éxito de la acuaponía, ya que modifica las interacciones planta-peces-microorganismo (Love *et al.*, 2014). En la actualidad los sistemas hidropónicos más utilizados son camas flotantes, película nutritiva y cultivo en sustrato. Este último es el más utilizado (Maucieri *et al.*, 2018) debido a su bajo costo de instalación, simplicidad, una mejor distribución de la solución nutritiva y una mayor aireación (Lennard y Leonard, 2004), además de proveer superficie para las bacterias nitrificantes indispensables para la acuaponía.

El tezontle es una roca basáltica, volcánica y porosa que se encuentra en centro de México (Rodríguez-Delfín, 2012). Es ampliamente utilizada en cultivos hortícolas como un medio de cultivo, comúnmente utilizada con un tamaño (granulometría) de 0.25 mm (Rodríguez-Díaz, Salcedo, Rodríguez, Gonzáles y Munguía, 2013). En una investigación realizada por Ortega-Martínez, Martínez, Ocampo, Sandoval y Pérez (2016) se encontró que la utilización de tezontle aumenta el rendimiento en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), en comparación con el suelo y sustratos como fibra de coco y mezcla aserrín-composta.

El objetivo de este estudio fue analizar los efectos del uso de diferentes granulometrías del sustrato denominado tezontle en plantas de 3 especies (tomate, lechuga y pepino) en un sistema acuapónico de recirculación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se ubicó en las instalaciones del Colegio de Postgraduados campus Montecillo, municipio de Texcoco, Estado de México. Se utilizó un invernadero de plástico UVII-720 de 50 m² para albergar el experimento. La siembra del tomate y pepino se llevó a cabo el 20 de marzo, el 80% de la germinación de ambas semillas ocurrió a los 13 días después de la siembra (abril 3) y a los 39 días se llevó a cabo el trasplante (12 de mayo) y finalizó el 1 de agosto de 2021, es decir, 80 días de seguimiento. La lechuga se sembró en semillero el 13 de mayo, se trasplantó el 20 del mismo mes y se muestrearon y cosecharon el 30 de junio (32 ddt).

El sistema acuapónico (Figura 1) se estableció utilizando 12 recipientes de 120 L como estanques para los peces, 12 tinas de 240 L para establecer las plantas y una bomba de aire de 120 L min⁻¹ para suministrar oxigenación auxiliar a los estanques. Se establecieron 3 cultivos: tomate (*Solanum lycopersicum* var. El Cid), pepino

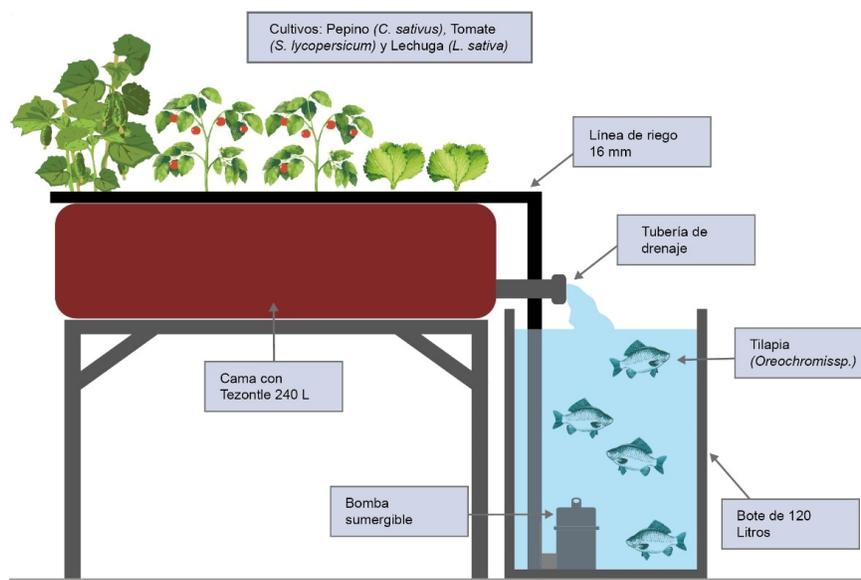


Figura 1. Diagrama del sistema de recirculación acuapónico con tezontle.
Figure 1. Diagram of the aquaponic recirculation system with tezontle.

