

Efecto Diferenciado del Silicio en la Interacción con NaCl en la Emergencia de Tres Variedades de (*Solanum lycopersicum* L.) Differential Effect of Silicon on the Interaction with NaCl on the Emergence of Three Varieties of (*Solanum lycopersicum* L.)

Emmanuel Alexander Enríquez-Acosta¹ , Fernando de Jesús Carballo-Méndez^{2†} ,
Francisco Higinio Ruiz-Espinoza³ , Félix Alfredo Beltrán-Morales³ ,
Dania Gisel Camacho-Aguñiga⁴ y César Enrique Calvopiña-León⁵

¹ Universidad Autónoma de Baja California Sur, Estudiante de Maestría en Innovación y Producción Orgánica en Ambientes Áridos y Costeros. ³ Profesor-Investigador. ⁴ Ayudante académico. Carretera al Sur km 5.5., Apartado Postal 19-B. 23080 La Paz, Baja California Sur, México; (E.A.E.A.), (F.H.R.E.), (F.A.B.M.), (D.G.C.A.).

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Profesor-Investigador Facultad de Agronomía. Av. Francisco Villa s/n, Ex Hacienda El Canadá. 66450 General Escobedo, Nuevo León, México; (F.J.C.M.).

[†] Autor para correspondencia: fcarballom@uanl.edu.mx

⁵ Universidad Técnica de Cotopaxi-Extensión La Maná, Profesor-Investigador. Av. Los Almendros y Pujilí, Edificio Universitario. EC050250 La Maná, Cotopaxi, Ecuador; (C.E.C.L.).

RESUMEN

El estrés por salinidad es uno de los problemas ambientales con mayor impacto en la agricultura, ya que provoca cambios morfológicos, fisiológicos y genéticos en las plantas. Considerando el gran impacto de la salinidad, se buscan alternativas para mitigar el estrés en las plantas, en especial por cloruro de sodio (NaCl). Los productos a base de silicio (Si) tienen la capacidad de mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, al estar expuestas en condiciones salinas. El objetivo de esta investigación fue evaluar la interacción NaCl-Si en la emergencia de plántulas de tres variedades de tomate. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial de 3², donde el factor A fueron las concentraciones de cloruro de sodio (0 mM, 25 mM, 50 mM) y el factor B, las diluciones de Si (0 mM, 1 mM, 2 mM). Los resultados indican que las variedades de tomate fueron impactadas de diferente manera por la interacción NaCl-Si. En condiciones no salinas (0 mM de NaCl) el Si incrementó el crecimiento de tomate cherry y saladette, mientras que en condiciones de salinidad moderada (25 mM de NaCl) sólo el tomate saladette fue beneficiado.

Palabras clave: *estrés salino, plántulas, tomate.*

SUMMARY

Salinity stress is one of the environmental problems with the greatest impact on agriculture as it causes morphological, physiological and genetic changes in plants. Considering the great impact of salinity, alternatives are being sought to mitigate stress in plants, especially by sodium chloride (NaCl). Silicon (Si)-based products have the ability to improve plant growth and development when exposed to saline conditions. Thus, the aim of our research was to evaluate the NaCl-Si interaction on seedling emergence of three tomato varieties. The experimental design was completely randomized with a factorial arrangement 3², where factor A was sodium chloride concentrations (0 mM, 25 mM, and 50 mM) and factor B, Si dilutions (0 mM, 1 mM, and 2 mM). Our results indicate that tomato varieties were impacted differently by the NaCl-Si interaction. Under non-saline conditions (0 mM NaCl), Si increased the growth of cherry and saladette tomato, while under moderate salinity conditions (25 mM NaCl) only saladette tomato was benefited.

Index words: *salinity stress, seedlings, tomato.*



Cita recomendada:

Enríquez-Acosta, E. A., Carballo-Méndez, F. J., Ruiz-Espinoza, F. H., Beltrán-Morales, F. A., Camacho-Aguñiga, D. G., & Calvopiña-León, C. E. (2024). Efecto Diferenciado del Silicio en la Interacción con NaCl en la Emergencia de Tres Variedades de (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 42, 1-10. e1927. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1927>

Recibido: 28 de marzo de 2024.

Aceptado: 11 de junio de 2024.

