

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Fuentes de silicio en aplicación foliar y radicular en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.)

Sources of silicon in foliar and root application in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.)

Authors/Autores: Anzaldo-Gudiño, G. E., Aguilar-Castillo, J. A., Balois-Morales, R., Alejo-Santiago, G., Sánchez-Monteón, A. L., Juárez-Rosete, C. R.

ID: e2211

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2211>

Received/Fecha de recepción: March 04th 2026

Accepted /Fecha de aceptación: September 14th 2026

Available online/Fecha de publicación: September 24th 2026

Please cite this article as/Como citar este artículo: Anzaldo-Gudiño, G. E., Aguilar-Castillo, J. A., Balois-Morales, R., Alejo-Santiago, G., Sánchez-Monteón, A. L., Juárez-Rosete, C. R. (2026). Sources of silicon in foliar and root application in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Revista Bio Ciencias*, 13, e2211. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2211>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original/ Original article

Fuentes de silicio en aplicación foliar y radicular en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.)

Sources of silicon in foliar and root application in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.)

Silicio en aplicación foliar y radicular en fresa /

Silicon in foliar and root application in strawberry

Anzaldo Gudiño, G. E. (ID)¹, Aguilar Castillo, J. A. (ID)², Balois Morales R. (ID)^{1,2}, Alejo Santiago G. (ID)^{1,2}, Sánchez Monteón, A. L. (ID)², Juárez Rosete, C. R. (ID)^{1,2}.

¹Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida, Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela km. 9. S/N, Xalisco, C.P. 63780, Nayarit, México.

²Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela km. 9. S/N, Xalisco, C.P. 63780, Nayarit, México.

*Autor de correspondencia:

Cecilia Rocío Juárez Rosete. Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida, Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela km. 9, S/N, Xalisco, C.P. 63780, Nayarit, México. Teléfono: (311) 7407661. E-mail: cecilia.juarez@uan.edu.mx

RESUMEN

El uso de silicio es una alternativa para mejorar la productividad y calidad de los cultivos. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de tres fuentes de silicio (silicato de potasio, dióxido de silicio + ácido ortosilícico y dióxido de silicio) y dos vías de aplicación (radicular y foliar) en el rendimiento y parámetros fisicoquímicos de fresa cv. San Andreas cultivada en sustrato. Se realizaron 18 aplicaciones durante el periodo experimental. Las variables evaluadas fueron la producción de frutos y, en fruto, el diámetro polar y ecuatorial, color, firmeza, pH, sólidos solubles totales, acidez titulable, índice de madurez y vitamina C. Los resultados mostraron que el dióxido de silicio incrementó significativamente la producción de frutos en un 56 % respecto al control. En frutos, esta fuente mejoró la firmeza (23 %), sólidos solubles totales (14 %), índice de madurez (28 %) y contenido de vitamina C (104 %). La aplicación foliar de las fuentes de silicio evaluadas fue 54% más eficiente que la radicular para la acumulación de vitamina C. Se concluye que el dióxido de silicio es la fuente más eficaz para potenciar el rendimiento y la calidad nutraceutica de la fresa, recomendándose la vía foliar para mejorar la acumulación de vitamina C.

PALABRAS CLAVE:

Nutrición mineral, Producción, Parámetros fisicoquímicos, Postcosecha.

Introducción

La fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) es un producto de alto valor comercial, sus frutos son apreciados por su sabor, aroma y propiedades nutricionales (González-Ramírez *et al.*, 2020; Aguilar *et al.*, 2019). El manejo agronómico del cultivo y la composición química de los frutos definen la calidad para el consumo en fresco, destacando sus características fisicoquímicas (González-Ramírez *et al.*, 2020; López-Valencia *et al.*, 2018). La producción de fresa tiene un alto impacto social

y económico a nivel mundial, que genera empleos de manera directa e indirecta (González-Ramírez *et al.*, 2020). International Trade Centre (ITC, 2025) ha reportado que en México para el 2024, se incrementó la producción de fresa, siendo la frutilla más exportada (4.58 %) a Estados Unidos, Canadá, Belice, Kuwait y Catar, ocupando el segundo lugar después de España. La Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO, 2025) reportó que en el 2023 los principales países productores de fresa fueron China, Rusia, Polonia, Estados Unidos y Turquía, generando mil millones de dólares anuales en valor comercial global. El Servicio de Información Agrícola y Pesquera (SIAP, 2025) reporta que para el año 2025, la producción en México fue de 696,112 toneladas y con un valor de más de 17 mil millones de pesos, destacando como entidades productoras Michoacán, Baja California y Guanajuato.

La producción agrícola, dentro de un manejo agronómico, ha orientado esfuerzos en la implementación de tecnologías, metodologías y prácticas que permitan incrementar la producción, disminuyendo costos, optimizando el tiempo y recursos (Velázquez-González *et al.*, 2022). En este sentido, uno de estos esfuerzos ha sido el sistema de producción en sustrato, debido a que es rentable y sostenible, lo que incrementa el rendimiento y calidad de los frutos, este sistema crea las condiciones ambientales y nutrimentales para el óptimo desarrollo de las plantas (Treftz & Omaye, 2015). Sin embargo, estos sistemas de producción se enfrentan a problemas, de tipo biótico o abiótico (Raffaelli *et al.*, 2025), lo que modifica la morfología y fisiología de las plantas, repercutiendo en la calidad y valor comercial de los frutos. El estrés biótico y abiótico constituye uno de los principales factores limitantes en la producción (Li & Wu, 2025). Ante esta problemática, el uso de silicio en la agricultura ha surgido como una alternativa para mitigar estos problemas ocasionados por el estrés biótico y abiótico (Hernández-Juárez *et al.*, 2024).

El silicio se considera un elemento benéfico para las plantas, debido a que promueve un mejor desarrollo y resistencia ante múltiples tipos de estrés o aumenta la asimilación de otros nutrientes (Trejo-Téllez *et al.*, 2007), aunque cada cultivo responde de manera diferente a la absorción de este mineral (Castellanos-González *et al.*, 2015). Existen diferentes fuentes de silicio como silicato de potasio, silicato de calcio, dióxido de silicio, ácido ortosilícico que pueden aplicarse vía radicular (fertirriego) o foliar para optimizar su absorción (Rajput *et al.*, 2021). Estas fuentes son altamente solubles y liberan silicio cuando se disuelven en agua, lo que facilita a la planta su absorción (Ma & Takahashi, 2002). El silicato de calcio proviene de rocas con composición granítica y derivados a partir de su metamorfismo y meteorización (Manning, 2010). Asimismo, existen fuentes biogénicas como el dióxido de silicio, formado por esqueletos de algas unicelulares llamadas diatomeas, cuyos caparazones silíceos, tras acumularse en el fondo marino y someterse a un proceso de fosilización, originan la diatomita, una roca sedimentaria de naturaleza silícea (Baglione, 2011). El aporte de silicio puede variar desde un 35-80 % en rocas ígneas, 60-70 % en metamórficas, hasta un 100 % según la aportación de la roca madre y depósitos biogénicos (Straaten, 2007).

Las fuentes de silicio difieren en su composición química, solubilidad y disponibilidad para las plantas. El ácido ortosilícico (H_4SiO_4) constituye la forma más disponible y directamente absorbida por las raíces, influyendo en el incremento de valores SPAD en hojas (Sanmartín-Galván *et al.*, 2023). El silicato de potasio (K_2SiO_3) libera silicio soluble y aporta potasio como elemento acompañante (Ma & Takahashi, 2002) y está relacionado con el incremento de los sólidos solubles totales y la firmeza en el fruto (Arce, 2012; Osuna, 2023; Adame-Adame & Morelos-Moreno, 2024). Por su parte, el dióxido de silicio (SiO_2) presenta menor solubilidad inicial, pero puede actuar como una fuente de liberación gradual (Manning, 2010), mejorando parámetros físicos del fruto como luminosidad (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2019) y firmeza (Munaretto, 2018; Giménez-Martínez, 2020; Ammar & Mohamed, 2024). Estas diferencias pueden influir en la absorción de nutrientes, tolerancia al estrés, rendimiento y calidad de los frutos (Liang *et al.*, 2005; Coskun *et al.*, 2019).

