

Producción agrícola sostenible y respuesta agronómica del pepino con aplicación de silicio

Sustainable Agricultural Production and the Agronomic Response of Cucumbers to Silicon Application

Produção agrícola sustentável e resposta agronômica do pepino com a aplicação de silício

Jiménez-Gavilanes, Anderson Rangel

Investigador Independiente

jimenezanderson41@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-0283-9248>



Pazmiño-Mera, Yulissa Yamilex

Investigadora Independiente

merayulissa@outlook.com

<https://orcid.org/0009-0007-5801-4199>



Campuzano-Santana, Karla Leticia

Investigador Independiente

karlacampuzanosant@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-2061-1637>



Macias-Cerezo, Ángel Josué

Investigador Independiente

ingmacias.29@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-8576-7940>



Palomino-Sanchez, Andrés Francisco

Investigador Independiente

ap3244266@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-7067-1947>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/n1/1675>

Como citar:

Jiménez-Gavilanes, A. R., Pazmiño-Mera, Y. Y., Campuzano-Santana, K. L., Macias-Cerezo, Ángel J., & Palomino-Sanchez, A. F. (2026). Producción agrícola sostenible y respuesta agronómica del pepino con aplicación de silicio. *Código Científico Revista De Investigación*, 7(1), 3736–3752.

Recibido: 14/05/2026

Aceptado: 08/06/2026

Publicado: 30/06/2026

Resumen

El silicio se utiliza en la nutrición vegetal por su capacidad para favorecer el crecimiento, fortalecer estructuras vegetales y contribuir al desempeño de los cultivos frente a diferentes condiciones de manejo. El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes dosis de dióxido de silicio (SiO_2) sobre variables agronómicas y económicas del pepino (*Cucumis sativus* L.). Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones: T1, control sin SiO_2 ; T2, 0,15 g SiO_2 planta⁻¹; T3, 0,21 g SiO_2 planta⁻¹; y T4, 0,27 g SiO_2 planta⁻¹. Las aplicaciones se realizaron a los 6, 20 y 28 días después del trasplante. Se evaluaron longitud de guía, diámetro del tallo, número de hojas, flores y frutos por planta, características físicas del fruto, rendimiento y rentabilidad. La longitud de guía y el diámetro del tallo no presentaron diferencias significativas entre tratamientos. T4 alcanzó las mayores medias en número de hojas (23,63), flores (24,90) y frutos por planta (4,33), además de longitud (27,70 cm), diámetro (6,06 cm) y peso del fruto (0,58 kg). El mayor rendimiento correspondió a T4, con 527,80 kg ha⁻¹, acompañado de un beneficio neto de USD 85,02, relación beneficio/costo de 1,64 y rentabilidad de 64,43 %. La dosis de 0,27 g SiO_2 planta⁻¹ presentó el desempeño más favorable al integrar mejores resultados vegetativos, productivos y económicos bajo las condiciones evaluadas.

Palabras clave: crecimiento, fertilización, nutrición, rendimiento, rentabilidad.

Abstract

Silicon is used in plant nutrition because of its ability to promote growth, strengthen plant structures, and enhance crop performance under various management conditions. The objective was to evaluate the effect of different doses of silicon dioxide (SiO_2) on agronomic and economic variables of cucumber (*Cucumis sativus* L.). A completely randomized design was used with four treatments and four replicates: T1, control without SiO_2 ; T2, 0.15 g SiO_2 per plant; T3, 0.21 g SiO_2 per plant; and T4, 0.27 g SiO_2 per plant. Applications were made 6, 20, and 28 days after transplanting. The following traits were evaluated: main shoot length, stem diameter, number of leaves, flowers, and fruits per plant, physical characteristics of the fruit, yield, and profitability. There were no significant differences in main shoot length and stem diameter among treatments. T4 achieved the highest means for the number of leaves (23.63), flowers (24.90), and fruits per plant (4.33), as well as for fruit length (27.70 cm), diameter (6.06 cm), and weight (0.58 kg). The highest yield was observed in T4, at 527.80 kg ha⁻¹, accompanied by a net profit of USD 85.02, a benefit-to-cost ratio of 1.64, and a profitability of 64.43%. The dose of 0.27 g SiO_2 plant⁻¹ showed the most favorable performance by combining the best vegetative, productive, and economic results under the evaluated conditions.

Keywords: growth, fertilization, nutrition, yield, profitability.

