

Vía de Aplicación y Dosis de Silicio en la Producción de Pepino Cultivado en Tezontle Application Route and Dose of Silicon in the Production of Cucumber Grown in Tezontle

Rogelio Nuñez-Ambríz¹  y Patricio Apáez-Barrios^{2*} 

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestría interinstitucional en agricultura protegida; (R.N.A.). ² Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; (P.A.B.). Prolongación Mariano Jiménez s/n, Col. El Varillero. 60670 Apatzingán de la Constitución, Michoacán, México.

* Autor para correspondencia: patricio.apaez@umich.mx

RESUMEN

El crecimiento acelerado de la población incrementa la demanda de hortalizas como el pepino (*Cucumis sativus* L.) y ante desafíos como la limitación de la superficie cultivable y el agua, así como el impacto negativo del cambio climático, lo que genera la necesidad de usar sustratos como medio de cultivo e implementar alternativas sustentables para elevar los rendimientos, tales como el uso de elementos benéficos. El objetivo fue evaluar dos vías de aplicación de silicio: a la raíz y foliar, a las dosis: 0, 500, 1000 y 1500 mg L⁻¹ sobre la producción, la calidad y el contenido foliar de nutrimentos en pepino en tezontle y condiciones protegidas. Los tratamientos se distribuyeron en campo en un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones. El rendimiento aumentó en 36 y 43.9% con la aplicación de 1500 mg directo a la raíz y de forma foliar y, 33% con 1000 mg vía foliar. La firmeza del fruto se incrementó en 19 y 20% con la aplicación de 1500 mg al follaje y a la raíz; mientras que, esta misma dosis, pero aplicada a la raíz aumentó en 4.9% el pH. Cuando se aplicaron 1500 mg a la raíz el contenido de macronutrimentos en hojas aumentó 4.8 % en S y 32.9 % en N; en cambio al aplicar 500 mg de silicio de forma foliar, el contenido de metales pesados se incrementó 14% en Zn y 61% en Fe, estos mismos disminuyeron con las dosis de 1000 y 1500 mg indistintamente de la forma de aplicación. Por lo que, la aplicación de silicio incrementó la producción, la calidad de la producción de pepino, modifica el contenido foliar de nutrimentos y la dosis más apropiada fue 1500 mg suministrada a la raíz o foliar.

Palabras clave: agricultura protegida, *Cucumis sativus*, elementos benéficos, tierra de diatomeas.

SUMMARY

The accelerated growth of the population increases the demand for vegetables such as cucumber (*Cucumis sativus* L.). In addition, challenges such as limited arable land and water availability, as well as the negative impacts of climate change, create the need to use substrates as cultivation media and to implement sustainable alternatives to increase yields, such as the use of beneficial elements. The objective of this study was to evaluate two silicon application routes, root and foliar, and three doses (0, 500, 1000, and 1500 mg L⁻¹) on production, fruit quality, and foliar nutrient content of cucumber grown in tezontle under protected conditions. Treatments were arranged in the field using a randomized complete block design with five replications. Yield increased by 36 and 43.9% with the application of 1500 mg supplied directly to the root and via foliar application, respectively, and by 33% with 1000 mg via foliar application. Fruit firmness increased by 19 and 20% with the application of 1500 mg to the foliage and the root, respectively; whereas this same dose, when applied to the



Cita recomendada:

Nuñez-Ambríz, R., & Apáez-Barrios, P. (2025). Vía de Aplicación y Dosis de Silicio en la Producción de Pepino Cultivado en Tezontle. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-10. e2248. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2248>

Recibido: 4 de marzo de 2025.

Aceptado: 12 de septiembre de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Diciembre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Héctor Estrada Medina

Editor Técnico:

Dr. José Gregorio Joya Dávila



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

root, increased fruit pH by 4.9%. When 1500 mg was applied to the root, leaf macronutrient content increased by 4.8% for S and 32.9% for N. In contrast, foliar application of 500 mg of silicon increased heavy metal content by 14% for Zn and 61% for Fe; however, these contents decreased with doses of 1000 and 1500 mg, regardless of the application method. Therefore, silicon application increased cucumber yield and fruit quality, modified foliar nutrient content, and the most appropriate dose was 1500 mg supplied either to the root or foliarly.

Index words: *protected agriculture, Cucumis sativus, beneficial elements, diatomaceous earth.*

INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es la cuarta hortaliza más cultivada a nivel mundial (3 518 066.0 ha; año 2023) (FAOSTAT, 2023), después del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), la col (*Brassica oleracea* L.) y la cebolla (*Allium cepa* L.) (Jia y Wang, 2021). El sabor y textura del fruto lo han hecho importante como complemento fresco para ensaladas y en formas procesadas como encurtidos y condimentos (Khan *et al.*, 2023). El consumo de cada 100 g aporta proteínas (0.65 g), carbohidratos (3.63 g), vitamina C (2.8 mg) y elementos minerales indispensables para la salud humana como Ca (16 mg), Mg (13 mg), P (24 mg), K (147 mg) y Na (2 mg) (Butnariu y Butu, 2015). También se le atribuyen propiedades medicinales como actividad antimicrobiana, capacidad reductora de la glucemia y capacidad antioxidante (Sharma, Sharma y Sandhu, 2020).

Aunque el pepino se produce principalmente en suelo, pero su cultivo en sustratos y bajo condiciones protegidas en México ha aumentado significativamente en los últimos 10 años; año 2013 (2 867 ha; 290 165 toneladas); año 2023 (4 651 ha; 519 034 toneladas), lo que representa un aumento de 62% en superficie y 79% en producción (SIAP, 2024), esto como respuesta a la necesidad de intensificar la producción agrícola para satisfacer la demanda de la población que continuará creciendo. Aunado a esto, existen otros retos y desafíos de la agricultura actual, como la reducción de la superficie de tierra cultivable, la necesidad de optimizar el uso del agua y los fertilizantes, así como reducir el impacto negativo del incremento de las temperaturas (Hu *et al.*, 2022). Por esta razón, es necesario buscar alternativas que ayuden a incrementar los rendimientos aún bajo condiciones desfavorables y hacerlo de manera sustentable. Al respecto, las investigaciones en el sector agrícola han demostrado que elementos benéficos como el silicio mejoran el crecimiento, el rendimiento de los cultivos y la calidad de las cosechas (Yuvaraj *et al.*, 2023).

