

El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas

Silicon (Si) and its mitigating effect on salt stress in horticultural crops

Andrea Cabezas Gutiérrez¹, Fernanda Camus Araya¹, Wladimir Esteban Condori¹,
Francisco Andrés González Vallejos¹, Pilar Mazuela Águila^{1*}

RESUMEN

La salinidad es el principal factor que limita el desarrollo y rendimiento de los cultivos debido al estrés fisiológico que producen las sales. En este contexto, el silicio (Si) ha sido propuesto por varios autores como una alternativa para mitigar el estrés salino. La suplementación con Si se considera uno de los métodos prometedores para mejorar la resiliencia de las plantas y así aumentar la capacidad de tolerancia de varios cultivos hortícolas.

En este estudio describimos cómo el Si confiere tolerancia al estrés salino y a la toxicidad por boro (B), ya que otorga a las plantas respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares que les permiten sobrevivir a las adversidades del medio. En este sentido, un importante desafío futuro es mejorar la producción hortícola, donde el Si puede incluirse en el manejo del cultivo con el fin de obtener sistemas más resilientes frente a estas condiciones desfavorables que muchas veces merman la producción.

Palabras clave: tomate, pepino, haba, espárrago, espinaca.

ABSTRACT

Salinity is the main factor limiting crop development and yield due to the physiological stress produced by salts. In this context, silicon (Si) has been proposed by several authors as an alternative to mitigate salt stress. Si supplementation is considered one of the promising methods to improve plant resilience and thus increase the tolerance capacity of several horticultural crops.

In the present study, we describe how Si confers tolerance to salt stress and boron (B) toxicity by conferring physiological, biochemical, and molecular responses to plants that enable them to survive environmental adversities. In this sense, an important future challenge is to improve horticultural production, where Si can be included in crop management in order to obtain more resilient systems in the face of these unfavorable conditions that often reduce production.

Keywords: silicon, salt stress, horticultural crops.

Introducción

Alrededor del mundo, el cultivo de distintas especies agrícolas está siendo limitado por la salinización de suelos, lo que provoca un bajo rendimiento productivo. Cabe mencionar además que la condición de salinidad suele darse con mayor frecuencia en sectores áridos y semiáridos, donde el régimen de lluvia no logra suplir los requerimientos hídricos de los cultivos.

La salinidad en el suelo es un estrés ambiental que restringe el rendimiento y crecimiento de varios cultivos (Zhao *et al.*, 2020). Los principales iones que componen las sales solubles y dan

lugar al fenómeno salinidad son cationes como sodio (Na⁺), calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), potasio (K⁺), y los aniones cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄²⁻), nitrato (NO₃⁻) y bicarbonato (HCO₃⁻). El Na⁺ y el Cl⁻ son los iones que causan un mayor estrés salino en las plantas (Artiola *et al.*, 2019). Los efectos negativos dependen de varios factores, pero principalmente del nivel de salinidad, el tiempo de exposición, genotipo y estado de madurez de la planta (Gengmao *et al.*, 2015).

La salinidad altera el desarrollo de los cultivos, ya que en estas condiciones el potencial osmótico ($\psi\pi$) del suelo supera al del sistema de las plantas, restringiendo la absorción de agua en la raíz.

¹ Departamento de Producción, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Tarapacá. Arica, Chile.

* Autor por correspondencia: pmazuela@academicos.uta.cl

Además de ello, trae consigo otros problemas como absorción limitada de nutrientes, exceso de iones (provocando toxicidad) y acumulación de Cl^- , Na^+ y B^- en distintas partes de la planta. La presencia en exceso de determinados elementos provoca antagonismos entre nitrato-cloruro, potasio-sodio y calcio-sodio, causando una reducción en la tasa de expansión foliar, seguida por el cierre estomático y, por consiguiente, la disminución de fotosíntesis y transpiración. A largo plazo, la combinación de estos efectos conlleva un estrés oxidativo en las plantas debido a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y nitrógeno (RNS).