(*Cucumis sativus* var. Pointseed) y lechuga (*Lactuca sativa* var. Parris). Estos cultivos fueron trasplantados en 3 granulometrías de tezontle: diámetro de partícula menor a 1 cm ($\varnothing < 1$), mayor a 5 cm ($\varnothing > 5$) y mezcla 50:50 % (v:v) de ambas granulometrías (<1:>5), colocando el tezontle con mayor granulometría en la parte superior, con el fin de simular un filtro. Las granulometrías fueron escogidas con el propósito de encontrar un sustrato para acuaponía, debido a que un tezontle más pequeño proporciona una mayor retención de humedad y sólidos disueltos además de tener una mayor superficie, por otro lado granulometrías mayores proporcionan mayor capacidad de aeración ayudando al proceso de nitrificación bacteriana (Vargas-Tapia *et al.*, 2008) Alrededor de 1.2 kg (3 organismos en total) de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) fueron colocados en los estanques.

Las variables medidas en los cultivos fueron los iones K^+ , Ca^{2+} y NO_3^- en el efluente proveniente de la tubería del drenaje de la cama del tezontle, utilizando los equipos de la marca Horiba modelos LAQUAtwin-K-11, LAQUAtwin-Ca-11 y LAQUAtwin- NO_3^- -11. En los estanques se monitoreó el peso de los peces para tener control de biomasa.

Se tomaron lecturas con el equipo atLEAF CHL STD en todos los cultivos, tomando directamente de las hojas recientemente maduras, una vez capturado los datos los valores obtenidos fueron convertidos a lecturas SPAD utilizando la metodología descrita por Zhu, Tremblay y Liang (2012).

Se cuantificó el crecimiento vegetativo de los cultivos midiendo la altura de la planta y diámetro del tallo utilizando un vernier Truper CALDI-6MP y una cinta métrica, además de cuantificar la cantidad de hojas en el caso de la lechuga.

Se cosecharon 5 racimos de tomate, de los cuales se tomaron 3 para hacer análisis de calidad de fruto en el laboratorio y 2 para hacer pruebas de días en el anaquel. En el laboratorio se extrajo el jugo a los tomates utilizando un extractor de jugos Hamilton Beach modelo 67606, con el fin de tomar la cantidad de iones de K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- y Na^+ , conductividad eléctrica y pH con ionómetros, conductímetros y potenciómetros Horiba modelos LAQUAtwin-Na-11, LAQUAtwin EC-33, LAQUAtwin pH-33, además de los ya mencionados anteriormente: grados Brix con un refractómetro modelo HI96801 marca Hanna y acidez titulable utilizando la metodología descrita por

San Martín-Hernández, Ordaz, Sánchez, Beryl Colinas y Borges (2012). A todos los racimos se les determinó peso, largo, ancho y grados Brix del fruto.

Se hicieron 2 cortes de pepino, se obtuvo el peso y sus medidas de largo y ancho, el primer corte se utilizó para medir su firmeza para calidad de fruto, mientras que el segundo fue para medir días en el anaquel utilizando la metodología descrita por Ramírez *et al.* (2004).

Al momento de la cosecha de la lechuga se cortó la parte aérea de la planta, se tomó el peso fresco y se extrajo el extracto celular tomado desde la nervadura central de la hoja (EC) con una jeringa de 20 mL tomando las lecturas para K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , Na^+ , pH y CE en el extracto con los ionómetros Horiba previamente mencionados.

El monitoreo de la temperatura ambiental y de la humedad relativa dentro del invernadero se tomó con un sensor DHT 22 (AM2302) y se utilizó un sensor digital sumergible Ds18b20 para tomar la temperatura de las tinas con peces. Los sensores se programaron con una placa Arduino nano v3 para tomar una lectura cada 30 minutos y grabados en una memoria SD, posteriormente los datos fueron extraídos y analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura y Humedad Relativa

La temperatura ambiental dentro del invernadero osciló de 7.2 a 43.7 °C, con un promedio de 20.13 °C. La temperatura más baja en los estanques de los peces fue de 13.75 °C y la más alta de 27.25 °C con un promedio de 20.9 °C. En cuanto la humedad relativa, por las noches se mantuvo a 99% debido a la constante recirculación del agua en las tinas, llegando a descender a 22.5% alrededor de las 12 pm, con un promedio de 79.03%. Las condiciones climáticas fueron las para el cultivo de plantas y peces, aunque se tuvieron registros de temperaturas bajas no causaron daños a las plantas o a los peces (FAO, 2014).

Crecimiento Vegetativo

La altura de las plantas de tomate a los 28 ddt fue similar en todos los tratamientos (Cuadro 1), las plantas de tomate llegaron a altura máxima que permitía el invernadero (130 cm) a partir de la semana 6, teniendo una tasa de crecimiento promedio de 1.3 cm día⁻¹. El pepino tardó 56 días en llegar a su altura máxima en todos los tratamientos, con una tasa de crecimiento promedio de 2.2 cm día⁻¹.