Sin embargo, existe la incógnita de qué fuente, método de aplicación y dosis pudiera ser la ideal y que permita optimizar sus beneficios, surgiendo como factor de estudio (Reyes-Pérez *et al.*, 2023). La aplicación de silicio en cultivos en sustrato puede mejorar la fisiología de la planta, mejorar producción y calidad del fruto, con ello se disminuye la aplicación de productos agroquímicos

convencionales, que suelen ser de alto costo y contaminantes para el medio ambiente (Hernández-Valencia *et al.*, 2022). A nivel vegetativo, el silicio fortalece la estructura celular y la rigidez de los tejidos, aumentando la resistencia al estrés (Lazo *et al.*, 2024). Asimismo, estimula la división celular, la asimilación y absorción de nutrientes y la eficiencia hídrica, lo que se traduce en mayor tasa fotosintética y acumulación de biomasa (Torres-Rodríguez *et al.*, 2024).

En condiciones donde existe un estrés por salinidad, su aplicación puede incrementar los compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y concentración mineral, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de la planta (Carballo-Méndez, 2019). Además, las plantas pueden excluir metales tóxicos en compartimientos específicos como la vacuola, minimizando su efecto dañino; el silicio facilita esta segregación y asegura que dichos metales se depositen en organelos donde resultan menos perjudiciales (Liang *et al.*, 2005). Durante la floración, acelera el proceso y reduce el número de días hasta la antesis, evidenciando una precocidad (Soriano-Saltos *et al.*, 2025). En cuanto a la calidad del fruto, el silicio promueve la expansión celular que incrementa el tamaño, interviene en la biosíntesis de pigmentos que mejoran la coloración, y refuerza las paredes celulares, lo que se traduce en mayor firmeza y mejor conservación postcosecha (Romero, 2019). Además, previene el estrés oxidativo y el pardeamiento fenólico (Torres-Rodríguez *et al.*, 2024). Al equilibrar la estructura de cloroplastos, integridad y desempeño del fotosistema II, manteniendo por más tiempo la calidad del fruto (Tripathi *et al.*, 2015).

Se ha demostrado que las aplicaciones de silicio incrementan la calidad de plántulas de fresa, en cultivo sin suelo (Li *et al.*, 2020), además, durante la etapa de trasplante, ha sido asociado a la resistencia bajo condiciones de temperatura elevadas (Xiao *et al.*, 2021). El silicio también está asociado a la absorción de nutrientes esenciales, así como a la formación de cutícula en las hojas, potencialmente retardando la incidencia de plagas y enfermedades (Osei *et al.*, 2023). También ha mostrado efectos estimulantes positivos sobre la biomasa y calidad del cultivo, incrementando el número de hojas y frutos (Liu *et al.*, 2021); adicionalmente, el silicio a bajas concentraciones a través de la fertilización foliar mantiene de forma constante la tasa fotosintética y reduce la transpiración, donde la mayor concentración de silicio se localizó en las hojas (Cruz, 2018). En fruto, la aplicación de silicio aumentó en 1.5 días la vida postcosecha (Peris-Felipo *et al.*, 2020), y tuvo un impacto positivo en parámetros como la acidez titulable, además de aumentar la concentración de flavonoides en frutos de fresa, demostrando que la biofortificación con silicio mejora las cualidades nutraceuticas de esta frutilla (Valentinuzzi *et al.*, 2017).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de tres fuentes de silicio aplicadas vía radicular y foliar para la producción de frutos y parámetros fisicoquímicos de frutos de fresa cv. San Andreas cultivadas en sustrato.

Material y Métodos

Sede del experimento

La investigación se realizó en un invernadero tipo túnel modificado de 4 m de altura con ventilación pasiva cenital y lateral, con una malla del 50 %. Como cubierta de la estructura, se utilizó un plástico agrícola HTA+ coextrusión pentacapa (Calibre 800) con un porcentaje de sombra del 25 % y 70 % de difusión de luz. Ubicado en la Unidad Académica de Agricultura de la Universidad Autónoma de Nayarit, Xalisco, Nayarit a 21°25'36.10" N y 104°53'26.79" O a una altitud de 972 m.

Tratamientos

Se evaluaron tres fuentes de silicio: silicato de potasio (K_2SiO_3) al 38 % (Respuest®, TEMISA®); óxido de silicio (SiO_2) al 50 % + ácido ortosilícico (H_4SiO_4) al 25 % (Erasil 222®, Era Minerals®); y óxido de silicio (SiO_2) al 92 % (Diatomix®). Los métodos de aplicación fueron vía radicular junto a la solución nutritiva y vía foliar hasta llegar a punto de goteo, dando un total de siete tratamientos junto

con el tratamiento control que consistió en no suministrar silicio de manera foliar ni radicular (Tabla 1), con un total de 18 aplicaciones durante todo el ciclo experimental, iniciando el día del trasplante y finalizando en la última cosecha. Las dosis aplicadas fueron de 50 ppm de silicio en todos los tratamientos. El diseño experimental fue factorial 3 x 2 en bloques completos al azar y 10 repeticiones, utilizando una planta por maceta como unidad experimental.

Tabla 1. Descripción de tratamientos evaluados en fresa cv. San Andreas.

Tratamiento	Fuente de silicio	Vía de aplicación	Dosis
T1	Solución nutritiva (control)	Raíz	0
T2	Silicato de potasio (K_2SiO_3)	Raíz	0 + 0.414 mL·L ⁻¹
T3	Dioxido de silicio (SiO_2) + ácido ortosilícico (H_4SiO_4)	Raíz	0 + 0.139 mL·L ⁻¹
T4	Dioxido de silicio (SiO_2)	Raíz	0 + 107 mg·L ⁻¹
T5	Silicato de potasio (K_2SiO_3)	Foliar	0 + 0.414 mL·L ⁻¹
T6	Dioxido de silicio (SiO_2) + ácido ortosilícico (H_4SiO_4)	Foliar	0 + 0.139 mL·L ⁻¹
T7	Dioxido de silicio (SiO_2)	Foliar	0 + 107 mg·L ⁻¹

Fuente: Elaboración propia

Manejo agronómico

El periodo de evaluación del experimento se realizó del 15 de enero al 15 de mayo del año 2024. Se utilizó como sustrato roca volcánica basáltica (tezontle negro) con diámetro de partícula de 0.3 a 0.8 mm, colocada en macetas de plástico semirrígido color negro con capacidad de un galón. Se utilizaron plántulas de fresa cv. San Andreas con una altura aproximada de 10 cm, con una separación entre plantas de 30 cm y entre hileras de 45 cm, con una densidad de plantación de 7 plantas·m². Se aplicó una solución preventiva a base de sales cuaternarias de amonio (FullGrow®, Agrosience®) en dosis de 2 mL·L⁻¹ durante el trasplante para la prevención de daño por patógenos. El riego se realizó manualmente, utilizando la solución nutritiva universal de Steiner (1961) al 50 % de concentración en todos sus iones durante todo el ciclo experimental.

Para el control de plagas y/o enfermedades se utilizó abamectina, extracto de ajo y 3,7-Dimetil-1,6-oxtadien-3-ol, d-1-metil-4 (1 metiletenil) ciclohexeno. Estos productos se utilizaron según las dosis recomendadas en la ficha técnica. Además, se llevó a cabo un registro de la temperatura y humedad relativa utilizando un termohigrómetro (JAGA® modelo HTC-2) como parámetros de monitoreo dentro del invernadero. La cosecha se realizó dos veces por semana durante cuatro semanas, iniciando el 11 de abril de 2024, cosechando los frutos con la coloración particular en la totalidad de la superficie de acuerdo con la escala BBCH 87 para fresa (Meier *et al.*, 1994).