Resumo

O silício é utilizado na nutrição vegetal devido à sua capacidade de favorecer o crescimento, fortalecer as estruturas vegetais e contribuir para o desempenho das culturas face a diferentes condições de gestão. O objetivo foi avaliar o efeito de diferentes doses de dióxido de silício (SiO_2) sobre variáveis agronômicas e econômicas do pepino (*Cucumis sativus* L.). Foi utilizado um plano experimental completamente aleatório com quatro tratamentos e quatro repetições: T1, controle sem SiO_2 ; T2, 0,15 g de SiO_2 por planta; T3, 0,21 g de SiO_2 por planta; e T4, 0,27 g de SiO_2 por planta. As aplicações foram realizadas aos 6, 20 e 28 dias após o transplante. Foram avaliados o comprimento do caule principal, o diâmetro do caule, o número de folhas,

flores e frutos por planta, as características físicas do fruto, o rendimento e a rentabilidade. O comprimento do caule e o diâmetro do caule não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. O T4 atingiu as médias mais elevadas no número de folhas (23,63), flores (24,90) e frutos por planta (4,33), além do comprimento (27,70 cm), diâmetro (6,06 cm) e peso do fruto (0,58 kg). O maior rendimento correspondeu ao T4, com 527,80 kg ha⁻¹, acompanhado de um lucro líquido de 85,02 USD, uma relação benefício/custo de 1,64 e uma rentabilidade de 64,43 %. A dose de 0,27 g de SiO₂ planta⁻¹ apresentou o desempenho mais favorável, ao integrar melhores resultados vegetativos, produtivos e económicos nas condições avaliadas.

Palavras-chave: crescimento, fertilização, nutrição, rendimento, rentabilidade.

Introducción

La sostenibilidad de la producción agrícola requiere mantener la productividad con un uso más eficiente de los recursos y una mayor capacidad de respuesta frente a factores de estrés. En este contexto, el silicio ha ganado interés por su participación en procesos asociados con la nutrición vegetal, la tolerancia a condiciones adversas y la eficiencia del sistema suelo-planta (Kovács et al., 2022). Su disponibilidad para las plantas depende de las formas químicas presentes en el suelo y de los mecanismos de absorción y transporte (Sharma et al., 2023). Estas características sustentan su estudio como insumo complementario dentro de estrategias orientadas a sistemas agrícolas más resilientes y con menor dependencia de insumos convencionales (Pavlovic et al., 2021).

En el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.), el crecimiento y la productividad pueden disminuir cuando la planta enfrenta desbalances nutricionales, salinidad o enfermedades. El exceso de nitrato altera el crecimiento, la asimilación de nitrógeno y la síntesis de clorofila (Gou et al., 2020), mientras que la salinidad reduce la biomasa y modifica diversos rasgos morfológicos durante las primeras etapas de desarrollo (Kaloterakis et al., 2021). A ello se suma la incidencia de patógenos como *Fusarium oxysporum*, capaz de afectar la actividad fotosintética y el equilibrio oxidativo. Estas limitaciones justifican la búsqueda de prácticas de manejo que fortalezcan la respuesta agronómica del cultivo sin incrementar innecesariamente la carga de insumos químicos (Sun et al., 2022).

El silicio no se considera un elemento esencial para la mayoría de las especies cultivadas, pero numerosos estudios reconocen sus efectos beneficiosos sobre procesos fisiológicos y nutricionales (Pavlovic et al., 2021). Su incorporación puede contribuir al mantenimiento de las relaciones hídricas, la regulación iónica y la actividad fotosintética bajo sequía o salinidad, aunque la magnitud de la respuesta depende de la especie y de las condiciones de crecimiento (Thorne et al., 2020). También se ha documentado su participación en la estabilidad de membranas, la regulación antioxidante y la reducción de la absorción o movilidad de elementos potencialmente tóxicos, aspectos relevantes para sostener el desempeño vegetal frente a distintos estreses (Vaculík et al., 2020).

En pepino, la aplicación de silicio ha mostrado respuestas favorables en variables directamente relacionadas con el desempeño agronómico. Bajo exceso de nitrato, el suministro radicular de silicio mejoró el crecimiento, la fotosíntesis, la asimilación de nitrógeno y la síntesis de clorofila (Gou et al., 2020). En condiciones salinas, también se registraron incrementos en biomasa, altura, área foliar y características del sistema radical (Kaloterakis et al., 2021). En campo, la aplicación foliar de silicio incrementó la fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento, además de modificar atributos de calidad del fruto. Estos resultados confirman que la respuesta puede abarcar tanto el desarrollo vegetativo como la productividad del cultivo (Hu et al., 2022).

