



Short Note [Nota Corta]

SILICIO COMO BIOESTIMULANTE EN EL CULTIVO DE PEPINO
(Cucumis sativus L.) †

[SILICON AS A BIOSTIMULANT IN CUCUMBER CULTIVATION
(Cucumis sativus L.)]

**Juan José Reyes-Pérez¹, Luis Tarquino Llerena-Ramos¹,
 Juan Antonio Torres-Rodríguez¹, Luis Guillermo Hernández-Montiel²,
 Ramón Klever Macías Pettao³, Erendira Aragón Sánchez⁴
 and Alejandro Palacios-Espinosa^{4*}**

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Av. Quito Km. 1.5 vía a Santo Domingo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., Km. 1 Carretera a San Juan de La Costa "El Comitan" La Paz, Baja California Sur, C.P. 23205, México.

³Universidad Técnica de Cotopaxi. Extensión La Maná, Avenida Los Almendros y Pujilí. La Mana, Cotopaxi, Ecuador.

⁴Universidad Autónoma de Baja California Sur, Km 5.5 Carretera al Sur, Col. El Mezquitito, C.P. 23080, La Paz, Baja California Sur, México. Email: palacios@uabcs.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The use of silicon as a fertilizer can reduce the need to use chemical fertilizers and thereby prevent the adverse effects of the latter. **Objective.** To evaluate silicon as a biostimulant in the cultivation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under greenhouse conditions. **Methodology.** Four concentrations of silicon dioxide (0, 0.15, 0.21 and 0.27 g of SiO₂ per plant) were applied to the plant at six, 20 and 28 d after transplanting (six days after the emergency). At 40 days after sowing, the length of guides (m), stem diameter (mm) and number of leaves were determined. Likewise, the number of flowers, number of fruits, length fruits, diameter and weight of the fruit and yield (kg ha⁻¹). The variables were analyzed using a general linear model and polynomials by regression. **Results.** The treatment of 0.22 g of SiO₂ per plant increased stem diameter and length of the guides. The concentration of 0.27 g of SiO₂ per plant had a positive influence on the growth of the cucumber crop, allowing fruit harvests of greater length, weight and diameter and a greater number of fruits per plant. **Implications.** It is possible to increase the yield of cucumber crops by applying silicon. **Conclusions.** The use of SiO₂ at concentrations of 0.27 g per cucumber plant under greenhouse conditions increases its yield per hectare.

Key words: Yield; silicon dioxide; greenhouse; morphometric variables; productive variables.

RESUMEN

Antecedentes. El uso de silicio como fertilizante puede reducir la necesidad de usar fertilizantes químicos y con ello prevenir los efectos adversos de estos últimos. **Objetivo.** Evaluar el silicio como bioestimulante en el cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero. **Metodología.** Cuatro concentraciones de dióxido de silicio (0, 0.15, 0.21 y 0.27 g de SiO₂ por planta) fueron aplicadas a la planta a los seis, 20 y 28 d después del trasplante (seis días después de la emergencia). A los 40 días después de la siembra, se determinó la longitud de guías (m), diámetro del tallo (mm) y número de hojas, así mismo, se determinaron para cada planta, el número de flores, número de frutos, la longitud fruto, diámetro y peso del fruto y el rendimiento (kg ha⁻¹). Las variables fueron analizadas mediante un modelo lineal general y polinomios por regresión. **Resultados.** Concentraciones de 0.22 g de SiO₂ por planta incrementaron el diámetro del tallo y longitud de las guías. El tratamiento de 0.27 g de SiO₂ por planta influyó positivamente en el crecimiento del cultivo del pepino, permitiendo cosechas de frutos de mayor longitud, peso y diámetro y un mayor número de frutos por planta. **Implicaciones.** Es posible incrementar el rendimiento del cultivo del pepino, mediante la

† Submitted December 20, 2023 – Accepted August 19, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5359>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

aplicación de silicio. **Conclusiones.** El uso de SiO₂ a concentraciones de 0.27 g por planta de pepino bajo condiciones de invernadero, incrementa su rendimiento por hectárea.

Palabras clave: rendimiento; dióxido de silicio; invernadero; variables morfológicas; variables productivas.

INTRODUCCIÓN

El uso constante de fertilizantes químicos puede alterar el pH del suelo, provocar acidificación del suelo, lo que resulta en una disminución de la carga de materia orgánica, carga de humus, organismos útiles, retraso en el crecimiento de las plantas e incluso se vuelve responsable de la emisión de gases de efecto invernadero (Pahalvi *et al.*, 2021). Los fertilizantes a base de silicio proporcionan protección, defensa y tolerancia al estrés ambiental (Bent, 2008).

De los diferentes tipos de fertilizantes de silicio, el silicato de calcio es la fuente de este elemento más utilizada en la agricultura. Los principales constituyentes de las escorias de acero son sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO), que constituyen el 95 % de la composición. También contienen elementos menores como compuestos de manganeso, hierro y azufre, así como trazas de cromo (Cr), vanadio (V), titanio (Ti), fósforo (P), potasio (K), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), cobalto (Co), y molibdeno (Mo) (Teo *et al.*, 2020; Mehmood *et al.*, 2021). El silicato de calcio puede ser una fuente de silicio rentable para la agricultura, siempre que esté libre de metales pesados (Babu y Nagabovanalli, 2017).