Nota de Investigación. Volumen 42. Julio de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Luis Hernández Adame

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

INTRODUCCIÓN

La salinidad del suelo es uno de los principales factores estresantes que perjudica el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Ahmad *et al.*, 2019). Esta condición afecta a 20% (60 millones de ha) de los suelos cultivables en todo el mundo, incrementándose continuamente debido al cambio climático extremo, el uso indiscriminado de fertilizantes sintéticos y el riego con agua salina (Zhu, Gong y Yin, 2019; Meng *et al.*, 2020; Sehrawat, Yadav, Sharma, Kumar y Bhat, 2018). El estrés por salinidad, en especial por cloruro de sodio (NaCl) afecta los procesos morfo-fisiológicos y bioquímicos de las plantas provocando disminución en la biomasa (Carballo-Mendez *et al.*, 2019). Al mismo tiempo, provoca sequía fisiológica, toxicidad iónica, insuficiencia en el uso del agua, desequilibrio nutricional y estrés oxidativo (Rehman *et al.*, 2019).

Ante la problemática antes mencionada, se han encontrado algunas alternativas para atenuar el impacto de la salinidad en los cultivos. Una de dichas alternativas es la fertilización con materiales a base de silicio (Si). El Si es el segundo elemento de mayor abundancia en la corteza terrestre después del oxígeno (Zhu *et al.*, 2019). Sin embargo, las plantas no pueden absorber el Si del suelo de manera directa, ya que se encuentra en forma de minerales de silicatos complejos (Frew, Weston, Reynolds y Gurr, 2018). Las plantas absorben el Si en forma de ácido silícico (H_4SiO_4), el cual ingresa por las raíces a través de la vía apoplástica y simplástica, trasladándose así, a los diferentes órganos de las plantas vía xilema y se deposita en forma de sílice (SiO_2) en las paredes celulares (Guerriero, Hausman y Legay, 2016). El Si tiene la capacidad de mejorar la actividad de la membrana plasmática, la fotosíntesis, la nutrición mineral e interactúa en la biosíntesis de lignina y celulosa, de esta manera el Si mitiga los efectos adversos por NaCl o algún tipo de estrés medio ambiental (Jan *et al.*, 2018; Rizwan *et al.*, 2019). Diversas investigaciones han demostrado el efecto como bioestimulante del Si en plantas sometidas a estrés salino por lo que la fertilización con Si debe considerarse como una práctica sostenible para la producción de cultivos de interés como el tomate (Hoffmann, Berni, Hausman y Guerriero, 2020). El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más importantes y de alto valor nutritivo, ampliamente cultivada a nivel mundial (Villegas-Espinoza *et al.*, 2018). Sin embargo, la presencia de NaCl en el suelo afecta el rendimiento y la calidad de este cultivo de interés comercial (Durukan y Demirbas, 2018). El género *Solanum* posee un carácter heredable de tolerancia a la salinidad (Cuartero, Bolarín, Asíns y Moreno, 2006). Sin embargo, Ashraf y Foolad (2007) mencionan que, la resistencia a la salinidad, no solamente dependen de la especie vegetal, sino que también de las variedades o ecotipos dentro de una misma especie; lo cual podría relacionarse con los mecanismos de respuestas de cada cultivar o variedad a ciertos grados o niveles de NaCl. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la interacción de NaCl-Si en la emergencia de plántulas de tres variedades de tomate.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación

La investigación se realizó en la Universidad Autónoma Baja California Sur (UABCS), localizada en la carretera al sur km 5.5 Apartado Postal 19-B código postal 23080, en La Paz, Baja California Sur, México. 24.102° o 24° 6' 7" N y 110.3154° o 110° 18' 55" O.

Material Biológico

Las variedades de tomate utilizadas fueron: cherry (*Solanum lycopersicum* var. Cerasiforme), bola (*Solanum lycopersicum* var. Floradade) y saladette (*Solanum lycopersicum* var. Río grande), cuyas semillas se obtuvieron del laboratorio de germoplasma de la UABCS.

Diseño Experimental

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial de 3^2 , donde el factor A fueron las concentraciones salinas de NaCl (0 mM, 25 mM y 50 mM) y el factor B las diluciones de Si (0 mM, 1 mM y 2 mM). Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones de 30 semillas cada una.

Desarrollo del Experimento

El experimento se llevó a cabo en una estructura de malla sombra donde el rango de temperatura estuvo entre 21 °C y 43 °C. Las pruebas de emergencia se realizaron en bandejas de poliestireno de 200 cavidades, las cuales contenían SOGEMIX PG-M como sustrato. El riego se aplicó diariamente, con un volumen de 1000 mL por bandeja, con sus respectivas soluciones. Las semillas se consideraron emergidas cuando la plántula rompió y surgió a través de la superficie del sustrato.