La eficacia agronómica del silicio depende de la fuente, la dosis, la vía de aplicación y el estado nutricional de la planta. En pepino, las aplicaciones radiculares y foliares han producido respuestas distintas según la disponibilidad de zinc y la etapa de recuperación nutricional (Lozano-González et al., 2021). El suministro mediante solución nutritiva también ha favorecido el crecimiento y el balance hídrico bajo condiciones de fertirrigación deficitaria (Ferrón-Carrillo & Urrestarazu, 2021). Asimismo, el uso de silicato de sodio en sustratos para plántulas mejoró características de crecimiento y modificó la disponibilidad de nutrientes y la

acumulación de metales, evidenciando que la respuesta depende del sistema de producción y del manejo aplicado (Tian et al., 2023).

La evidencia disponible demuestra que los efectos del silicio en pepino han sido estudiados bajo condiciones específicas de estrés nutricional y salinidad, así como mediante diferentes vías de aplicación (Gou et al., 2020; Kaloterakis et al., 2021). También se han registrado respuestas positivas sobre crecimiento, rendimiento y calidad del fruto bajo condiciones de campo (Hu et al., 2022). Sin embargo, la respuesta a dosis definidas de dióxido de silicio bajo condiciones controladas requiere mayor análisis para establecer su comportamiento agronómico y económico. Por ello, el objetivo del estudio fue evaluar la respuesta agronómica del pepino ante diferentes dosis de silicio, considerando el crecimiento, las características del fruto, el rendimiento y la rentabilidad.

Metodología

Área de estudio

La investigación se desarrolló en el Campus La María de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado en el km 7 de la vía Quevedo–El Empalme, provincia de Los Ríos, Ecuador, a 75 m s. n. m., aproximadamente en las coordenadas 1°06' S y 79°27' O. El sitio experimental presentó topografía plana, temperatura media de 24,9 °C, humedad relativa de 84 %, precipitación anual de 2295,1 mm y heliofanía de 870,2 horas luz año⁻¹, de acuerdo con la serie multianual 1990–2019 de la estación meteorológica Pichilingue del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño completamente al azar con un factor de estudio constituido por las dosis de dióxido de silicio (SiO₂). Se evaluaron cuatro tratamientos: control sin aplicación de silicio, 0,15 g de SiO₂ planta⁻¹, 0,21 g de SiO₂ planta⁻¹ y 0,27 g de SiO₂ planta⁻¹. Cada

tratamiento contó con cuatro repeticiones, para un total de 16 unidades experimentales. Cada parcela tuvo 3,60 m de ancho por 4,20 m de longitud, equivalente a 15,12 m², con un área experimental total de 241,92 m². La distancia de siembra fue de 0,60 m entre plantas y 0,90 m entre hileras, con 0,80 m entre calles. Cada parcela estuvo conformada por cuatro hileras de siete plantas.

Establecimiento y manejo del cultivo

El suelo se acondicionó mediante dos pases de azadón para favorecer su descompactación. El semillero se estableció en bandejas germinadoras de plástico utilizando tierra de siembra como sustrato. Las semillas se colocaron aproximadamente a 2 mm de profundidad y las bandejas se cubrieron con plástico durante 48 h para favorecer la germinación. El trasplante se efectuó tres días después de la emergencia de las plántulas, seguido de riego manual.

Durante las primeras etapas de crecimiento, el riego se realizó dos veces por semana y posteriormente una vez por semana. La poda se efectuó semanalmente mediante la eliminación de hojas quebradas, enfermas o envejecidas y de brotes laterales. El control de malezas se realizó manualmente cada 15 días. El tutorado se instaló cuando inició la emisión de guías, entre los 15 y 25 días después del trasplante. La cosecha se efectuó cuando los frutos alcanzaron la madurez fisiológica, entre los 75 y 90 días después del trasplante, y se consideraron dos cosechas para las evaluaciones productivas.