La capacidad de las plantas para absorber silicio del suelo, acumularlo dentro de sus tejidos y luego reincorporarlo al suelo a través de resto de cosecha crea una intrincada red de mecanismos de retroalimentación en los ecosistemas (Pavlovic *et al.*, 2021; Katz *et al.*, 2021). Los efectos benéficos proporcionados por el silicio están estrechamente relacionados con su nivel de acumulación en la planta, es extremadamente importante dilucidar los posibles mecanismos de absorción y transporte de este elemento en las plantas para aprovechar los efectos favorables inducidos por el silicio en las plantas (Li *et al.*, 2022; Shivaraj *et al.*, 2022).

Las cucurbitáceas como el pepino (*Cucumis sativus* L.), acumulan cantidades elevadas de silicio y se benefician de la fertilización con este elemento. Se cree que un mayor contenido de silicio en la planta de pepino está relacionado con incrementos en los rendimientos, así como con una mejor resistencia a las enfermedades y tolerancia a los factores abióticos como la sequía (Li *et al.*, 2022; Rea *et al.*, 2022). El pepino no es una planta acumuladora de silicio como el arroz, pero absorbe grandes cantidades cuando están disponibles a altos niveles en el medio, llegando a igualarse prácticamente frente a las gramíneas (Sun *et*

al., 2018; Hu *et al.*, 2020). Ramac (2015), afirma que el silicio en mezcla con fertilizantes químicos se potencializa la adsorción y absorción de nutrientes para los cultivos (nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes). Se requiere de cierta cantidad de silicio en el agua y suelo, para que el calcio se vuelva disponible para la planta, para ello, el silicio actúa reforzando las paredes celulares y el sistema vascular de las plantas, facilitando la absorción de calcio presente en el suelo por medio del agua (Bent 2008). El silicio, en combinación con el calcio, el magnesio, el hierro, el zinc y el molibdeno, mejora significativamente el desarrollo del cultivo y la producción de la cosecha. Además, prolonga la vida útil de los productos de cosecha, lo que garantiza mayor calidad y durabilidad de las cosechas (Thapa *et al.*, 2021; Kovács *et al.*, 2022).

Kaloterakis *et al.* (2021) aplicó silicio mediante la fertilización en plántulas de pepino, en un sistema hidropónico recirculante, incrementó varios parámetros asociados al crecimiento de plántulas y disminuyó los efectos adversos de la salinidad, esta mejora del crecimiento bajo un estrés salino se combinó con la reducción de cloruros presentes en el suelo y una alteración en el crecimiento de las raíces, observándose que el sistema radicular incrementó el volumen y biomasa. La aplicación de silicio ayuda a mantener la homeostasis iónica, la absorción y redistribución de nutrientes, permitiendo a la planta realizar un uso más eficiente de los recursos disponibles (Cabezas *et al.*, 2022). En virtud de lo anterior, el objetivo del estudio fue evaluar el silicio como bioestimulante en el cultivo del pepino en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el *Campus* “La María” perteneciente al predio de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Ecuador, con las siguientes coordenadas geográficas 79° 27” de longitud Oeste y 1° 06” de latitud Sur a una altitud de 75 msnm, con una temperatura anual promedio de 24 °C, 84 % de humedad relativa y precipitación media anual de 2295 mm. El suelo presentó una textura franca con 32% de arena, 48% de limo y 20% de arcilla, con un contenido de materia orgánica medio (3.9%).

Se establecieron bajo condiciones de invernadero, 16 parcelas experimentales de 4.2 x 3.6 m cada una, con cuatro hileras por parcela y siete plantas por hilera. Se utilizó la variedad de pepino diamante. El semillero se realizó en bandejas germinadoras de plástico de 2 mm

de profundidad, utilizando como sustrato, una composición de 3:1:1, tres carretillas de tierra negra (50% suelo y 50% abono orgánico, la cual es previamente cernida con un tamiz) por una de aserrín de madera y una de arena (de río). Las bandejas fueron cubiertas con plástico por 48 h para facilitar el crecimiento y germinación. El trasplante se realizó a los seis días después de la emergencia, cuando las plántulas presentaron una altura de 10 a 15 cm y de 2 a 4 hojas verdaderas. El riego se realizó manual dos veces a la semana durante las primeras etapas de crecimiento de las plántulas y posteriormente se redujo a una vez semanal, así mismo, se eliminaron semanalmente las hojas enfermas, viejas y los brotes de las axilas.

Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos: T1= control (sin aplicación de silicio); T2= 0.15 g de SiO₂ por planta; T3= 0.21 g de SiO₂ por planta; T4= 0.27 g de SiO₂ por planta, cada uno de ellos con cuatro repeticiones, para ello, las parcelas experimentales fueron aleatorizadas para asignar cuatro de ellas a cada tratamiento.