Cuadro 1. Altura promedio en centímetros de las plantas de tomate, lechuga y pepino, en tres tamaños de partícula de tezontle, en estadios iniciales de cada cultivo.

Table 1. Average height in centimeters of tomato, lettuce, and cucumber plants in three particle sizes of tezontle in the early stages of each crop.

Tezontle	Tomate			Pepino			Lechuga	
	12-may	25-may	07-jun	25-may	07-jun	26-jun	07-jun	26-jun
cm	12-may	25-may	07-jun	25-may	07-jun	26-jun	07-jun	26-jun
ddt [†]	0	14	28	0	14	28	14	28
< 1	74.4 a [‡]	118.5 a	124.1 a	8.0a	32.7 a	77.1a	10.0 a	20.6 a
50-50	72.7 a	117.0 a	123.3 a	7.4a	23.3 a	80.5a	11.2 a	20.7 a
> 5	70.2 a	118.2 a	124.3 a	7.4a	26.1 a	79.4a	8.2 a	20.0 a
DMSH	10.8	9.8	5.7	1.5	19.3	40.8	3.1	6.6

[†] días después del trasplante, [‡] Promedios con distintas letras son estadísticamente diferentes (Tukey; $P \leq 0.05$; DMSH = diferencia mínima significativa honesta).

[†] days after transplant, [‡] Means with different letters are statistically different (Tukey; $P \leq 0.05$; DMSH = honest least significant difference).

La lechuga alcanzó su máxima altura a los 32 días) con una altura de 20 cm en todos los tratamientos con una tasa de crecimiento promedio de 0.6 cm día⁻¹.

El diámetro del tallo del tomate a los 28 ddt en el tratamiento de partículas < 1 cm presentaron un crecimiento mayor respecto a partículas de tezontle > a 5 (Cuadro 2). Esto se explica porque en partículas menores hay mayor superficie y mayor retención de agua; que permite mayor crecimiento de bacterias nitrificantes y de bacterias promotoras del crecimiento (Sánchez-López, Gómez, Garrido y Bonilla, 2012). En el caso de pepino, datos no mostrados, no hubo diferencias significativas en diámetro del tallo. En el caso de lechuga no es posible hacer mediciones precisas del diámetro del tallo porque la mayoría de hojas en lechuga derivan del mismo en forma compacta y no es posible o confiable tomar lecturas en este cultivo.

Lecturas SPAD

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las lecturas SPAD en pepino y la lechuga (Figura 2), pesar de que en el momento del trasplante del pepino se presentaron hojas cloróticas llegando a tener valores SPAD por debajo de los 47.3 unidades en todos los tratamientos, esto factiblemente causado por una deficiencia de micronutrientes, las cuales se corrigieron dos semanas después del trasplante llegando a tener valores superiores a los 55.1 unidades en todos los tratamientos. Estas deficiencias se presentaron en todos los tratamientos acuapónicos, atribuido al pH por arriba de 7.8 en el efluente, situación que en la matriz del suelo y en la solución del mismo disminuye la disponibilidad de micronutrientes (Neina, 2019).

Las lecturas SPAD del tomate y pepino se incrementaron con el paso del tiempo y no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos de tamaño de partícula (Figura 2). En el caso de lechuga las lecturas SPAD no presentan cambios de uno a otro muestreo. Las lecturas SPAD del tomate y pepino fueron similares a las reportadas por Schmautz *et al.* (2016) en cuanto a que al inicio son menores, aumentan y vuelven a disminuir, lo cual se relaciona con la acumulación de nutrientes en hoja en la etapa vegetativa y posterior movilización de nutrientes hacia los frutos.

Calidad del Agua

La concentración de NO₃⁻, K⁺ y Ca²⁺ en el efluente de las tinas fueron similares (Figura 3), es decir, todos los tratamientos mantuvieron la misma concentración a lo largo del tiempo que duró el experimento. En el caso del K⁺, al mes de trasplante su concentración descendió a niveles indetectables por el equipo (< 4 mg L⁻¹).

Cuadro 2. Diámetro del tallo de tomate en milímetros en tres tamaños de partículas de tezontle.
Table 2. Tomato stem diameter in millimeters in three sizes of tezontle particles.