Aplicación de silicio

Se utilizó silicio comercial en polvo con una concentración de 85 % de SiO₂. Las dosis de 0,15; 0,21 y 0,27 g de SiO₂ planta⁻¹ se aplicaron de acuerdo con cada tratamiento, mientras que el control no recibió silicio. Se realizaron tres aplicaciones durante el desarrollo del cultivo, a los 6, 20 y 28 días después del trasplante.

Variables agronómicas y productivas

Para las evaluaciones agronómicas se seleccionaron 10 plantas al azar por tratamiento. La longitud de guía se determinó desde la base del tallo hasta el ápice mediante un flexómetro y se expresó en metros (m). El diámetro del tallo se midió a 20 cm sobre el nivel del suelo mediante un calibrador pie de rey y se expresó en milímetros (mm). El número de hojas se obtuvo mediante el conteo de hojas verdaderas presentes en cada planta. El número de flores por planta se registró cuando el cultivo alcanzó aproximadamente el 50 % de floración, entre los 40 y 45 días después del trasplante.

Las variables productivas comprendieron número de frutos por planta, longitud, diámetro y peso del fruto. El número de frutos se determinó mediante conteo considerando la producción obtenida en las dos cosechas. Para las características físicas se seleccionaron 10 frutos al azar. La longitud del fruto se midió desde el extremo apical hasta el basal y se expresó en centímetros (cm); el diámetro se determinó con un calibrador pie de rey y se expresó en centímetros, mientras que el peso se registró mediante una balanza electrónica y se expresó en kilogramos (kg). El rendimiento se calculó a partir de la producción acumulada de las dos cosechas en la parcela útil y se expresó en kg ha^{-1} .

Análisis económico

El análisis económico se realizó para cada tratamiento considerando los costos variables y los costos totales asociados al manejo del cultivo. El ingreso bruto se determinó a partir del rendimiento obtenido y del precio de venta del producto. Posteriormente se calcularon el beneficio neto, la relación beneficio/costo y la rentabilidad de cada tratamiento.

Análisis estadístico

Las variables agronómicas y productivas se sometieron a un análisis de varianza de acuerdo con el diseño completamente al azar. Las medias se compararon mediante la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95 %. La organización y tabulación de los datos se

realizó en Microsoft Excel 2019 y el procesamiento estadístico mediante InfoStat versión 2017.1.2.

Resultados

Variables de crecimiento

La longitud de guía no presentó diferencias significativas entre los tratamientos. T3 (0,21 g SiO₂ planta⁻¹) y T4 (0,27 g SiO₂ planta⁻¹) registraron las mayores medias, con 1,88 m, seguidos de T2 (0,15 g SiO₂ planta⁻¹) con 1,87 m; T1 (control) presentó el menor promedio, con 1,82 m. A pesar de esta variación numérica, todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico y el coeficiente de variación fue de 1,85 %.

El diámetro del tallo tampoco mostró diferencias significativas. La mayor media correspondió a T3, con 6,77 mm, seguida de T4 con 6,60 mm y T2 con 6,53 mm, mientras que T1 alcanzó 6,07 mm. El coeficiente de variación fue de 7,69 %. En contraste, el número de hojas sí presentó diferencias significativas entre tratamientos. T4 alcanzó el promedio más alto, con 23,63 hojas, y difirió significativamente de T1, que registró la menor media con 20,46 hojas. T2 y T3 presentaron valores intermedios de 21,62 y 22,08 hojas, respectivamente, sin diferir significativamente de los tratamientos extremos

Tabla 1

Variables de crecimiento del pepino bajo diferentes dosis de SiO₂

Tratamiento	Longitud de guía (m)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas
T1: Control	1,82 a	6,07 a	20,46 b
T2: 0,15 g SiO ₂ planta ⁻¹	1,87 a	6,53 a	21,62 ab
T3: 0,21 g SiO ₂ planta ⁻¹	1,88 a	6,77 a	22,08 ab
T4: 0,27 g SiO ₂ planta ⁻¹	1,88 a	6,60 a	23,63 a
Promedio	1,86	6,49	21,95
CV (%)	1,85	7,69	4,76

Nota: Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente según la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95 % (Autores, 2026).

Componentes reproductivos

El número de flores por planta presentó diferencias significativas entre tratamientos. T4 registró la mayor media, con 24,90 flores por planta, seguido de T3 con 21,53 flores; ambos compartieron el grupo estadístico superior. T2 alcanzó 17,80 flores y T1 presentó el menor promedio, con 12,97. T4 mostró diferencias significativas respecto de T2 y T1, mientras que T3 no difirió de T4 ni de T2, pero sí superó significativamente al control. El coeficiente de variación fue de 10,38 %.