La aplicación de silicio fue aplicada directamente alrededor de cada planta, utilizando polvo comercial (85 % SiO₂ 50 kg⁻¹) en tres momentos; a los 6, 20 y 28 días después del trasplante (ddt). Se realizó un control de malezas manual cada 15 días para evitar la competencia por nutrientes. No se realizó aplicación de fertilizantes. A los 15 y 25 ddt, se instalaron postes de madera a los extremos de cada hilera y se guiaron los tallos del cultivo con piolas para un correcto desarrollo. A los 40 d después de la siembra (dds) se seleccionaron al azar diez plantas por cada unidad experimental y se midió la longitud de guía desde la base del tallo hasta el ápice de la última hoja, utilizando un flexómetro graduado en m, el diámetro del tallo se midió a los 20 cm desde el suelo, utilizando un Vernier graduado en mm, también se contabilizó el número de hojas y número de flores por planta a los 40 a 45 ddt. La cosecha se realizó a los 75 y 90 ddt, evaluando dos cosechas. Como variables de rendimiento se determinó el número de frutos por planta, se midió la longitud del

fruto desde la parte apical hasta la parte basal, el diámetro ecuatorial con un Vernier graduado en cm y el peso del fruto en una balanza analítica, el rendimiento se expresó en Kg ha⁻¹ calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{parcela útil} \times 10000 \text{ m}^2}{\text{área de la parcela útil (m}^2\text{)}}$$

Las variables fueron analizadas mediante un modelo lineal general con pruebas de comparación de medias de Tukey, así como polinomios desarrollados mediante regresión, utilizando el software Minitab19 (Minitab 2019). Se determinó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Bartlett.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medias y errores estándar para cada una de las variables vegetativas respecto a cada tratamiento se muestran en la Tabla 1, se observó en el número de flores diferencias significativas (P<0.05) para cada una de las cuatro dosis de silicio, incrementándose el número de flores conforme la cantidad de silicio aumentaba. El número de hojas fue mayor (P<0.05) a dosis de 0.21 y 0.27 g de silicio, comparado con 0 y 0.15 g de silicio, las cuales fueron iguales entre sí (P>0.05). El diámetro del tallo fue igual (P>0.05) entre 0.15, 0.21 y 0.27 g, siendo menor (P<0.05) el diámetro del tallo con 0 g de silicio, sin embargo, no hubo diferencia (P>0.05) entre este último tratamiento y el de 0.15 g de silicio. La longitud de la guía fue igual (P>0.05) entre las cuatro dosis de silicio.

Se ha demostrado que la aplicación de silicio aumenta significativamente el número de flores en plantas de pepino, lo cual se atribuye a la mejora en la eficiencia fotosintética (Luan *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2022). Otro estudio demostró que el silicio incrementó el número de flores, en el cultivo de chile habanero, resultados similares a los obtenidos en este trabajo (Cágal 2013).

Tabla 1. Variables de crecimiento vegetativo en pepino con diferentes tratamientos de silicio.

Variables morfológicas	0 g de Silicio ($\bar{x} \pm EE$)	0.15 g de Silicio ($\bar{x} \pm EE$)	0.21 g de Silicio ($\bar{x} \pm EE$)	0.27 g de Silicio ($\bar{x} \pm EE$)
Número de flores	8.53 ^d ± 0.32	11.60 ^c ± 0.42	13.70 ^b ± 0.44	15.13 ^a ± 0.35
Número de hojas	21.07 ^c ± 0.37	22.10 ^{bc} ± 0.42	22.50 ^{ab} ± 0.31	23.80 ^a ± 0.37
Diámetro de tallo (mm)	6.07 ^b ± 0.15	6.53 ^{ab} ± 0.12	6.77 ^a ± 0.12	6.60 ^a ± 0.13
Longitud de guías (m)	1.811 ^a ± 0.04	1.882 ^a ± 0.03	1.883 ^a ± 0.02	1.884 ^a ± 0.02

Diferente letra en hileras indica diferencia significativa (P<0.05).

La adición de silicio incrementó significativamente el número de hojas en plantas de pepino bajo condiciones de estrés por cadmio y sin estrés, por lo tanto, el silicio no solo mejora la resistencia al estrés, sino que también promueve el crecimiento general de la planta en condiciones sin estrés (Wu *et al.*, 2015). Otras especies, como *Glycyrrhiza uralensis*, demostraron que el silicio, aumentó significativamente el número de hojas y el área foliar bajo condiciones de estrés salino (Shen *et al.*, 2022).

Respecto al diámetro del tallo estos resultados obtenidos son similares a los reportados por Lyu *et al.*, (2022) en el cultivo de pepino, logrando un incremento del diámetro del tallo en 5.29% con la adición de silicio en comparación con plantas no tratadas con silicio. La aplicación de silicio aumento del 94.87% en el diámetro del tallo de plantas de pepino tratadas con silicio y afectadas por la marchitez por *Fusarium* sp., en comparación con las plantas control (sin aplicación de silicio) (Sun *et al.*, 2022).

El Si puede aumentar el diámetro del tallo y el número de hojas de las plantas, al mejorar la fotosíntesis y potenciar el desarrollo de haces vasculares involucrados en la absorción y el transporte de nutrientes (Pavlovic *et al.*, 2021). La aplicación de silicio no solo mejora las variables vegetativas, sino que también fortalece la planta contra diversos factores de estrés ambiental y fitopatógenos.