En la actualidad existen diferentes estudios que consideran al silicio (Si) como un importante agente exógeno que refuerza el sistema de defensa en las plantas frente a condiciones salinas. Este mineral es un nutriente que ha despertado gran interés en la agricultura, ya que actúa positivamente cuando se presentan problemas de relaciones hídricas, fotosíntesis, absorción de iones, biosíntesis de hormonas y también en los tejidos que proporcionan resistencia mecánica a las plantas.

El estudio tuvo como objetivo generar una descripción del conocimiento actualizado, con el fin de comprender mejor el papel de este elemento bajo estrés salino y toxicidad por B a nivel suelo y planta.

Silicio como agente mitigador

El Si es el segundo elemento más abundante en la tierra y su presencia estimula la capacidad de las plantas para crecer en condiciones de estrés mejorando las actividades fisiológicas, bioquímicas y componentes estructurales (Khan *et al.*, 2020).

En el suelo el Si se encuentra en forma de silicatos y óxidos, en una concentración que oscila entre 0,1 y 0,6 nM (Zhang *et al.*, 2018). Las plantas absorben este elemento como ácido silícico $\text{Si}(\text{OH})_4$ y es transportado a través del xilema hasta los órganos con mayor tasa de transpiración (Tubana *et al.*, 2016). Al alcanzar el límite de solubilidad se polimeriza en forma de sílice amorfa (SiO_2), la cual se deposita en las paredes celulares de las superficies epidérmicas de tallos, hojas y frutos (Exley, 2015).

El Si está presente en todas las plantas en valores que van del 0,1 al 10% de su peso seco. Estas cantidades dependen de la capacidad de las raíces para absorber el elemento y del genotipo de

la planta. Las plantas que pueden acumular más de 4% de Si en el tejido vegetal son clasificadas como acumuladoras, aquellas que contienen entre 2 y 4% se consideran intermedias y las que acumulan menos de 2% se denominan no acumuladoras (Guerriero *et al.*, 2016).

El Si incide en la mejora de los niveles de osmolitos como la prolina, proteínas solubles, azúcares y compuestos fenólicos, los cuales juegan un papel en el ajuste osmótico y sistema antioxidante (enzimático y no enzimático), inhibiendo en última instancia el exceso de ROS y, en consecuencia, se reduce la peroxidación lipídica (Rady *et al.*, 2019). Un mayor contenido de Si en las hojas favorece el flujo de estos solutos, lo que provoca valores de $\psi\pi$ bajos, junto con la captación y retención de agua en los tejidos.

Con la presencia de Si se reduce la translocación de iones de la raíz a las hojas, evitando una alta concentración de Na^+ y Cl^- en el tejido aéreo. A la vez incrementa las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en todos los órganos (Khan *et al.* 2020). De igual forma, Ríos *et al.* (2017) sostienen que el Si promueve el desarrollo y actividad de las barreras de difusión, exodermis, endodermis y banda de Caspari, a través de una mayor deposición de suberina y lignina para la transportación apoplástica del Na^+ , evitando la acumulación de este ion en el brote de la planta. Esto puede conducir a un restablecimiento de las acuaporinas con el fin de mantener el flujo de agua a través de la ruta simplástica.

Además, el Si promueve la modificación del intercambio gaseoso, uno de los procesos más afectados por la salinidad. Este elemento tiene un papel protector del cloroplasto, mejorando la concentración de pigmentos relacionados con la absorción de la luz, lo que provoca un aumento de la actividad fotosintética (Jesús *et al.*, 2018). Con la aplicación de Si, en la planta se incrementan los compuestos orgánicos que contribuyen al ajuste osmótico, permitiendo la retención de agua y manteniendo los procesos vitales.

También el Si se deposita debajo de las cutículas y en la pared celular, ayudando a las células vegetales a mejorar la capacidad de desintoxicación de ROS, así como a modular los sistemas de defensa antioxidantes y la expresión de genes claves asociados con la mitigación del estrés oxidativo y el metabolismo hormonal (Mostofa *et al.*, 2021).

Efecto mitigador de boro

El Si ha sido reportado como un elemento benéfico para varias especies de plantas, pero aún existe debate respecto a su esencialidad (Katz *et al.*, 2021). Su principal beneficio ha sido observado en plantas estresadas, variando en gran medida de una especie a otra y dependiendo principalmente de la genética, respuesta que no ha sido comprobada en genotipos tolerantes a salinidad (Gunes *et al.*, 2007).

