

EL PAPEL BIOLÓGICO DEL SILICIO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS: CONTRIBUCIÓN AL CONTROL DE PLAGAS Y ENFERMEDADES

THE BIOLOGICAL ROLE OF SILICON IN AGRICULTURAL CROPS: CONTRIBUTION TO PEST AND DISEASE CONTROL

¹María Yesenia Ruiz-Aguilar , ¹Luis Alberto Aguirre-Uribe , ²Sonia Noemí Ramírez-Barrón ,
³Yolanda del Carmen Pérez-Luna , ¹Epifanio Castro-del Ángel , ^{1§}Agustín Hernández-Juárez 

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología. Calzada Antonio Narro No. 1923, Buenavista, Saltillo, México. C.P. 25315. ² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Ciencias Básicas. Calzada Antonio Narro No. 1923, Buenavista, Saltillo, México. C.P. 25315. ³ Universidad Politécnica de Chiapas, Departamento de Agroindustrial. Carretera Tuxtla Gutiérrez - Portillo Zaragoza Km 21+500, Suchiapa, Chiapas, México. C.P. 29150. [§]Autor de correspondencia: (chinoahj14@hotmail.com).

RESUMEN

El silicio (Si), un oligoelemento disponible, se distingue por su capacidad de ser fácilmente absorbido, por su elevada solubilidad y una especificidad en las plantas. Este aspecto resulta esencial, debido a que siete de 10 cultivos más importantes a nivel mundial son reconocidos por su acumulación de Si y su respuesta positiva a su aplicación. Sin embargo, el avance y desarrollo de los cultivos agrícolas se ven restringidos por factores de estrés, como bióticos o abióticos. El objetivo del presente análisis de información consistió en examinar la capacidad del silicio para estimular las barreras físicas y bioquímicas en las plantas, proporcionando mecanismos eficaces de resistencia ante plagas y enfermedades. La investigación fue realizada mediante un minucioso análisis de artículos científicos obtenidos de diversas bases de datos, incluyendo Google Scholar, Scielo, Science Direct, Scopus y Redalyc. La incorporación de silicio en prácticas agrícolas posee un potencial significativo para contribuir a la seguridad alimentaria, al facilitar el desarrollo de cultivos optimizados en términos de producción. En consecuencia, se considera el uso estratégico del silicio como una fuente sostenible y beneficiosa en la producción agrícola, ofreciendo perspectivas prometedoras para mejorar la eficiencia y resiliencia de los sistemas agrícolas.

Palabras clave: ciclo biogeoquímico, defensa natural, fitolitos, hormesis, resistencia vegetal.

ABSTRACT

The silicon (Si), a highly available trace element, is distinguished by its ability to absorb quickly, elevated solubility, and specificity in plants. This aspect is crucial, as seven of the 10 most important crops worldwide are known for their Si accumulation and positive response to its application. However, the progress and development of crops have become constrained by biotic and abiotic stress factors. The objective of this data analysis was to examine the ability of silicon to stimulate physical and biochemical barriers in plants, providing effective mechanisms of resistance to pests and diseases. The research was carried out through a meticulous analysis of scientific articles obtained from various databases, including Google Scholar, Scielo, Science Direct, Scopus, and Redalyc. The incorporation of silicon in agricultural practices has significant potential to contribute to food security by facilitating the development of yield-optimized crops. Consequently, the strategic use of silicon is considered beneficial and sustainable in agricultural production, offering promising prospects for improving the efficiency and resilience of agriculture systems.

Index words: biogeochemical cycle, natural defense, phytoliths, hormesis, plant resistance.

INTRODUCCIÓN

El silicio (Si) es un elemento químico clasificado como metaloide, que se encuentra en la naturaleza principalmente como dióxido de silicio (SiO_2), se sitúa como el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (Tréguer et al., 2021; Ahmad et al., 2020). Su liberación proviene de la desmineralización del cuarzo y el feldespato, así como de fitolitos que se encuentran en las hojas, estos llegan al suelo tras el desprendimiento y degradación de las hojas (Barão, 2023; De-Tombeur et al., 2020;).

En el ámbito agrícola, el Si se destaca por aumentar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Interviene en procesos metabólicos vitales y fortalece las estructuras celulares, confiriendo resistencia ante factores bióticos y abióticos (Akhtar et al., 2021). A pesar de que el Si no es un componente esencial para el crecimiento vegetal, su capacidad para absorberlo a través de las raíces en forma de ácido silícico o monosilícico, junto con las variaciones anatómicas entre plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas, sugiere que es casi necesario para el desarrollo vegetal (Khan et al., 2021; Zargar et al., 2019). El Si se utiliza en sistemas de agricultura protegida, como los invernaderos, aplicando directamente sobre las hojas de las plantas; sin embargo, a pesar de sus beneficios, su uso como fertilizante en la producción agrícola todavía no se ha generalizado (Artyszak, 2018). La solubilidad y movilidad de silicio en la planta aumenta de acuerdo con el tamaño de partícula, optimizando su distribución en el tejido vegetal.

La adición de silicio a las plantas puede generar características químicas y físicas singulares, lo cual podría realzar su función biológica (Sarai et al., 2021; Petkowski, Bains y Seager, 2020); por lo cual, una de las principales funciones que desempeña el Si es la activación de la barrera mecánica, donde se identificó la polimerización del

Si en las paredes epidérmicas de las células y vasos xilemáticos, siendo las principales vías de ataque de plagas y enfermedades, pero también se inducen respuestas de defensa inducible como fitohormonas, enzimas (Song et al., 2021).

Paralelamente, el Si desempeña un papel crucial en la rigidez y resistencia de los tejidos vegetales, lo que disminuye su palatabilidad y digestibilidad para los insectos herbívoros (Saw et al., 2023, Islam et al., 2020). Estas defensas pueden desencadenar modificaciones en los compuestos volátiles liberados, atrayendo así a los parasitoides o depredadores de los herbívoros (Vu et al., 2022). Esta combinación de efectos resulta la importancia del Si como factor de protección y fortalecimiento en las plantas frente amenazas externas.

