






Soluciones nutritivas y aplicación foliar de silicio en la producción hidropónica de chile serrano

Nutrient solutions and foliar application of silicon in the hydroponic production of serrano chili

Rogelio Nuñez Ambríz¹ , José Emilio Bueno Jáquez² , Juan Antonio Chamú Baranda² , Martín Solís Martínez² 
, Oscar Martín Antúnez Ocampo^{3*} 

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Prolongación de la calle Mariano Jiménez S/N, Colonia El Varillero, C.P. 60670, Apatzingán de la Constitución, Michoacán, México.

² Centro de Estudios Profesionales. Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero. Avenida Vicente Guerrero Núm. 81. C.P. 40000. Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Iguala. Carretera Iguala - Tuxpan, km. 2.5. C.P. 40000, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the effect of the Steiner nutrient solution concentration (50, 75, 100 and 125 %) and the foliar application of silicon (with and without application) on the production of hydroponic serrano chili. The treatments were distributed under a design of randomized complete blocks arranged in divided plots. The base solution (100 %) and 75 % concentration caused greater plant growth and greenness index (SPAD readings). The highest fruit yields were achieved with the 75 and 50 % solutions. The solution at an ionic concentration of 75 % increased the diameter of premium fruits, however, none of the concentrations of the nutrient solution modified the soluble solids ($^{\circ}$ Brix) of the fruits. On the other hand, it was shown that silicon significantly favors growth, greenness index and plant yield, but not fruit quality ($^{\circ}$ Brix). The 75 % SN combined with the foliar application of silicon guarantees the highest crop yield (2.02 kg m⁻²) and fruit diameter (1.82 cm).

Keywords: *Capsicum annuum*, ionic concentration, beneficial elements, hydroponics, nutrition.

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la concentración de la solución nutritiva Steiner (50, 75, 100 y 125 %) y la aplicación foliar de silicio (con y sin aplicación) en la producción de chile serrano hidropónico. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas. La solución base (100 %) y de 75 % de concentración provocaron un mayor crecimiento de las plantas e índice de verdor (lecturas SPAD). Los más altos rendimientos de frutos se lograron con las soluciones al 75 y 50 %. La solución a una concentración iónica de 75 % incrementó el diámetro de frutos de primera calidad, sin embargo, ninguna de las concentraciones de la solución nutritiva modificó los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) de los frutos. Por otra parte, se evidenció que el silicio favorece significativamente el crecimiento, el índice de verdor y el rendimiento de las plantas, pero no la calidad de los frutos ($^{\circ}$ Brix). La SN al 75 % combinada con la aplicación foliar de silicio garantizan

el mayor rendimiento del cultivo (2.02 kg m⁻²) y diámetro de los frutos (1.82 cm).

Palabras clave: *Capsicum annuum*, concentración iónica, elementos benéficos, hidroponía, nutrición.

INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum* L.) se encuentra dentro de las ocho hortalizas más cultivadas en el mundo (año 2022-2023; 2 065 408 ha; 36 999 380.55 t) (FAOSTAT, 2023), por su uso industrial, medicinal, ornamental y alimenticio (Palacio-Márquez *et al.*, 2019). En México, existe una gran diversidad de especies y variedades de importancia gastronómica, cultural y económica (Bobadilla-Larios *et al.*, 2017); sin embargo, las que se cultivan en mayor superficie son el jalapeño, serrano, morrón, poblano y habanero (Ávila-Quezada *et al.*, 2019). En el 2023, el chile serrano se mantuvo como la segunda variedad más cultivada en el país, con 348 197.08 t producidas, esto también representa una fuente importante de empleo e ingresos económicos para los estados con mayor volumen de producción, como Sinaloa (147 607 t, 42.4 %); San Luis Potosí (54 407 t, 15.6 %), Michoacán (20 903 t, 6 %), Veracruz (18 593 t, 5.3 %) y Guanajuato (17 199 t, 4.9 %) (SIAP, 2023).

El crecimiento de la población mexicana demanda la producción constante de alimentos y exige la tecnificación agrícola (Chavez-Díaz *et al.*, 2020). Aunado a esto, la agricultura actual enfrenta retos y desafíos como la reducción de la superficie cultivable, el deterioro y pérdida de fertilidad de los suelos por la sobreexplotación, la escasez de agua, las pérdidas de la producción por plagas y enfermedades en cultivos de campo abierto y el deterioro ambiental (FAO, 2017). Ante esta situación, resalta la importancia de los sistemas hidropónicos, que se caracterizan por no requerir de suelo como sistema biótico para las plantas; además, permiten suministrar los nutrientes que demanda el cultivo a través de una solución nutritiva (SN), lo que permite obtener altos rendimientos en menor superficie (Sela *et al.*, 2023). No obstante, en diversos cultivos hidropónicos se emplean SN universales, que en muchos casos superan la concentración iónica necesaria para alcanzar el crecimiento y rendimiento

*Autor para correspondencia: Oscar Martín Antúnez Ocampo
Correo-e: antunez.oscar@inifap.gob.mx

Recibido: 23 de enero de 2025

Aceptado: 21 de febrero de 2025

Publicado: 13 de marzo de 2025

óptimo del cultivo, lo cual hace que la fertilización inorgánica se convierta en la práctica agrícola de mayor costo, y esto se ve reflejado en la reducción de las utilidades del productor, lo que se agudiza por el aumento constante en el precio de los fertilizantes utilizados (De la Rosa-Rodríguez *et al.*, 2020). Además, no todas las hortalizas responden de la misma manera a las concentraciones de la SN y existen variaciones en genotipos de la misma especie (Meselmani, 2022). En este contexto, la SN más utilizada en la producción de chile es la formulada por Steiner (San Juan *et al.*, 2019).