El efecto positivo del Si ha sido evaluado tanto a nivel de suelo como de planta (Imtiaz *et al.*, 2016). En el suelo, donde es parte estructural de sus partículas, el rol mitigador sobre el estrés salino se aprecia principalmente en la toxicidad específica por B, provocando la formación de complejos de boro-silicatos (B-Si) que disminuyen su disponibilidad para la planta (Gunes *et al.*, 2007). Sin embargo, para otros iones salinos (Na^+ y Cl^-) no se ha observado un efecto directo sobre su mitigación, actuando más bien sobre la estabilidad de los microagregados (Schaller *et al.*, 2021) que contribuyen a la red de poros dentro y entre los agregados, siendo un aspecto clave en la estructura edáfica y la lixiviación de sales del perfil de suelo.

Aun cuando el efecto mitigador del Si en las plantas afectadas por sales se aprecia a nivel del fortalecimiento de la pared celular (función mecánica) (Coskun *et al.*, 2016), falta por determinar una posible función metabólica en las plantas.

Efecto del Si en diversos cultivos

Las investigaciones de Si han avanzado de forma considerable y es ampliamente reconocido el efecto beneficioso en diversas plantas. Sin embargo, aún se necesita una mayor investigación acerca de los mecanismos que inducen al Si como agente benéfico para el cultivo, especialmente en condiciones adversas y estrés. No obstante, existe evidencia significativa de que este elemento muestra efectos positivos en procesos de germinación, crecimiento, producción de biomasa, concentración mineral y sustancias de importancia nutricional.

La magnitud de los beneficios aportados por el Si bajo un estrés de alta salinidad varía en gran medida de una especie a otra, dependiendo principalmente de la genética de las plantas. Como regla general, Ouellette *et al.*, (2017) sostienen que las monocotiledóneas se consideran

altas acumuladoras de Si y las dicotiledóneas, acumuladoras bajas. Sin embargo, Deshmukh *et al.* (2020) realizaron un estudio con varias familias de dicotiledóneas, incluidas las Cucurbitaceae, Fabaceae y Asteraceae, las cuales mostraron una alta acumulación de Si, mientras que solo las especies de monocotiledóneas dentro de la familia Poaceae hicieron lo mismo. En el ensayo, el girasol (dicotiledónea) acumuló igual cantidad de Si que el arroz (*Oryza sativa L.*) (monocotiledónea), cuyo cultivo es conocido por su gran capacidad de acumulación. Lo anterior deja en evidencia lo obsoleto que ha quedado este concepto, ya que la acumulación de este elemento va más allá de la clase taxonómica.

Lugares como el Medio Oriente se caracterizan por investigar constantemente las condiciones que limitan la producción agrícola, dado que sus características climatológicas son adversas. Ante esto, Abdul y Moftah (2014) evaluaron los efectos del Si y Nano-Silicio (NSi) en la mitigación de salinidad en germinación, crecimiento y rendimiento de haba (*Vicia faba L.*). Los resultados indican que la aplicación de Si y NSi mejoró las características de germinación de semillas de haba, con un aumento en el contenido de K^+ y una disminución de Na^+ en las semillas con condiciones salinas. De igual forma, Haghghi *et al.* (2012) demostraron que al aplicar Si en los procesos germinativos de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) provocaron una gran reducción de daños, aumentando altamente la tasa de germinación.

Por otro lado, Kaloterakis (2021) realizó un estudio que consistió en aplicar Si mediante la fertilización en plántulas de pepino (*Cucumis sativus L.*), en un sistema hidropónico recirculante. La aplicación de Si incrementó varios parámetros asociados al crecimiento de plántulas y la disminución de los efectos adversos de salinidad. La mejora del crecimiento bajo un estrés salino se combinó con la reducción de cloruros presentes en el suelo y una alteración en el crecimiento de las raíces. Bajo condiciones de estrés salino, se observó que el sistema radicular incrementó el volumen y biomasa en respuesta a la aplicación de Si, proporcionando un beneficio significativo para las plántulas.