Tezontle	Tomate					
	12-may	25-may	07-jun	26-jun	10-jun	27-jul
cm						
ddt	0	14	28	42	57	76
< 1	10.5 a ^{††}	13.1 a	14.8 a	16.9 a	17.5 a	18.4 a
Mezcla 50-50	10.6 a	12.3 a	13.8 ab	15.6 a	17.2 a	17.6 a
> 5	9.7 a	12.0 a	13.4 b	15.19 a	15.6 a	17.0 a
DMSH [†]	1.2	1.96	1.06	2.24	2.31	3.13

[†] DMSH = diferencia mínima honesta significativa, ^{††} Promedios con distintas letras son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

[†]DMSH = Honest Significant Least Difference, ^{††} Means with different letters are statistically different (Tukey, $P \leq 0.05$).

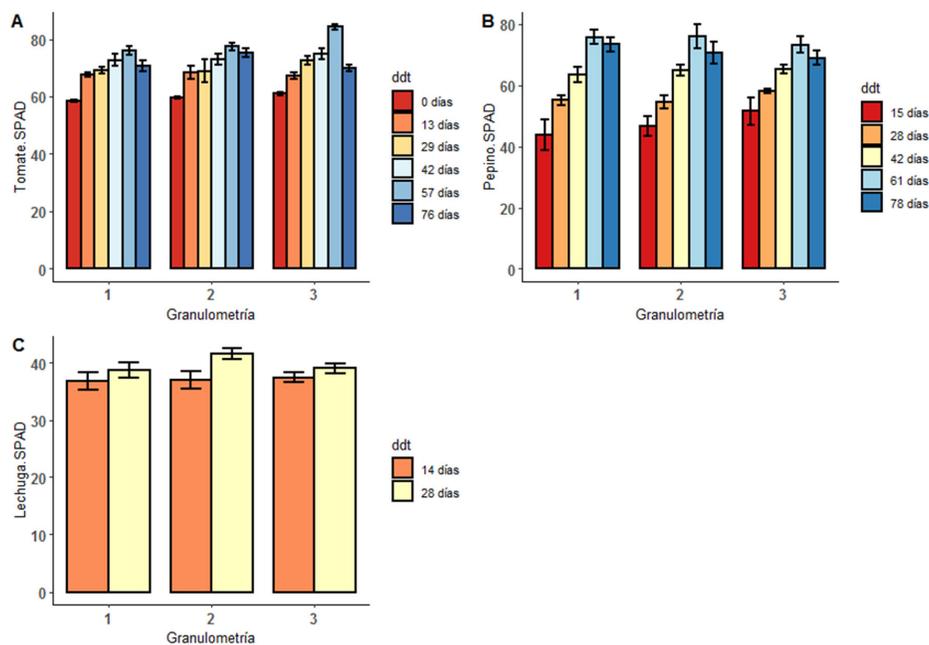


Figura 2. A) Lecturas de SPAD en tomate, B) pepino y C) lechuga en tres tamaños de partícula de tezontle usado como sustrato. Granulometría 1, 2 y 3 corresponden a diámetro de partícula menor a 1 cm ($\varnothing < 1$), mayor a 5 cm ($\varnothing > 5$) y mezcla 50:50 % (v:v) de ambas granulometrías ($< 1 : > 5$), respectivamente.

Figure 2. A) SPAD readings in tomato, B) cucumber, and C) lettuce in three particle sizes of tezontle used as substrate. Granulometry 1, 2 and 3 correspond to particle diameter less than 1 cm ($\varnothing < 1$), greater than 5 cm ($\varnothing > 5$) and a 50:50 (v:v) mix of both particle sizes ($< 1 : > 5$), respectively.

El pH en el agua proveniente del pozo tenía un pH de 6.9 ± 0.1 ; al momento de llenar los estanques la excreta de los peces en el transcurso de un día subió el pH hasta 7.8 en todos los tratamientos, estos valores de pH se mantuvieron a lo largo del experimento. Por otro lado, la conductividad eléctrica inició con valores 0.44 mS cm^{-1} , teniendo un valor máximo de 0.55 mS cm^{-1} en todos los tratamientos. A pesar de tener las condiciones ideales para el proceso de nitrificación (Másmela-Mendoza, Lizarazo y Aranguren, 2019) y tener un suministro constante de alimento para peces, la concentración de NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} estuvieron por debajo de lo recomendable para el cultivo del tomate y pepino (Gómez y Sánchez, 2003; Parker *et al.*, 2019), posiblemente debido a una baja biomasa de peces (3.92 g L^{-1}), a pesar de esto no se detectaron deficiencias visibles de nitrógeno y potasio, únicamente se presentó pudrición apical en el fruto del tomate causado por una deficiencia de calcio.