La incorporación de la nanotecnología en el sector agrícola se ha convertido en el inicio de una revolución tecnológica con gran potencial en el siglo XXI. Esta innovación ha transformado las prácticas agrícolas convencionales y facilita el avance hacia métodos de agricultura más eficientes (Sharma et al., 2023). En este contexto, el uso de la nanotecnología en la elaboración de nanomateriales de Si presenta una mayor estabilidad como fertilizantes debido a su resistencia al calor, luz ultravioleta, la desecación y la disminución de la pérdida de lixiviación y volatilización (Zulfiqar et al., 2019). Estas características se atribuyen a la inercia de las nanopartículas de Si ante variaciones en el pH, un tamaño entre 4 y 100 nanómetros, y una composición aproximada de un 53.3% de oxígeno y un 46.8% de Si (Bhat et al., 2021). De igual manera, el empleo de nanopartículas de Si en la prevención y manejo de plagas y enfermedades vegetales se caracteriza también por su eficacia, durabilidad y una relación superficie-volumen que facilita su implementación (Ramezani, Ramezani y Gerami, 2019). La producción de nanomateriales de Si ha experimentado un aumento significativo a nivel global en las últimas décadas, lo que demuestra un gran potencial en la protección de cultivos debido a su menor impacto

ambiental en comparación con los pesticidas convencionales (Shoaib et al., 2018).

En esta revisión se propuso explorar los mecanismos de resistencia activados por el Si en plantas y así comprender la interacción planta-plaga ante respuestas inducidas que generan este proceso. Recientemente se ha generado evidencia donde el silicio puede ser beneficioso, especialmente en situaciones de estrés, tanto en cultivares susceptibles como resistentes (Gomes et al., 2005) con mecanismos de defensa tanto químicos (terpenos, fenoles, alcaloides, enzimas) como mecanismos físicos (tricomas, espinas, ligninas, etc.) (Acevedo et al., 2021). El objetivo de la investigación fue abordar aspectos fundamentales que abarcan la relevancia del silicio en la agricultura, la translocación de silicio en las plantas, los mecanismos de defensa y las formas de interacción del silicio en cultivos de importancia agrícola. Esta investigación se llevó a cabo mediante un exhaustivo estudio de artículos científicos recopilados de múltiples bases de datos, entre las cuales se destacan Google Scholar, Scielo, Science Direct, Scopus y Redalyc.

DESARROLLO

Ciclo biogeoquímico del silicio

El ciclo biogeoquímico del silicio ha sido poco estudiado debido a que el silicio (Si) no es un elemento esencial para el crecimiento y la reproducción de las plantas, pero es importante conocerlo por su relación con el ciclo del carbono (Tréguer et al., 2021; De-Tombeur et al., 2020; Vander y Delvaux, 2019). El Si en la corteza terrestre está asociado a minerales como el cuarzo y el feldespato (Barão, 2023), también se ha encontrado en formas como caolín, esmectita y vermiculita (Raturi et al., 2021).

La disponibilidad de silicio en el suelo está determinada por el silicio mineral o silicio disuelto (ácido monosilícico), $\text{Si}(\text{OH})_4$, ácido polisilícico o complejo de ácido silícico y compuestos orgánicos (Schaller et al., 2021) y el silicio reciclado proveniente de las plantas (fitolitos), todos estos se encuentran en una fase líquida (De-Tombeur et

al., 2020); sin embargo, solo una pequeña fracción de Si se activa dentro del ciclo biogeoquímico (Vander y Delvaux, 2019).

El ciclo se inicia con la meteorización de los minerales, que se lleva a cabo por la descomposición de ácido carbónico a partir del dióxido de carbono (CO_2) y la liberación de $\text{Si}(\text{OH})_4$ (Vander y Delvaux, 2019), pasando a través de ciclos hidrológicos; el tiempo de conversión dependerá de la temperatura, el pH, el potencial redox, el contenido de agua, microorganismos descomponedores del suelo y la concentración de CO_2 (Raturi et al., 2021).

La interacción de suelo-planta se incluye en el ciclo biogeoquímico del Si, dado que afecta la reserva del suelo, esto sucede cuando absorben las plantas Si, formado como fitolitos en los tejidos vegetales (principalmente hojas), el retorno del silicio al suelo se da por la senescencia de las hojas (Vander y Delvaux, 2019), mientras que los recursos minerales se agotan con el tiempo, el Si foliar aumenta con el envejecimiento del suelo (De-Tombeur et al., 2020), sin embargo, se ha demostrado que el tipo de suelo, el clima y la vegetación modifican la cantidad de Si en el suelo (Barão, 2023).

Absorción del silicio en la planta

Regularmente el silicio se encuentra en el suelo y mediante las raíces se activan mecanismos activos, pasivos o de rechazo (Vander y Delvaux, 2019). La planta toma el silicio en forma de ácido silícico a través de canales de tipo acuaporina hacia la membrana celular (Luyckx et al., 2017). El Si se deposita de manera regular como un gel en el lumen celular, la pared celular o el espacio intercelular antes de que se produzca la evapotranspiración en la planta (Maceda et al., 2021). Asimismo, se ha observado la acumulación de Si en áreas de salificación en diversos tejidos, tales como la epidermis, el haz vascular, el esclerénquima, el lumen celular y los espacios intercelulares de brotes y raíces (Mandlik et al., 2020). La acumulación de Si en tejidos epidérmicos crea una membrana de celulosa con

silicio, y al estar presentes iones de Calcio y pectinas, se genera una protección a la planta (Sahebi et al., 2015).

Las plantas que mayormente acumulan Si son gramíneas y los cultivos como arroz, trigo, cebada, maíz, caña de azúcar, remolacha azucarera o tomates acumulan concentraciones de Si superior al 0.1-10.0% de materia seca (Barão, 2023; Mandlik et al., 2020). La cantidad de Si absorbida dependerá de la concentración en el suelo y las condiciones ambientales (Islam et al., 2020).