Es importante destacar que, los retos y desafíos descritos anteriormente en la producción de hortalizas, especialmente en el chile serrano bajo sistemas de cultivo sin suelo, demandan el adecuado manejo de las soluciones nutritivas, pero también la implementación de alternativas sustentables que ayuden a incrementar los rendimientos y calidad de los frutos. En este sentido, el uso de elementos benéficos como el silicio resulta una alternativa viable por las mejoras fisiológicas y agronómicas que éste genera en los cultivos. Al respecto, el silicio es el segundo elemento mineral más abundante en el suelo después del oxígeno (Liu *et al.*, 2020). En la solución del suelo se encuentra como ácido monosilícico (Si(OH)_4), la mayor parte en forma no disociada, que es fácilmente disponible para las plantas (Martos-García *et al.*, 2023). Se ha demostrado que su absorción genera efectos benéficos para las plantas como resistencia a plagas, tolerancia a toxicidad por metales pesados (Fe, Al, Mn, Cu y Ar), al estrés hídrico y salino, menor evapotranspiración, promoción de crecimiento, mejora la arquitectura de las plantas y por consiguiente favorece la tasa fotosintética (Kaur *et al.*, 2016; López-Cuén *et al.*, 2020). Sin embargo, no todas las plantas responden de la misma manera a la absorción de este mineral (Castellanos *et al.*, 2015). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la concentración iónica de la solución nutritiva de Steiner y la aplicación foliar con silicio en el crecimiento, rendimiento y calidad de frutos de chile serrano cultivado en condiciones de malla sombra e hidroponía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área experimental

El experimento se desarrolló en condiciones de malla 30 % sombra e hidroponía, en la unidad experimental del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CSAEGRO), localizado en la región Norte del estado de Guerrero, México, entre las coordenadas geográficas 18° 19' latitud norte y 99° 39' longitud oeste, a 640 m de altitud. Esta región presenta un clima cálido subhúmedo Awo (w) (i) g, con lluvia en verano. La precipitación media anual es de 797 mm y la temperatura de 24.6 °C (García, 2004).

Material vegetal

Se usaron semillas de chile serrano var. Camino Real F1 (Harris Moran®, Seed Company). Este material exhibe una estructura vegetativa vigorosa, y posee frutos grandes, de color verde oscuro brillante, con excelente sabor, picor y larga vida de anaquel.

Factor en estudio y diseño experimental

Se evaluaron dos factores; el primero fue la concentración de la solución nutritiva (SNs) con cuatro niveles (50, 75, 100 y 125 %) y el segundo, la aplicación foliar de silicio (FSi) con dos niveles (sin y con). Los tratamientos resultaron de la combinación de los niveles de ambos factores, y se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas. Cada tratamiento constó de 4 repeticiones, lo cual generó 32 unidades experimentales integradas por cinco plantas. La parcela principal correspondió a la aplicación de silicio y la subparcela a la concentración de la solución nutritiva.

Las SNs se elaboraron con base en la formulación de la SN Steiner (1984) por ser la que ha generado los mejores resultados en la mayoría de las hortalizas; mientras que, la fuente de silicio fue tierra de diatomeas (Diatomix®) compuesta por dióxido de silicio (SiO_2 , 92.7 %); óxido de aluminio (Al_2O_3 , 3.6 %); óxido de hierro (Fe_2O_3 , 1.2%); óxido de calcio (CaO , 1.2 %); óxido de magnesio (MgO , 0.4 %); óxido de potasio (K_2O , 0.3 %); óxido de sodio (Na_2O , 0.3 %), óxido de titanio (TiO_2 , 0.2 %) y óxido de fósforo (P_2O_5 , 0.1 %).

Establecimiento y manejo del experimento

Las semillas se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades previamente desinfectadas con cuaternario de amonio (10 mL L⁻¹) y rellenas con turba como sustrato, y se regaron con agua potable. El trasplante se llevó a cabo a los 43 días después de la siembra (dds), cuando las plántulas presentaron tres pares de hojas totalmente desarrolladas, en contenedores de polietileno de 35 × 37 cm con arena de río como sustrato con las siguientes características: granulometría (< 2 mm), densidad aparente (1.5 g cm⁻³), porosidad (39 %), pH (6.73), conductividad eléctrica (0.04 dS m⁻¹) y capacidad de intercambio catiónico (2.10 meq / 100 g) (Danh *et al.*, 2011). Los contenedores se distribuyeron a doble hilera con separación de 0.4 m entre contenedores e hileras, y 1.25 m entre camas de cultivo. El sistema de riego fue por goteo automatizado, con tinacos de 1 100 L de capacidad para cada solución nutritiva, y una bomba periférica de 1/2 HP por cada tinaco. Las plantas se mantuvieron erguidas con tutorado de espaldera sencilla.

Las SNs se aplicaron diariamente con pH ajustado entre 5.5 y 6.5. En la etapa vegetativa, a cada planta se le suministró diariamente 375 mL de SN mediante riegos por pulsos de un minuto de duración. Durante la etapa de floración-fructificación se aumentaron los riegos para aplicar 660 mL de SN. La tierra de diatomeas se disolvió en agua potable a una dosis de 10 g L⁻¹ combinada con coadyuvante Inex A (1 mL L⁻¹) y se aplicaron por las mañanas para evitar deriva por el viento, hasta punto de goteo con un aspersor manual Truper® de 5 L de capacidad. Las aspersiones iniciaron a los 5 ddt y se repitieron cada siete días hasta contabilizar seis aplicaciones. La cosecha inició a los 60 ddt, posteriormente se realizó cada 5 días, hasta completar cinco cortes. Los frutos fueron clasificados por calidad, con base en los siguientes criterios de longitud: primera calidad (8.0 a 10.0 cm), segunda calidad



(5.0 a 7.9 cm), tercera calidad (3.5 a 4.9 cm) y desecho (< 3.5 cm o dañados) (FAO, 2011).