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno (Liu *et al.*, 2020) y resulta viable como complemento del manejo agronómico de los cultivos, sobre todo en aquellos que se producen sin suelo, puesto que, en estos sistemas la raíz del cultivo se desarrolla en sustratos inertes y la disponibilidad de silicio se ve limitada (Mills-Ibibofori, Dunn, Maness y Payton, 2019). Entre los principales beneficios de este elemento para los cultivos están: la formación de una barrera física que protege del ataque de plagas y enfermedades. Esto debido a que el silicio se polimeriza en gel de sílice y se concentra en los órganos de mayor transpiración (Gouranga, Nagdev, Jeer y Murali, 2023); ayuda a mitigar el estrés de las plantas causado por altas temperaturas, escases de agua, salinidad del suelo o sustrato y presencia de metales pesados (Cd, Pb, Ti y Cr) (Duo *et al.*, 2023); favorece la absorción de macronutrientes, principalmente N, K, Ca, Mg y S, y mejora la actividad fotosintética (Zhang *et al.*, 2018). Las principales fuentes de silicio usadas en la agricultura son el silicato de potasio, silicato de sodio, cenizas de cascarilla de arroz, silicato de calcio y tierra de diatomeas; de las cuales las últimas dos son las que han generado los mejores resultados fisiológicos y agronómicos; son de costo rentable y además aportan otros minerales como Ca, P, K, Mg y Fe, por lo que son una buena alternativa para los productores (Tayade *et al.*, 2022).

En el cultivo de pepino, la incorporación de este mineral a través del suelo o de las hojas mejora su producción. Al respecto, Faroutine, Arteaga, Pineda y Vázquez (2023) indican que las aplicaciones de silicio al sustrato (50 y 100 mg L⁻¹ de silicato de calcio) promueven significativamente el rendimiento de frutos, el área foliar y la biomasa radical en cultivo. Por su parte, Osuna-Zárate, Robledo, Mendoza y Sandoval (2023) encontraron que la aplicación foliar de silicio (20 mL L⁻¹ de silicato de potasio) incrementa el rendimiento, la calidad de frutos y la absorción de N, P, K, Ca, Mg y Fe. Sin embargo, no todos los cultivares responden de la misma manera. Tal es el caso de González-Terán, Gómez y Trejo (2020) quienes no encontraron aumento en el rendimiento de frutos de pepino con aplicaciones foliares de este elemento (2 mM). Por lo tanto, el efecto positivo del suministro de silicio dependerá de la dosis, la forma de aplicación, del sistema de producción y de las condiciones ambientales en las que se desarrolle el cultivo (Ouellette *et al.*, 2017; Reyes-Perez, Tipán, Llerena, Hernandez y Rivas, 2023).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de dos vías de aplicación: a la raíz y foliar y tres dosis de silicio: 500, 1000 y 1500 mg L⁻¹ en la producción, calidad y contenido foliar de nutrientes de pepino en tezontle y en casa sombra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Experimental

La investigación se desarrolló bajo condiciones protegidas en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, ubicada a 19° 08' N y 102° 37' O, a 324 m de altitud, en Apatzingán, Michoacán.

Establecimiento del Experimento

Se instaló un sistema hidropónico abierto que consistió en contenedores de polietileno color negro de 15 L de capacidad rellenos con tezontle rojo de granulometría < 1 cm y un sistema de riego por goteo automatizado. Se utilizaron semillas del híbrido de pepino Centauro, las cuales se sembraron en charolas de poliestireno expandido de 242 cavidades con un sustrato a base de turba (Peat moss). El trasplante se realizó a los 10 días después de la siembra, se colocó una planta por cada contenedor.

Manejo Agronómico

La nutrición del cultivo se realizó mediante la solución nutritiva de Steiner (1984) aplicada diariamente y ajustada por etapa fenológica. Se tomó como base la solución completa, a la concentración iónica en meq L⁻¹ de: 12 (NO₃⁻), 1 (H₂PO₄⁻), 7 (SO₄²⁻), 7 (K⁺), 9 (Ca²⁺), 4 (Mg²⁺) y en mg L⁻¹ de: 2 (Fe²⁺), 0.6 (B), 2.3 (Mn²⁺), 0.6 (Zn²⁺), 0.06 (Cu²⁺) y 0.04 (Mo). La conductividad eléctrica en la fase vegetativa, floración y amarre y desarrollo de frutos fue de 1.5, 1.8 y 2.0 dS m⁻¹, respectivamente y el pH se mantuvo entre 5.8 y 6.0 con la adición de 50 mL de ácido fosfórico y 123 mL de ácido sulfúrico, en 2500 L de agua. Para la aplicación de la solución nutritiva se programaron riegos por pulsos mediante un temporizador digital Sterent®, de esta manera, se suministraron por contenedor diariamente 0.350 L en la primera semana de establecimiento, 0.560 L durante la etapa vegetativa, 0.980 L al inicio de la floración y 1.40 L en la etapa de producción y cosecha. A la planta se le dio soporte con un tutorado en espaldera de malla cuadrículada (15 × 15 cm). Las plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), los trips (*Frankliniella occidentalis*) y el minador de la hoja (*Liriomyza huidobrensis*) se controlaron con aplicaciones de Flupyradifurone (2 mL L⁻¹, Tiametoxam (1 g L⁻¹) y Extracto de ajo, chile, ruda y agave (5 mL L⁻¹), respectivamente. Mientras que, el mildiu (*Pseudoperonospora cubensis*) se controló con aplicaciones alternadas de Azoxystrobin (1 g L⁻¹) y Metalaxil (3 mL L⁻¹). El cultivo tuvo una duración de 60 días después de haber sido trasplantado. La cosecha inició a los 36 ddt y se hicieron a intervalos de cuatro días, en total se obtuvieron seis cortes. Como criterio de cosecha se consideró la longitud de los frutos (> 16 cm), y que presentaran un color verde oscuro y totalmente rectos.