Variables Evaluadas

Porcentaje y Tasa de Emergencia

El porcentaje de emergencia se registró a los 14 días (ISTA, 2017), mientras que el número de semillas emergidas fue registrado diariamente (tasa de emergencia), el cual fue calculado de acuerdo con la ecuación de Maguire (1962), donde n_1, n_2, \dots, n_{30} son el número de semillas emergidas en los tiempos $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_{14}$ (en días).

A los 30 días después de la siembra, las plántulas fueron cosechadas. Después de separar las plantas por tejido (radícula, tallo y hojas), estos se lavaron con agua potable y posteriormente con agua destilada. Una vez eliminado el exceso de agua, se colocaron en papel estraza y después de esto, se midió la longitud y anchura de hojas, longitud de radícula y longitud de tallo, para lo cual se utilizó una regla graduada.

Longitud y Anchura de Hojas

La longitud de la hoja fue medida desde la unión del peciolo con el tallo, hasta al ápice del foliolo central. Para la anchura se consideró la distancia entre los ápices de los folíolos medios. Dichas variables fueron expresadas en centímetros.

Longitud de Radícula

La longitud de la radícula se tomó desde la base del tallo donde inician los pelos radicales, hasta donde termina la raíz, y fue expresada en centímetros.

Longitud del Tallo

La longitud del tallo se midió desde la base del tallo hasta la yema terminal, para ello se utilizó una regla convencional metálica, graduada en milímetros. Esta variable fue reportada en centímetros.

Número de Hojas

Las hojas totalmente expandidas fueron contadas mediante la observación visual en cada planta individual por tratamiento y se utilizó el valor promedio.

Contenido Relativo de Clorofila

El contenido relativo de clorofila se realizó una vez en dos hojas distintas, del ápice a la base (hojas número 2 y 3) después de los 21 días de la siembra. Para lo anterior se utilizó un medidor de clorofila SPAD 502 Plus, marca Minolta, los resultados fueron expresados en unidades SPAD.

Biomasa Fresca y Seca

A los 21 días de la siembra se seleccionaron 8 plantas al azar por repetición. Para determinar el peso fresco y seco las plantas fueron separadas en raíz, tallo y hoja. Una vez obtenido el peso fresco de las raíces, tallos y hojas, éstas se colocaron en bolsas de papel y se introdujeron en una estufa de secado (Ríos Rocha modelo EO-50) a temperatura de 70 °C durante 72 horas hasta obtener su deshidratación completa. Para determinar el peso se utilizó una balanza analítica (Ohaus, modelo PA224C).

Análisis Estadístico

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y en las variables que mostraron diferencias significativas se realizó la prueba de polinomios ortogonales ($P \leq 0.05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM SPSS Statistics, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variedades de tomate mostraron diferente impacto por parte del NaCl, el Si y la interacción entre estos factores. Particularmente el tomate bola (*Solanum lycopersicum* var. Floradade), no mostró efecto por la interacción NaCl-Si (Cuadro 1).

En tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. Cerasiforme), la presencia de Si mostró efectos cuadráticos incrementando en 11% la longitud de la raíz, en una concentración de 25 mM NaCl, con la presencia de 1 mM de Si; contrario a lo anterior, en los niveles de salinidad bajo (0 mM) y alto (50 mM de NaCl), la misma concentración de Si redujo dicha variable 14% y 47%, respectivamente (Figura 1A). En la longitud del tallo se incrementó 24% cuando la concentración de Si fue de 1 mM en condiciones salinas (25 mM) (Figura 1B).

La presencia de Si en la solución provocó aumento lineal de la biomasa fresca de raíz en condición no salina (0 mM de NaCl), mientras que en condición salina (50 mM de NaCl) la presencia de Si redujo dicha variable (Figura 1C). En la biomasa fresca del tallo, la concentración de 2 mM de Si, en condiciones no salinas (0 mM de NaCl), incrementó 25% dicha biomasa, mientras que en condiciones salinas (25 mM de NaCl), la concentración de 1 mM de Si la incrementó 28% (Figura 1D).

En la biomasa fresca de la hoja se observó un efecto cuadrático al incrementar las dosis de Si; particularmente el Si en condiciones no salinas (0 mM NaCl) incrementó dicha variable, mientras que en condiciones salinas (50 mM NaCl) el Si disminuyó la biomasa fresca de hojas (Figura 1E). La biomasa seca de la hoja mostró un efecto positivo del Si en concentraciones de 0 mM y 25 mM NaCl, donde la presencia de 2 mM de Si aumentaron dicha variable en 44% y 8%, respectivamente; mientras que en la concentración de 50 mM NaCl en efecto fue inverso disminuyendo 24% dicha biomasa (Figura 1F).