Registro de los elementos del clima y la fenología

Durante el desarrollo del cultivo, dentro de la casa sombra se registró decenalmente las temperaturas máximas y mínimas con un datalogger Elitech®. También, se registró la duración de las etapas fenológicas de las plantas de Chile, éstas fueron: plántula, vegetativa, floración-fructificación y madurez fisiológica-cosecha. Las unidades calor acumuladas se calcularon mediante el método residual con la fórmula $UC = ((T_{máx} - T_{mín}) / 2) - T_{base}$. Donde: UC= unidades calor diarias, $T_{máx}$ = temperatura máxima diaria (°C), $T_{mín}$ = temperatura mínima diaria (°C), T_{base} = temperatura base del cultivo. Para las plantas de Chile se considera temperatura base 14 °C (Seo-Young y Chan, 2019).

Variables en estudio

A los 50 ddt se midieron las siguientes variables morfológicas: altura de la planta (cm), con un flexómetro Truper® desde la base del tallo hasta la yema apical; diámetro del tallo (mm), con un vernier digital Truper®, número de bifurcaciones por planta. Se registró el índice de verdor en lecturas SPAD al inicio de la etapa vegetativa (15 ddt), floración (29 ddt) y cuajado y fructificación (43 ddt); las lecturas se obtuvieron con el medidor portátil del contenido relativo de clorofila SPAD-502, marca Minolta®, en la hoja recientemente madura.

El rendimiento se calculó con base en la sumatoria de cinco cosechas, y se obtuvo el peso y número de frutos comercializables de cada parcela útil (tres plantas), estos datos se reportaron en m² considerando la densidad de población. El peso de los frutos (kg) se determinó con una báscula digital L-PCR, Torrey®; además, de una muestra de cinco frutos de primera calidad de cada unidad experimental se midió el diámetro con un vernier digital Truper® y se reportó el promedio de las cinco cosechas. Los sólidos solubles totales (°Brix) se obtuvieron del jugo de los frutos en cada cosecha, colocando jugo en el sensor del refractómetro digital Hanna® y se obtuvo un promedio.

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos en cada variable evaluada, se realizó un análisis de varianza ($\alpha \leq 0.05$) y las que fueron significativas se les realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) con el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4 (SAS, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología-ambiente

El ciclo biológico del cultivo de Chile fue de 128 días, en condiciones de malla sombra e hidroponía, bajo una temperatura media de 28.11 °C donde se acumularon 2 039.75 unidades calor (UC). Los primeros 42 días correspondieron a la etapa de plántula (685.15 UC), la etapa vegetativa constó de 23 días (421.60 UC); mientras que, la etapa de floración-fructificación tuvo una duración de 36 días (572.90 UC), y la

etapa de madurez fisiológica-cosecha duró 26 d (360.10 UC). Respecto a estos datos, López-Salazar *et al.* (2019) y Luna *et al.* (2021) en Chile serrano variedad Tampiqueño 74, cultivado en hidroponía y condiciones de invernadero, tuvieron ciclos de producción de 165 y 180 d, respectivamente. La discrepancia con lo obtenido en la presente investigación se debe principalmente a la diferencia entre los ambientes del área de estudio.

Es importante indicar que en la etapa vegetativa y primera semana de la floración e inicio de cuajado de frutos se registraron las temperaturas más altas (40 a 42 °C); sin embargo, éstas descendieron en toda la etapa de madurez fisiológica-cosecha, al tener temperaturas máximas de 33 a 35 °C, medias de 25 a 27 °C y mínimas de 19 a 21 °C (Figura 1). Al respecto, Seo-Young y Chan (2019) indican que las temperaturas diurnas óptimas para la floración de las plantas de Chile son de 26 - 28 °C; cuando se presenta una temperatura alta (> 30 °C) no solo reduce el número total de frutos por aborto floral, sino que también provoca la malformación de frutos, por este motivo resulta importante las aplicaciones de silicio con el objetivo de reducir el estrés de las plantas generado por las altas temperaturas.

La concentración iónica de la solución nutritiva (SN) mostró significancia ($\alpha \leq 0.05$) en todas las variables de estudio excepto en los sólidos solubles totales (°Brix). La aplicación foliar de silicio (Si) influyó de forma significativa en la mayoría de las variables con excepción del número de bifurcaciones por planta (NB) y sólidos solubles totales (°Brix), en cambio, la interacción de SN x Si solo mostró significancia en las variables rendimiento (RF) y diámetro de frutos de primera calidad (DF) (Tabla 1).

Efecto de la concentración de la solución nutritiva (SN)

Las plantas fertilizadas con concentraciones de 125, 100 y 75 % presentaron la mayor altura y fueron estadísticamente superiores en 13.49, 17.72 y 20.73 %, respectivamente, en comparación a las plantas que se les aplicó la solución al 50 %. Las SN al 75 y 100 % generaron plantas con mayor diámetro de tallo y número de bifurcaciones, mientras que, los resultados más bajos en estas variables los obtuvieron las plantas fertilizadas con SN al 125 y 50 %, y esta última fue la menos eficiente (Tabla 2). Estos resultados indican que una concentración alta (125 %) de iones en la SN no garantiza el mayor crecimiento de las plantas de Chile, puesto que, a mayor concentración iónica se incrementa el potencial osmótico, lo que exige mayor gasto de energía metabólica de la planta para absorber los iones por la raíz, este desgaste se ve reflejado en una disminución del desarrollo de la planta (Pérez-Vázquez *et al.*, 2020).