Tratamientos y Diseño Experimental

Se evaluaron ocho tratamientos que resultaron de la combinación de las dos vías de aplicación de silicio: foliar y a la raíz, y las dosis de silicio: 0, 500, 1000 y 1500 mg L⁻¹. Los tratamientos se distribuyeron en el campo bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones. La unidad experimental estuvo formada por seis plantas (una planta por contenedor). Se utilizó como fuente de silicio la tierra de diatomeas del producto comercial Diatomix®, que tiene la siguiente composición: 92.7 % (SiO₂), 3.6 % (Al₂O₃), 1.2 % (Fe₂O₃), 1.2 % (CaO), 0.4 % (MgO), 0.3 % (K₂O), 0.3 % (Na₂O), 0.2 % (TiO₂) y 0.1 % (P₂O₅).

Aplicación de los Tratamientos

La aplicación de los tratamientos inició a los 10 ddt y se repitieron cada siete días hasta totalizar cinco aplicaciones. La cantidad necesaria para cada dosis de silicio se pesó en una balanza de precisión marca Highland®. Las aspersiones foliares se realizaron por las mañanas hasta punto de goteo con una aspersora manual Truper® de 2 L de capacidad. A la solución aplicada se le adicionó el adherente Inex-A® (1 mL L⁻¹). Las plantas testigo se asperjaron únicamente con agua. En las aplicaciones vía raíz se usó una probeta graduada para suministrar el silicio. El gasto en ambas vías de aplicación fue de 100 mL planta⁻¹ desde el inicio de los tratamientos hasta comenzar la fase de floración, en las aplicaciones posteriores se suministraron 200 mL planta⁻¹ (mililitros por planta).

Registro de los Elementos del Clima y la Fenología

En el desarrollo del cultivo, dentro de la casa sombra se registró diariamente la temperatura y humedad relativa (valor máximo y mínimo de ambos elementos). Estos datos se midieron con un dataloguer Elitech® y se reportaron como promedios semanales. También se registró el tiempo a ocurrencia de las fases fenológicas de las plantas de pepino, que fueron: emergencia, plántula, fase vegetativa, floración y fructificación.

Variables Evaluadas

A los 30 ddt se midió la concentración nutrimental en las hojas; se tomaron desde la tercera a la quinta hoja a partir del ápice, y se analizó el N total con el método de Dumas; mientras que, el P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Mn, Cu, B y Mo se analizaron mediante Digestión Ácida/ ICP-OES. Se cuantificó el rendimiento (kg planta^{-1}) mediante la sumatoria del peso obtenido en cada cosecha por planta, con una báscula digital marca Rhino® y el número de frutos por planta. Con los datos anteriores se determinó el peso medio de los frutos. Por otro lado, en una muestra aleatoria de tres frutos por unidad experimental se midió su longitud con un flexómetro Truper®, el diámetro con un vernier digital Truper®, la firmeza con un penetrómetro manual con puntera de 11 mm de diámetro (modelo GY-03), los sólidos solubles totales con un refractómetro Hanna®, para lo cual se depositaron tres gotas del jugo del pericarpio del fruto sobre el sensor del refractómetro. El pH y la acidez titulable se determinaron de acuerdo con la metodología descrita por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1980). Se pesaron 10 g de pulpa y se licuaron con 50 mL de agua destilada, se filtró el extracto obtenido y de este último se tomaron 20 mL para registrar la lectura de pH con un potenciómetro (Phep® 5) (método 981.12). La acidez titulable se determinó en 10 mL del extracto anterior, mediante titulación con hidróxido de sodio 0.025 N (método 942.15).

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos de las variables evaluadas se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) mediante el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología y Elementos del Clima

El ciclo del cultivo fue de 70 días, la emergencia sucedió a los tres días después de la siembra, y se consideró como plántula hasta los 10 días, que fue cuando se realizó el trasplante. La fase vegetativa correspondió a los primeros 20 días después del trasplante (ddt); la floración ocurrió a los 21 ddt y la fructificación a los 28 ddt (Figura 1). Al respecto, Meneses-Fernández y Quesada (2018), en el cultivo de pepino producido bajo cubierta y en sustrato, reportaron los mismos tiempos de fase vegetativa y floración, sin embargo, la fructificación inició a los 34 ddt. Esa diferencia puede ser atribuida a la precocidad que presenta el material vegetal usado en la presente investigación y el incremento de las temperaturas en esa fase fenológica.

Durante el desarrollo del cultivo, los valores máximos de temperatura oscilaron entre 36.6 y 41.8 °C y de 45.13 a 77.3% de humedad relativa. Mientras que, los valores mínimos fueron de 16.2 a 21.3 °C y de 14.2 a 28.0%. Existió una relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa; conforme avanzó el ciclo del cultivo, las temperaturas se incrementaron, de tal forma que los valores más altos se registraron en la etapa de fructificación, mientras que la humedad relativa disminuyó conforme se presentaban las fases fenológicas e incrementaba la temperatura. Al respecto Pal, Adhikary, Shankar, Sahu y Maitra (2020) mencionan que temperaturas superiores a 40 °C en cultivos de pepino bajo cubierta provocan aborto floral y malformación de frutos por lo que se vuelve necesario buscar alternativas para reducir el estrés del cultivo.