Rendimiento y Calidad de Fruto Tomate

La primera cosecha de tomate inició 47 ddt, en total se cosecharon 5 racimos, los pesos promedios del racimo se muestran en el Cuadro 3. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en el peso del racimo. A pesar de tener una baja concentración de nutrientes en el efluente (Villalobos-Reyes y González-Pérez, 2016), se tuvieron altos rendimientos de $4.98 \text{ kg planta}^{-1}$ con granulometría $< 1 \text{ cm}$, $4.65 \text{ kg planta}^{-1}$ con mezcla 50-50 y $4.43 \text{ kg planta}^{-1} > 5 \text{ cm}$, probablemente la utilización de sustrato como medio para la hidroponía ayudó a retirar y conservar los nutrientes para el efluente de las tinas.

En el peso promedio del fruto el tratamiento con tezontle $< 1 \text{ cm}$ fue superior en los racimos 3 y 4 en comparación con los tratamientos con tezontle $> 5 \text{ cm}$ y mezcla 50-50, mientras que en los racimos 1, 2 y 5 no se encontraron diferencias (Cuadro 4)

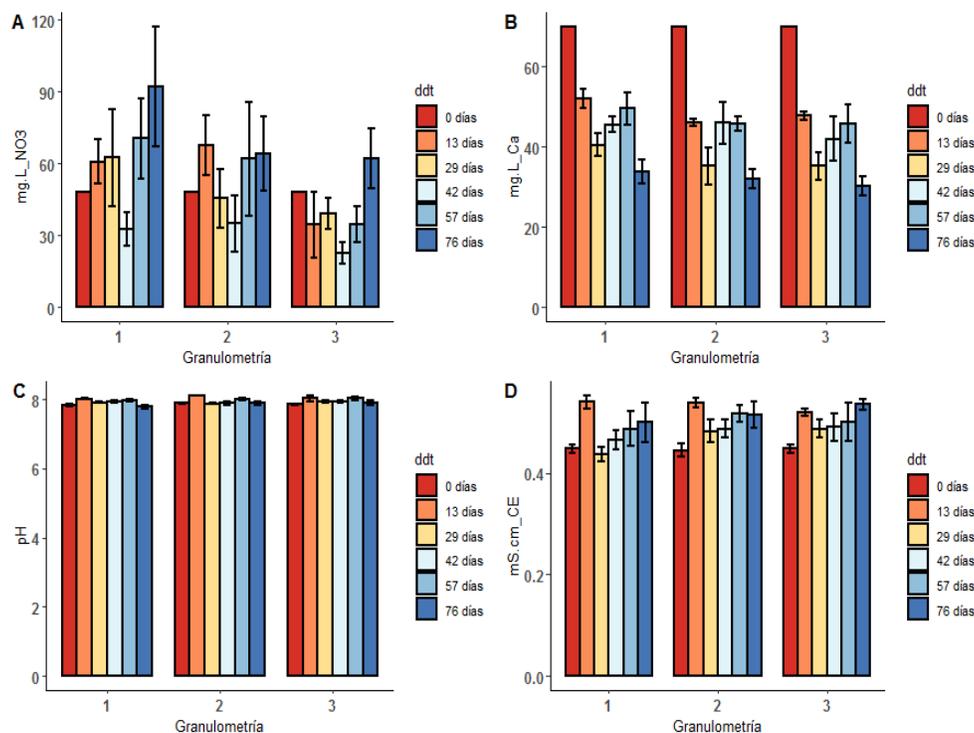


Figura 3. A) Concentración de NO₃⁻, B) Ca²⁺, C) pH en las en las tinas, D) y conductividad eléctrica del efluente en las tinas en tres tamaños de partícula de tezontle.
Figure 3. A) Concentration of NO₃⁻, B) Ca²⁺, C) pH in the vats, D) and electrical conductivity of the effluent in the fish tanks in three sizes of tezontle particles.

destacando que no se hizo poda de frutos en los racimos del tomate con el fin de tener la mayor cantidad de tomates por racimo.

La calidad del tomate no se vio afectada por tamaño de partícula del sustrato. La firmeza de los tomates fue similar en todas las granulometrías teniendo promedios de 1.93, 2.06 y 1.96 kg/cm² respectivamente a los tratamientos > 1 cm, mezcla 50-50 y < 5 cm. Al igual que los °Brix, no se encontraron diferencias, se registró un decremento de °Brix en el quinto racimo, esto posiblemente causado por los días 10 nublados final de la experimentación, afectado la temperatura el interior del invernadero teniendo valores máximos inferiores a los 25 °C durante el día, comparados con días anteriores superaban los 30 °C durante el día.

Cuadro 3. Efecto de la granulometría del tezontle en el peso de los racimos del tomate en un sistema acuapónico.

Table 3. Effect of tezontle particle size on tomato cluster weight in an aquaponic system.