En el número de frutos por planta también se observaron diferencias significativas. T4 alcanzó la mayor media con 4,33 frutos, seguido de T3 con 4,17; ambos tratamientos fueron estadísticamente similares. T2 presentó una respuesta intermedia de 3,98 frutos por planta, mientras que T1 registró la menor media con 3,27. T3 y T4 difirieron significativamente del control, mientras que T2 no mostró diferencias significativas respecto de los grupos extremos. El coeficiente de variación fue de 4,51 %.

Tabla 2

Componentes reproductivos del pepino bajo diferentes dosis de SiO₂

Tratamiento	Flores por planta	Frutos por planta
T1: Control	12,97 c	3,27 b
T2: 0,15 g SiO ₂ planta ⁻¹	17,80 b	3,98 ab
T3: 0,21 g SiO ₂ planta ⁻¹	21,53 ab	4,17 a
T4: 0,27 g SiO ₂ planta ⁻¹	24,90 a	4,33 a
Promedio	19,30	3,94
CV (%)	10,38	4,51

Nota: Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente según la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95 % (Autores, 2026).

Características físicas del fruto

La longitud del fruto presentó diferencias significativas entre tratamientos. T4 alcanzó la mayor media, con 27,70 cm, y superó significativamente a los demás tratamientos. T2 y T3 registraron valores de 23,00 y 22,93 cm, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos; T1 obtuvo la menor longitud, con 20,30 cm, y conformó un grupo estadístico diferente. El coeficiente de variación fue de 4,15 %.

El diámetro del fruto mostró un comportamiento semejante. T4 presentó el promedio más alto, con 6,06 cm, y difirió significativamente del resto de tratamientos. T3 y T2 registraron medias de 5,90 y 5,88 cm, respectivamente, sin diferencias significativas entre ambos, mientras que T1 obtuvo el menor diámetro, con 5,75 cm. El coeficiente de variación fue de 2,76 %.

En el peso del fruto también se registraron diferencias significativas. T4 alcanzó la mayor media, con 0,58 kg, y superó significativamente a T1 y T2, cuyos valores fueron 0,46 y 0,48 kg, respectivamente. T3 presentó una media intermedia de 0,49 kg y no difirió significativamente de T4 ni de los tratamientos con menores pesos. El coeficiente de variación para esta variable fue de 8,49 %.

Tabla 3

Características físicas del fruto de pepino bajo diferentes dosis de SiO₂

Tratamiento	Longitud del fruto (cm)	Diámetro del fruto (cm)	Peso del fruto (kg)
T1: Control	20,30 c	5,75 c	0,46 b
T2: 0,15 g SiO ₂ planta ⁻¹	23,00 b	5,88 b	0,48 b
T3: 0,21 g SiO ₂ planta ⁻¹	22,93 b	5,90 b	0,49 ab
T4: 0,27 g SiO ₂ planta ⁻¹	27,70 a	6,06 a	0,58 a
Promedio	23,48	5,90	0,50
CV (%)	4,15	2,76	8,49

Nota: Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente según la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95 % (Autores, 2026).

Rendimiento

El rendimiento presentó diferencias significativas entre los cuatro tratamientos, con una separación estadística definida para cada dosis. T4 registró la mayor media, con 527,80 kg ha⁻¹, seguido de T3 con 494,10 kg ha⁻¹ y T2 con 470,12 kg ha⁻¹. T1 presentó el menor rendimiento, con 436,91 kg ha⁻¹. Debido a que cada tratamiento estuvo representado por una letra diferente en la comparación de medias, se evidenciaron diferencias significativas entre todas las dosis evaluadas. El coeficiente de variación fue de 7,23 %.

Tabla 4

Rendimiento del cultivo de pepino bajo diferentes dosis de SiO₂

Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
T1: Control	436,91 d
T2: 0,15 g SiO ₂ planta ⁻¹	470,12 c

Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
T3: 0,21 g SiO ₂ planta ⁻¹	494,10 b
T4: 0,27 g SiO ₂ planta ⁻¹	527,80 a
CV (%)	7,23

Nota: Medias con la misma letra no difieren estadísticamente según la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95 % (Autores, 2026).