Las medias y error estándar para las variables de rendimiento por cada uno de los cuatro tratamientos se muestran en la Tabla 2. El diámetro del fruto fue mayor ($P < 0.05$) en las aplicaciones de 0.21 y 0.27 g de silicio. La mayor longitud del fruto se obtuvo con aplicación de 0.27 g de silicio, mientras que el número de frutos fue igual ($P > 0.05$) para las dosis de 0.15, 0.21 y 0.27 g de silicio, siendo el tratamiento de 0 g de silicio la de menor ($P < 0.05$) número de frutos. En cuanto al peso del fruto, el tratamiento de 0.27 g de silicio fue el de mayor ($P < 0.05$) peso, no habiendo diferencias ($P > 0.05$) en los pesos de los demás tratamientos. El rendimiento fue diferente ($P < 0.05$) entre las cuatro dosis, incrementándose conforme la cantidad de silicio aumentó.

Tabla 2. Estadísticos de las variables de fruto por tratamiento.

Variables morfológicas	0 g de silicio ($\bar{x} \pm EE$)	0.15 g de silicio ($\bar{x} \pm EE$)	0.21 g de silicio ($\bar{x} \pm EE$)	0.27 g de silicio ($\bar{x} \pm EE$)
Diámetro de frutos (cm)	5.73 ^c ± 0.05	5.88 ^{bc} ± 0.05	5.90 ^{ab} ± 0.05	6.06 ^a ± 0.02
Longitud de frutos (cm)	20.3 ^c ± 0.34	23.0 ^b ± 0.47	22.9 ^b ± 0.52	27.7 ^a ± 0.33
Número de frutos	3.27 ^b ± 0.08	3.97 ^a ± 0.08	4.17 ^a ± 0.14	4.33 ^a ± 0.14
Peso de fruto (kg)	0.46 ^b ± 0.01	0.48 ^b ± 0.01	0.49 ^b ± 0.01	0.58 ^a ± 0.01
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	56815 ^d ± 3.18	71355 ^c ± 6.43	73003 ^b ± 5.90	87148 ^a ± 11.7

Diferente letra en hileras indica diferencia significativa ($P < 0.05$).

Los análisis polinomiales a través de regresión (Figura 1) muestran que las variables número de flores, número de hojas, número de frutos y diámetro del fruto, siguen una tendencia lineal positiva, es decir, que la respuesta en estas variables se incrementó a medida que aumentó la cantidad de silicio, mientras que las variables (Figura 2) diámetro del tallo y longitud de guías, mostraron una tendencia polinomial cuadrática inversa, por lo que la máxima respuesta se presenta en el tratamiento de mayor dosis de silicio, sin embargo, las variables peso y longitud del fruto, mostraron una tendencia polinomial cuadrática en dónde podemos obtener la respuesta máxima (k) mediante la ecuación cuadrática de la siguiente forma:

$$k = \frac{-b}{2a}$$

Por lo que considerando la función cuadrática obtenida para el diámetro del tallo:

$$-12.28 Si^2 + 5.489 Si + 6.051$$

Tenemos que k es igual a:

$$k = \frac{-5.849}{2(-12.28)} = 0.22 \text{ g}$$

De esta manera a dosis de 0.22 g de silicio se obtiene el mayor diámetro del tallo.

De la misma forma, para la variable longitud de guías, considerando la ecuación cuadrática obtenida para esa variable:

$$-1.607 Si^2 + 0.7014 Si + 1.810$$

el valor de k será:

$$k = \frac{-0.7014}{2(-1.607)} = 0.22 \text{ g}$$

Por lo que con una dosis de silicio de 0.22 g se obtiene la mayor longitud de guías.