Tezontle	Peso de racimos de tomate					Total
	g racimo ⁻¹					
cm	12-may	25-may	07-jun	26-jun	10-jun	
< 1	892	898	1103	1031	1282	5206
Mezcla 50-50	862	919	859	775	1457	4872
> 5	1060	1030	570	857	1061	4578
CV (%)	16.3	39.9	39.2	24.6	24.9	31.2

CV = coeficiente de variación.
 CV = coefficient of variation.

Cuadro 4. Peso promedio de los frutos del tomate en tres tamaños de partícula de tezontle.
Table 4. Average weight of tomato fruits in three tezontle particle sizes.

Tezontle	Peso promedio del fruto del tomate				
	g fruto ⁻¹				
cm	Racimo 1	Racimo 2	Racimo 3	Racimo 4	Racimo 5
< 1	153.3 a [†]	149.9 a	171.1 a	164 a	159.7 a
Mezcla 50-50	151.6 a	152.3 a	156.9 ab	142.9 ab	137.8 a
> 5	151.3 a	161 a	132.8 b	137 b	139.8 a
DMSH	25.7	36.6	37.1	25.0	40.0

[†] Promedios con letras disímiles presentan diferencia estadísticamente significativa (Tukey, $P \leq 0.05$).

[†] Averages with dissimilar letters show statistically significant difference (Tukey, $P \leq 0.05$).

La concentración de iones de Ca^{2+} en el fruto del tomate fue $< 4 \text{ mg L}^{-1}$, siendo indetectable por el equipo y lo suficientemente bajo para causar pudrición apical (Parra-Terraza, Villarreal, Sánchez, Corrales y Hernández, 2008), aun así únicamente deficiencias de Ca se presentaron en el quinto racimo y solamente en 2 frutos con pudrición apical en los tratamiento con granulometría < 1 , 2 frutos con pudrición apical en el tratamiento de mezcla 50-50 y 3 frutos con pudrición apical en el tratamiento con partícula de tezontle $> 5 \text{ cm}$.

La concentración de los iones NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} en el fruto del tomate no se vieron afectados por los tratamientos, siendo bajos en todos los casos (Cuadro 5), ya que en un sistema hidropónico con solución nutritiva Steiner sobrepasan las $3\,000 \text{ mg L}^{-1}$ de N, $5\,000 \text{ mg L}^{-1}$ de K^+ y 340 mg L^{-1} de Ca^{2+} (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2001).

Los tomates en tezontle con granulometría $< 1 \text{ cm}$ tardaron 24 días en presentar signos de pudrición, al igual que los tomates en tezontle 50-50. Por otro lado, en los tomates en tezontle $> 5 \text{ cm}$ los signos de pudrición aparecieron a partir de los 22 días. Los resultados obtenidos en calidad del fruto del tomate concuerdan con los reportados por San Martín-Hernández *et al.*, (2012), quienes reportan la inexistencia de variación con diferentes sustratos en calidad del tomate.

Rendimiento y Calidad del Fruto Pepino

El primer corte de los frutos del pepino de los tratamientos 1, 2 y 3 tuvieron un peso promedio de 441.25, 476.12 y 415.87 g, en el segundo corte alcanzaron 544.37, 519.12 y 488.75 g respectivamente. Los tratamientos no presentaron un cambio en

Cuadro 5. Efecto del tamaño de partícula de tezontle en la firmeza del fruto de tomate (kgf), iones NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} (mg L^{-1}), CE (conductividad eléctrica) (dS m^{-1}), AT (acidez titulable), °Brix (%).

Table 5. Effect of tezontle particle size on tomato fruit firmness (kgf), NO_3^- , K^+ and Ca^{2+} ions (mg L^{-1}), CE (electrical conductivity) (dS m^{-1}), AT (titratable acidity), °Brix (%).

Tezontle	Calidad en el extracto del tomate								
	Firmeza	NO_3^-	K^+	Ca^{2+}	Na^+	CE	pH	AT	°Brix
cm									
< 1 cm	1.9	107.3	1577.3	<4	32.1	3.5	4.4	0.3	3.9
Mezcla 50-50	2.0	101.4	1468.2	<4	33.5	3.3	4.4	0.3	3.9
> 5 cm	2.0	106.7	1527.3	<4	35.2	3.9	4.4	0.3	3.9
CV [†]	7.4	14.4	6.5	-	13.6	11.6	0.6	4.4	3.5

[†] CV = coeficiente de variación.