Cuando se alcanza un umbral tóxico de salinidad, se provocan alteraciones en la estabilidad iónica, lo que conlleva relaciones de Na^+/K^+ y $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ inadecuadas para el crecimiento de la planta.

Rady *et al.* (2018) mencionan que el Si aplicado de forma foliar en plantas de cebolla revirtió el desequilibrio de N, P, K y la baja relación de Na^+/K^+ causado por la salinidad. Al igual que en trigo, el Si propició un mayor contenido de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Javaid *et al.*, 2019), proporcionando mayor relación entre estos nutrientes. En girasol (*Helianthus annuus* L.) y sorgo (*Sorgo bicolor* L.) la captación de K^+ y Ca^{2+} fue mejorada bajo la aplicación de Si, aumentando el crecimiento y la productividad (Hurtado *et al.*, 2020).

Cabe mencionar que la concentración de Na^+ , B y Cl^- en la parte aérea de las plantas de tomate y espinaca (*Spinacea oleracea* L.) disminuye cuando se aplica Si a los suelos sódicos. Eraslan (2008) evaluó el efecto de la aplicación de Si en plantas de espinacas sometidas a diversos estreses como salinidad, concentración de B y ácido salicílico (SA), y concluyó que este elemento podría proteger a las plantas contra el daño oxidativo al mejorar los sistemas antioxidantes. El trabajo de Gunes *et al.* 2007 también mostró que la espinaca es más tolerante a la toxicidad combinada del B y la salinidad que otras especies.

Conclusiones

En los últimos años el interés por el Si se refleja en el aumento de evidencia científica que considera

este elemento como una alternativa para cultivos desarrollados en condiciones de salinidad, siendo una herramienta que puede mitigar los efectos de las sales a nivel de suelo y planta.

Varios autores coinciden en que la adición de Si alivia los efectos del estrés salino junto con la toxicidad por B, ya que mejora la relación Na^+/K^+ y $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, reduciendo el estrés oxidativo. El Si se ha caracterizado como una enmienda de gran importancia para aumentar el crecimiento y la tolerancia de los cultivos a la salinidad. También se destaca su papel para mantener la homeostasis iónica, la absorción y redistribución de nutrientes, lo que ayudaría a la planta a realizar un uso más eficiente de los recursos disponibles. En general, se puede concluir que en suelos salinos la aplicación de Si alivia el estrés en todas las etapas de crecimiento.

Aun cuando diversas investigaciones han abordado el efecto benéfico del Si en cultivos hortícolas, es necesario generar una mayor información sobre los aspectos técnicos para su implementación en condiciones salinas y con toxicidad específica por B.

Agradecimientos

Proyecto Estudiantil UTA 9727-18 y CD UTA 1401 y CD UTA 1795.

Literatura citada

- Artiola, J.; Walworth, J.; Musil, S.; Crimmins, M. 2019. Soil and Land Pollution. *Environmental and Pollution Science*, 3 (14): 219-235.
- Coskun, D.; Britto, D.T.; Huynh, W. Q.; Kronzucker, H.J. 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Front. Plant Sci.*, 7:1072. DOI: 10.3389/fpls.2016.01072
- Deshmukh, R., Sonah, H.; Belanger, R.R. 2020. New evidence defining the evolutionary path of aquaporins regulating silicon uptake in land plants. *Journal of experimental botany*, 71 (21): 6775-6788.
- Eraslan, F.; Inal, A.; Pilbeam, D.; Gunes, A. 2008. Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Matador) grown under boron toxicity and salinity. *Plant Growth Regulation*, 55 (3): 207-219.
- Exley, C. 2015. A possible mechanism of biological silicification in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6: 853. DOI:10.3389/fpls.2015.00853
- Gengmao, Z.; Shihui, L.; Xing, S.; Yizhou, W.; Zipan, C. 2015. The role of silicon in physiology of the medicinal plant (*Lonicera japonica* L.) under salt stress. *Scientific reports*, 5 (1): 1-11.
- Guerrero, G.; Hausman, J.; Legay, S. 2016. Silicon and the Plant Extracellular Matrix. *Frontiers in Plant Science*, 7: 463. DOI:10.3389/fpls.2016.00463
- Gunes, A.; Inal, A.; Bagci, E.G.; Pilbeam, D.J. 2007. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. *Plant and Soil*, 290(1): 103-114.
- Haghighi, M.; Afifipour, Z.; Mozafarian, M. 2012. The alleviation effect of silicon on seed germination and seedling growth of tomato under salinity stress. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 76, 119. DOI: 10.2478/v10032-012-0008-z.
- Hurtado, A.; Chiconato, D.; de Mello Prado, R.; Junior, G.; Gratão, P.; Felisberto, G.; Dos Santos, D. 2020. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 110964. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110964