Rendimiento y sus Componentes

Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación foliar de Si a 1500 mg generó el mayor rendimiento, seguido de la misma dosis suministrada a la raíz; estas combinaciones superaron al rendimiento de las plantas testigo en 43.9 y 36%, respectivamente. También se observó que al aplicar 1000 mg de silicio de forma foliar se incrementó el rendimiento en 33% (Figura 2). Los incrementos anteriores se atribuyen a que las plantas que recibieron estos mismos tratamientos produjeron una cantidad de frutos significativamente superior a las plantas sin aplicación (Cuadro 1). Es importante mencionar que la eficiencia del Si fue similar cuando se aplicó directamente a la raíz que de forma foliar, ya que se ha mencionado que, en comparación con la fertilización al

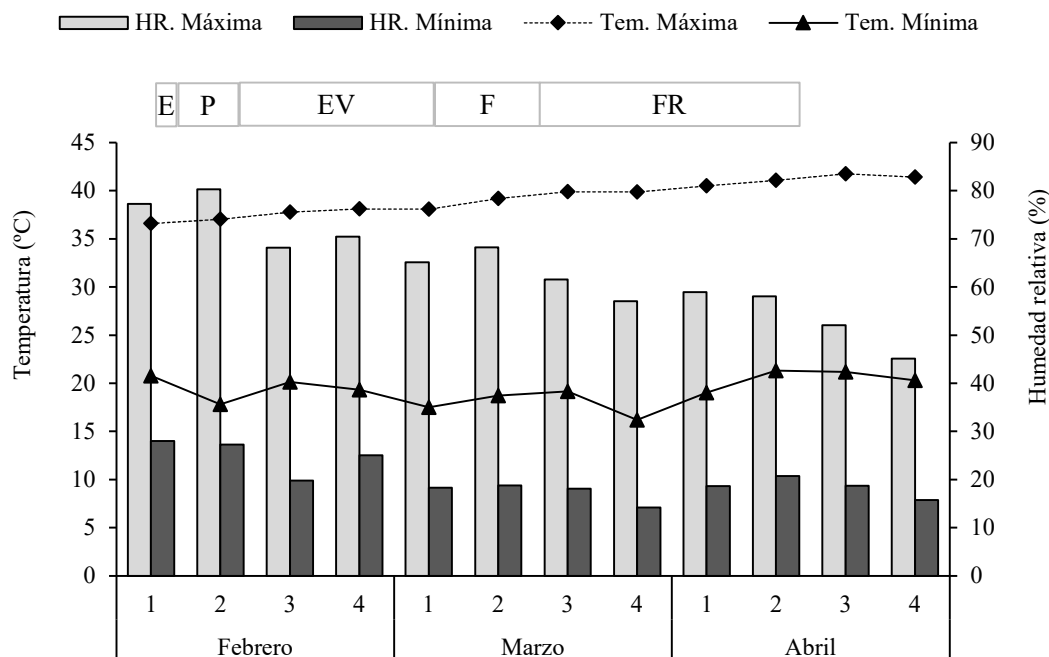


Figura 1. Valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa (promedio semanal) y fenología del cultivo de pepino. E = emergencia; P = plántula; EV = etapa vegetativa; F = floración; FR = fructificación.

Figure 1. Maximum and minimum values of temperature and relative humidity (weekly average) and phenology of the cucumber crop. E = emergency; P = seedling; EV = vegetative stage; F = flowering; FR = fruiting.

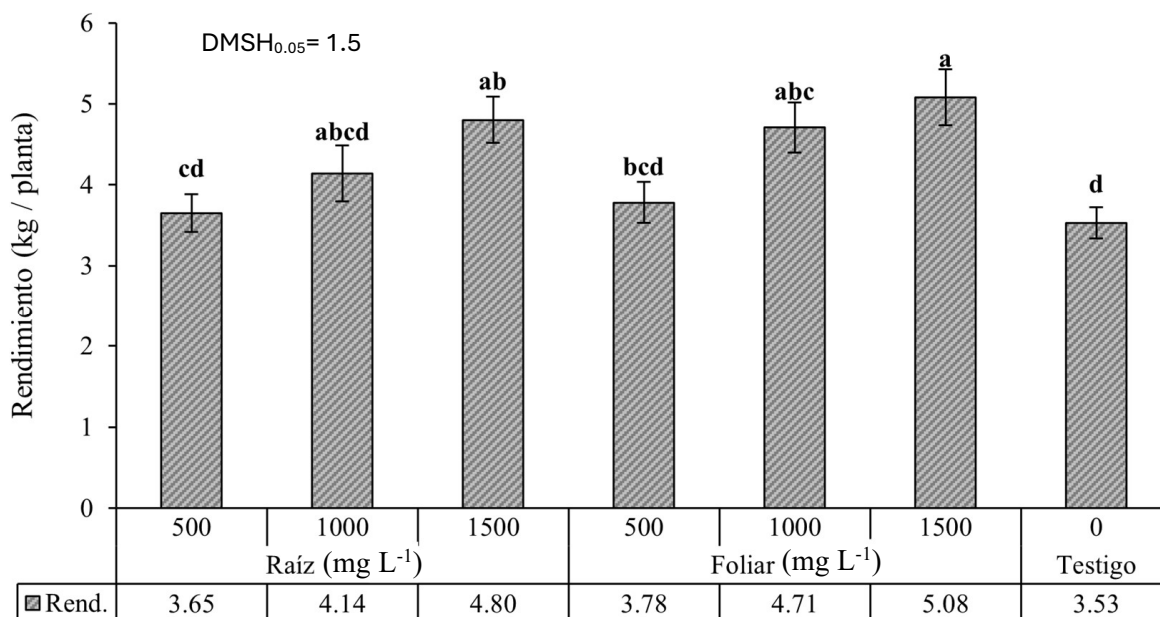


Figura 2. Rendimiento de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. Letras distintas en cada barra indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

Figure 2. Yield of cucumber produced in tezontle as a function of the route of application and dose of silicon. Different letters in each bar indicate statistical differences (Tukey, $p \leq 0.05$). $DMSH_{0.05}$ = Minimum Significant Honest Difference at 5% probability of error.