La distribución del Si en las plantas varía en función del tipo de planta y la especie. En maíz (*Zea mays* L., Poaceae), se ha comprobado que los genes *ZmLsi6* tienen un papel crucial en transportar el Si desde el parénquima de las hojas hacia el xilema, mientras que *ZmLsi1* facilita la absorción del Si en las raíces (Bokor et al., 2015). En arroz (*Oryza sativa* L., Poaceae) se ha constatado que los genes *Lsi1*, *Lsi2*, *Lsi3* y *Lsi6* son los encargados del transporte de Si en el haz vascular del tallo, el cual se absorbe desde la raíz hasta las hojas (Mandlik et al., 2020; Yamaji et al., 2015).

Activación de mecanismos de defensa vegetal ante plagas y enfermedades mediante la influencia del silicio

El papel esencial del Si en las plantas radica en su acumulación en las paredes celulares, donde se presenta la penetración de patógenos y el ataque de insectos plaga; como resultado, el Si activa mecanismos de resistencia de manera directa como indirecta (Fawe et al., 2001; Alhousari y Greger, 2018;). El Si protege a la planta frente a situaciones de estrés abiótico y biótico, mejorando sus propiedades mecánicas como una barrera física y fisiológica, actuando como una barrera bioquímica o molecular (Wang et al., 2017). Asimismo, se ha demostrado que el Si es capaz de inducir el control biológico a través de la atracción de parasitoides, depredadores y microorganismos entomopatógenos para el control de las plagas (Reynolds et al., 2016).

Reforzamiento de barreras físicas mediante la incorporación de silicio en la planta

Las plantas requieren de Si para crecer y desarrollarse. El Si se absorbe rápidamente por las plantas mediante el xilema, lo que propicia una rápida oscilación y translocación (Pozza, Pozza y Dos Santos-Botelho, 2015). El mecanismo directo que se activa en la planta se debe a la polimerización mecánica del Si, que se acumula debajo de la cutícula y paredes de la hoja (principalmente), y también se puede hallar en las raíces, partes aisladas de la planta como espinas, tricomas o macropelos (Ahammed y Yang, 2021). En general, las plantas monocotiledóneas presentan una acumulación de Si con mayor facilidad que las dicotiledóneas (Debona, Rodrigues y Datnoff, 2017).

La acumulación de Si constituye un componente fundamental de la defensa que propicia un endurecimiento y disminución de la digestibilidad de los tejidos vegetales de la planta ante el ataque de insectos herbívoros (Yang et al., 2017). Este mecanismo se debe a los fitolitos, que son una forma amorfa de óxido de silicio que se origina a partir del ácido monosilícico. Los fitolitos se transportan por el sistema vascular y se depositan en diferentes partes de la planta, adoptando la forma de la célula (Nawaz et al., 2019).

Los fitolitos pueden presentar diversas formas (cúbicas, cilíndricas, hexagonales, globulares, esféricas, cúpula, mancuerna, cuenco, bulliforme, polilobados y silla de montar) y pueden ser localizadas en diferentes partes de la planta como brotes, raíces, hojas y tallos (Mandlik et al., 2020; Luyckx et al., 2017), con dimensiones entre 20 a 200 μm , un índice de refracción de 1.458 y su peso oscila entre 1.5 a 2.3 g cm^{-3} (Calegari et al., 2022). En sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench Poaceae) se adquirió un fitolito debido a la deposición de Si en forma de cúpula, situado en la pared tangencial interna de la pared de la endodermis de la raíz (Mandlik et al., 2020).

Otro componente responsable de una barrera física generada por el Si es el compuesto fenólico lignina, un heteropolímero de la pared celular del tejido vascular de la planta. Las monocotiledóneas presentan monómeros fenilpropanoides del tipo p-cumarílico (H), coniferílico (G) y sinapílico (S) (Maceda et al., 2021). Estos compuestos fenólicos pueden generar una rigidez en la estructura de la planta, una presión hídrica, el almacenamiento y soporte de células especializadas; esto se pudo apreciar en los tallos de rosa de monte (*Paeonia lactiflora* Pall Paeoniaceae), a la que se le aplicó Si y se consiguió una acumulación de lignina del tipo G y S (Zhao et al., 2021). Se observó que en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L. var. Corona Cucurbitaceae) tratadas con silicato de potasio, en los vasos del xilema, las paredes y membranas celulares adyacentes presentaban una alta densidad de compuestos lignocelulósicos que se extendían hasta el lumen del vaso (Cherif et al., 1992).

Se ha constatado que, al momento de que la planta experimenta una acumulación de Si, se puede activar la formación de calosa como un mecanismo físico de defensa adicional (Kulich et al., 2018). Este polisacárido se produce en diferentes partes, tales como la pared celular, estomas, floema y tubo polínico, y se compone de glucosas que se unen por los enlaces β -1,3-glucosídicos (Brugiére y Exley, 2017). En *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. (Brassicaceae), se ha identificado al gen EXO70H4 como el factor esencial en la acumulación de calosa, este proceso se llevó a cabo mediante una estructura llamada anillo de Ortmann, la cual se originó en tricomas maduros, así como en la pared delgada basal del bulbo y la pared gruesa apical. La finalidad principal de esta acumulación radica en preservar la eficacia de la planta contra infecciones y acelerar la cicatrización de las heridas causadas por insectos o patógenos (Kulich et al., 2018).

Reforzamiento de barreras bioquímicas a través de la incorporación de silicio en la planta

La relevancia del Si en la planta radica en su participación en la gestión del estrés debido a condiciones ambientales adversas, tales como salinidad, la sequía, el desequilibrio de nutrientes, la radiación solar y la presencia de metales pesados en el suelo (Thind et al., 2020; Alhousari y Greger, 2018;). También, el Si desempeña un papel fundamental en la producción de elementos que fortalecen la resistencia a plagas y enfermedades, incrementando la producción de enzimas, metabolitos secundarios, fitohormonas y efectores (Mandlik et al., 2020; Sahebi et al., 2015). La planta posee la capacidad de emitir compuestos orgánicos volátiles como respuesta a la presencia de Si, lo que puede generar un impacto positivo en la atracción de enemigos naturales de los insectos polífagos, que son plagas de gran importancia en la agricultura (Yang et al., 2017).