Análisis económico

El comportamiento económico mostró una tendencia creciente asociada con el rendimiento obtenido en los tratamientos. T4 presentó el mayor ingreso bruto, con USD 216,98, pese a registrar también el costo más alto, de USD 131,96. Este tratamiento alcanzó el mayor beneficio neto, con USD 85,02, una relación beneficio/costo de 1,64 y una rentabilidad de 64,43 %. T3 ocupó la segunda posición en estos indicadores, con un beneficio neto de USD 74,36, relación beneficio/costo de 1,58 y rentabilidad de 57,75 %.

T2 presentó un ingreso bruto de USD 193,27, un beneficio neto de USD 68,68, relación beneficio/costo de 1,55 y rentabilidad de 55,12 %. Los menores valores económicos correspondieron a T1, con un ingreso bruto de USD 161,66, beneficio neto de USD 52,35, relación beneficio/costo de 1,48 y rentabilidad de 47,89 %. En términos descriptivos, la mayor inversión asociada a T4 estuvo acompañada por los mayores valores de rendimiento, beneficio neto y rentabilidad.

Tabla 5

Análisis económico de la producción de pepino bajo diferentes dosis de SiO₂

Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Ingreso bruto (USD)	Costo del tratamiento (USD)	Beneficio neto (USD)	Relación B/C	Rentabilidad (%)
T1: Control	436,91	161,66	109,31	52,35	1,48	47,89
T2: 0,15 g SiO ₂ planta ⁻¹	470,12	193,27	124,59	68,68	1,55	55,12
T3: 0,21 g SiO ₂ planta ⁻¹	494,10	203,13	128,77	74,36	1,58	57,75
T4: 0,27 g SiO ₂ planta ⁻¹	527,80	216,98	131,96	85,02	1,64	64,43

Nota: (Autores, 2026).

Discusión

La respuesta vegetativa mostró que el silicio no modificó significativamente la longitud de guía ni el diámetro del tallo, aunque T3 y T4 alcanzaron las mayores medias de longitud y T3 el mayor diámetro; en cambio, T4 incrementó significativamente el número de hojas respecto al control. Faroutine et al. (2023) observaron en pepino que el efecto del silicio sobre el crecimiento varió según la disponibilidad hídrica y la dosis aplicada. Cázarez-Flores et al. (2024) también registraron respuestas diferenciadas en longitud del tallo, área foliar y biomasa según el cultivar y la concentración de Si. González-Terán et al. (2020) no encontraron cambios significativos en biomasa con aplicaciones foliares de silicio, lo que confirma que la respuesta vegetativa no siempre ocurre de manera uniforme.

En los componentes reproductivos, T4 presentó la mayor media de flores y frutos por planta, mientras que T1 registró los valores más bajos. Cázarez-Flores et al. (2022) determinaron que dosis superiores de silicio favorecieron el crecimiento y rendimiento del pepino, aunque la magnitud de la respuesta dependió de la concentración aplicada. Osuna-Zárate et al. (2023) encontraron que determinadas combinaciones de silicato de potasio favorecieron el número de frutos y el rendimiento, evidenciando una respuesta asociada al cultivar y al tratamiento. De manera similar, Xavier et al. (2025) registraron incrementos en producción de frutos después de aplicaciones foliares de silicio, lo que respalda la respuesta productiva observada con T4 en el presente estudio.

Las características físicas del fruto también respondieron favorablemente a la dosis superior, ya que T4 alcanzó las mayores medias de longitud, diámetro y peso. Núñez-Ambríz y Apáez-Barrios (2025) señalaron que la dosis y la vía de aplicación del silicio condicionan la respuesta productiva del pepino cultivado en sustrato. González-García et al. (2022) encontraron que diferentes formas de silicio modificaron atributos de calidad poscosecha y compuestos bioactivos del fruto. No obstante, González-Terán et al. (2020) no observaron

cambios significativos en el tamaño de los frutos después de la aplicación foliar de Si. Esta diferencia evidencia que la respuesta del fruto puede estar condicionada por la fuente de silicio, forma de aplicación, ambiente de cultivo y condiciones nutricionales.