Cuadro 1. Significancia estadística, prueba de comparación del rendimiento y componentes del cultivo de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.**Table 1. Statistical significance, comparison test of yield and components of cucumber culture produced in tezontle depending on the route of application and silicon doses.**

Vía de aplicación	Silicio	Frutos por planta	Peso medio	Diámetro	Longitud
	mg L ⁻¹		g	mm	cm
Raíz	500	12.67 c [†]	287.38 a	48.31 a	22.91 a
	1000	13.40 bc	308.81 a	48.37 a	22.64 a
	1500	13.80 ab	347.98 a	48.90 a	22.93 a
Foliar	500	12.60 c	299.05 a	48.44 a	22.86 a
	1000	14.40 ab	326.01a	49.50 a	23.10 a
	1500	17.06 a	337.95 a	49.41 a	23.47 a
	Testigo	12.53 c	281.85 a	47.63 a	22.71 a
Probabilidad de F		**	ns	ns	ns
DMSH _{0.05}		1.2	68.65	2.59	0.99
Coeficiente de variación (%)		5.98	10.94	2.66	2.15

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). ** = ($\alpha \leq 0.01$); ns = no significativo ($\alpha \geq 0.05$). DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

[†] Means with equal letters within each column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$). ** = ($\alpha \leq 0.01$); ns = not significant ($\alpha \geq 0.05$). DMSH_{0.05} = Honest minimum significant difference.

suelo, la aspersión foliar de este mineral es más eficiente (Hu *et al.*, 2022). Sin embargo, los sustratos prácticamente inertes como el tezontle poseen características físicas y químicas muy distintas a un suelo y esto puede favorecer la movilización y absorción del silicio.

La respuesta positiva observada en el rendimiento se asocia a que el silicio favorece la absorción y acumulación de elementos como el K, Ca, Mg, B y Mo, que determinan la producción y el desarrollo de los frutos (Pavlovic, Kostic, Bosnic, Kirkby y Nikolic, 2021), lo que se pudo observar en el Cuadro 3 y 4 de nuestro estudio. También se ha documentado que el Si mejora la eficiencia de la fotosíntesis en plantas de pepino al mejorar la conductancia estomática, la síntesis de clorofila y la actividad de la enzima rubisco, lo que favorece el incremento en la concentración de fotoasimilados y energía metabólica para las plantas (Sun *et al.*, 2022). Otro efecto positivo del Si es que ayuda a mitigar el estrés por altas temperaturas (Shilpha, Manivannan, Soundararajan y Ryong, 2023), lo cual sucedió en esta investigación, dado que en las fases críticas para el rendimiento (floración y fructificación) se presentaron temperaturas máximas de entre 39.2 y 41.8 °C (Figura 1); por lo tanto, las plantas que se desarrollan con niveles bajos de estrés tienden a incrementar el rendimiento de frutos.

Calidad de Frutos

Los resultados indicaron que los frutos con mayor firmeza fueron aquellos cosechados de las plantas que recibieron la dosis de 1500 mg en ambas vías de aplicación, con incremento de 20% vía raíz y 19% con la aplicación foliar con respecto al testigo (Cuadro 2). Al respecto, Cázares-Flores *et al.* (2024) señalaron que el silicio aplicado vía drench (20 mg L⁻¹) aumentó la firmeza de los frutos de pepino en 13.39%. Esta respuesta se debe a que el Si al acumularse en la pared celular del tejido vegetal se une a compuestos polisacáridos como la celulosa, la hemicelulosa y las pectinas lo que le proporciona rigidez y estabilidad y mejora la resistencia mecánica (Singh, Kumar y Sharma, 2023). Además, en el Cuadro 3 se observa que la combinación de las dos vías de aplicación y la dosis de 1500 mg favoreció la acumulación de Ca en hojas, y este elemento es de los más importantes para el fortalecimiento de las paredes celulares, al formar enlaces cruzados de pectinas de calcio (Gawkowska, Cybulska y Zdunek, 2018), que junto con el silicio incrementaron la firmeza de los frutos. Cabe resaltar que mejorar esta característica física incrementa la vida de anaquel de los frutos de pepino (Rodríguez-Borbon *et al.*, 2023). Esto es importante porque el ablandamiento de frutos por daños mecánicos, de transporte y por la pérdida de agua y la descomposición de moléculas orgánicas son las principales causas de pérdidas en postcosecha (González-García *et al.*, 2022).

Cuadro 2. Significancia estadística y prueba de comparación de medias de las variables de calidad de frutos de pepino producidos en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.
Table 2. Statistical significance and mean comparison test of the quality variables of cucumber fruits produced in tezontle as a function of the route of application and silicon doses.

Vía de aplicación	Silicio	Firmeza	Sólidos solubles	pH	AT
	mg L ⁻¹	kg cm ⁻²	°Brix		%
Raíz	500	5.96 bc †	4.77 a	6.23 ab	0.304 a
	1000	6.24 ab	4.52 a	6.31 ab	0.304 a
	1500	6.29 a	4.59 a	6.54 a	0.272 a
Foliar	500	5.92 bc	5.17 a	6.16 b	0.352 a
	1000	6.17 ab	5.01 a	6.33 ab	0.301 a
	1500	6.28 a	4.60 a	6.36 ab	0.291 a
	Testigo	5.74 c	4.58 a	6.23 ab	0.323 a
Probabilidad de F		**	ns	*	ns
DMSH _{0.05}		0.33	1.6	0.34	0.10
Coeficiente de variación (%)		2.71	16.41	2.70	16.45

† Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). * = ($\alpha \leq 0.05$); ** = ($\alpha \leq 0.01$); ns = no significativo ($\alpha \geq 0.05$). DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

† Means with equal letters within each column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$). * = ($\alpha \leq 0.05$); ** = ($\alpha \leq 0.01$); ns = not significant ($\alpha \geq 0.05$). DMSH_{0.05} = Honest minimum significant difference.