Durante el periodo del experimento que consistió en los meses enero a mayo, se observó una variabilidad entre las temperaturas mínimas y máximas mensuales, siendo las mínimas de 7.1 y 11 °C y máximas que se registraron hasta los 40.8 °C (Figura 1). La temperatura media mostró una tendencia creciente a medida que avanzaban los meses durante el periodo de estudio. De manera similar, la humedad relativa presentó valores mínimos entre 33 y 37 % y máximos de 82 a 94 %, mientras que la humedad relativa media se mantuvo relativamente constante.

Variables evaluadas

Se evaluó producción de frutos ($\text{kg} \cdot \text{planta}^{-1}$) realizando la cosecha de los frutos de cada tratamiento en cada cosecha y se registra el peso con una balanza digital; el diámetro polar y ecuatorial de los frutos se midió utilizando un vernier digital (mm), la determinación del color en los frutos en la zona ecuatorial se utilizó un colorímetro de la marca Konica Minolta® y la lectura se relacionó con los parámetros (CIELCH) L^* , C^* y h° , en donde L^* es la luminosidad reflejada por el fruto (negro a blanco), C^* es cromaticidad y h° el ángulo Hue. La firmeza (N) en frutos fue determinada con un penetrómetro Force Gauge® modelo GY-4 puntal de 8 mm. El pH se midió directamente en el jugo proveniente de los frutos con un potenciómetro (HANNA® HI 2211). Los sólidos solubles totales (°Brix) se calcularon colocando directamente unas gotas de jugo de los frutos en un refractómetro (HANNA® HI 96801).

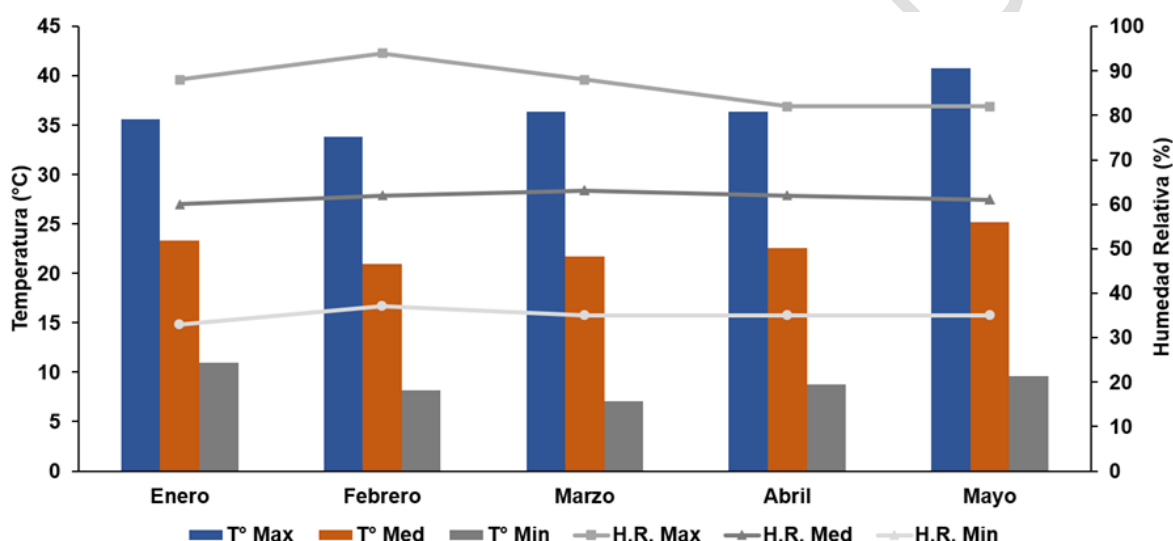


Figura 1. Temperatura y humedad relativa máxima, media y mínima registrada en los meses de enero a mayo 2024 dentro del invernadero. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos.

La acidez titulable (% ácido) se determinó utilizando el método oficial mediante titulación volumétrica (AOAC, 2023). Se diluyeron 5 mL de jugo de fresa con 25 mL de agua destilada en un vaso de precipitado de 10 mL y se agregaron tres gotas de fenolftaleína (1 % en alcohol) que actuará como indicador, en una bureta se añadió una solución de hidróxido de sodio (NaOH 0.1 N) y se tituló abriendo la válvula lentamente hasta observar que la muestra haya mantenido un vire de color rosa estable durante 30 segundos. Los resultados se expresaron en porcentaje de ácido cítrico, que es el ácido orgánico de mayor presencia en el fruto de fresa (Ecuación 1).

$$\text{Ecuación 1. \% ácido orgánico} = \frac{(V \cdot N \cdot \text{meq} \cdot 100)}{\text{Vol}}$$

Donde:

% ácido orgánico: es el porcentaje del ácido orgánico predominante.

V: el volumen en mL de NaOH usado para la titulación.

N: la normalidad del NaOH.

meq: el miliequivalente del ácido orgánico predominante (ácido cítrico = 0.064).

Vol: es el volumen en mL de la muestra.

El índice de madurez se obtuvo a partir de la relación sólidos solubles totales/acidez titulable. Se determinó dividiendo la cantidad de °Brix del fruto entre el porcentaje (%) de ácido cítrico presente en el mismo fruto (de la Cruz-Millan, 2012). La vitamina C se evaluó por el método de Dürüst *et al.* (1997), el cual consiste en preparar las siguientes soluciones: DCIP (2,6 diclorofenolindofenol sal disódica) a $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ en agua desionizada; amortiguador de acetatos compuesto por tres gramos de acetato de sodio anhidro, 7 mL de agua desionizada y 10 mL de ácido acético glacial. El procedimiento consistió en colocar en viales 50 μL de muestra obtenida a partir de dos gramos de pulpa fresca homogeneizada con 10 mL de ácido tricloroacético (TCA), los cuales se colocaron en un baño de hielo durante cinco minutos y posteriormente, se centrifugó a 18510 g durante 10 minutos, posteriormente se adicionaron 50 μL de amortiguador de acetatos y 400 μL de DCPI. Se midió la absorbancia a 520 nm en un lector de microplacas (Power Wave XS, Biotek). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico por cada 100 g de pulpa fresca (mg AAE/100 g.f.p).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de cada variable se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) en un diseño factorial con el programa estadístico de SAS®. Las variables que presentaron diferencias estadísticas con la prueba de F fueron sometidas a una comparación de medias de las fuentes de silicio y método de aplicación con el control con la prueba de Dunnett ($\alpha = 0.05$).

Resultados y Discusión

El suministro de silicio a plantas de fresa indistintamente de su método de aplicación presentó un aumento en su producción; los tratamientos con suministro de silicato de potasio (K_2SiO_3) y dióxido de silicio (SiO_2) tuvieron un aumento de 28 y 56 % por planta respectivamente, tanto en aplicación foliar como radicular con respecto a las plantas del tratamiento control (Tabla 2). En el caso específico de las frutillas, estos resultados concuerdan con lo reportado por Jarosz *et al.* (2025), quienes reportaron un aumento en la producción de frutos al suministrar silicio vía radicular en comparación con la aplicación vía foliar, del mismo modo, señalaron que dosis de silicio de 240 y $360 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ incrementaron la producción en comparación con el testigo. Shabani *et al.* (2025) reportan un aumento en la producción al suministrar 2 y $4 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ en plantas de fresa cv. Parus.

Resultados obtenidos por Silva *et al.* (2013) muestran un aumento en la producción al aplicar silicio de forma radicular y foliar, siendo la aplicación a la raíz más efectiva en plantas de fresa cv. Milsei Tudla. Las aplicaciones de silicio pueden influir positivamente en la producción, debido a que el silicio aumenta la absorción de nutrientes y mejora la actividad fotosintética, lo que genera una mayor producción de frutos (Abd-Alkarim *et al.*, 2017).

Uno de los parámetros de calidad en frutos de fresa es el color, en este sentido, los frutos cosechados de plantas de fresa tratados con silicio y en especial el dióxido de silicio presentaron el tono de color rojo característico de estas frutillas, con respecto a los frutos testigo que presentaron un tono de rojo más bajo (Tabla 3). Aunque el color puede variar ampliamente según la radiación solar (Agüero *et al.*, 2015), el silicio demostró un efecto regulador.