- Imtiaz, M.; Rizwan, M.S.; Mushtaq, M.A.; Ashraf, M.; Shahzad, S.M.; Yousaf, B.; Tu, S.
2016. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. *Journal of environmental management*, 183: 521-529.
- Javaid, T.; Ansar, F.M.; Akhtar, J.; Ahmad, S.Z.; Anwarul-Haq, M.
2019. Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na⁺, Cl⁻ and mineral ions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 291-299.
- Jesús, E.; Fátima, R.; Guerrero, A.; Araújo, J.; Brito, M.
2018. Growth and gas exchanges of arugula plants under silicon fertilization and water restriction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22: 119-124.
- Kaloterakis, N.; van Delden, S.H.; Hartley, S.; De Deyn, G.B.
2021. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure Bacillus species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 288, 110383. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110383
- Katz, O.; Puppe, D.; Kaczorek, D.; Prakash, N.B.; Schaller, J.
2021. Silicon in the soil-plant continuum: intricate feedback mechanisms within ecosystems. *Plants*, 10: 652. DOI: 10.3390/plants10040652.
- Khan, A.; Bilal, S.; Latif, K.A.; Imran, M.; Al-Harrasi, A.; AlRawahi, A.; Lee, I-J.
2020. Silicon-mediated alleviation of combined salinity and cadmium stress in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by regulating physio-hormonal alteration. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188, 109885. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109885.
- Mostofa, M.; Rahman, M.; Ansary, M.; Keya, S.; Abdelrahman, M.; Miah, M. G.; Phan Tran, L.
2021. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41 (6): 918-934.
- Ouellette, S.; Goyette, M.H.; Labbé, C.; Laur, J.; Gaudreau, L.; Gosselin, A.; Bélanger, R.R.
2017. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in plant science*, 8, 949. DOI: 10.3389/fpls.2017.00949
- Rady, M.; Semida, W.; El-Mageed, T.; Hemida, K.; Randy, M.
2018. Up-regulation of antioxidative defense systems by glycine betaine foliar application in onion plants confer tolerance to salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 240, 614-622.
- Rady, M.; Elrys, A.S.; El-Maati, M.; Desoky, E.
2019. Interplaying roles of silicon and proline effectively improve salt and cadmium stress tolerance in *Phaseolus vulgaris* plant. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 558-568.
- Rios, J.; Martínez-Ballesta, M.; Ruiz, J.M.; Blasco, B.; Carvajal, M.
2017. Silicon-mediated Improvement in Plant Salinity Tolerance: The Role of Aquaporins. *Frontiers in Plant Science*, 8: 948. DOI: 10.3389/fpls.2017.00948
- Schaller, J.; Puppe, D.; Kaczorek, D.; Ellerbrock, R.; Sommer, M.
2021. Silicon cycling in soils revisited. *Plants*, 10 (2): 295.
- Tubana, B.; Babu, T.; Datnoff, L.
2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. *Soil Science*, 181 (9/10): 393-411.
- Zhao, C.; Zhang, H.; Song, C.; Zhu, J.; Shabala, S.
2020. Mechanisms of Plant Responses and Adaptation to Soil Salinity. *The Innovation*, 1 (1): 1-17. DOI: 10.1016/j.xinn.2020.100017
- Zhang, Y.; Shi, Y.; Gong, H.; Li, H.; Hu, Y-h.; Wang, Y.
2018. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (10): 2151-2159.