En pH de los frutos, la dosis más alta de silicio (1500 mg) generó el valor más sobresaliente en este parámetro; pero solo cuando fue aplicado a la raíz. En contraste, los frutos provenientes de las plantas que recibieron la aspersión foliar de 500 mg de silicio mostraron el pH más bajo, incluso menor que el testigo (Cuadro 2). Los valores de pH obtenidos en este estudio son superiores a los reportados en otras investigaciones con aplicaciones foliares de Si en pepino, donde se alcanzaron media de 5.2 a 5.7 (González-Terán, *et al.*, 2020; González-García *et al.*, 2022; Cázares-Flores *et al.*, 2024). Aumentar el pH de los frutos resulta beneficioso para la salud humana ya que se ha demostrado que consumir pulpa de pepino con pH neutro o cercano a la neutralidad puede actuar contra la acidez estomacal; además, tiene potencial carminativo y antiácido (Chakraborty y Rayalu, 2021). Los sólidos solubles totales y acidez titulable no presentaron diferencias significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 3. Concentración de macronutrientes en hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.
Table 3. Macronutrient concentration in cucumber leaves grown in tezontle as a function of application route and silicon doses.

Aplicación	Silicio	N	P	K	Ca	Mg	S
	mg L ⁻¹	%					
Raíz	500	6.79 b†	0.41 d	3.03 b	3.66 a	0.99 ab	1.24 bc
	1000	6.97 ab	0.41 d	2.84 cd	3.92 a	1.04 a	1.21 c
	1500	7.11 a	0.50 a	3.29 a	3.90 a	1.05 a	1.30 b
Foliar	500	6.98 ab	0.45 bc	2.45 e	3.84 a	1.00 ab	1.05 d
	1000	6.90 ab	0.46 b	2.68 d	3.78 a	1.00 ab	1.11 d
	1500	6.79 b	0.43 cd	2.94 bc	3.98 a	1.05 a	1.44 a
	Testigo	5.35 c	0.41 d	2.86 c	3.25 b	0.93 b	1.24 bc
Probabilidad de F		**	**	**	**	**	**
DMSH _{0.05}		0.29	0.02	0.16	0.39	0.09	0.06
Coeficiente de variación (%)		1.58	1.96	2.08	3.80	3.22	1.94

† Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). ** = ($\alpha \leq 0.01$). DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

† Means with equal letters within each column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$). ** = ($\alpha \leq 0.01$). DMSH_{0.05} = Honest minimum significant difference.

Cuadro 4. Concentración de micronutrientes en hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.
Table 4. Micronutrient concentration in tezontle-grown cucumber leaves as a function of application route and silicon doses.

Aplicación	Silicio	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo
	mg L ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----					
Raíz	500	271.3 b [†]	67.4 c	215.6 b	17.19 c	104.1 c	3.14 ab
	1000	246.3 c	59.9 d	187.3 d	15.53 d	106.9 b	3.25 a
	1500	223.3 e	68.3 c	181.4 e	18.90 b	91.8 g	3.11 abc
Foliar	500	342.3 a	77.4 a	258.3 a	27.48 a	95.3 e	2.91 bc
	1000	205.4 g	58.8 d	165.0 f	15.43 d	101.4 d	2.89 c
	1500	242.7 d	72.3 b	193.1 c	15.24 d	109.1 a	3.19 a
	Testigo	212.0 f	68.1 c	165.4 f	17.27 c	93.5 f	3.10 abc
Prob. F		**	**	**	**	**	**
DMSH _{0.05}		2.08	2.14	1.87	0.59	1.52	0.24
Coeficiente de variación (%)		0.30	1.13	0.34	1.17	0.54	2.83

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). ** = ($\alpha \leq 0.01$). DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

[†] Means with equal letters within each column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$). ** = ($\alpha \leq 0.01$). DMSH_{0.05} = Honest minimum significant difference.

Concentración Nutricional en Hojas

Todas las combinaciones de vía de aplicación y dosis de silicio incrementaron la concentración de N, Ca y Mg en hojas respecto al testigo. Las plantas a las que se les aplicó 1500 mg de silicio a la raíz mostraron la mayor concentración de N, P y K en hojas. Los valores más altos de Mg y S se obtuvieron al suministrar 1500 mg en ambas vías de aplicación (Cuadro 3).

La interacción positiva del silicio con la mayoría de los nutrientes aún no es clara, pero se ha demostrado que la adición de este elemento benéfico favorece la absorción y distribución de éstos, ya sea por cambios en las propiedades químicas del suelo o sustrato (pH, capacidad de intercambio catiónico y capacidad de retención de humedad); por la regulación positiva de los genes transportadores de cada mineral o por la estimulación de la actividad de H⁺-ATPasa (Pavlovic *et al.*, 2021). Sin embargo, el efecto sinérgico del silicio con los nutrientes esenciales depende del tipo de suelo o sustrato, las condiciones ambientales en las que se desarrolla la planta (temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, principalmente), así como la fuente, dosis y vía de aplicación del silicio (Hu *et al.*, 2020).