En fresa cv. Diamante, Voća *et al.* (2009) encontraron valores óptimos de luminosidad (L), croma (C) y ángulo de tono (h) en temporadas atípicas (altas temperaturas) de producción, valores entre 30.24 a 41.05, 25.92 a 34.13 y 44.51 a 56.06 respectivamente, por lo que se sugiere que el silicio ayuda a mantener los estándares de calidad comercial. Alvarado-Cepeda *et al.* (2020) reportaron valores máximos de 33.46, 33.81 y 1.25 en L, C y h respectivamente, sobre el color externo en frutos de fresa cultivados bajo malla sombra. Carbajal-Vázquez *et al.* (2019) reportan un aumento en la luminosidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*) en respuesta a aplicaciones foliares de SiO_2 con una dosis de $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; sin embargo, en concentraciones de $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ disminuye la luminosidad en el fruto. Conocer el color en frutos de fresa sirve para diagnosticar el grado de

madurez e índice de cosecha, además de la firmeza, sabor y apariencia (Martínez-Bolaños *et al.*, 2008).

Al respecto, se ha documentado que las aplicaciones de silicio contribuyen a la regulación y estabilidad del color del fruto por un periodo mayor al acumularse en la epidermis y cutícula, reforzando la pared celular, retrasando el ablandamiento y pardeamiento (Karaagra y Erogul, 2024). Además de influir en la síntesis y degradación de pigmentos, beneficiando al almacenamiento de carotenoides, antocianinas y fenoles, que participan en la coloración de los frutos (Karagiannis *et al.*, 2021), estos compuestos se asocian a la capacidad del silicio de accionar sistemas antioxidantes, reduciendo la oxidación de pigmentos y retardando la pérdida de color (Abidi *et al.*, 2023). Siendo el color un atributo visual fundamental para la aceptación por parte del consumidor (Plaza-Venegas *et al.*, 2025).

Tabla 2. Producción por planta y diámetros polar y ecuatorial en frutos de fresa por efecto de fuente de silicio y método de aplicación en frutos de fresa.

Fuente de silicio	Rendimiento de frutos (kg·m ²)	Diámetro polar en fruto (mm)	Diámetro ecuatorial en fruto (mm)
Control	0.960 ± 0.0121 ^b	41.060 ± 1.178 ^a	29.450 ± 0.769 ^a
K ₂ SiO ₃	1.240 ± 0.0136 ^a	38.777 ± 1.233 ^a	29.922 ± 0.829 ^a
SiO ₂ + H ₄ SiO ₄	1.050 ± 0.0124 ^b	38.430 ± 1.166 ^a	29.517 ± 0.826 ^a
SiO ₂	1.500 ± 0.0149 ^a	37.300 ± 0.998 ^a	28.647 ± 0.644 ^a
LSD	0.1127	4.1033	2.7796
Método de aplicación			
Raíz	1.19 ± 0.138 ^a	39.287 ± 0.828 ^a	29.102 ± 0.554 ^a
Foliar	1.18 ± 0.149 ^a	38.496 ± 0.811 ^a	29.666 ± 0.532 ^a
LSD	1.0248	2.2068	1.4949

Medias con diferente letra en cada variable son significativamente diferentes (Dunnett α= 0.05). ±: error estándar. LSD: diferencia mínima significativa. Fuente: Elaboración propia.

Los frutos cosechados de plantas tratadas con silicio mostraron un aumento de la firmeza, siendo las aplicaciones de dióxido de silicio + ácido ortosilícico y dióxido de silicio las que mostraron diferencias significativas, respecto al control, aumentando 12 y 23 % la firmeza del fruto (Tabla 3). Este efecto puede atribuirse a que el silicio puede aumentar el contenido de hemicelulosa y lignina, aumentando la dureza en las paredes celulares; además de que se puede colocar como una capa bajo la cutícula (Kim *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2015); también se encuentra en el lumen y espacios intercelulares de las plantas en forma de sílice amorfa (Ma & Yamaji, 2006), en epidermis celulares, estomas, tricomas y elementos vasculares, confiriéndole a las diferentes estructuras de la planta mayor rigidez, incluido el fruto (Munaretto *et al.*, 2018).

Al respecto, Najarro (2025) reportó un aumento del 20 % en la firmeza de fruto de fresa con la adición de silicio a plantas de fresa en comparación con los frutos de fresa provenientes de plantas control. Este efecto positivo coincide con los resultados obtenidos por Munaretto *et al.* (2018; 2020) en frutos de mora 'Xavante' y fresa 'Albió'. Resultados similares obtuvo Giménez-Martínez (2020), quien reportó un aumento en la firmeza de frutos en tomate con el suministro diario de SiO₂ con una dosis de 0.6 mmol·L⁻¹. Por otra parte, las plantas a las que se les suministró silicio producen frutos más firmes y pueden ser menos susceptibles al ataque de plagas y enfermedades (Galati *et al.*,

2015); además, tienden a aumentar la vida poscosecha (Dias *et al.*, 2023). Los frutos con una mayor firmeza guardan una relación directamente proporcional a una mayor vida de anaquel y comercial (Pistón *et al.*, 2021). Al mantener el tejido firme, detiene el ablandamiento de las paredes celulares, reduciendo la deshidratación y pérdida de peso durante el almacenamiento (Franco-Gaytán *et al.*, 2018) y evita lesiones por daño físico durante el transporte (Moya-León *et al.*, 2019).

La fuente de silicio (Tabla 4) no afecta el pH de los frutos cosechados. En este estudio el control mostró un aumento de la acidez de 6 a 7 % con respecto a los demás tratamientos. Los frutos obtenidos de plantas a las que se les suministró silicio se encuentran muy cercanos al rango mínimo reportado por Gholami *et al.* (2025), quienes sitúan un rango de 3.3 a 3.6 como valores de pH aceptables para frutos de fresa de calidad comercial.

Para el contenido de sólidos solubles totales (Tabla 4), los frutos obtenidos de plantas con aplicación de SiO₂ presentaron diferencia estadística respecto a los demás tratamientos, aumentando los sólidos solubles totales en un 14 % en comparación con el control. Nada (2020) menciona que cuando la dosis de silicato de potasio aumentó a 0.6 g·L⁻¹ mejoraron parámetros como lo son sólidos solubles totales y acidez titulable. Yaghubi *et al.* (2019) mencionaron que la incorporación de silicio a la planta de fresa de 1500 ppm podría mejorar el contenido de sólidos solubles totales y acidez titulable cuando no existe un estrés por salinidad. Resultados similares fueron reportados por Agapito-Hernández (2023), con un aumento en los sólidos solubles totales al adicionar SiO₂ aplicado de forma conjunta vía drench y foliar en plantas de pepino (*Cucumis sativus*). Asimismo, Peña & Galecio (2019) reportaron un aumento en relación con los sólidos solubles totales en frutos de maracuyá (*Passiflora edulis*) al suministrar a la planta dosis de silicio de 25 y 100 kg·ha⁻¹. Cázares-Flores *et al.* (2022), informaron un aumento en el contenido total de azúcares en frutos de pepino al suministrar silicio en conjunto con cloro en dosis de 20:20 mg·L⁻¹ aplicadas vía radicular.

Tabla 3. Parámetros de color (L°, C° y h°) y firmeza por efecto de fuente de silicio y método de aplicación en frutos de fresa.

Fuente de silicio	Luminosidad (L*)	Chroma (C*)	Hue (h*)	Firmeza (N)
Control	36.61 ± 0.36 ^b	39.87 ± 0.69 ^a	37.01 ± 0.67 ^a	7.01 ± 0.21 ^b
K ₂ SiO ₃	37.82 ± 0.37 ^b	39.77 ± 0.40 ^a	37.59 ± 0.51 ^a	7.39 ± 0.24 ^b
SiO ₂ + H ₄ SiO ₄	37.20 ± 0.42 ^b	39.98 ± 0.53 ^a	37.71 ± 0.54 ^a	7.90 ± 0.30 ^a
SiO ₂	38.37 ± 0.43 ^a	40.71 ± 0.46 ^a	39.06 ± 0.64 ^a	8.67 ± 0.24 ^a
LSD	1.348	1.818	2.225	0.862
Método de aplicación				
Raíz	37.36 ± 0.30 ^a	39.96 ± 0.39 ^a	37.87 ± 0.45 ^a	7.77 ± 0.21 ^a
Foliar	37.63 ± 0.28 ^a	40.21 ± 0.36 ^a	37.81 ± 0.40 ^a	7.96 ± 0.18 ^a
LSD	0.794	1.070	1.197	0.508

Medias con diferente letra en cada variable son significativamente diferentes (Dunnett α= 0.05). ±: error estándar. LSD: diferencia mínima significativa. N: Newtons.