A pesar de la perspectiva de incorporar Si como parte de una estrategia innovadora en el manejo integrado de plagas y enfermedades, con el propósito de alcanzar un efecto más favorable en la producción de componentes físicos y bioquímicos de la planta (Verma et al., 2021), es esencial considerar la adecuada dosificación de Si, la fase de desarrollo en la que se encuentre la planta, considerado estos elementos fundamentales para alcanzar resultados más eficaces. En la Tabla I se proporciona información detallada acerca de ciertos componentes producidos por la planta ante la presencia de Si.

El impacto hormético de silicio en las plantas

A pesar de la evidencia que respalda la aplicación de Si para el control de diversas plagas y enfermedades en las plantas, resulta crucial abordar la cuestión de cómo discernir cuándo este oligoelemento funciona como un estimulante, activando las defensas de la planta y cuándo podría tener efectos perjudiciales.

Tabla I. Componentes bioquímicos relacionados en la inducción de defensa de la planta ante el ataque de plagas y enfermedades.

Inducción de respuesta de defensa de la planta	Componentes/compuestos	Referencia
Hormonas vegetales	Ácido abscísico, ácido salicílico (SA), ácido jasmónico (JA) y etileno (ET).	Ahamed & Yang (2021), Luyckx et al. (2017)
Metabolitos primarios	Calosa y lignina.	Maceda et al. (2021), Zhao et al. (2021), Alhousari & Greger (2018)
Metabolitos secundarios	Fitoalexinas (momilactonas), fenoles, flavonoides, antocianinas, n-heptadecano y sesquiterpenos.	Mandlik et al. (2020), Alhousari & Greger (2018)
Compuestos orgánicos volátiles	Cedrol, jasmonato de metilo (MeJA), salicilato de metilo (MeSA), acetato de (z)-3-hexenilo (HA), α -bergamoteno, hexanal 2-etilo, β -sesquifellandreno y β -cariofileno	Liu et al. (2017), Kvedaras et al. (2010), James & Grasswitz (2005)
Especies reactivas de oxígeno (ERO)	Enzimas: ascorbato peroxidasa (APX), catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (Gpx), polifenol oxidasa (PPO), superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y lipoxigenasa (LOX). Compuestos no enzimáticos: glutatión, ascorbato y malondialdehído.	Greger (2018), Yang et al. (2017), Alhousari & Greger (2018)
Especies reactivas de nitrógeno (ERN)	Enzimas: nitrogenasa, óxido nítrico sintasa 2 (NO ₂) y S-nitrosoglutatión-reductasa (GSNOR). Compuestos no enzimáticos: óxido nítrico (NO), peroxinitrito y S-nitrosotirol.	Basu et al. (2020), Li et al. (2019)
Otras enzimas	Fenilalanina amonio liasa (PAL), chalcona sintasa (CHS), chalcona isomerasa, β -1,3 glucanasa y quitinasa.	Ahamed & Yang (2021), Yang et al. (2017)

Con el fin de abordar esta problemática, se puede explorar el concepto introducido por primera vez en el año 1940, conocido como la hormesis. Esta teoría sostiene que dosis bajas de sustancias tóxicas pueden generar efectos positivos, mientras que a dosis elevadas provocan inhibición en las plantas (Erofeeva, 2022). El estudio llevado a cabo por Hugo Paul Friedrich Schulz en 1887 fundamentó la creación de modelos biológicos en la teoría de la hormesis, conocida como Ley de Arndt-Schulz (Kendig et al., 2010).

La hormesis y el estrés vegetal son respuestas adaptativas bifásicas, puesto que la relación dosis-respuesta afecta a todos los organismos biológicos (Agathokleous y Calabrese, 2019). La hormesis, por tanto, es un mecanismo adaptativo que desencadena en la planta funciones destinadas a

contrarrestar tanto el estrés biótico como el abiótico, mediante una plasticidad fenotípica (Erofeeva, 2022). Los insectos, hongos, bacterias y virus presentes en áreas agrícolas están sujetos a sustancias tóxicas que provocan un fenómeno de hormesis; en dosis bajas, estas sustancias estimulan el desarrollo o resistencia, mientras que en dosis altas ejercen un control efectivo sobre estos organismos (Cutler et al., 2022).

La identificación del comportamiento hormético en modelos epidemiológicos se consigue mediante la aplicación de curvas dosis-respuesta. Estas curvas, de tipo sigmoideo, U invertida, bifásica y en forma de J, son empleadas para describir y entender dicho comportamiento (Vargas-Hernández et al., 2017; Davison et al., 2009; Se utilizan modelos sólidos para confirmar

la presencia de este fenómeno y determinar la dosis que maximiza la respuesta hormética, siendo los más frecuentes el logístico, Probit, Gompertz y Weibull (Cedergreen et al., 2005).

Para evaluar la toxicidad en dosis repetidas, se emplean modelos estadísticos robustos que permiten determinar los efectos cuantitativos. Un modelo esencial es el nivel sin efecto adverso observable (NOAEL, por sus siglas en inglés no observed adverse effect level), el cual indica la dosis más elevada de un xenobiótico administrado, sin inducir alteraciones significativas en el organismo objetivo (Noruzi et al., 2024; Rezvanfar, 2014; Ochoa, 2013). Asimismo, se utiliza el modelo del nivel de efecto no observado (NOEL, por sus siglas en inglés: no observed effect), el cual representa la concentración máxima del xenobiótico sin ocasionar alteraciones morfológicas o de desarrollo visibles en el organismo (Belz y Duke, 2022; Ochoa, 2013). Además, se considera el modelo del nivel mínimo de efecto adverso observado (LOAEL, siglas en inglés: lowest observed adverse effect level), que identifica la concentración más baja del xenobiótico, capaz de provocar alteraciones adversas en lo funcional, morfología y desarrollo del organismo objetivo (Noruzi et al., 2024; Ochoa, 2013).