[†] CV = coefficient of variation.

el peso del fruto, por lo cual no existió diferencia significativa entre tratamientos. Los frutos presentaron entre 21 y 24 cm de largo en todos los tratamientos en ambos cortes de pepino. El diámetro del fruto del pepino se registró entre los 57 y 62.4 mm en todos los tratamientos, este peso y tamaño del fruto del pepino tipo similar a lo reportado por (Chacón-Padilla y Monge-Pérez, 2020).

En cuanto a firmeza del pepino se tuvieron 4.2, 4.5 y 4.09 kgf similares a los descritos por (Sánchez-del-Castillo, González, Moreno y Reyes, 2014), no se observó una diferencia entre los tratamientos en firmeza del fruto. La vida anaquel obtuvo un promedio de 26.8 días en el tratamiento <1 cm, 24.5 días en el tratamiento 50-50 y 25.2 días en el tratamiento > 5 cm al igual que los reportados por (Muy-Rangel, Siller, Díaz y Valdéz, 2004).

Rendimiento y Calidad de Lechuga

La granulometría del tezontle tuvo un efecto en el peso final de la lechuga, el tratamiento con tezontle con granulometría <1 cm fue estadísticamente superior al de granulometría >5 cm con promedios de 89.87 g y 50.12 g respectivamente, el tratamiento con mezcla 50-50 resultó similar a ambos con promedio de 75.66 g, este aumento en el peso fresco posiblemente causado por una mayor retención de materia orgánica por parte del tezontle con granulometría < 1 cm la cual favorece al crecimiento de la lechuga (Schneider, Thiesen, Engroff, Holz y Altísimo, 2018), el aumento del peso fresco también se puede explicar con una mayor cantidad de bacterias promotoras del crecimiento en el tezontle < 1 cm (Díaz-Vargas, Ferrera, Almaraz y Alcántar, 2001).

En la concentración de iones en el extracto celular de hojas de la lechuga únicamente se encontraron diferencias significativas en concentración de Ca^{2+} (Cuadro 6), con mayor concentración en el tratamiento mezcla 50-50 comparado con los tratamientos < 1 cm y > 5 cm, esta acumulación y el crecimiento de la lechuga posiblemente se atribuye a mayor capacidad de retención de agua y nutrientes del tezontle con granulometrías inferiores a los <5 cm de diámetro (Vargas-Tapia *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

La utilización de tezontle es viable como sustrato para un sistema acuapónico, es recomendable la implementación de un tezontle fino < 1 cm, además de tener una mayor capacidad de retención de humedad y una mayor superficie para que las bacterias colonicen el medio, y promuevan mayor crecimiento de plantas y calidad

Cuadro 6. Efecto del tamaño de partícula de tezontle en el peso fresco de la lechuga (g), iones de Ca^{2+} , K^+ , NO_3^- , Na^+ (mg kg^{-1}), CE (conductividad eléctrica) (dS m^{-1}).

Table 6. Effect of tezontle particle size on fresh lettuce weight (g), ions Ca^{2+} , K^+ , NO_3^- and Na^+ concentration (mg kg^{-1}), CE (electrical conductivity) (dS m^{-1}).

Tezontle	Cosecha Lechuga						
	Peso fresco	Ca^{2+}	K^+	NO_3^-	Na^+	pH	CE
< 1 cm	89.8 a	51.62 b	1425 a	3100 a	881.25 a	5.95 a	6.08 a
Mezcla 50-50	75.66 ab	88.5 a	922.5 a	2825 a	1245 a	6.025 a	5.415 a
> 5 cm	50.12 b	50.12 b	1001.25 a	2220 a	1113.75 a	5.9625 a	5.85 a
DMSH [†]	36.1	16.2	579.6	1193.5	448.1	0.1	1.6

[†] Promedios con letras disímiles presentan diferencia estadísticamente significativa (Tukey, $P \leq 0.05$).

[†] Averages with dissimilar letters show statistically significant difference (Tukey, $P \leq 0.05$).

de fruto. El sustrato fino actúa como filtro para retener sólidos suspendidos y evita taponamientos del sistema, mejora la calidad del agua y genera mejores condiciones de vida para los peces.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles de los autores previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no tienen conflicto de interés.

FONDOS

Los fondos para la realización de la investigación los aportó el Colegio de Postgraduados.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y diseño: M.S.V. y A.V.A. Datos experimentales: A.V.A. Revisión resultados: M.S.V., J.J.A.S., R.B.L. y G.A.G. Revisión manuscrito: M.S.V., J.J.A.S., R.B.L. y G.A.G.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México que apoyó al MC Andrés Valenzuela Antelo con beca para llevar a cabo Maestría en Ciencias en el Colegio de Postgraduados.