El rendimiento aumentó progresivamente desde T1 hasta T4 y presentó diferencias significativas entre todos los tratamientos, lo que evidencia una respuesta favorable dentro del intervalo de dosis evaluado. AlSaeedi (2022) reportó que la aplicación de nanopartículas de sílice modificó positivamente el rendimiento y la eficiencia de uso del agua en pepino cultivado en suelo arenoso. López-Cuen et al. (2024) observaron que la respuesta del crecimiento y rendimiento al silicio estuvo condicionada por la concentración aplicada y el nivel de salinidad. Asimismo, Xavier et al. (2025) obtuvieron un incremento de 25 % en la producción con fertilización foliar de Si. Estas evidencias muestran que la respuesta productiva puede ser favorable, aunque su magnitud depende del sistema y de las condiciones de cultivo.

Los mecanismos fisiológicos que podrían explicar el mejor comportamiento de T4 no fueron determinados en este experimento, por lo que no pueden atribuirse de manera directa. Sin embargo, Zhu et al. (2020) demostraron que el silicio favoreció el crecimiento y la biomasa del pepino bajo salinidad mediante modificaciones en el metabolismo de prolina y citocininas. Lyu et al. (2022) relacionaron su aplicación con mejoras en el estado hídrico, nutrición mineral, metabolismo del nitrógeno y desarrollo radical bajo estrés autotóxico. Luan et al. (2022) también identificaron modificaciones fisiológicas y transcriptómicas asociadas con mayor tolerancia del pepino a bajas temperaturas. Estos mecanismos ofrecen una base fisiológica para interpretar respuestas agronómicas favorables, aunque deben comprobarse específicamente bajo las condiciones del presente estudio.

El análisis económico mostró que el incremento del costo de aplicación en T4 fue compensado por el mayor rendimiento, alcanzando la relación beneficio/costo de 1,64 y una rentabilidad de 64,43 %, superiores a T1. Berahim et al. (2021) encontraron que la aplicación

de silicio incrementó el rendimiento del arroz y obtuvo una relación beneficio/costo de 1,63, evidenciando que el aumento productivo puede compensar el costo adicional del insumo. Wenneck et al. (2021) también observaron que la incorporación de silicio incrementó el retorno económico en la mayoría de las condiciones evaluadas en cultivo protegido. En pepino, Xavier et al. (2025) registraron además una ganancia económica diferencial positiva asociada con el aumento de la producción generado por la fertilización con silicio.

Conclusión

La aplicación de silicio influyó favorablemente en la respuesta agronómica y económica del cultivo de pepino, aunque su efecto varió entre las variables evaluadas. La longitud de guía y el diámetro del tallo no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, mientras que el número de hojas, flores y frutos mostró una respuesta superior con las dosis más altas. T4 (0,27 g SiO₂ planta⁻¹) registró las mayores medias en número de hojas, flores, frutos, longitud, diámetro y peso del fruto, además del mayor rendimiento, con 527,80 kg ha⁻¹. Este tratamiento también alcanzó el mejor comportamiento económico, con un beneficio neto de USD 85,02, una relación beneficio/costo de 1,64 y una rentabilidad de 64,43 %. En las condiciones evaluadas, la dosis de 0,27 g SiO₂ planta⁻¹ presentó la respuesta agronómica y económica más favorable.

Referencias bibliográficas

- AlSaeedi, A. H. (2022). Enhancement of soil water characteristics curve (SWCC) and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in sandy soils by using silica nanoparticles. *Journal of King Saud University - Science*, 34(4), 101926. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101926>
- Berahir, Z., Omar, M. H., Zakaria, N.-I., Ismail, M. R., Rosle, R., Roslin, N. A., & Che'Ya, N. N. (2021). Silicon improves yield performance by enhancement in physiological responses, crop imagery, and leaf and culm sheath morphology in new rice line, PadiU Putra. *BioMed Research International*, 2021, 6679787. <https://doi.org/10.1155/2021/6679787>