Se han documentado aproximadamente 5000 estudios que abordan la hormesis inducida por sustancias químicas y factores físicos en organismos (Agathokleous y Calabrese, 2019). De este conjunto, 32 ensayos se centran específicamente en explorar el efecto hormético en las plantas. Dentro de estos estudios, se observa que el 66 % optó por utilizar una regresión no lineal como método para representar la relación entre la dosis y la respuesta, mientras que el 34 % restante prefirió emplear un modelo estadístico con el mismo propósito (Belz y Duke, 2022). Este análisis evidencia la amplia diversidad de enfoques metodológicos utilizados en la investigación de la hormesis, destacando la prevalencia de la regresión no lineal como herramienta para analizar la dosis-respuesta en las plantas. Sin embargo, la

investigación específica de la hormesis por Si todavía es escasa.

Algunos estudios acerca de la hormesis se han enfocado en la aplicación foliar del silicato de calcio (CaSiO_3) en Chile (*Capsicum annuum* L. Solanaceae) durante las etapas iniciales de desarrollo. Se observó que, a una dosis de 60 mg L^{-1} , se produjo un aumento en el diámetro del tallo, al igual que en el contenido de aminoácidos en las raíces y hojas. A una dosis de 125 mg L^{-1} se registró un incremento en los azúcares solubles totales, el contenido de clorofila (a y b), el área foliar, así como en el peso fresco y peso seco de tallos y hojas. Sin embargo, con una dosis alta de 250 mg L^{-1} , se evidenció una disminución en el diámetro del tallo, la longitud de la raíz más larga, y los niveles de aminoácidos en las raíces y hojas aumentaron en la dosis de 60 mg L^{-1} (dosis baja); en contraste con dosis mayores se observó una reducción de variables agronómicas (Trejo-Téllez et al., 2020). En un estudio adicional llevado a cabo en el invernadero con *C. annuum* y mediante una nutrición basada en CaSiO_3 , se pudo identificar que 16 genes LsiI se relacionan con los canales de absorción de Si en las raíces de la planta debido a un efecto hormético, así como tres genes vinculados con el canal de excreción Lsi2. Estos genes demostraron la capacidad de activar la síntesis de múltiples hormonas vegetales, incluyendo la auxina, el ácido giberélico, el ácido salicílico, el ácido jasmónico y el etileno (Gómez-Merino et al., 2020).

El silicio como un nanomaterial

La implementación de la nanotecnología con silicio en la agricultura se está convirtiendo en un campo interdisciplinario en expansión, puesto que desempeña un papel positivo en la estimulación del crecimiento y la tolerancia al estrés en las plantas, lo que representa un potencial significativo para diversas aplicaciones en el ámbito agrícola (Rastogi et al., 2019). De esta manera, se promueve la implementación de prácticas agrícolas sostenibles que disminuyan la dependencia de insumos costosos como pesticidas y fertilizantes (Singh et al., 2021).

Las nanopartículas (NPs) son partículas de dimensiones que varían entre 1 y 100 nm en comparación con los compuestos a granel (Rastogi et al., 2019; Luyckx et al., 2017;). Estas NPs poseen propiedades físicas y químicas únicas, que incluyen características ópticas, superficiales, eléctricas y térmica (Vargas-Hernández et al., 2020). Estas propiedades únicas hacen que tengan diversas aplicaciones en los campos de la medicina, la electrónica, la energía, la agricultura, entre otros (Elizabeth et al., 2019).

La singularidad de las NPs se aprecia a nivel fisiológico, debido a su reducido tamaño es un factor que contribuye a mejorar la solubilidad y facilitar un transporte más eficiente en las plantas, así como la relación superficie-peso que incide en diversos procesos metabólicos y etapas de crecimiento (El-Shetehy et al., 2021; Vargas-Hernández et al., 2020). Las NPs de Si tienen una notable capacidad para combatir plagas y patógenos que afectan a los cultivos agrícolas, lo que les permite crear una herramienta efectiva en la protección de las plantas contra amenazas biológicas, lo que contribuye a mejorar la salud y la productividad de los cultivos (El-Shetehy et al., 2021).

Las investigaciones indican que las NPs de silicio poseen características destacadas, siendo económicamente asequibles, son hidrófobas, con un elevado volumen de poros, y biocompatibles con otros compuestos, además de no ser tóxicos permitiendo su aplicación en entornos ambientales (Snehal y Lohani, 2018). Con un diámetro que oscila entre 5 y 20 nm, estas nanopartículas tienen la capacidad de penetrar fácilmente la pared celular y la membrana plasmática, así como de ingresar a través de las aberturas estomáticas o la base de los tricomas cuando se aplica de manera foliar. La eficacia de la absorción de silicio dependerá del método de aplicación (Goswami et al., 2022).

En el ámbito agrícola, la aplicación foliar de nanopartículas de silicio en plantas de maíz ha demostrado incrementar los niveles de compuestos fenólicos y enzimas como la fenilalanina amonio

liasa, la peroxidasa y polifenol oxidasa. Este aumento contribuye a desarrollar resistencia frente a patógenos como *Fusarium oxysporum* Schldl. (Nectriaceae) y *Aspergillus niger* Tieghem (Aspergillaceae) (Suriyaprabha et al., 2014).

La investigación en nanomateriales de Si está ganando impulso en el ámbito de la agricultura. La capacidad del Si para fortalecer las plantas y mejorar su autodefensa ofrece una alternativa prometedora a los pesticidas sintéticos, ayudando así a prevenir la resistencia de plagas (Kráľová y Jampílek, 2022). Este enfoque no solo es eficaz, sino también sostenible, lo que lo convierte en una solución muy atractiva para abordar los desafíos agrícolas.