En general, las lecturas SPAD oscilaron de 45.68 a 66.49, y fue en la etapa de fructificación en donde se registraron las mayores lecturas. En la etapa vegetativa, las plantas fertilizadas con SN al 75, 100 y 125 % presentaron el mayor índice de verdor (55.90 a 57.66 lecturas SPAD), que estadísticamente fueron similares; pero, diferentes a las obtenidas en hojas de plantas fertilizadas con SN al 50 %. En floración, las lecturas

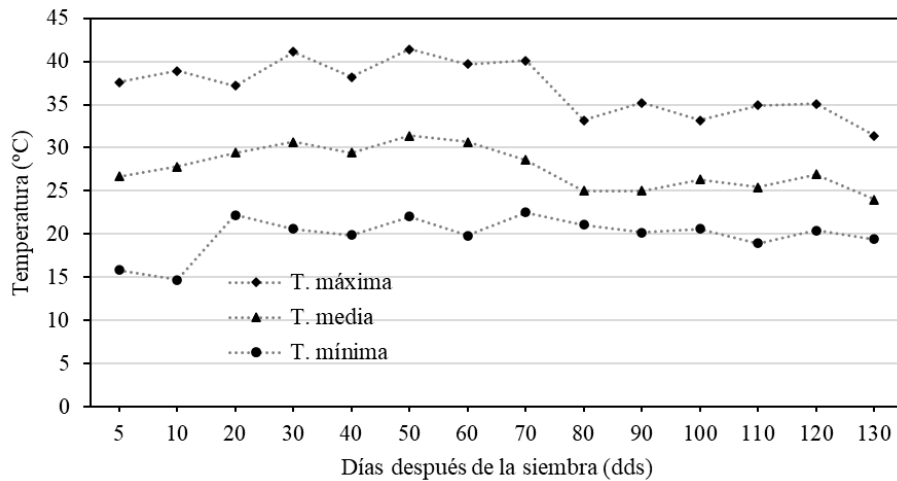


Figura 1. Fenología-ambiente de chile serrano, cultivado en casa sombra e hidroponía. Etapa vegetativa (EV); floración-fructificación (F-F); madurez fisiológica-cosecha (MF-C).

Figure 1. Phenology-environment of serrano chili, grown in shade house and hydroponics. Vegetative stage (VE); flowering-fruitletting (F-F); physiological maturity-harvest (MF-C).

Tabla 1. Significancia estadística del crecimiento, el índice de verdor como lecturas SPAD y el rendimiento y sus componentes del cultivo de chile serrano en respuesta a la concentración de la solución nutritiva y la aplicación foliar de silicio.

Table 1. Statistical significance of plant growth, yield and fruit quality components of the serrano pepper crop in response to the concentration of the nutrient solution and the foliar application of silicon.

Fuente de variación	AP	DT	NB	SPAD (FV)	SPAD (FL)	SPAD (FR)	RF (kg m ²)	NF (m ²)	DF (cm)	SST (°Brix)
Si	*	*	ns	*	*	*	**	**	**	ns
SN	*	*	*	**	**	**	**	*	*	ns
SNxSi	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	ns

AP= altura de la planta. DT= diámetro del tallo. NB= número de bifurcaciones por planta. FV= fase vegetativa. FL= floración. FR= fructificación. RF= rendimiento de frutos. NF= número de frutos. DF= diámetro de frutos de primera calidad. SST= sólidos solubles totales. SN= concentración de la solución nutritiva. Si= aplicación foliar de Silicio. *= significativo ($\alpha \leq 0.05$). **= altamente significativo ($\alpha \leq 0.01$). ns= no significativo ($\alpha > 0.05$).

AP= height of the plant. DT= stem diameter. NB= number of forks per floor. FV = vegetative phase. FL = flowering. FR = fruitletting. RF = fruit yield. NF = number of fruits. DF= diameter of top-quality fruits. TSS = total soluble solids. SN= concentration of the nutrient solution. Si = foliar application of Silicon. *= significant ($\alpha \leq 0.05$). **= Highly significant ($\alpha \leq 0.01$). ns= not significant ($\alpha > 0.05$).

Tabla 2. Prueba de comparación de medias de la altura (AP), diámetro del tallo (DT) y número de bifurcaciones (NB) de plantas de chile serrano en respuesta a la aplicación de silicio y concentración de la solución nutritiva.

Table 2. Means comparison test of height (PA), stem diameter (DT) and number of bifurcations (NB) of serrano chili plants in response to silicon application and nutrient solution concentration.

Factores	Niveles	AP (cm)	DT (mm)	NB
Aplicación de Si	Sin	93.38 b ^a	9.71 b	56.36 a
	Con	109.60 a	11.0 a	59.25 a
Concentración de la SN	125 %	101.90 a	9.84 b	58.13 b
	100 %	105.70 a	10.86 a	64.75 a
	75 %	108.40 a	11.68 a	64.00 a
	50 %	89.79 b	9.05 b	44.36 c
Media general		101.49	10.36	57.81
CV (%)		8.00	6.00	7.00

^aMedias con letras iguales dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). Si = Silicio, SN = solución nutritiva.

^aMeans with equal letters within each column are statistically equal (Tukey, $p \leq 0.05$). Si = Silicon, SN = nutrient solution.

más sobresalientes se obtuvieron con la solución al 75 y 100 %, respectivamente. En la fase de fructificación, las plantas fertilizadas con SN al 75 % obtuvieron las lecturas SPAD más altas (66.69); pero, estadísticamente iguales a las lecturas (65.24 y 66.06) de plantas con SN al 100 y 125 %, estas tres soluciones superaron de 4 a 7 %, a las lecturas obtenidas en plantas fertilizadas con SN al 50 % (Tabla 3). Es importante señalar que, el índice de verdor de las plantas de Chile no se incrementó de manera proporcional a la concentración de la SN como lo reportaron Chamú-Juárez *et al.* (2020) en el cultivo de tomate de cáscara, tampoco se observó una relación directa entre el mayor contenido de nitrógeno en la SN y el incremento de las lecturas SPAD, comportamiento que señalaron Padilla *et al.* (2018) en el cultivo de pimiento morrón (*C. annuum* L.). Esto refleja la importancia de conocer la concentración ideal de la SN para cada cultivo en particular y como ésta influye en la absorción de elementos importantes

que constituyen la clorofila como el nitrógeno y magnesio (Pareek *et al.*, 2018), porque se ha demostrado que estos no se absorben de manera eficiente por las plantas en concentraciones altas de SN. No obstante, cuando el nitrógeno y magnesio se suministran en menor concentración en la SN (al 50 %), las lecturas SPAD de las hojas disminuyen.