Fuente: Elaboración propia.

El silicio está relacionado con el aumento del ácido giberélico en plantas, lo que favorece la elongación celular y la conversión de azúcares complejos en simples mediante la enzima alfa-amilasa en frutos climatéricos, resultando en frutos con mayor tamaño y una mayor acumulación de azúcares (Lee *et al.*, 2010). La fresa, al ser un fruto no climatérico, acumula bajos niveles de almidón que disminuyen en etapas tempranas del desarrollo (Souleyre *et al.*, 2004). Por lo tanto, este incremento en el contenido de azúcares puede deberse al aumento de la clorofila y eficiencia fotosintética, ya que los azúcares y ácidos orgánicos que se producen en la hoja pueden moverse a

órganos como los frutos (Yaghubi *et al.*, 2019) y la disolución de la pared celular (Moya-León *et al.*, 2019).

En este sentido, Roudeillac & Trajkovski (2003) mencionan que el dulzor de la fresa debe situarse entre los 7 y 12 °Brix, para estar dentro del rango de las recomendaciones en la calidad poscosecha. Los datos obtenidos en este estudio (Tabla 4) demuestran que los frutos con el suministro de cada una de las fuentes de silicio evaluadas se encuentran en los rangos establecidos. La barrera que otorga el silicio amorfo en las hojas aumenta la eficiencia fotosintética (Ma & Yamaji, 2006; Markovich *et al.*, 2017), cuyos asimilados contribuyen a la formación de azúcares que posteriormente se depositarán en el fruto.

En cuanto al índice de madurez (Tabla 4), el tratamiento SiO₂ mostró los valores más altos en comparación con las demás fuentes y control, siendo 28 % superior respecto a este último; aunque las otras fuentes evaluadas también fueron superiores al control, no se mostraron diferencias estadísticas. En comparación con lo reportado por Ziogas *et al.* (2022), quienes encontraron una disminución en la relación al índice de madurez en frutos de mandarina (*Citrus clementina* Hort. Ex Tan) al aplicar un producto a base de SiO₂ y CaO en comparación con los frutos del tratamiento testigo De la Cruz-Millán (2012), no encontró diferencias en dosis de 100 y 400 mg·L⁻¹ de K₂SiO₃ al suministrarse en aplicaciones foliares con respecto al control en frutos de fresa. En este tipo de frutos un índice de madurez más alto se asocia con la calidad organoléptica, que, de acuerdo con Gómez (2004), se sitúa entre 8 y 9 para frutos de fresa con tonalidad rojiza en su totalidad. Patel *et al.* (2023), establecen un rango óptimo entre 8.5 y 14 en la relación SST/AT, fuera de estos límites el consumidor rechaza el producto debido al desbalance organoléptico. Cualquier modificación que reduzca los sólidos solubles totales o cambios drásticos en el pH, disminuyen el índice de sabor global, mermando la competitividad de la fruta en los canales de distribución en fresco (Alvarado-Cepeda *et al.*, 2020).

Tabla 4. Parámetros químicos por efecto de fuente de silicio y método de aplicación en frutos de fresa.

Fuente de silicio	pH	Sólidos solubles totales (°Brix)	Acidez titulable (% CA)	Índice de madurez
Control	3.470 ± 0.052 ^a	6.967 ± 0.180 ^b	0.960 ± 0.024 ^a	7.283 ± 0.244 ^b
K ₂ SiO ₃	3.261 ± 0.019 ^b	7.128 ± 0.165 ^b	0.864 ± 0.032 ^a	8.320 ± 0.302 ^b
SiO ₂ + H ₄ SiO ₄	3.283 ± 0.028 ^b	7.162 ± 0.145 ^b	0.880 ± 0.037 ^a	8.219 ± 0.302 ^b
SiO ₂	3.276 ± 0.027 ^b	7.972 ± 0.133 ^a	0.864 ± 0.040 ^a	9.361 ± 0.436 ^a
LSD	0.128	0.591	0.127	1.217
Método de aplicación				
Raíz	3.309 ± 0.033 ^a	7.365 ± 0.144 ^a	0.888 ± 0.029 ^a	8.445 ± 0.346 ^a
Foliar	3.336 ± 0.030 ^a	7.250 ± 0.148 ^a	0.896 ± 0.020 ^a	8.145 ± 0.230 ^a
LSD	0.074	0.344	0.074	0.708

Medias con diferente letra en cada variable son significativamente diferentes (Dunnett α= 0.05). ±: error estándar. LSD: diferencia mínima significativa. °Brix: grados Brix; % CA: porcentaje de ácido cítrico.

Fuente: Elaboración propia.

El contenido de vitamina C, en los frutos obtenidos de plantas con suministro de silicio mostraron valores superiores con relación al control, sin embargo, los frutos con SiO₂ y K₂SiO₃ fueron estadísticamente diferentes al control, con un aumento del 104 % y 83 % con respecto a los frutos de las plantas del control; además, la aplicación foliar de cualquiera de las fuentes de silicio evaluadas mostró una mayor acumulación de vitamina C en el fruto, con un aumento de 54 % en comparación con la aplicación radicular (Tabla 5). Resultados que concuerdan con los de Nada (2020), quien reportó que dosis de silicato de potasio de hasta 0.6 g·L⁻¹ incrementan significativamente el contenido de vitamina C en frutos de fresa. Estos datos superan lo reportado

por Pacheco (2023), quien observó incrementos leves en fresa cv. Albión sin llegar a la significancia estadística ($P < 0.05$). Shabani *et al.* (2025) reportaron un aumento gradual en el contenido de vitamina C en frutos de fresa cuando la dosis de silicio aumento de 2 a 4 mL·L⁻¹.

Por otra parte, Torres-Rodríguez (2024) evidenciaron un incremento del 5 % en el contenido de vitamina C con dosis de 3 mM·L⁻¹ de SiO₂ en conjunto con la aplicación de ácidos húmicos. La aplicación de silicio contribuye a un aumento en la expresión de genes relacionados con la vitamina C y la actividad antioxidante, con ello se reduce el estrés oxidativo en frutos al disminuir radicales libres, lo que ayuda a conservar la vitamina C (He *et al.*, 2025). Similar a lo reportado por Romero-Aranda *et al.* (2006), donde la mayor acumulación de vitamina C en tomate al suministrar silicio vía foliar fue mayor en comparación con la vía radicular, debido a que la aplicación radicular de silicio puede tener limitaciones debido a su lenta movilidad hacia los órganos aéreos de la planta como las hojas, donde se sintetiza la mayoría de los antioxidantes, incluida la vitamina C (Ma y Takahashi, 2002).

Tabla 5. Contenido de vitamina C por efecto de fuente de silicio y método de aplicación en frutos de fresa.

	Vitamina C (mg AAE /100 g.f.p.)
Fuente de silicio	
Control	10.246 ± 0.429 ^b
K ₂ SiO ₃	18.773 ± 1.706 ^a
SiO ₂ + H ₄ SiO ₄	12.932 ± 0.998 ^b
SiO ₂	20.956 ± 1.795 ^a
LSD	3.683
Método de aplicación	
Root	13.476 ± 1.079 ^b
Foliar	17.978 ± 1.328 ^a
LSD	2.155

Medias con diferente letra en cada variable son significativamente diferentes (Dunett $\alpha = 0.05$). $\pm$: error estándar. LSD: diferencia mínima significativa. mg AAE /100 g.f.p.: mg equivalente de ácido ascórbico por cada 100 g de pulpa fresca.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La suplementación con silicio representa una alternativa positiva para mejorar la productividad y la calidad nutraceutica de la fresa cv. San Andreas cultivada en roca volcánica basáltica bajo condiciones de invernadero. Entre las fuentes evaluadas, el dióxido de silicio (SiO₂) se posiciona como la fuente más efectiva, al mostrar mayor efecto sobre la producción de frutos y sobre los atributos de calidad del fruto, lo que sugiere una mayor eficiencia agronómica de esta fuente.