COMENTARIOS FINALES

El papel del silicio (Si) en los cultivos agrícolas es multifacético y esencial para el desarrollo y la resistencia de las plantas, y lo convierte en un componente importante en la gestión de cultivos para mejorar la productividad y la sostenibilidad. Además, el ciclo biogeoquímico del Si y su absorción en la planta revelan su importancia en la salud y el crecimiento de los cultivos. La contribución al control de plagas y enfermedades se debe a la activación de mecanismos de defensa vegetal, lo que mejora la resistencia natural de las plantas. La influencia hormética del Si se caracteriza por su habilidad para estimular respuestas positivas en las plantas, propiciando la producción y la resistencia. La consideración del silicio como un nanomaterial aporta una perspectiva innovadora, evidenciando aplicaciones potenciales en la agricultura sostenible. La comprensión y la aplicación adecuada del Si en la agricultura pueden desempeñar un papel fundamental en la optimización de la productividad, la salud de las plantas y la sostenibilidad de los cultivos. Sin embargo, es crucial llevar a cabo investigaciones exhaustivas, particularmente con nano formulaciones de Si, para comprender mejor su efectividad en diversos entornos agrícolas. Estos experimentos de campo son indispensables para evaluar cómo estas

tecnologías funcionan en condiciones reales y cómo pueden integrarse de manera efectiva en los sistemas de cultivo existentes. Solo con una comprensión sólida y evidencia científica se puede avanzar hacia una agricultura más sostenible y productiva.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT), quien brindó su apoyo a la becaria de doctorado María Yesenia Ruiz Aguilar (CVU 655777).

REFERENCIAS

- Acevedo, F.E., Peiffer, M., Ray, S., Tan, C.W. y Felton, G.W. (2021). Silicon-Mediated Enhancement of Herbivore Resistance in Agricultural Crops. *Frontiers in Plant Science*, 12, e631824. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.631824>
- Agathokleous, E. y Calabrese, E.J. (2019). Hormesis can enhance agricultural sustainability in a changing world. *Global Food Security*, 20, 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.02.005>
- Ahmed, G.J. y Yang, Y. (2021). Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.031>
- Ahmad, Z., Waraich, E.A., Barutçular, C., Hossain, A., Erman, M., Çiğ, F., Gharib, H. y Sabagh, A.E.L. (2020). Enhancing drought tolerance in wheat through improving morphophysiological and antioxidants activities of plants by the supplementation of foliar silicon. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 89(3), 529-539. <https://doi.org/10.32604/phyton.2020.09143>
- Akhtar, N., Ilyas, N., Mashwani, Z.R., Hayat, R., Yasmin, H., Noureldeen, A. y Ahmad, P. (2021). Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nano-particles for amelioration of drought stress in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 160-176. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.039>
- Alhousari, F. y Greger, M. (2018). Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. *Plants*, 7(2), 1-11. <https://doi.org/10.3390/plants7020033>
- Artyszak, A. (2018). Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality—A literature review in Europe. *Plants*, 7(3), e54. <https://doi.org/10.3390/plants7030054>
- Barão, L. (2023). The Use of Si-Based Fertilization to Improve Agricultural Performance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 1096-1108. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01106-1>
- Basu, S., Kumar, G., Kumari, N., Kumari, S., Shekhar, S., Kumar, S. y Rajwanshi, R. (2020). Reactive oxygen species and reactive nitrogen species induce *Lysigenous aerenchyma* formation through programmed cell death in rice roots under submergence. *Environmental and Experimental Botany*, 177, e104118. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104118>
- Belz, G.R. y Duke, O.S. (2022). Modelling biphasic hormetic dose responses to predict sub-NOAEL effects using plant biology as an example. *Current Opinion in Toxicology*, 29, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.01.003>
- Bhat, J.A., Rajora, N., Raturi, G., Sharma, S., Dhiman, P., Sanand, S., Shivaraj, S.M., Sonah, H. y Deshmukh, R. (2021). Silicon nanoparticles (SiNPs) in sustainable agriculture: major emphasis on the practicality, efficacy and concerns. *Nanoscale Advances*, 3(14), 4019-4028. <https://doi.org/10.1039/D1NA00233C>
- Bokor, B., Bokorová, S., Ondoš, S., Švubová, R., Lukačová, Z., Hýblová, M., Szemes, T. y Lux, A. (2015). Ionome and expression level of Si

- transporter genes (Lsi1, Lsi2, and Lsi6) affected by Zn and Si interaction in maize. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9), 6800-6811. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3876-6>
- Brugiére, T. y Exley, C. (2017). Callose-associated silica deposition in Arabidopsis. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 39, 86-90. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.08.005>
- Calegari, M.R., De-Souza, E., Mozer, J.H., Marcolin, L. y Da Fonseca, C.F. (2022). Fitólitos-Uma ferramenta para estudos de reconstrução paleoambiental. *Derbyana*, 43, 1-24. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.778>
- Cedergreen, N., Ritz, C. y Streibig, J.C. (2005). Improved empirical models describing hormesis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24(12), 3166-3172. <https://doi.org/10.1897/05-014r.1>
- Cherif, M., Benhamou, N., Menzies, J.G. y Belanger, R.R. (1992). Silicon induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 41, 411-425. [https://doi.org/10.1016/0885-5765\(92\)90053-X](https://doi.org/10.1016/0885-5765(92)90053-X)
- Cutler, G.C., Amichot, M., Benelli, G., Guedes, R.N.C., Qu, Y., Rix, R.R., Ullah, F. y Desneux, N. (2022). Hormesis and insects: Effects and interactions in agroecosystems. *Science of The Total Environment*, 825, e153899. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153899>
- Davison, P.G., Manrique, R.R. y Sánchez, M.G. (2009). Hormesis: antecedentes e implicaciones en los sistemas biológicos. *Latin American Journal of Pharmacy*, 28(6), 954-960.
- Debona, D., Rodrigues, F.A. y Datnoff, L.E. (2017). Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 85-107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516>
- De-Tombeur, F., Turner, B.L., Laliberté, E., Lambers, H., Mahy, G., Faucon, M.P., Zemunik, G. y Cornelis, J.T. (2020). Plants sustain the terrestrial silicon cycle during ecosystem retrogression. *Science*, 369(565), 1245-1248. <https://doi.org/10.1126/ciencia.abc0393>
- Elizabeth, A., Babychan, M., Mathew, A.M. y Syriac, G.M. (2019). Application of Nanotechnology in Agriculture. *International Journal of Pure y Applied Bioscience*, 7(2), 131-139. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.6493>
- El-Shetehy, M., Moradi, A., Maceroni, M., Reinhardt, D., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B., Mauch, F. y Schwab, F. (2021). Silica nanoparticles enhance disease resistance in Arabidopsis plants. *Nature Nanotechnology*, 16(3), 344-353. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00812-0>
- Erofeeva, E.A. (2022). Environmental hormesis of non-specific and specific adaptive mechanisms in plants. *Science of the Total Environment*, 804, e150059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150059>
- Fawe, A., Menzies, J.G., Chérif, M. y Bélanger, R.R. (2001). Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: *Silicon in Agriculture*. (Vol. 8, pp. 159-169). Elsevier. Nederland. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80013-6](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80013-6)
- Gomes, F.B., Campos-De-Moraes, J., Donizetes-Santos, C. y Goussain, M.M. (2005). Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Ciencias Agrícolas*, 62(6), 547-551. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600006>
- Gómez-Merino, F.C., Trejo-Téllez, L.I., García-Jiménez, A., Escobar-Sepúlveda, H.F. y Ramírez-Olvera, S.M. (2020). Silicon flow from root to shoot in pepper: a comprehensive in silico analysis reveals a potential linkage between gene expression and hormone