El mayor rendimiento y número de frutos se obtuvo en plantas fertilizadas con SN al 75 % (1.85 kg m⁻², 337.89 frutos) y 50 % (1.83 kg m⁻², 329.28 frutos), que fueron estadísticamente iguales pero superiores a los promedios registrados en plantas con SN al 100 y 125 % (1.35 a 1.50 kg m⁻², 265.94 a 274.15 frutos). Mientras que, el mayor diámetro de frutos de primera calidad se logró con la aplicación de SN al 75 %, que fue estadísticamente superior al resto de las SNs, teniendo el menor tamaño de fruto en plantas fertilizadas con SN al 125 % (Tabla 4).

Tabla 3. Prueba de comparación de medias del índice de verdor en lecturas SPAD de plantas de Chile serrano en respuesta a la aplicación de silicio y concentración de la solución nutritiva.

Table 3. Means comparison test of the greenness index in SPAD readings of serrano chili plants in response to the application of silicon and concentration of the nutrient solution.

Factores	Niveles	Vegetativa	Floración	Fructificación
Aplicación de Si	Sin	53.15 b ^a	61.76 b	63.93 b
	Con	54.83 a	63.81 a	66.40 a
Concentración de la SN	125 %	56.70 a	60.21 b	66.06 ab
	100 %	57.66 a	65.61 a	65.24 ab
	75 %	55.90 a	65.65 a	66.69 a
	50 %	45.68 b	59.65 b	62.67 b
Media general		53.99	62.78	65.17
CV (%)		4.00	4.00	4.00

^aMedias con letras iguales dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). Si = Silicio. SN = solución nutritiva.

^aMeans with equal letters within each column are statistically equal (Tukey, $p \leq 0.05$). Si = Silicon. SN = nutrient solution.

Tabla 4. Prueba de comparación de medias de los componentes del rendimiento y calidad del fruto de plantas de Chile serrano por efecto de la concentración de la solución nutritiva y la aplicación foliar de silicio.

Table 4. Means comparison test of the yield and fruit quality components of serrano chili plants in response to the nutrient solution concentration and silicon foliar application.

Factores	Niveles	RF (kg m ⁻²)	NF (m ²)	DFP (cm)	°Brix
Aplicación de Si	Sin	1.46 b ^a	272.26 b	1.49 b	5.45 a
	Con	1.80 a	331.37 a	1.55 a	5.40 a
Concentración de la SN	125 %	1.35 b	265.94 b	1.42 b	5.46 a
	100 %	1.50 b	274.15 b	1.46 b	5.09 a
	75 %	1.85 a	337.89 a	1.71 a	5.50 a
	50 %	1.83 a	329.28 a	1.49 b	5.65 a
Media general		1.63	301.82	1.52	5.43
CV (%)		12.00	12.00	4.00	10.00

^aMedias con letras iguales dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). Si = Silicio. SN = solución nutritiva. NF = número de frutos. RF = rendimiento de frutos. DFP = diámetro de frutos de primera calidad.

^aMeans with equal letters within each column are statistically equal (Tukey, $p \leq 0.05$). Si = Silicon. SN = nutrient solution. NF = number of fruits. RF = fruit yield. DFP = diameter of top quality fruits.

Estos resultados reflejan que el cultivo de chile serrano disminuye su rendimiento a niveles altos de salinidad en el sustrato, por lo que la SN más adecuada para obtener los mayores rendimientos es la de 75 %. Además, representa un beneficio económico por el ahorro de fertilizantes empleados en la nutrición del cultivo en comparación con la SN al 100 %. Resultados similares reportaron Salazar-Jara *et al.* (2016) quienes al evaluar cinco concentraciones de la SN de Steiner (25, 50, 75, 100 y 125 %) concluyeron que la solución concentrada al 75 % obtuvo el mayor rendimiento y producción de materia seca en plantas de chile tipo húngaro (*C. annuum*). Los resultados obtenidos en esta investigación también se relacionan con las temperaturas ambientales en las que se desarrolló el cultivo, puesto que, está demostrado que los nutrientes se absorben con mayor facilidad en una solución con menor fuerza de retención (potencial osmótico de -0.018 a 0.054 MPa, sobre todo en cultivares sensibles a la salinidad) cuando existen altas temperaturas ambientales (> 30 °C), de la rizósfera y de la SN (Sandoval-Villa *et al.*, 2016; Karnoutsos *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020).

Efecto de la aplicación foliar de silicio (Si)

La aplicación de Si aumentó la altura de la planta en 17.37 % y el diámetro de tallo en 13.29 %, con respecto a las plantas que no recibieron aplicación (Tabla 2). El efecto positivo de las aspersiones foliares de Si en el crecimiento de las plantas, también se ha reportado en jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con aplicaciones de silicato de sodio (Hu *et al.*, 2023) y en papa (*Solanum tuberosum* L.) con dióxido de silicio (Wadas, 2021). La estimulación del crecimiento de las plantas tratadas con Si se debe a que este mineral favorece la absorción, asimilación y removilización del nitrógeno (Gou *et al.*, 2020), macronutriente que se absorbe en grandes cantidades durante el crecimiento vegetativo de las plantas de chile (Salazar-Jara *et al.*, 2016).

En las tres etapas fenológicas, las lecturas SPAD de las plantas con Si fueron estadísticamente superiores a las obtenidas en hojas de plantas testigo (Tabla 3). Se ha reportado que el incremento de las lecturas SPAD está estrechamente relacionado con el aumento de los niveles de clorofila en las hojas, y está evidenciado que el Si favorece la concentración de este tipo de pigmentos en el tejido vegetal (Jesus *et al.*, 2018). En este sentido, Cázarez-Flores *et al.* (2022) reportaron que en jitomate; la aplicación de Si incrementó significativamente las lecturas SPAD, comportamiento similar observaron Elaziz *et al.* (2019) en el cultivo de calabacita con aplicación de silicato de potasio.