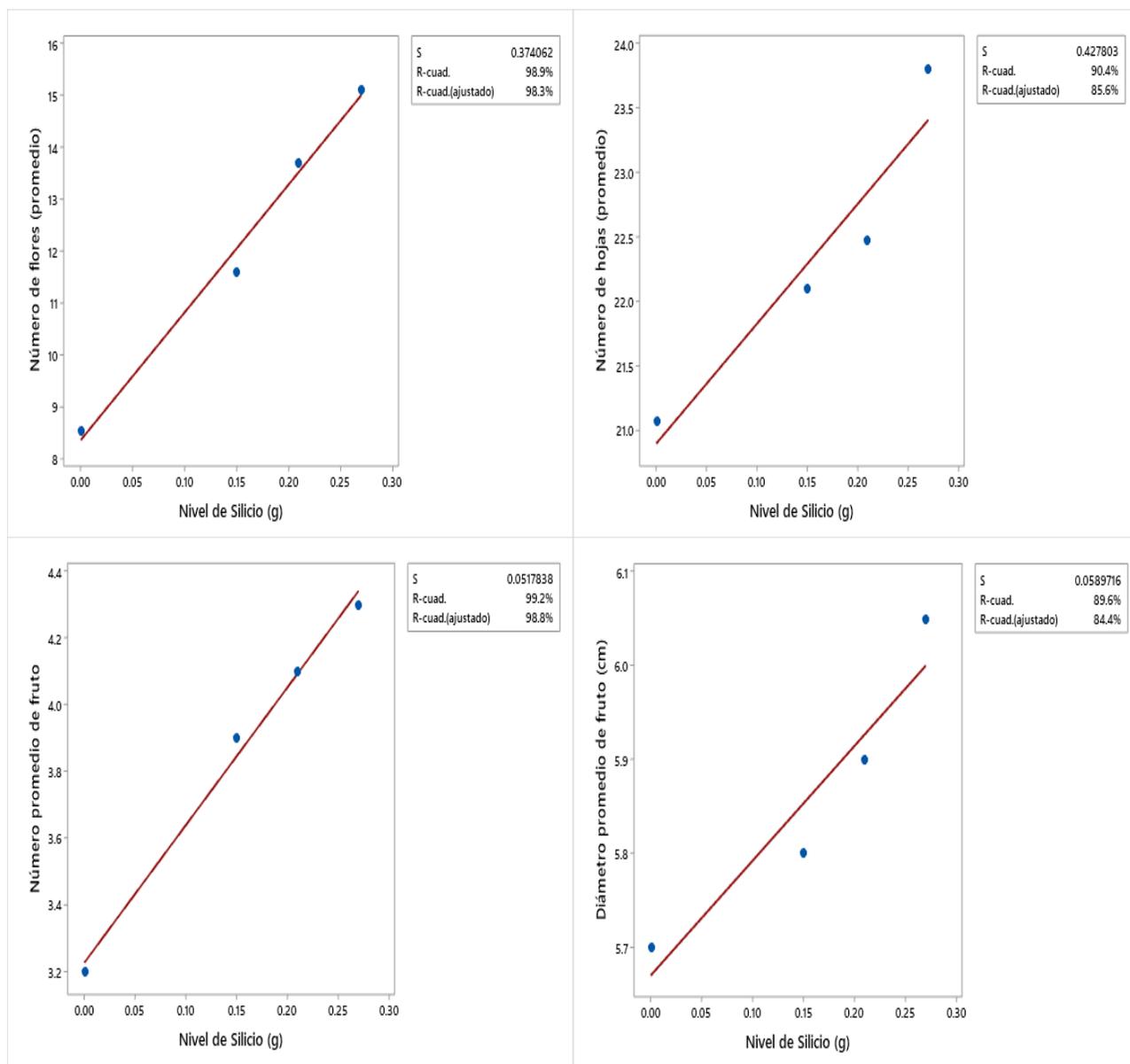


Figura 1. Comportamiento de las variables número de flores, número de hojas, número de frutos y diámetro de fruto, en función de la aplicación de silicio.

Parra Terraza *et al.* (2004), reportan que niveles de silicio de 1.5 mol m^3 , no tuvieron efecto sobre las variables de crecimiento del pepino, sin embargo, niveles de 0.75 mol m^3 de silicio provocaron efectos benéficos sobre el crecimiento de la planta, estos resultados no están en correspondencia a los obtenidos en este trabajo, donde las mayores dosis de silicio presentaron los mejores resultados en las variables de crecimiento. Incrementos significativos para altura de la planta, peso y diámetro del fruto del pepino, fueron reportados por Alcantra *et al.* (2021), utilizando 3 t ha^{-1} de silicio ($95 \% \text{ SiO}_2$). Incrementos en el verdor foliar y biomasa aérea de plántulas de pepino, fueron reportados por Cazares *et al.* (2023) utilizando 20 mg L^{-1} de silicio.

El comportamiento del rendimiento se observa en la Figura 3 donde el rendimiento sigue una tendencia lineal positiva, obteniendo la máxima respuesta a mayores aplicaciones de silicio (0.27 g de SiO_2 por planta).

Kowalska *et al.*, (2020) indican que la mejora en el rendimiento del trigo y la eficiencia del mismo dependen de la escala del estrés hídrico. Como los incrementos en el rendimiento del trigo del 42 % en año de sequía y del 26 % en año con precipitación media fueron reportados con dosis de silicio (0.3 , 3 y 6 L de silicio ha^{-1}) aplicadas en forma foliar (Martin *et al.*, 2017). Otros autores indicaron que concentraciones de 0.27 g por planta de silicio

incrementó las variables morfológicas número de hojas, flores, frutos, longitud, diámetro peso y rendimiento de maíz y trigo bajo condiciones tropicales (Agostinho *et al.*, 2017). Meena *et al.* (2014) aplicaron silicio a una concentración de 0.27 g por planta y encontraron una correlación positiva y altamente significativa entre la acumulación de silicio, el contenido de clorofila, la tasa fotosintética, el peso de la biomasa fresca total, el peso de la biomasa seca total y el contenido de nitrógeno de las plántulas, lo que indica que la fertilización con silicio mejora el rendimiento de los cultivos.