- signaling that stimulates plant growth and metabolism. *PeerJ*, 8, e10053. <https://doi.org/10.7717/peerj.10053>
- Goswami, P., Mathur, J. y Srivastava, N. (2022). Silica nanoparticles as novel sustainable approach for plant growth and crop protection. *Heliyon*, 8(7), e09908. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09908>
- Islam, W., Tayyab, M., Khalil, F., Hua, Z., Huang, Z. y Chen, H.Y.H. (2020). Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 168, e104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
- James, D.G. y Grasswitz, T.R. (2005). Synthetic herbivore-induced plant volatiles increase field captures of parasitic wasps. *BioControl*, 50(6), 871-880. <https://doi.org/10.1007/s10526-005-3313-3>
- Kendig, L.E., Le, H.H. y Belcher, M.S. (2010). Defining hormesis: evaluation of a complex concentration response phenomenon. *International Journal of Toxicology*, 29(3), 235-246. <https://doi.org/10.1177/1091581810363012>
- Khan, I., Awan, S.A., Rizwan, M., Ali, S., Hassan, M.J., Brestic, M., Zhang, X. y Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 222, e112510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>
- Kráľová, K. y Jampílek, J. (2022). Metal- and Metalloid-Based Nanofertilizers and Nanopesticides for Advanced Agriculture. In: *Inorganic Nanopesticides and Nanofertilizers*. Springer, Cham. pp. 295-361. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94155-0_10
- Kulich, I., Vojtková, Z., Sabol, P., Ortmannová, J., Neděla, V., Tihlaříková, E. y Zárský, V. (2018). Exocyst subunit EXO70H4 has a specific role in callose synthase secretion and silica accumulation. *Plant Physiology*, 176(3), 2040-2051. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01693>
- Kvedaras, O.L., An, M., Choi, Y.S. y Gurr, G.M. (2010). Silicon enhances natural enemy attraction and biological control through induced plant defences. *Bulletin of Entomological Research*, 100(3), 367-371. <https://doi.org/10.1017/S0007485309990265>
- Li, B., Sun, L., Huang, J., Göschl, C., Shi, W., Chory, J. y Busch, W. (2019). GSNOR provides plant tolerance to iron toxicity via preventing iron-dependent nitrosative and oxidative cytotoxicity. *Nature Communications*, 10(1), e3896. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11892-5>
- Liu, J., Zhu, J., Zhang, P., Han, L., Reynolds, O.L., Zeng, R., Wu, J., Shao, Y., You, M. y Gurr, G.M. (2017). Silicon supplementation alters the composition of herbivore induced plant volatiles and enhances attraction of parasitoids to infested rice plants. *Frontiers in Plant Science*, 8, e1256. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01265>
- Luyckx, M., Hausman, J.F., Lutts, S. y Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C.B., Trejo, C. y Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*, 27(2), 1-16. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Mandlik, R., Thakral, V., Raturi, G., Shinde, S., Nikolić, M., Tripathi, D.K., Sonah, H. y Deshmukh, R. (2020). Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *Journal of Experimental Botany* 71(21), 6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>
- Nawaz, M.A., Zakharenko, A.M., Zemchenko, I.V., Haider, M.S., Ali, M.A., Imtiaz, M., Chung, G., Tsatsakis, A., Sun, S. y Golokhvast, K.S. (2019). Phytolith formation in plants:

- From soil to cell. *Plants* 8(8), 249-281. <https://doi.org/10.3390/plants8080249>
- Noruzi, M., Rezvanfar, M.A. y Daghighi, S.M. (2024). Benchmark dose. In: Encyclopedia of Toxicology. Academic Press. pp. 939-944. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00786-7>
- Ochoa, R. (2013). Pathology Issues in the design of toxicology studies. In: Handbook of Toxicologic Pathology. Elsevier. pp. 595-618. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415759-0.00019-4>
- Petkowski, J.J., Bains, W. y Seager, S. (2020). On the potential of silicon as a building block for life. *Life*, 10 (6), e84. <https://doi.org/10.3390/life10060084>
- Pozza, E.A., Pozza, A.A.A. y Dos Santos-Botelho, D.M. (2015). Silicon in plant disease control. *Revista Ceres*, 62(3), 323-331. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030013>
- Ramezani, M., Ramezani, F. y Gerami, M. (2019). Nanoparticles in Pest Incidences and Plant Disease Control. In: Nanotechnology for Agriculture: Crop Production & Protection. Springer, Singapore. pp. 233-272. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9374-8_12
- Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., Chauhan, D.K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N.I. y Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *Biotech*, 9(3): e90. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>
- Raturi, G., Sharma, Y., Rana, V., Thakral, V., Myaka, B., Salvi, P., Singh, M., Dhar, H. y Deshmukh, R. (2021). Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agriculture and silicon biogeochemical cycle. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 827-838. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.039>
- Reynolds, O.L., Padula, M.P., Zeng, R. y Gurr, G.M. (2016). Silicon: Potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>
- Rezvanfar, M.A. (2014). Benchmark Dose. Encyclopedia of Toxicology: 3rd. Edition. Academic Press. USA. 5220 p. 402-406. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00588-1>
- Sahebi, M., Hanafi, M.M., Nor, A.A.S., Rafii, M.Y., Azizi, P., Tengoua, F.F., Mayzaitul, A.J.N. y Shabanimofrad, M. (2015). Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International*, 2015, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2015/396010>
- Sarai, N. S., Levin, B. J., Roberts, J. M., Katsoulis, D. E., y Arnold, F. H. (2021). Biocatalytic transformations of silicon—The other group 14 element. *ACS Central Science*, 7(6), 944-953.
- Saw, G., Nagdev, P., Jeer, M. y Murali-Baskaran R. K. (2023). Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pestic Biochem Physiol*. 194 (105524) <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105524>
- Sharma, B., Tiwari, S., Kumawat, K. C., y Cardinale, M. (2023). Nano-biofertilizers as bio-emerging strategies for sustainable agriculture development: Potentiality and their limitations. *Science of The Total Environment*, 860, e160476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160476>
- Shoaib, A., Elabasy, A., Waqas, M., Lin, L., Cheng, X., Zhang, Q., y Shi, Z. H. (2018). Entomotoxic effect of silicon dioxide nanoparticles on *Plutella xylostella* (L.)(Lepidoptera: Plutellidae) under laboratory conditions. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100(1), 80-91. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1387786>
- Schaller, J., Puppe, D., Kaczorek, D., Ellerbrock, R. y Sommer, M. (2021). Silicon cycling in soils revisited. *Plants*, 10(2), 1-33. <https://doi.org/10.3390/plants10020295>