La aplicación foliar de silicio fue el método de aplicación más efectivo para incrementar el contenido de vitamina C en los frutos, logrando una acumulación superior en comparación con la aplicación vía radicular. Esto evidencia la importancia del método de aplicación sobre la calidad nutraceutica del fruto.

Los resultados obtenidos indican que el uso de SiO₂ mediante aspersiones foliares, representa una estrategia para mejorar la productividad y calidad del fruto en el cultivo de fresa en sustrato, buscando mejorar el valor comercial, reduciendo el uso de insumos convencionales y contribuyendo a una producción más sostenible.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, GEAG, CRJR; desarrollo de la metodología, GEAG, CRJR, RBM, JAAC, GAS; manejo de software, GEAG, JAAC; validación experimental, CRJR, JAAC, RBM; análisis de resultados, JAAC, GEAG, GAS; Manejo de datos, ALSM, GEAG; escritura y preparación del manuscrito, GEAG, CRJR; redacción, revisión y edición GEAG, GAS, CRJR; administrador de proyectos, CRJR, ALSM; adquisición de fondos, CRJR.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación recibió financiamiento del programa “Fortalecimiento al posgrado de calidad con recursos provenientes del impuesto especial del 15 % destinado a la UAN, patronato 2023”.

Declaraciones éticas

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnológica e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para estudios de Maestría BECA 4011315. A la Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida de la Universidad Autónoma de Nayarit. Al Laboratorio de Tecnología de Alimentos por facilitar sus instalaciones y equipos para el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Abd-Alkarim, E., Bayoumi, Y., Metwally, E., & Rakha, M. (2017). Silicon supplements affect yield and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in net houses. *African Journal of Agricultural Research*, 12(31), 2518-2523. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12484>
- Abidi, W., Akrimi, R., Hajlaoui, H., Rejeb, H., & Gogorcena, Y. (2023). Foliar fertilization of potassium silicon improved postharvest fruit quality of peach and nectarine [*Prunus persica* (L.) Batsch] cultivars. *Agriculture*, 13(1), 195. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010195>
- Adame-Adame, J., & Morelos-Moreno, A. (2024). Influencia del Silicio en la calidad de fruto de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) [Memoria]. *I Simposio Avances en la investigación básica y aplicada en el Agro mexicano*. Loma Bonita, México. 25. <https://www.unpa.edu.mx/libros/Memorias%201%20SimposioAgro.pdf>
- Agapito-Hernández, F. J. (2023). Efecto del silicio en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. División de agronomía]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/49005>

- Agüero, J. J., M. Salazar, D. S. Kirschbaum & E. F. Jerez. (2015). "Factors affecting fruit quality in strawberries grown in a subtropical environment". *International Journal of Fruit Science* 15: 223-234. <https://doi.org/10.1080/15538362.2015.1017427>
- Aguilar, T. M., Volke, H. V. H., Sánchez, G. P., Pérez, G. M., & Fajardo F. M. L. (2019). Concentración y extracción de macronutrientes en cuatro variedades de fresa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(6), 1287-1299. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1552>
- Alvarado-Cepeda, Y. A., Mendoza-Villarreal, R., Sandoval-Rangel, A., Vega-Chávez, J. L., & Franco-Gaytán, I. (2020). Calidad fisicoquímica y sensorial de frutos de fresas obtenidos en dos sistemas de cultivo. *RIIIT-Revista internacional de investigación e innovación tecnológica*, 8(43), 18-29. <https://riiit.com.mx/ojs/index.php/riiit/article/view/102>
- Ammar, M. I., & Mohamed, H. H. (2024). Effect of Diatomaceous Earth on Certain Pests as well as Yield Quality of Cucumber Plants Under Greenhouse Conditions. *New Valley Journal of Agricultural Science*, 4(4), 1-15. https://web.archive.org/web/20250409193559/https://nvjas.journals.ekb.eg/article_392114_1_28a8207449959c8d6bbc525e0e56396.pdf
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2023). AOAC Official method 942.15 Acidity (titratable) of fruit products. Official Methods of Analysis of AOAC International. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3390>
- Arce, R. M. H. (2012). Nutrición silíceas en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/49121d1c-fa59-4b23-8701-cd2bc87725b0/content>
- Baglione, L. (2011). Usos de la tierra diatomea. *Revista Técnicaña*, 27, 31-32. https://saltonverde.com/wp-content/uploads/2015/tec_no27_2011_p33-34.pdf
- Carbajal-Vázquez, V. H., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Alcántar-González, G., Sánchez-García, P., Ramírez-Olvera, S. M., & de la Luz, M. (2019). Dióxido de silicio mejora el color y la concentración de licopeno en tomates sometidos a estrés salino. *Desarrollo científico en México*. 278-282. https://www.researchgate.net/publication/333056332_DIOXIDO_DE_SILICIO_MEJORA_EL_COLOR_Y_LA_CONCENTRACION_DE_LICOPENO_EN_TOMATES_SOMETIDOS_A_ESTRES_SALINO
- Carballo-Méndez, F. J. (2019). Efecto del silicio en plantas sometidas a estrés salino [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18339>
- Castellanos-González, L., de Mello-Prado, R., & Silva-Campos, C. N. (2015). El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. *Cultivos Tropicales*, 36, 16–24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193243640002>
- Cázar-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. D. 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. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.994>
- Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J. G., Reynolds, O., Ma, J. F., Kronzucker, H. J., & Bélanger, R. R. (2019). The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*, 221(1), 67–85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>
- Cruz, J. P. H. (2018). Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) a la aplicación de silicio [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados]. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/3058/Cruz_Hipolito_JP_MC_Edaforologia_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- De la Cruz-Millán, M. G. (2012). Fertilización foliar con potasio, calcio y silicio en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de horticultura]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/47a5adbd-2542-4863-be51-49fe0561f52b/content>
- Dias, da S. A., Pio, R., Carvalho, R. L. A., Siddique, A. M., Ferreira, S. N., Maranhã, P. P., & Milagres, R. C. H. (2023). Silicon application for the production and quality of raspberry fruit in