El silicio tiene efectos benéficos significativos tanto desde el punto de vista nutricional como fisiológico en el desarrollo de cultivos. Este elemento mejora la absorción de nutrientes y la fotosíntesis, y fortalece la resistencia de las plantas frente a factores de estrés ambiental, incluyendo sequía, salinidad y enfermedades. Además, estudios han mostrado que la suplementación con silicio puede disminuir la necesidad de otros fertilizantes esenciales al mejorar la eficiencia del uso de nutrientes en las plantas (Pavlovic *et al.*, 2021; Kovács *et al.*, 2022; Tayade *et al.*, 2022).

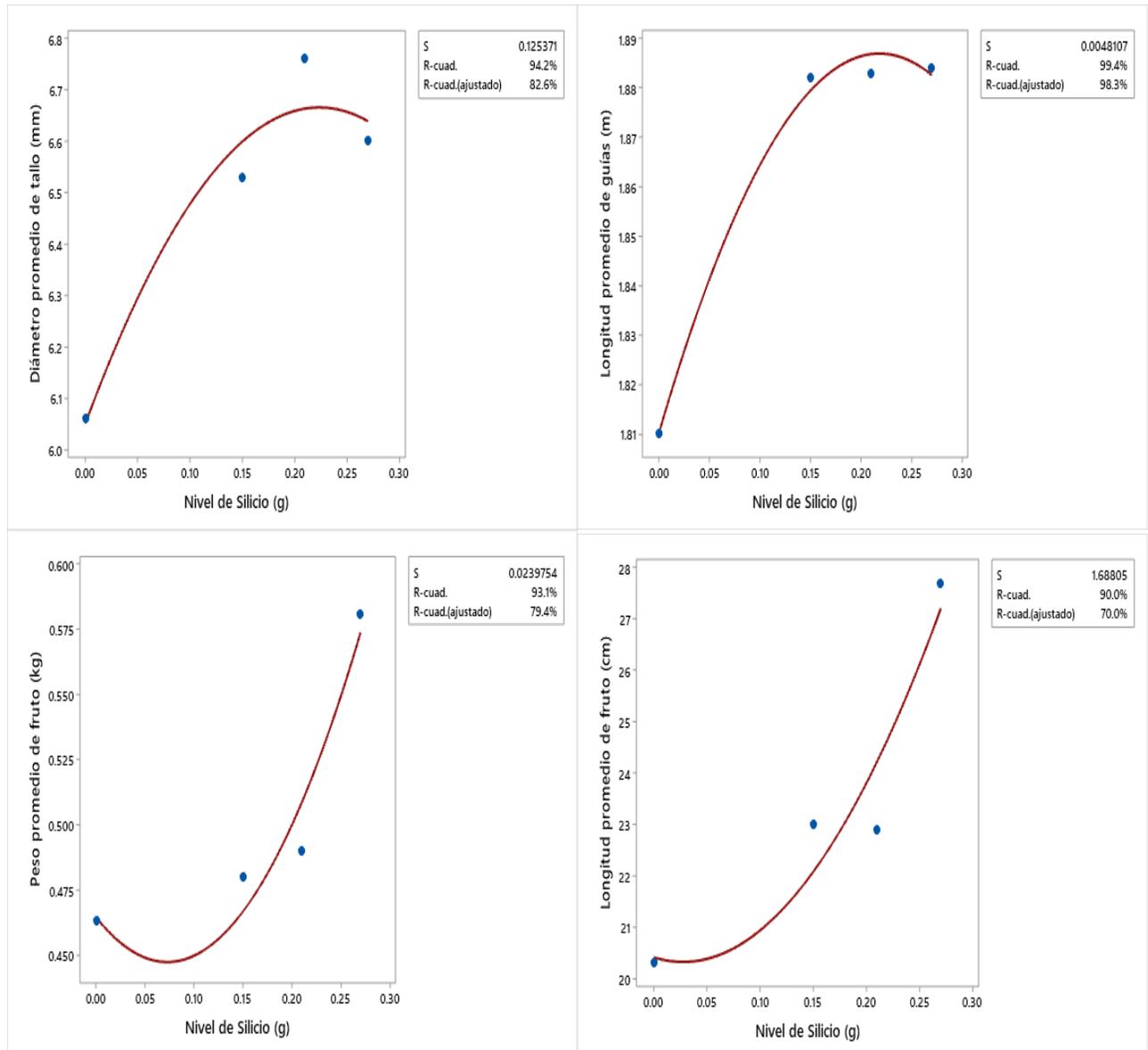


Figura 2. Comportamiento de las variables diámetro de tallo, longitud de guías, peso de fruto y longitud de fruto en función de la aplicación de silicio