Las plantas con Si fueron superiores en 23.99 % en rendimiento, 21.71 % en frutos y 4.03 % en diámetro de frutos, que las plantas sin la aplicación de este mineral (Tabla 4). Los resultados anteriores demuestran que el Si incrementó la productividad y calidad de chile serrano en condiciones protegidas e hidroponía. Estos beneficios pueden relacionarse con la resistencia que el Si proporciona a la planta en condiciones de estrés abiótico (Ranjan *et al.*, 2021), en especial, a

las altas temperaturas, situación que sucedió en este estudio, puesto que, en la primera semana de la floración e inicio de cuajado de frutos (etapa crítica que define el rendimiento), se registraron temperaturas máximas de 40 °C. Aunado a esto, está demostrado que la aplicación foliar de Si estimula la actividad fotosintética de las plantas de chile, lo que se traduce en mayores rendimientos (Sudradjat *et al.*, 2016).

Efecto de la interacción de SN × Si

En la Tabla 1 se puede observar que las únicas variables que mostraron significancia ($\alpha \leq 0.05$) por efecto de la SN × Si fueron el rendimiento y el diámetro de frutos de primera calidad. En este sentido, las plantas fertilizadas con la solución al 75 % con Si presentaron el mayor rendimiento (2.02 kg m⁻²), el cual fue estadísticamente similar con las plantas con la aplicación Si y SN al 50 y 100 % (1.70 a 1.93 kg m⁻²) y sin Si con las SN al 50 y 75 % (1.68 a 1.72 kg m⁻²). La mayor diferencia en rendimiento se observó en plantas fertilizadas con Si y las soluciones al 50 y 75 %, que fueron superiores en 48.5, 55.4 y 69.3, 77.2 % a las plantas fertilizadas con las soluciones más concentradas (100 y 125 %) sin aplicación de Si, respectivamente (Figura 2). La respuesta negativa que tuvieron las soluciones de mayor concentración en el rendimiento puede deberse al efecto nocivo que genera la acumulación de sales en el sustrato. Mientras que, el efecto positivo de las soluciones de menor concentración se relaciona con el aumento del tamaño (diámetro) de los frutos que se obtuvo con estas mismas combinaciones. Por otro lado, las plantas fertilizadas con SN al 75 % con aplicación de Si produjeron los frutos de mayor diámetro (1.82 cm), que fueron estadísticamente superiores en 22.1, 20.5, 23.0, 26.4 % al tamaño de los frutos cosechados de las plantas fertilizadas únicamente con las soluciones de 50, 75, 100 y 125 % respectivamente, y superiores en 20.5, 27.3 y 28.2 % al diámetro obtenido con las soluciones al 50, 100 y 125 % con aplicación de silicio (Figura 3).

Los resultados indican que el silicio mejora la eficiencia de las soluciones nutritivas aplicadas. Esto concuerda con lo publicado por Neu *et al.* (2017) y Kovács *et al.* (2022) quienes indican que la fertilización foliar con silicio aumenta la eficiencia de los fertilizantes compuestos por macronutrientes como el N, P, K y Ca y micronutrientes como el Cu, Zn y Mn. En este sentido, en la investigación se observó que el Si redujo el estrés causado por el alto potencial osmótico generado por la solución de mayor concentración (125 %) dado que, el rendimiento obtenido con esta misma solución, pero con aplicación de Si fueron superiores en 36 %. Al respecto, Altuntas *et al.* (2018) reportaron que la aplicación de Si de forma foliar es una alternativa para reducir el estrés generado por factores abióticos (temperatura, salinidad, humedad), dado que este elemento mejora la conductancia estomática y el potencial hídrico foliar en plantas estresadas por altos contenidos de sal en el suelo o sustrato y estas mejoras conducen a una actividad fotosintética más eficiente e incremento de los rendimientos.

La relevancia de los resultados de la investigación es

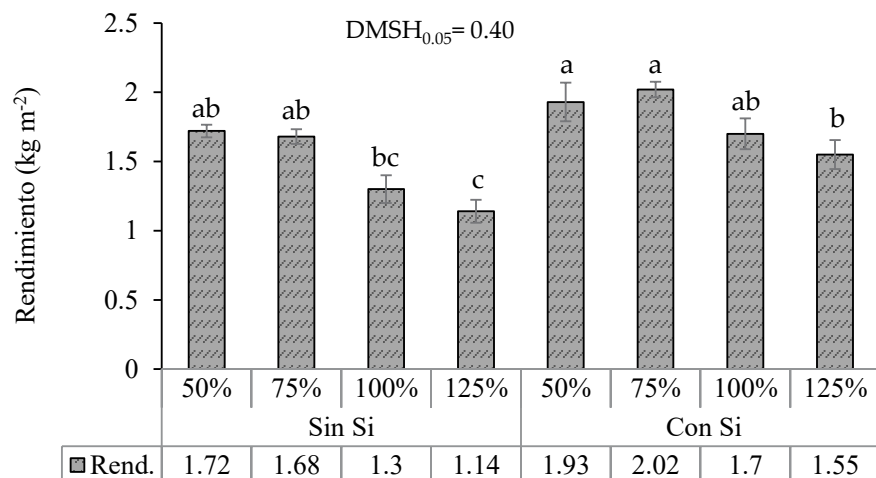


Figura 2. Rendimiento de chile serrano en respuesta a la concentración de la solución nutritiva y la aplicación foliar de silicio. DMSH= diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 2. Yield of serrano pepper in response to nutrient solution concentration and silicon foliar application. DMSH = honest minimum significant difference. Means with equal letters are statistically equal (Tukey, $p \leq 0.05$).