- Singh, P.R., Handa, R. y Manchanda, G. (2021). Nanoparticles in sustainable agriculture: an emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 329, 1234-1248. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>
- Snehal, S. y Lohani, P. (2018). Silica nanoparticles: Its green synthesis and importance in agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 3383-3393.
- Song, X.P., Verma, K.K., Tian, D.D., Zhang, X.Q., Liang, Y.J., Huang, X., Li, C.N. y Li, Y.R. (2021). Exploration of silicon functions to integrate with biotic stress tolerance and crop improvement. *Biological Research*, 54(19), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40659-021-00344-4>
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Kavitha, K., Yuvakkumar, R., Rajendran, V. y Kannan, N. (2014). Application of silica nanoparticles in maize to enhance fungal resistance. *IET Nanobiotechnology*, 8(3), 133-137. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2013.0004>
- Thind, S., Hussain, I., Ali, S., Hussain, S., Rasheed, R., Ali, B. y Hussain, H.A. (2020). Physiological and biochemical bases of foliar Silicon-induced alleviation of cadmium toxicity in wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 2714-2730. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00337-4>
- Tréguer, P.J., Sutton, J.N., Brzezinski, M., Charette, M.A., Devries, T., Dutkiewicz, S., Ehlert, C., Hawkings, J., Leynaert, A., Liu, S.M., Monferrer, N.L., López-Acosta, M., Maldonado, M., Rahman, S., Ran, L. y Rouxel, O. (2021). Reviews and syntheses: The biogeochemical cycle of silicon in the modern ocean. *Biogeosciences*, 18(4), 1269-1289. <https://doi.org/10.5194/bg-18-1269-2021>
- Trejo-Téllez, L.I., García-Jiménez, A., Escobar-Sepúlveda, H.F., Ramírez-Olvera, S.M., Bello-Bello, J.J. y Gómez-Merino, F.C. (2020). Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ*, 2020(6), e9224. <https://doi.org/10.7717/peerj.9224>
- Vander, L.C. y Delvaux, B. (2019). The weathering stage of tropical soils affects the soil-plant cycle of silicon, but depending on land use. *Geoderma*, 351, 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.033>
- Vargas-Hernández, M., Macias-Bobadilla, I., Guevara-González, R.G., Rico-García, E., Ocampo-Velázquez, R.V., Avila-Juarez, L. y Torres-Pacheco, I. (2020). Nanoparticles as potential antivirals in agriculture. *Agriculture (Switzerland)*, 10(10), e444. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100444>
- Vargas-Hernández, M., Macias-Bobadilla, I., Guevara-González, R.G., Romero-Gómez, S.J., Rico-García, E., Ocampo-Velázquez, R.V., Alvarez-Arquieta, L.L. y Torres-Pacheco, I. (2017). Plant hormesis management with biostimulants of biotic origin in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 8, e1762. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01762>
- Verma, K.K., Song, X.P., Tian, D.D., Guo, D.J., Chen, Z.L., Zhong, C.S., Nikpay, A., Singh, M., Rajput, V.D., Singh, R.K., Minkina, T. y Li, Y.R. (2021). Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and improvement. *Plants*, 10(10), e2163. <https://doi.org/10.3390/plants10102163>
- Vu, Q., Dossa, G.S., Mundaca, E.A., Settele, J., Crisol-Martínez, E., y Horgan, F.G. (2022). Combined effects of soil silicon and host plant resistance on planthoppers, blast and bacterial blight in tropical rice. *Insects*, 13(7), e604. <https://doi.org/10.3390/insects13070604>
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q. y Guo, S. (2017). Role of silicon on plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>
- Yamaji, N., Sakurai, G., Mitani-Ueno, N. y Ma, J.F. (2015). Orchestration of three transporters and distinct vascular structures in node for

- intervascular transfer of silicon in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(36), 11401-11406. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508987112>
- Yang, L., Han, Y., Li, P., Li, F., Ali, S. y Hou, M. (2017). Silicon amendment is involved in the induction of plant defense responses to a phloem feeder. *Scientific Reports*, 7(1): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04571-2>
- Zargar, S.M., Mahajan, R., Bhat, J.A., Nazir, M., y Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. 3. *Biotech*, 9(3), e73. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>
- Zhao, D., Xu, C., Luan, Y., Shi, W., Tang, Y. y Tao, J. (2021). Silicon enhances stem strength by promoting lignin accumulation in herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 190, 769-779. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.016>
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A., y Munné-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289, e110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.11.0270>