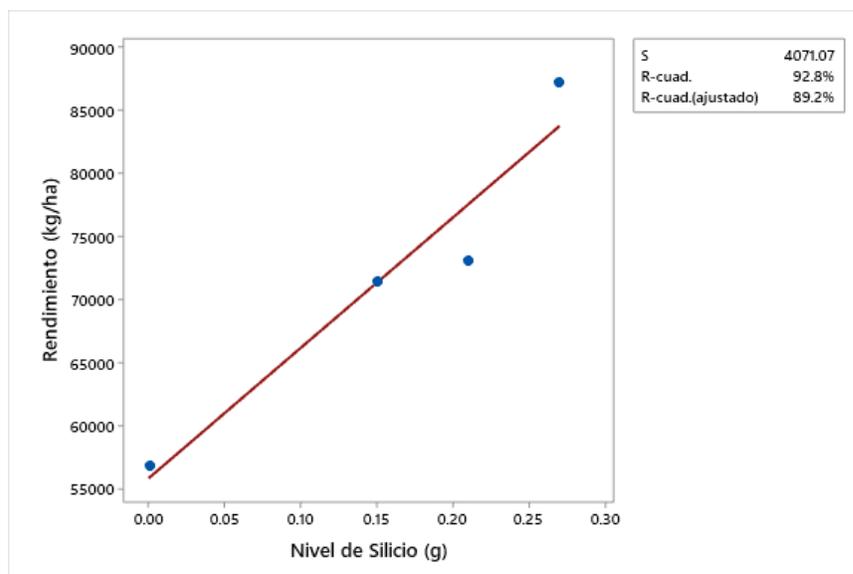


Figura 3. Rendimiento de pepino en función del nivel de silicio.

CONCLUSIONES

La aplicación de silicio al cultivo del pepino incrementó la respuesta de las variables vegetativas (diámetro del tallo, número de flores y hojas), y las variables de rendimiento (peso, diámetro, longitud y número de frutos y rendimiento). El rendimiento del cultivo en respuesta a la concentración de silicio sigue una respuesta lineal positiva, es decir, el rendimiento se incrementa conforme la dosis de silicio va aumentando desde 0 hasta 0.27g de SiO₂, lo cual se recomienda, evaluar el rendimiento de pepino a concentraciones mayores de silicio.

Agradecimientos

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 8^{va} Convocatoria, a través del proyecto PFOC8-10-2021 “Estimulación de la productividad biológica y agrícola por la aplicación de silicio en cultivos hortícolas”.

Funding. This research was conducted with funds from the Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT).

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest. The funding sources had no role in the design of the study, in the collection, analysis, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Compliance with ethical standards. Do not apply.

Data availability. The authors confirm that all data underlying the findings are fully available without restriction upon reasonable request to the corresponding author, Alejandro Palacios Espinosa (palacios@uabcs.mx). All relevant data necessary to replicate this study are described in the paper.

Author contribution statement (CRediT). **J.J. Reyes-Pérez-** Investigation, Methodology, Validation, **L.T. Llerena-Ramos-** Investigation, Methodology, Validation, **J.A. Torres-Rodríguez-** Investigation, Methodology, Validation, **L.G. Hernández-Montiel-** Supervision, Validation, **R.K. Macias-Pettao-** Investigation, Methodology, Validation, **E. Aragón-Sánchez-** Formal analysis, Writing of manuscript, **A. Palacios-Espinosa-** Formal analysis, Writing of manuscript, Writing-review.

REFERENCES

- Agostinho, F., Tubana, B., Martins, M. and Datnoff D., 2017. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. *Plants* 6, pp. 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants6030035>.
- Alcantra, E., Sales, M.M.A., Viana, C.F.A. and Vitor, M.R.F., 2021 Aproveitamento do silicio derivado da extração do quartzo são thomé na cultura do pepino. *Revista Augustus* 27 (54), pp. 48-58. <https://doi.org/10.15202/10.15202/1981896.2021v27n54p48>.
- Babu, T. and Nagabovanalli, P., 2017. Effect of silicon amendment on soil-cadmium availability and