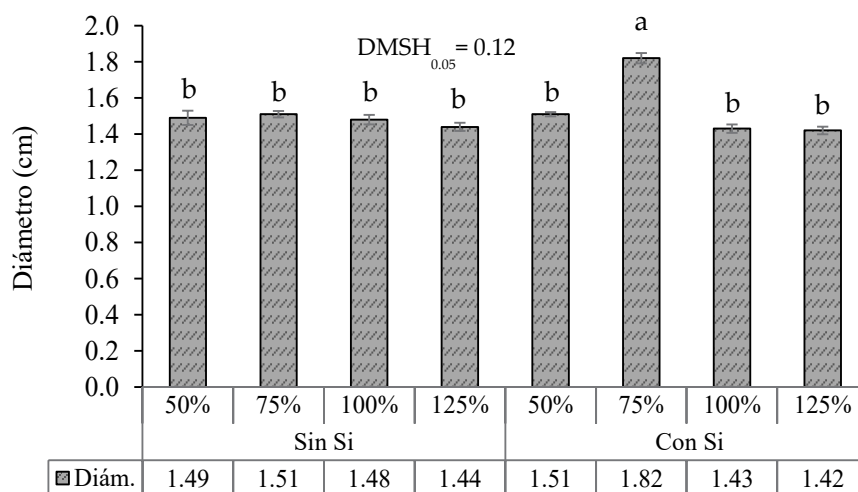


Figura 3. Diámetro de frutos de primera calidad en respuesta a la concentración de la solución nutritiva y la aplicación foliar de silicio. DMSH= diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 3. Diameter of top quality fruits in response to nutrient solution concentration and silicon foliar application. DMSH = honest minimum significant difference. Means with equal letters are statistically equal (Tukey, $p \leq 0.05$).

que al diluir las soluciones al 75 y 50 %, los iones disueltos son mayormente aprovechados que en soluciones más concentradas (100 y 125 %) en el cultivo de chile serrano, esto asociado con el beneficio del Si de eficientizar el uso de los fertilizantes, resulta en un ahorro económico por la reducción de sales minerales aplicadas en este cultivo.

CONCLUSIONES

Las soluciones nutritivas al 75 y 100 % de su concentración iónica favorecieron el crecimiento y el índice de verdor de las plantas de chile serrano. La solución al 50 % provocó el menor crecimiento y el índice de verdor más bajo en las tres etapas

fenológicas. En cuanto al rendimiento y componentes, las soluciones al 50 y 75 % lograron los resultados más sobresalientes. Esta investigación reflejó un efecto positivo del silicio en el crecimiento y rendimiento de las plantas de chile serrano, respuesta que se evidenció en el incremento de la altura de planta, diámetro de tallo, índice de verdor, rendimiento, número de frutos y diámetro de frutos de primera calidad. La solución nutritiva Steiner al 75 % de su concentración iónica combinada con aplicación foliar de silicio generaron el mayor rendimiento (2.02 kg m^{-2}) y diámetro de los frutos (1.82 cm).

REFERENCIAS

- Altuntas, O., Dasgan, Y. y Akhoundnejad, Y. 2018. Silicon-induced salinity tolerance improves photosynthesis, leaf water status, membrane stability, and growth in pepper (*Capsicum annuum* L.). *HortScience*. 53(12):1820-1826.
- Ávila-Quezada, G.D., Cordero-González, J.M. y Porras-Flores, D.A. 2019. La integridad del suelo: complemento para las buenas prácticas agrícolas en el Chile. En: Chiles regionales: variedad, producción e inocuidad. Porras, F.D.A., Luján, A.R.S. y Flores, C.M.A. (eds.). pp 53-60. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Bobadilla-Larios, V., Esperanza-Ibarra, E., Delgadillo-Ruiz, L., Gallegos-Flores, P. y Ayala-Luján, J.L. 2017. Variedades de Chile (*Capsicum annuum* L.) identificadas mediante marcadores RAPD. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 20:465-473.
- Castellanos, G.L., De Mello, P.R. y Silva, C.C.N. 2015. El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. *Cultivos tropicales*. 36:16-24.
- Cázar-Flores, L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T.J., Ayala-Tafoya, F., Díaz-Valdés, T., Yáñez-Juárez, M.G. y López-Orona, C.A. 2022. Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana*. 40:1-11.
- Chamú-Juárez, R., Sandoval-Villa, M., Rodríguez-Mendoza, M.N. y García-Esteva, A. 2020. Respuesta del tomate de cáscara silvestre mexicano (*Physalis* spp.) al potencial osmótico en hidroponía. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 43(2):151-159.
- Chavez-Díaz, I.F., Zelaya, M.L.X., Cruz, C.X.I., Rojas, A.E., Ruiz, R.S. y De los Santos, V.S. 2020. Considerations on the use of biofertilizers as a sustainable agrobiotechnological alternative to food security in Mexico. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*. 11:1423-1436.
- Danh, T.L., Truong, P., Mammucari, R. y Foster, N. 2011. Economic incentive for applying vetiver grass to remediate lead, copper and zinc contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*. 13(1):47-60.
- De la Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Trejo-Téllez, L.I., Padilla-Bernal, L.E., Solís-Sánchez, L.O. y Ortíz-Rodríguez, J.M. 2020. Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato. *Horticultura Brasileira*. 38:47-52.
- Elaziz, A.S.A., Alkharpotly, A.A., Yousry, M.M. y Abido A.I.A. 2019. Effect of foliar application with salicylic acid and potassium silicate on squash plants (*Cucurbita pepo* L.) yield and quality. *Fayoum Journal of Agricultural Research and Development*. 33:1-24.
- FAO, 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Codex standard for chilli peppers 307.
- FAO, 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture Trends and challenges. Rome.
- FAOSTAT, 2023. Corporate Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>.
- García, E. 2004. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Gou, T., Yang, L., Hu, W., Chen, X., Zhu, Y., Guo, J. y Gong, H. 2020. Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*. 152:53-61.
- Hu, W., Su, Y., Yang, R., Xie, Z. y Gong, H. 2023. Effect of foliar application of silicon and selenium on the growth, yield and fruit quality of tomato in the field. *Horticulturae*. 9:1126.
- Jesus, E., Fátima, R., Guerrero, A., Araújo, J. y Brito, M. 2018. Growth and gas exchanges of arugula plants under silicon fertilization and water restriction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 22:119-124.
- Karnoutsos, P., Karagiovanidis, M., Bantis, F., Chatzistathis, T., Koukounaras, A. y Ntinis, G.A. 2020. Controlled root-zone temperature effect on baby leaf vegetables yield and quality in a floating system under mild and extreme weather conditions. *Science of Food and Agriculture*. 101:3933-3941.
- Kaur, S., Kaur, N., Siddique, K.H.M. y Nayyar, H. 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defense against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 62:905-920.
- Kovács, S., Kutasy, E. y Csajbók, J. 2022. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*. 11(9):1-22.
- Lee, J.Y., Hiyama, M., Hikosaka, S. y Goto, E. 2020. Effects of concentration and temperature of nutrient solution on growth and camptothecin accumulation of *Ophiorrhiza pumila*. *Plants*. 9:793.
- Liu, X., Huang, Z., Li, Y., Xie, W., Li, W., Tang, X., Ashraf, U., Kong, L., Wu, L., Wang, S. y 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*. 196:1-9.
- López-Cuén, P.I., González-Mendoza, D., Escobosa-García, M.I., Cárdenas-Salazar, V., Núñez-Ramírez, F., Soto-Ortiz, R. y Ruíz-Alvarado, C. 2020. Respuesta fisiológica diaria del tomate a la aplicación de silicio bajo condiciones de salinidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11:339-352.
- López-Salazar, R., Peña, R.F.M., Sánchez-Bernal, F., Lozano, C.C.J., Benavides, M.A. y González-Fuentes, J.A. 2019. Efecto de un fulvato de hierro sobre calidad y producción de frutos de Chile 'Serrano'. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10:1367-1378.
- Luna, G.L.R., Robledo, T.V., Ramírez, G.F., Mendoza, V.R., Pérez, R.M.A. y Gordillo, M.F.A. 2021. Comportamiento agronómico y nutracéutico de poblaciones F2 desarrolladas de cruces interraciales de Chile. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12:23-36.
- Martos-García, I., Fernández-Escobar, R. y Benlloch-González, M. 2023. Silicon is a non-essential element but promotes growth in olive plants. *Scientia Horticulturae*. 323:1-11.
- Meselmani, M.A.A. 2022. Nutrient Solution for Hydroponics. In: Recent Research and Advances in Soilless Culture. M. Turan., S. Argin., E. Yildirim. and A. Güneş. (ed.), pp 30-52. IntechOpen. Estambul, Turquía.
- Neu, S., Schaller, J. y Dudel, G.E. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*. 7:1-8.
- Padilla, M.F., De Souza, R., Peña-Fleitas, T., Gallardo, M., Giménez, C. y Thompson, R. B. 2018. Different responses of various chlorophyll meters to increasing nitrogen supply in sweet pepper. *Frontiers in Plant Science*. 9:1752.