- a subtropical region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58, e03371. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03371>
- Dürüst, N., Sümengen, D., & Dürüst, Y. (1997). Ascorbic acid and element contents of foods of Trabzon (Turkey). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(6), 2085–2087. <https://doi.org/10.1021/jf9606159>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2025). The statistics division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Franco-Gaytán, I., Saucedo-Veloz, C., Calderón-Zavala, G., Cruz-Huerta, N., Teliz-Ortiz, D., & Galicia-Cabrera, R. M. (2018). Calidad y vida de anaquel de tres cultivares de fresa (*Fragaria ananassa*) tratadas con concentraciones altas de CO₂ por periodo corto. *Agrociencia*, 52(3), 393-406. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1677/1677>
- Galati, V. C., Guimarães, J. E. R., Marques, K. M., Fernandes, J. D. R., Cecílio Filho, A. B., & Mattiuz, B. H. (2015). Aplicação de silício, em hidroponia, na conservação pós-colheita de alface americana 'Lucy Brown' minimamente processada. *Ciência Rural*, 45(11), 1932-1938. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140334>
- Gholami, R., Aguilinategh, N., & Rabbani, H. (2025). Investigating the physicochemical properties of strawberries and classification by an E-Nose during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2025(1), 2322442. <https://doi.org/10.1155/jfpp/2322442>
- Giménez-Martínez, J. M. (2020). Efecto del silicio sobre la productividad de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tipo RAF en cultivo sin suelo [Tesis de Licenciatura, Universidad de Almería, Escuela superior de ingeniería]. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/9750/GIMENEZ%20MARTINEZ,%20JOSE%20MANUEL.pdf?sequence=1>
- Gómez, C. R. (2004). Fresa variedad Chandler (*Fragaria chiloensis* L.). In: Rojas, A. J. M., Peñuela, M. A. E., Gomez, P. C. R., Aristizábal, V. G. E., Chaparro, C. M. C., & López, R. J. A. Caracterización de los productos hortofrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad (pp 145–151). *Centro Nacional de Investigaciones de Café*. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/828/16/Fresa%20variedad%20Chandler.pdf>
- González-Ramírez, M. G., Santoyo-Cortés, V. H., Arana-Coronado, J. J., & Muñoz-Rodríguez, M. (2020). The insertion of Mexico into the global value chain of berries. *World Development Perspectives*, 20, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2020.100240>
- He, B., Wei, Y., Wang, Y., Zhong, Y., Fan, M., Gong, Q., Lu, S., Hassan, M. U., & Li, X. (2025). Silicon application improves tomato yield and nutritional quality. *BMC Plant Biology* 25, 252. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06249-8>
- Hernández-Juárez, A., Ruiz-Aguilar, M. Y., Aguirre-Uribe, L. A., Ramírez-Barrón, S. N., Pérez-Luna, Y. del C., & Castro-del Ángel, E. (2024). El papel biológico del silicio en cultivos agrícolas: su contribución al control de plagas y enfermedades: Silicio: Defensa biológica agrícola. *Revista Mexicana De Agroecosistemas*, 11(1). <https://doi.org/10.60158/rma.v11i1.421>
- Hernández-Valencia, R. D., Juárez-Maldonado, A., Pérez-Hernández, A., Lozano-Cavazos, C. J., Zermeno-González, A., & González-Fuentes, J. A. (2022). Influencia de fertilizantes orgánicos y del silicio sobre la fisiología, el rendimiento y la calidad nutracéutica del cultivo de fresa. *Nova scientia*, 14(28). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052022000100101
- International Trade Centre (ITC). 2025. Lista de los exportadores para el producto seleccionado Producto: 081010 Fresas "frutillas", frescas. <https://www.trademap.org/en/goods/time-series/exports/c/484/c/000/p/081010/byPartner/year/default/direct/values/USD/lines>
- Jarosz, Z., Dzida, K., Zydlik, Z., Jarosz, M., Kamiński, S., & Pitura, K. (2025). Effect of foliar and root silicon supply on yielding and gray mold incidence in strawberry pot cultivation. *Agriculture*, 15(4), 401. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040401>
- Karaagra, B., & Eroglu, D. (2024). Determination of the effect of silicon foliar application on the quality and post harvest resistance of sweet cherry. *Applied Ecology & Environmental Research*, 22(5). http://doi.org/10.15666/aeer/2205_46934707

- Karagiannis, E., Michailidis, M., Skodra, C., Molassiotis, A., & Tanou, G. (2021). Silicon influenced ripening metabolism and improved fruit quality traits in apples. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.037>
- Kim, S. G., Kim, K. W., Park, E. W., & Choi, D. (2002). Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology*, 92(10), 1095-1103. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.10.1095>
- Lazo, S. I. B., Villaseñor, O. D. R., Luna, R. Á. E., Rodríguez, D. I., & Cun, C. J. V. (2024). Efectos de la aplicación de diferentes fuentes de silicio foliar en el cultivo de pimiento, Var: Yolo Wonder. *Ab intus FAV-UNRC*, 7(13). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13136285>
- Lee, S. K., Sohn, E. Y., Hamayun, M., Yoon, J. Y., & Lee, I. J. (2010). Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry System* 80, 333–340. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9299-6>
- Li, C., & Wu, Y. (2025). Advances and future directions in biotic and abiotic stress responses of horticultural plants. *Horticulturae*, 11(11), 1405. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111405>
- Li, Y., Xiao, J., Hu, J., & Jeong, B. R. (2020). Method of silicon application affects quality of strawberry daughter plants during cutting propagation in hydroponic substrate system. *Agronomy*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111753>
- Liang, Y. C., Sun, W. C., Si, J., & Römhild, V. (2005). Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology*, 54(5), 678–685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01246.x>
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015). Silicon in agriculture. From theory to practice. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>.
- Liu, B., Asiana, C., Wileman, H., Jin, X. & Hall, A. M. (2021). Benefits of using silicon as a nutrient in sustainable strawberry production. *Acta Horticulturae*, 1309(7), 413–419. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.60>
- López-Valencia, D., Sánchez-Gómez, M., Acuña-Caita, J. F., & Fischer, G. (2018). Propiedades fisicoquímicas de siete variedades destacadas de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivadas en Cundinamarca (Colombia), durante su maduración. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(1), 147-162. https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num1_art:528
- Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. *Elsevier Science*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51166-9.X5000-3>
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in plant science*, 11(8), 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- Manning, D. A. (2010). Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agronomy for sustainable development*, 30(2), 281-294. <https://doi.org/10.1051/agro/2009023>
- Markovich, O., Steiner, E., Kouřil, Š., Tarkowski, P., Aharoni, A. & Elbaum, R. (2017). Silicon promotes cytokinin biosynthesis and delays senescence in *Arabidopsis* and *Sorghum*. *Plant, Cell & Environment*. 40,1189-1196. <https://doi.org/10.1111/pce.12913>
- Martínez-Bolaños M., Nieto-Ángel D., Téliz-Ortiz, D., Rodríguez-Alcazar J., Martínez-Damian M. T., Vaquera-Huerta H. & Carrillo M.O. (2008). Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares mexicanos y estadounidenses. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14(2): 113-119. <https://revistas.chapingo.mx/horticultura/revista/articulos/viewer.html?file=rchshXIV14.pdf>
- Meier, U., Graf, H., Hack, H., Hess, M., Kennel, W., Klose, R., Mappes, D., Seipp, D., Stauss, R., Streif, J., & van den Boom, T. (1994). Phänologische Entwicklungsstadien des Kernobstes (*Malus domestica* Borkh. und *Pyrus communis* L.), des Steinobstes (*Prunus*-Arten), der Johannisbeere (*Ribes*-Arten) und der Erdbeere (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 46(7), 141-153. https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00067136
- Moya-León, M. A., Mattus-Araya, E., & Herrera, R. (2019). Molecular events occurring during softening of strawberry fruit. *Frontiers in Plant Science*, 10, 615. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00615>