- uptake in rice grown in different moisture regimes. *Journal of Plant Nutrition*, 40(17), pp. 2440-2457. <https://doi.org/10.1080/01904167>.
- Bent, E., 2008. Ácido silícico. Cultivar de acuerdo con la naturaleza Parte I- II. Bérghamo. Italia. Pág. 6-15. <http://www.hortcom.files.wordpress.com>
Fecha de consulta 30 de junio de 2022.
- Cabezas, G.A., Camus, A.F., Esteban, C.W., González, V.F.A. and Mazuela, A.P., 2022. El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *Idesia (Arica)*, 40, pp. 129-133. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000100129>.
- Cágal, Á.C., 2013. Efecto de diferentes concentraciones de Silicio, adicionado al suelo en el cultivo de Chile Habanero a cielo abierto. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 1(2), pp. 53-57. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v1i2.228>
- Hu, A.Y., Xu, S.N., Qin, D.N., Li, W. and Zhao, X.Q., 2020. Role of silicon in mediating phosphorus imbalance in plants. *Plants*, 10(1), pp. 51. <https://doi.org/10.3390/plants10010051>
- Kaloterakis, N., Van Delden, S.H., Hartley, S. and De Deyn, G.B., 2021. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure Bacillus species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L). *Scientia Horticulturae*, 288, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110383>.
- Katz, O., Puppe, D., Kaczorek, D., Prakash, N.B. and Schaller, J., 2021. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. *Plants*, 10(4), pp. 652. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
- Kovács, S., Kutasy, E. and Csajbók, J., 2022. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*, 11(9), pp. 1223. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>
- Kowalska, J., Tyburski, J., Bocianowski, J. and Matysiak, K., 2020. Methods of silicon application on organic spring wheat (*Triticum aestivum* L. spp. vulgare) cultivars grown across two contrasting precipitation years. *Agronomy*, 10, pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111655>.
- Li, R., Sun, Y., Wang, H. and Wang, H., 2022. Advances in understanding silicon transporters and the benefits to silicon-associated disease resistance in plants. *Applied Sciences*, 12(7), pp. 3282. <https://doi.org/10.3390/app12073282>
- Luan, H., Niu, C., Nie, X., Li, Y. and Wei, M., 2022. Transcriptome and physiological analysis of rootstock types and silicon affecting cold tolerance of cucumber seedlings. *Plants*, 11(3), pp. 445. <https://doi.org/10.3390/plants11030445>
- Lyu, J., Jin, N., Meng, X., Jin, L., Wang, S., Xiao, X. and Yu, J., 2022. Exogenous silicon alleviates the adverse effects of cinnamic acid-induced autotoxicity stress on cucumber seedling growth. *Frontiers in Plant Science*, 13, pp. 968514. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.968514>
- Martin, T.N., Leivas, U. and Barella, J.D., 2017. Foliar application of silicon on yield components of wheat crops. *Caatinga*, 30, pp. 578-585. <http://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n305rc>
- Meena, V., Dotaniya, M., Coumar, V. and Subba, A., 2014. A Case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings of the Natural Academy of Sciences, India, Section B Biology Sciences*, 84, pp. 505–518. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270>.
- Mehmood, S., Wang, X., Ahmed, W., Imtiaz, M., Ditta, A., Rizwan, M. and Li, W., 2021. Removal mechanisms of slag against potentially toxic elements in soil and plants for sustainable agriculture development: A critical review. *Sustainability*, 13, pp. 5255. <https://doi.org/10.3390/su13095255>
- Minitab, LLC., 2019. Minitab (Version 19) [Computer software]. <https://www.minitab.com>
- Pahalvi, H.N., Rafiyya, L., Rashid, S., Nisar, B. and Kamili, A.N., 2021. Chemical fertilizers and their impact on soil health. *Microbiota and Biofertilizers*, 2: pp. 1-20. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1.
- Parra-Terraza, S., Baca-Castillo, G.A., Carrillo-González, R., Kohashi-Shibata, J., Martínez-

- Garza, A. and Trejo-López, C., 2004. Silicio y potencial osmótico de la solución nutritiva en el crecimiento del pepino. *Terra Latinoamericana*, 33 (4), pp. 467-473. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311096011>.
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A. and Nikolic, M., 2021. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, pp. 697592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Ramac, 2015. Rappaccioli McGregor S.A. Foro informativo. *Agroquímicos de Nicaragua*. <http://www.ramac.com.ni> Fecha de consulta 3 de agosto de 2022.
- Rea, R.S., Islam, M.R., Rahman, M.M., Nath, B. and Mix, K., 2022. Growth, nutrient accumulation, and drought tolerance in crop plants with silicon application: A review. *Sustainability*, 14(8), pp. 4525. <https://doi.org/10.3390/su14084525>
- Shen, Z., Cheng, X., Li, X., Deng, X., Dong, X., Wang, S. and Pu, X., 2022. Effects of silicon application on leaf structure and physiological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. and *Glycyrrhiza inflata* Bat. under salt treatment. *BMC Plant Biology*, 22, pp. 390. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03783-7>
- Shivaraj, S.M., Mandlik, R., Bhat, J.A., Raturi, G., Elbaum, R., Alexander, L. and Sonah, H., 2022. Outstanding questions on the beneficial role of silicon in crop plants. *Plant and Cell Physiology*, 63(1), pp. 4-18. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab145>
- Sun, H., Duan, Y., Qi, X., Zhang, L., Huo, H. and Gong, H., 2018. Isolation and functional characterization of CsLsi2, a cucumber silicon efflux transporter gene. *Annals of Botany*, 122(4), pp. 641-648. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy103>
- Sun, S., Yang, Z., Song, Z., Wang, N., Guo, N., Niu, J. and 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, pp. 1011859. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1011859>
- Tayade, R., Ghimire, A., Khan, W., Lay, L., Attipoe, J. Q. and Kim, Y., 2022. Silicon as a smart fertilizer for sustainability and crop improvement. *Biomolecules*, 12(8), pp. 1027. <https://doi.org/10.3390/biom12081027>
- Teo, P.T., Zakaria, S.K., Salleh, S.Z., Taib, M.A.A., Mohd Sharif, N., Abu Seman, A., and Mamat, S., 2020. Assessment of electric arc furnace (EAF) steel slag waste's recycling options into value added green products: A review. *Metals*, 10, pp. 1347. <https://doi.org/10.3390/met10101347>
- Thapa, S., Bhandari, A., Ghimire, R., Xue, Q., Kidwaro, F., Ghatrehsamani, S. and Goodwin, M., 2021. Managing micronutrients for improving soil fertility, health, and soybean yield. *Sustainability*, 13(21), pp. 11766. <https://doi.org/10.3390/su132111766>
- Wu, J., Guo, J., Hu, Y. and Gong, H., 2015. Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress. *Frontiers in Plant Science*, 6, pp. 141391. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00453>