- Cázarez-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. de J., Ayala-Tafoya, F., Díaz-Valdés, T., Yáñez-Juárez, M. G., & López-Orona, C. A. (2022). Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana*, 40, e994. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.994>
- Cázarez-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. de J., Zazueta-Torres, N. D., Yáñez-Juárez, M. G., Angulo-Castro, A., & Díaz-Valdés, T. (2024). Response of two varieties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to silicon and chlorine applied in shade houses. *Terra Latinoamericana*, 42, e1620. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1620>
- 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392023000300334>
- Ferrón-Carrillo, F., & Urrestarazu, M. (2021). Effects of Si in nutrient solution on leaf cuticles. *Scientia Horticulturae*, 278, 109863. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109863>
- González-García, Y., Flores-Robles, V., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Cabrera de la Fuente, M., 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, G. E., Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Téllez, 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>
- Gou, T., Yang, L., Hu, W., Chen, X., Zhu, Y., Guo, J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.031>
- Hu, W., Su, Y., Zhou, J., Zhu, H., Guo, J., Huo, H., & Gong, H. (2022). Foliar application of silicon and selenium improves the growth, yield and quality characteristics of cucumber in field conditions. *Scientia Horticulturae*, 294, 110776. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110776>
- Kaloterakis, N., van Delden, S. H., Hartley, S. E., & 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, 110383. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110383>
- Kovács, S., Kutasy, E., & Csajbók, J. (2022). The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*, 11(9), 1223. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>
- López-Cuen, P. I., Payán-Arzapalo, M. A., Samaniego-Gámez, B. Y., Valle-Gough, R. E., Ruelas-Islas, J. del R., & Núñez-Ramírez, F. (2024). Efecto del silicio en pepino cultivado en salinidad por macronutrientes. *Terra Latinoamericana*, 42, e2024. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.2024>
- Lozano-González, J. M., Valverde, C., Hernández, C. D., Martín-Esquinas, A., & Hernández-

- Apaolaza, L. (2021). Beneficial effect of root or foliar silicon applied to cucumber plants under different zinc nutritional statuses. *Plants*, 10(12), 2602. <https://doi.org/10.3390/plants10122602>
- Luan, H., Niu, C., Nie, X., Li, Y., & Wei, M. (2022). Transcriptome and physiological analysis of rootstock types and silicon affecting cold tolerance of cucumber seedlings. *Plants*, 11(3), 445. <https://doi.org/10.3390/plants11030445>
- Lyu, J., Jin, N., Meng, X., Jin, L., Wang, S., Xiao, X., Liu, Z., Tang, Z., & Yu, J. (2022). Exogenous silicon alleviates the adverse effects of cinnamic acid-induced autotoxicity stress on cucumber seedling growth. *Frontiers in Plant Science*, 13, 968514. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.968514>
- Núñez-Ambriz, R., & Apáez-Barrios, P. (2025). Vía de aplicación y dosis de silicio en la producción de pepino cultivado en tezontle. *Terra Latinoamericana*, 43, e2248. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2248>
- 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(8), 55–66. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i8.2435>
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A., & Nikolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Sharma, B., Kumawat, K. C., Tiwari, S., Kumar, A., Dar, R. A., Singh, U., & Cardinale, M. (2023). Silicon and plant nutrition—Dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: A review. *Pedosphere*, 33(4), 534–555. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>
- Sun, S., Yang, Z., Song, Z., Wang, N., Guo, N., Niu, J., Liu, A., Bai, B., Ahammed, G. 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>
- Thorne, S. J., Hartley, S. E., & Maathuis, F. J. M. (2020). Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops? *Frontiers in Plant Science*, 11, 1221. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01221>
- Tian, W., Li, Z., Gong, K., Wang, X., Shah, S., Wang, X., & Zhang, X. (2023). Sodium silicate improves cucumber seedling growth and substrate nutrients and reduces heavy metal accumulation in plants. *Horticulturae*, 9(9), 988. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9090988>
- Vaculík, M., Lukačová, Z., Bokor, B., Martinka, M., Tripathi, D. K., & Lux, A. (2020). Alleviation mechanisms of metal(loid) stress in plants by silicon: A review. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6744–6757. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa288>
- Wenneck, G. S., Saath, R., Rezende, R., Andrean, A. F. B. A., Santi, D. C., & Terassi, D. S. (2021). Análise econômica da utilização de silício no cultivo de couve-flor em ambiente protegido na região noroeste do Paraná. *Irriga*, 1(2), 335–343. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n2p335-343>
- Xavier, M. F. N., Flores, R. A., Cruz, D. R. C., Ferreira, I. V. L., Castro, J. P. V., Silva, M. L.,

- Muniz, M. P., Silva, V. B., Milagres, V. A. C., Abdala, K. O., Carmo, R. T., & Momesso, L. (2025). Foliar fertilization with a soluble silicon source can alter pigment production in leaves and increase fruit production in cucumbers (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 48(13), 2331–2348. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2477268>
- Zhu, Y., Jiang, X., Zhang, J., He, Y., Zhu, X., Zhou, X., Gong, H., Yin, J., & Liu, Y. (2020). Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.014>