En micronutrientes, la aspersión foliar de 500 mg de Si generó la mayor concentración de metales pesados (Fe, Zn, Mn y Cu) en hojas, lo que concuerda con Ma y Yamaji (2015) quienes señalan que el Si puede mejorar la eficiencia de absorción y movilidad de micronutrientes esenciales en las plantas, en cambio, la dosis de 1500 mg favoreció la concentración de B y Mo. Se observó que al aplicar 1000 mg de silicio de forma foliar se disminuye la cantidad de Fe, y en ambas vías de aplicación el Zn y Cu; pero el Cu también se ve afectado por el suministro de 1500 mg vía foliar, lo que podría explicarse por interacciones de competencia en los sitios de absorción o mecanismos de antagonismo iónico de estos elementos con el Si (Adrees *et al.*, 2015) (Cuadro 4). Lo anterior se relaciona con la capacidad del silicio para mitigar el estrés por metales pesados, ya que reduce su absorción cuando este elemento benéfico se encuentra en concentraciones suficientes en el sustrato o en la planta (De Olivera, Rodríguez, Da Silva, Abreu y De Mello, 2023). En arroz, se ha demostrado que las aplicaciones de silicio reducen las concentraciones de metales pesados (As, Cd y Cu) en hojas y granos (Gaur *et al.*, 2020).

Este estudio muestra que la aplicación de silicio tanto a la raíz como vía foliar incrementa el rendimiento y sus componentes; así como, la calidad de los frutos y la concentración nutricional en las hojas. Las dosis de 1000 y 1500 mg generaron los mayores rendimientos y favorecieron la calidad de los frutos en términos de firmeza. Sin embargo, solo la dosis más alta (1500 mg) aplicada a la raíz aumentó el pH de los frutos y esta misma fue la que generó el más alto contenido de macronutrientes en hojas cuando se aplicó en ambas vías. Por lo tanto, en el cultivo de pepino producido en tezontle, la dosis de 1500 mg de silicio fue la más eficiente y puede aplicarse de forma foliar o incluirla en la solución nutritiva para suministrarse directamente a la raíz.

CONCLUSIÓN

El ciclo del cultivo fue de 70 días y se desarrolló bajo una temperatura que osciló entre 16.2 y 41.8 °C y una humedad relativa entre 14.2 y 77.3%. El silicio a dosis de 1000 y 1500 mg indistintamente de la vía de aplicación fueron las que generaron los mayores rendimientos y firmeza de los frutos. El pH del fruto aumentó significativamente con 1500 mg de silicio suministrados a la raíz. La aplicación foliar de silicio en dosis de 1500 mg incrementó la concentración de N, P, K, Ca, Mg y Mo en hojas, mientras que, la misma dosis, pero aplicada a la raíz aumentó el contenido de Ca, Mg, S, B y Mo. En cambio, 500 mg de silicio aplicado vía foliar aumentó la concentración de metales pesados, pero disminuyeron con las dosis de 1000 y 1500 mg indistintamente de la forma de aplicación. La aplicación de silicio mejora la producción y calidad de la producción de pepino y la dosis más apropiada es 1500 mg suministrada a la raíz o foliar.

DECLARACIÓN ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos obtenidos y analizados en esta investigación están disponibles a través del autor con previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores señalan que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: R.N.A. y P.A.B. Metodología: R.N.A. Validación: P.A.B. Análisis formal: P.A.B. Investigación: R.N.A. Escritura y preparación del borrador original: R.N.A. Escritura, revisión y edición: R.N.A. y P.A.B. Análisis estadístico: P.A.B. Supervisión: P.A.B.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al personal del laboratorio de análisis físico-químicos de esta institución por las facilidades otorgadas en el desarrollo de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., ... & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists, International). (1980). *Official Methods of Analysis of AOAC*. Washington, D.C., USA: AOAC.
- Butnariu, M., & Butu, A. (2015). Chemical composition of vegetables and their products. In P. C. K. Cheung, & B. M. Metha. (Eds.). *Handbook of food chemistry* (pp. 627-692). Heidelberg, Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Cázares-Flores, L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. J., Zazueta-Torres, N. D., Yáñez-Juárez, M. G., Angulo-Castro, A., & Díaz-Valdés, T. (2024). Respuesta de dos variedades de pepino (*Cucumis sativus* L.) al Silicio y Cloro aplicados en casa sombra. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-9. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1620>
- Chakraborty, S., & Rayalu, S. (2021). Health beneficial effects of cucumber. In H. Wang (Ed.). *Cucumber economic values and its cultivation and breeding* (pp. 75-84). Londres, Reino Unido: IntechOpen.