- Munaretto, L. M., Botelho, R. V., Resende, J. T. V., Schwarz, K., & Sato, A. J. (2018). Productivity and quality of organic strawberries pre-harvest treated with silicon. *Horticultura Brasileira*, 36(1), 40-46. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620180107>
- Munaretto, L. M., Silva, T., Vasconcelos-Botelho, R., & Vilela-de-Resende, J. T. (2020). Qualidade de amoras-pretas cv. Xavante tratadas em pré-colheita com silício. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science/Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, 13(1). [10.5935/PAeT.V13.e6495](https://doi.org/10.5935/PAeT.V13.e6495)
- Nada, M. (2020). Effect of Foliar Application with Potassium Silicate and Glycine Betaine on Growth and Early Yield Quality of Strawberry Plants. *Journal of Plant Production*, 11(12), 1295-1302. https://www.academia.edu/44642120/Journal_of_Plant_Production_Effect_of_Foliar_Application_with_Potassium_Silicate_and_Glycine_Betaine_on_Growth_and_Early_Yield_Quality_of_Strawberry_Plants?auto=download
- Najarro, G. C. A. (2025). Efecto de la aplicación foliar de biosílice, boro y zinc en el rendimiento y calidad de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) bajo cubierta. Ayacucho – 2750 m.s.n.m. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/8218>
- Osei, A. F., Jin, X., Abdullah, W. Z. B. W., & Sidique, S. N. M. (2023). Silicon improves strawberry plants nutrient uptake and epicuticular wax formation in a rhizosphere cooling system. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2023(2), 1–10. <https://doi.org/10.35495/ajab.2022.060>
- Osuna, Z. A. P. (2023). Efecto de silicio y sustancias húmicas para atenuar el estrés salino en pepino [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/49757>
- Pacheco, M. G. E. (2023). Efectos de ácidos húmicos y silicio en producción de fresa (*Fragaria* spp.) variedad “Albión” en diferentes concentraciones [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura]. <https://repositorio.uaaan.mx/bitstream/handle/123456789/49126/Pacheco%20Maldonado%20c%20Gustavo%20%20Eduardo.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Patel, H., Taghavi, T., & Samtani, J. B. (2023). Fruit quality of several strawberry cultivars during the harvest season under high tunnel and open field environments. *Horticulturae*, 9(10), 1084. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101084>
- Peña, R. A., & Galecio, J. M. A. (2019). Efecto del silicio orgánico en el rendimiento de maracuyá (*Passiflora edulis*), cultivada en Somate-Sullana. *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 6(1), 25–37. <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2019v6n1.002>
- Peris-Felipo, F. J., Benavent-Gil, Y., & Hernández-Apaolaza, L. (2020). Silicon beneficial effects on yield, fruit quality and shelf-life of strawberries grown in different culture substrates under different iron status. *Plant Physiology and Biochemistry*, 152, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.026>
- Pistón, F., Pérez, A. G., Sanz, C., & Refoyo, A. (2021). Strawberry postharvest shelf life is related to total acid content and fruit firmness. *Acta Horticulturae* 1309: 869-872. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.124>
- Plaza-Vanegas, G. R., Bermello-Mendoza, K. O., Cárdenas-Briones, D. K., & González-Cevallos, J. D. (2025). Evaluación colorimétrica y microbiológica de fresas recubiertas con almidón de yuca. *Polo del Conocimiento*, 10(4), 2049-2063. <https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/9433>
- Raffaelli, D., Qaderi, R., Mazzoni, L., Mezzetti, B., & Capocasa, F. (2025). Yield and sensorial and nutritional quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) fruits from plants grown under different amounts of irrigation in soilless cultivation. *Plants*, 14(2), 286. <https://doi.org/10.3390/plants14020286>
- Rajput, V. D., Minkina, T., Feizi, M., Kumari, A., Khan, M., Mandzhieva, S., Sushkova, S., El-Ramady, H., Verma, K. K., Singh, A., Hullebusch, E. D. van, Singh, R. K., Jatav, H. S., & Choudhary, R. (2021). Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 10(8), 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>

- Reyes-Pérez, J. J., Rodríguez-Rodríguez, S., Torres-Rodríguez, J. A., Llerena-Ramos, L. T., Hernández-Montiel, L. G., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2023). Biofortificación con silicio en el crecimiento y rendimiento de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en ambiente controlado. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1749>
- Romero, M. R. O. (2019). Aplicación foliar y al suelo de fuentes de silicio para mejorar la calidad postcosecha en limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados]. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/3581>
- Romero-Aranda, M. R., Jurado, O., & Cuartero, J. (2006). Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, 163(8), 847–855. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.05.010>
- Roudeillac, P. & Trajkovski, K. (2003). Breeding for fruit quality and nutrition in strawberries. *Acta Horticulturae* 649: 55-60. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.649.7>
- Sanmartín-Galván, J., Cuenca-Moreno, A., Luna-Romero, Á., Jaramillo-Aguilar, E., & Villaseñor-Ortiz, D. (2023). Efecto nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano (*Musa* spp.) en Ecuador. *Agronomía Costarricense*, 47(2), 47-56. <http://doi.org/10.15517/rac.v47i2.56131>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2025, november 10). Anuario estadístico de la producción agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Silva, M. L. S., Resende, J. T. V. de, Trevizani, A. R., Figueiredo, A. S. T., & Schwarz, K. (2013). Influence of silicon on production and fruit quality of strawberry. *Semina: Ciências Agrárias*, 34(6Supl1), 3411–3424. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3411>
- Shabani, E., Zivdar, S., Rahnama Ghahfarokhi, A., Danaeifar, A., & Davoudi Arshad, M. (2025). Foliar application of Si-aminochelate: a strategy for increasing P uptake and antioxidant properties of strawberry. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1690. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07735-9>
- Soriano-Saltos, J. J., Morejón-Troya, F. J., Viera-Aguilera, R. A., Moran-Sánchez, N. L., & Gómez-Gómez, K. D. (2025). Evaluación del impacto del silicio orgánico en el desarrollo vegetativo y la productividad del cultivo de soya. *Polo del Conocimiento*, 10(6), 799–821. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/9676>
- Souleyre, E. J., Iannetta, P. P., Ross, H. A., Hancock, R. D., Shepherd, L. V., Viola, R., Taylor, M. A. & Davies, H. V. (2004). Starch metabolism in developing strawberry (*Fragaria x ananassa*) fruits. *Physiologia Plantarum*, 121(3), 369-376. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0338.x>
- Steiner, A. A. (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant & Soil*, 15(2), 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Straaten, P. (2007). Agrogeology: The use of rocks for crops. Enviroquest Ltd. <https://www.sgb.gov.br/remineralizadores/media/agrogeologymaster.pdf>
- Torres-Rodríguez, J. A., Ramos-Remache, R. A., Reyes-Pérez, J. J., Quinatoa Lozada, E. F., & Rivas-García, T. (2024). Silicio como bioestimulante en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y agente de control biológico de *Moniliophthora roreri*. *Terra Latinoamericana*, 42, 1–11. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1817>
- Treftz, C., & Omaye, S. T. (2015). Comparision between hydroponic and soil systems for growing strawberries in a greenhouse. *International Journal of Agricultural Extension*, 3(3), 195-200. https://content.scrip.org/pdf/fns_2015111910531217.pdf
- Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C., & Alcántar-González G. (2007). Elementos benéficos. In Alcántar, G. G. & Trejo-Téllez, L. I. Nutrición de cultivos. (49-91). MundiPrensa y Colegio de Postgraduados.
- Nava-Castro, K.E., & Morales-Montor, J. (2018). Medicina ambiental, respuesta inmunitaria y enfermedades parasitarias: un enfoque en los disruptores endocrinos. In Morales Montor, J., Ponce Regalado, M. D., & Becerril Villanueva, L. E. Nuevos enfoques en el estudio de las Interacciones Neuroinmunoendocrinológicas. (pp. 185-207). Ed. Pandora.
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., Dubey, N. K., & Rai, A. K. (2015). Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll florescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. *Ecotoxicology and environmental safety*, 113, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.029>

- Valentinuzzi, F., Cologna, K., Pii, Y., Mimmo, T., & Cesco, S. (2017). Assessment of silicon biofortification and its effect on the content of bioactive compounds in strawberry (*Fragaria × ananassa* 'Elsanta') fruits. *Acta Horticulturae*, 1217, 307–312. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1217.38>
- Velázquez-González, R. S., García-García, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sánchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations. *Agriculture*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>
- Voća, S., Dobričević, N., Družić, J., Duralija, B., Babojelić, M. S., Dermšek, D., & Čmelik, Z. (2009). The change of fruit quality parameters in day-neutral strawberries cv. Diamante grown out of season. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(3), 248–254. <https://doi.org/10.1080/09637480701706331>
- Xiao, Z., Yan, G., Ye, M., & Liang, Y. (2021). Silicon relieves aluminum-induced inhibition of cell elongation in rice root apex by reducing the deposition of aluminum in the cell wall. *Plant and Soil*, 462, 189–205. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04850-y>
- Yaghubi, K., Vafaei, Y., Ghaderi, N., & Javadi, T. (2019). Potassium Silicate Improves Salinity Resistant and Affects Fruit Quality in Two Strawberry Cultivars Grown Under Salt Stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(12), 1439–1451. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1621333>
- Ziogas, V., Bravos, N., & Hussain, S. B. (2022). Preharvest foliar application of Si–Ca-based biostimulant affects postharvest quality and shelf-life of clementine mandarin (*Citrus clementina* Hort. Ex Tan). *Horticulturae*, 8(11), 996. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8110996>