- Palacio-Márquez, A., Gutiérrez-Ruelas, N.J., Hernández-Figueroa, K.I., Muñoz-Márquez, E., Sida-Arreola, J.P., Ojeda-Barrios, D.L., Flores-Córdova, M.A. y Sánchez-Chávez, E. 2019. Respuesta de la aplicación de ácido salicílico sobre actividad fotosintética, asimilación de nitrógeno y rendimiento en chile jalapeño. En: Chiles regionales: variedad, producción e inocuidad. F.D.A. Porras., A.R.S. Luján. y C.M.A. Flores. (eds.). pp 69-78. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Pareek, S., Sagar, N.A., Sharma, S., Kumar, V., Agarwal, T., González-Aguilar, G.A., y Yahia, E.M. 2018. Chlorophylls: Chemistry and biological functions. *In: Fruit and Vegetable Phytochemicals*. Y. Elhadi (ed.) 269-284 pp. Wiley-Blackwell. USA.
- Pérez-Vázquez, E., Gaucín-Delgado, J.M., Ramírez-Rodríguez, S.C., Sariñana-Navarrete, M.A.; Zapata, S.G. y Zuñiga-Valenzuela, E. 2020. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva y su efecto en el rendimiento y la calidad nutraceutica de pimiento morrón. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*. 11(7):1669-1675.
- Ranjan, A., Sinha, R., Bala, M., Pareek, A., Singla-Pareek, S.L. y Singh, A.K. 2021. Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*. 63:15-25.
- Salazar-Jara, F.I., Juárez-López, P., Bugarín-Montoya, R., Alejo-Santiago, G., García-Paredes, J.D. y Cruz-Crespo, E. 2016. Extracción de macronutrientes en chile (*Capsicum annuum* L.) tipo húngaro. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7:2055-2061.
- San Juan, M.J., Aquino-Bolaños, T., Ortiz-Hernández, Y.D. y Cruz-Izquierdo, S. 2019. Características de fruto y semilla de chile huacle (*Capsicum annuum* L.) producido en hidroponía. *Idesia (Arica)*. 37:87-94.
- Sandoval-Villa, M., Sánchez-García, P. y Alcantár-González, G. 2016. Principios de la hidroponía y del fertirriego. En: *Nutrición de cultivos*. G. Alcantár-González, L. Trejo-Téllez y F. Gómez-Merino (eds.), pp 319-367. Biblioteca Básica de Agricultura. México.
- SAS. 2017. Statistical Analysis System Institute. SAS User's Guide versión 9.0. Cary N. C. USA.
- Sela, S.S., Rodov, V., Kenigsbuch, D. y Bar-Tal, A. 2023. Hydroponic agriculture and microbial safety of vegetables: Promises, challenges, and solutions. *Horticulturae*. 9:1-21.
- Seo-Young, O. y Chan, S.K. 2019. Fruit development and quality of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) under various temperature regimes. *Horticultural Science and Technology*. 37(3):313-321.
- SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. En: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta (07/09/2023).
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. *In: Sixth International Congress on Soilless Culture. Proceedings International Society for Soilless Culture*. 633-650 pp. Lunteren, the Netherlands.
- Sudradjat, F., Farida, J.A. y Sulistyono, E. 2016. Studies on the effects of silicon and antitranspirant on chili pepper (*Capsicum annuum* L.) growth and yield. *European Journal of Scientific Research*. 37(1):5-10.
- Wadas, W. 2021. Potato (*Solanum tuberosum* L.) growth in response to foliar silicon application. *Agronomy*. 11:2423.