- De Olivera, A. L., Rodríguez, C. F. J., Da Silva, L. D., Abreu-Junior, C. H., & De Mello, P. R. (2023). Silicon mitigates the effects of potentially toxic metals. In R. P. De Mello (Ed.). *Benefits of silicon in the nutrition of plants* (pp.237-251). Cham, Switzerland: Springer.
- Dou, Z., Feng, H., Zhang, H., Abdelghany, A. E., Zhang, F., Li, Z., & Fan, J. (2023). Silicon application mitigated the adverse effects of salt stress and deficit irrigation on drip-irrigated greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 289, 108526. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108526>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). (2023). *Corporate Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Consultada el 28 de abril, 2024, desde <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Faroutine, G., Arteaga-Ramírez, R., Pineda-Pineda, J., & Vázquez-Peña, M. A. (2023). Effect of calcium silicate and moisture content of the substrate on the growth and productivity parameters of cucumber. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 83(3), 334-346. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392023000300334>
- Gaur, S., Kumar, J., Kumar, D., Chauhan, D. K., Prasad, M. S., & Srivastava, K. P. (2020). Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110885>
- Gawkowska, D., Cybulska, J., & Zdunek, A. (2018). Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers*, 10(7), 762. <https://doi.org/10.3390/polym10070762>
- González-García, Y., Flores-Robles, V., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., De la Fuente, M. C., Sandoval-Rangel, A., & Juárez-Maldonado, A. (2022). Application of two forms of silicon and their impact on the postharvest and the content of bioactive compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruits. *Biocell*, 46(11), 2497-2506. <https://doi.org/10.32604/biocell.2022.021861>
- González-Terán, J. E., Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Tellez, L. I. (2020). Effects of silicon and calcium application on growth, yield and fruit quality parameters of cucumber established in a sodic soil. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 19(3), 149-158. <https://doi.org/10.24326/asphc.2020.3.13>
- Gouranga, S., Nagdev, P., Jeer, M., & Murali-Baskaran, R. K. (2023). Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 194, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105524>
- Hu W., Su, Y., Zhou, J., Zhua, H., Gou, J., Hou, H., & Gong, H. (2022). Foliar application of silicon and selenium improves the growth, yield and quality characteristics of cucumber in field conditions. *Scientia Horticulturae*, 9(10), 1-10. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101126>
- Hu, Y. A., Xu, N. S., Qin, N. D., Li, W., & Zhao, Q. X. (2020). Role of silicon in mediating phosphorus imbalance in plants. *Plants*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/plants10010051>
- Jia, H., & Wang, H. (2021). Introductory chapter: studies on cucumber. In H. Wang (Ed.). *Cucumber economic values and its cultivation and breeding* (pp. 1-8). Londres, Inglaterra: IntechOpen.
- Khan, M. N., Siddiqui, M. H., Alhussien, K. M., El-Alosey, A. R., AlOmran, M. A. M., & Kalaji, H. M. (2023). Titanium dioxide nanoparticles require K⁺ and hydrogen sulfide to regulate nitrogen and carbohydrate metabolism during adaptive response to drought and nickel stress in cucumber. *Environmental Pollution*, 334, 122008. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122008>
- Liu, X., Huang, Z., Li, Y., Xie, W., Li, W., Tang, X., ... & Mo, Z. (2020). Selenium-silicon (Se-Si) induced modulations in physio-biochemical responses, grain yield, quality, aroma formation and lodging in fragrant rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 196, 110525. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110525>
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20(7), 435-442.
- Meneses-Fernández, C., & Quesada-Roldán, G. (2018). Crecimiento y rendimiento del pepino holandés en ambiente protegido y con sustratos orgánicos alternativos. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 235-250. <http://dx.doi.org/10.15517/ma.v29i2.28738>
- Mills-Ibibofo, T., Dunn, B., Maness, N., & Payton, M. (2019). Use of diatomaceous earth as a silica supplement on potted ornamentals. *Horticulturae*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5010021>
- Osuna-Zárate, A. P., Robledo-Torres, V., Mendoza-Villarreal, R., & Sandoval-Rangel, A. (2023). Effect of silicon and humic substances on the productivity and absorption of minerals in cucumber. *Agro Productividad*, 16, 55-66. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i8.2435>
- Ouellette, S., Goyette, M. H., Labbé, C., Laur, J., Gaudreau, L., Gosselin, A., ... & Bélanger, R. R. (2017). Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 949. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00949>
- Pal, A., Adhikary, R., Shankar, T., Sahu, A. K., & Maitra, S. (2020). Cultivation of cucumber in greenhouse. In: S. Maitra, J. Dinkar. & T. Shankar (Eds.). *Protected cultivation and smart agriculture* (pp. 139-145). India: New Delhi Publishers.
- Pavlovic J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, A. E., & Nikolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Reyes-Perez, J. J., Tipan-Torres, H. C., Llerena-Ramos, L. T., Hernandez-Montiel, L. G., & Rivas-Garcia, T. (2023). Silicon increased the growth, productivity, and nutraceutical quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(2), 13155-13155. <https://doi.org/10.15835/nbha51213155>
- Rodriguez-Borbon, M. I., Sohn, H., Delgado, E., Fuqua, D. O., Rodríguez-Medina, M. A., Tlapa, D., & Baez-Lopez, Y. (2023). Shelf-life assessment on European cucumber based on accelerated temperature-humidity stresses. *Applied Sciences*, 13(4), 2663. <https://doi.org/10.3390/app13042663>
- SAS Institute. (2017). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.4*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Sharma, V., Sharma, L., & Sandhu, K. S. (2020). Cucumber (*Cucumis sativus* L.). In G. A. Nayik. & A. Gull (Eds.). *Antioxidants in vegetables and nuts-properties and health benefits* (pp. 333-340). Singapore: Springer.
- Shilpha, J., Manivannan, A., Soundararajan, P., & Ryong, J. B. (2023). Heat stress mitigation by silicon nutrition in plants: a comprehensive overview. In R. P. De Mello (Ed.). *Benefits of silicon in the nutrition of plants* (pp. 328-346). Cham, Switzerland: Springer.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2023). Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultada el 14 de agosto, 2025, desde <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singh, P., Kumar, V., & Sharma, A. (2023). Interaction of silicon with cell wall components in plants: a review. *Journal of Applied and Natural Science*, 15(2), 480-497. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i2.4352>
- Sun, S., Yang, Z., Song, Z., Wang, N., Guo, N., Niu, J., ... & Chen, S. (2022). Silicon enhances plant resistance to Fusarium wilt by promoting antioxidant potential and photosynthetic capacity in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 1011859. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1011859>
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. In International Society for Soilless Culture. In *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture* (pp. 633-650). Wageningen, The Netherlands: ISOSC. ISBN: 9789070976040.
- Tayade, R., Ghimire, A., Khan, W., Lay, L., Attipoe, J. Q., & Kim, Y. (2022). Silicon as a smart fertilizer for sustainability and crop improvement. *Biomolecules*, 12(8), 1027. <https://doi.org/10.3390/biom12081027>
- Yuvaraj, M., Priya, R. S., Jagathjothi, N., Saranya, M., Suganthi, N., Sharmila, R., ... & Subramanian, K. S. (2023). Silicon nanoparticles (SiNPs): Challenges and perspectives for sustainable agriculture. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 128, 102161. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102161>
- Zhang, Y., Yu, S., Hai-Jun, G., Hai-Liang, Z., Huan-Li, L., Yan-Hong, H., & Yi-Chao, W. (2018). Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10), 2151-2159. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62038-6)