LITERATURA CITADA

- Armenta-Bojórquez, A. D., Baca-Castillo, G. A., Alcáncar-González, G., Kohashi-Shibata, J., Valenzuela-Ureta, J. G., & Martínez-Garza, A. (2001). Relaciones de nitratos y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y absorción nutrimental de tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 7(1), 61-75. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.11.073>
- Chacón-Padilla, K., & Monge-Pérez, J. E. (2020). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: comparación entre tipos de pepino. *Revista Tecnología En Marcha*, 33(1), 17-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5018>
- Díaz-Vargas, P., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suárez, J. J., & Alcántar-González, G. (2001). Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento en lechuga. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 327-335.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2014). *Small-scale aquaponic food production. Small-scale aquaponic food production Integrated fish and plant farming*. Rome, Italy: FAO. ISBN: 978-92-5-108532-5
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2020). *Aquaponics food production systems. combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future* (619 pp.). Cham, Switzerland: Springer.
- Gómez-Hernández, T., & Sánchez-del Castillo, F. (2003). Diluted nutrient solutions for single-truss tomato production. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 57-63.
- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2004). A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system. *Aquaculture International*, 12(6), 539-553.

- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An International Survey of Aquaponics Practitioners. *Plos One*, 9(7), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Másmela-Mendoza, J. E., Lizarazo-Forero, L. M., & Aranguren-Riaño, N. J. (2019). Bacterias nitrificantes cultivables de la zona limnética del lago de Tota, Boyacá. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1378>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1-11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Muy-Rangel, D., Siller-Cepeda, J., Díaz-Pérez, J., & Valdéz-Torres, B. (2004). Efecto de las condiciones de almacenamiento y el encerado en el estatus hídrico y la calidad poscosecha de pepino de mesa. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(2), 157-165.
- Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Hindawi Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- 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.
- Parker, J., James, L., Parks, S., Tesoreiro, L., Ryland, A., Ekman, J., & Jarvis, J. (2019). *Greenhouse cucumber production*. New South Wales, Australia: NSW Government-HortInnovation.
- Parra-Terraza, S., Villarreal-Romero, M., Sánchez-Peña, P., Corrales-Madrid, J. L., & Hernández-Verdugo, S. (2008). Efecto del calcio y potencial osmótico de la solución nutritiva en la pudrición apical, composición mineral y rendimiento de tomate. *Interciencia*, 33(6), 499-456.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-Integrating Fish and plant culture*. Texas, USA: SRAC Publication.
- Ramírez, H., Encina-Rodríguez, L. I., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Hernández-Davila, J., & Alonso-Corona, S. (2004). Influencia de la temperatura sobre procesos fisiológicos en postcosecha de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Homero. *Revista Agraria-Nueva Epoca*, 1(3), 31-37.
- Rodríguez-Delfín, A. (2012). Advances of Hydroponics in Latin America. *Acta Horticulturae*, 947, 23-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.1>
- Rodríguez-Díaz, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macias, R., Gonzáles-Eguiarte, D. R., & Munguía-Mena, S. (2013). Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Terra Latinoamericana*, 31(4), 275-284.
- San Martín-Hernández, C., Ordaz-Chaparro, V. M., Sánchez-García, P., Beryl Colinas-Leon, M. T., & Borges-Gómez, L. (2012). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia*, 46(3), 243-254.
- Sánchez-del-Castillo, F., González-Molina, L., Moreno-Pérez, E. C., & Reyes-González, C. E. (2014). Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 261-269.
- Sánchez-López, D. B., Gómez-Vargas, R. M., Garrido-Rubiano, M. F., & Bonilla-Buitrago, R. R. (2012). Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7), 1401-1415. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1346>
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T. G., & Junge, R. (2016). Tomato Productivity and Quality in Aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Schneider, J. R., Thiesen, L. A., Engroff, T. D., Holz, E., & Altissimo, B. S. (2018). Growth analysis of lettuce under different substrate compositions. *Advances in Horticultural Science*, 32(2), 221-227. <https://doi.org/10.13128/ahs-21882>
- Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J., Muñoz-Ramos, J., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López, M., ... Ojodeagua-Arredondo, J. L. (2008). Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 323-331.
- Villalobos-Reyes, S., & González-Pérez, E. (2016). Determinación de la relación pez planta en la producción de tomate (*Lycopersicon sculentum* L.) en sistema de acuaponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 983-992.
- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges-A review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1586-1599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>
- Zhu, J., Tremblay, N., & Liang, Y. (2012). Comparing SPAD and atLEAF values for chlorophyll assessment in crop species. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(4), 645-648. <https://doi.org/10.4141/CJSS2011-100>