En tomate saladette (*Solanum lycopersicum* var. río grande), en condiciones no salinas, desarrolló un incremento lineal en la longitud y ancho de la hoja provocado por la presencia de Si. Contrario a lo anterior, en una condición de 25 mM de NaCl dichas variables disminuyeron cuadráticamente (Figura 2A y B).

El Si actuó de manera positiva en condiciones no salinas, incrementando 4% la longitud del tallo y 10% la biomasa fresca del tallo con la presencia de 2 mM de Si (Figuras 2C y D). Contrario a lo anterior, se observó decremento de la biomasa fresca del tallo en presencia de Si en la concentración de 25 mM de NaCl (Figura 2D).

La concentración de 2 mM de Si impacto de manera positiva en la biomasa fresca de la hoja en condiciones no salinas (0 mM de NaCl), al incrementarla 14%; mientras que el efecto fue contrario cuando se incrementó la salinidad (25 mM de NaCl) (Figura 2E). En la producción de la biomasa seca del tallo y de hojas las plántulas regadas con solución sin NaCl mostraron incremento de 30% y 26% con la presencia del 1 mM y 2 mM de Si, respectivamente. Contrario a lo anterior, con la presencia de 25 mM de NaCl en la solución, el impacto generado fue negativo (Figuras 2F y G). Cabe señalar que los resultados antes mencionados fueron obtenidos en un sustrato artificial; sin embargo, pueden ser la base para la utilización del Si tanto en cultivos en suelo o sistemas sin suelo.

Las plantas cultivadas en sistemas agrícolas están expuestas a sufrir cambios ambientales, dificultando así, su óptimo crecimiento (Meng *et al.*, 2020). Una elevada concentración de sales en el suelo puede afectar la morfología y fisiología de las plantas al reducir la producción de la biomasa y su rendimiento (Maliro, Guwela, Nyaika y Murphy, 2017). El estrés salino afecta el desarrollo de la planta, provoca desbalance nutricional, afectando así, los procesos fotosintéticos, metabolismo energético y síntesis de proteínas (Jan *et al.*, 2018; Ahmad *et al.*, 2019). La presencia de sales en el medio de crecimiento, en especial por NaCl, reduce el potencial osmótico de las plantas, afectando así, la absorción de agua y minerales (Casierra-Posada, Carreño y Cutler, 2017).

Li, Zhu, Hu, Han y Gong (2015), evaluaron el factor interacción del NaCl-Si en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), donde observaron que, en condiciones salinas, los parámetros evaluados como: altura de la planta, número de hoja y peso seco (tallo/raíz) aumentaron significativamente al aplicarse las dosis de Si. Por otra parte, Kim *et al.* (2014) evaluaron la influencia del Si en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) en condiciones salinas, donde observaron que, el Si contrarrestó los efectos negativos del NaCl al incrementar la biomasa fresca y la longitud de la raíz.

Cuadro 1. Valores de F (F) y niveles de significancia (P) observados en los análisis de varianza para las variables de emergencia y crecimiento.
Table 1. F values (F) and significance levels (P) observed in the analysis of variance for emergence and growth variables

Variables Factores	Cherry			Bola			Saladette		
	NaCl	Si	NaCl×Si	NaCl	Si	NaCl×Si	NaCl	Si	NaCl×Si
%E									
F	11.067	1.286	1.25	6.692	1.541	1.142	0.069	1.468	0.363
P	<0.001	0.293	0.314	0.004	0.233	0.358	0.933	0.248	0.832
TSE									
F	40.546	0.302	1.748	47.938	0.083	4.019	0.862	2.267	1.47
P	<0.001	0.741	0.169	<0.001	0.921	0.011	0.434	0.123	0.239
CLF									
F	2.866	1.094	1.183	16.124	1.307	1.073	7.053	6.502	0.963
P	0.074	0.349	0.341	<0.001	0.287	0.389	0.003	0.005	0.444
LH									
F	1.507	0.552	0.725	26.992	0.445	0.143	35.876	5.848	13.546
P	0.24	0.582	0.583	<0.001	0.646	0.964	<0.001	0.008	<0.001
AH									
F	13.531	0.311	0.735	26.218	1.497	0.665	34.594	7.213	20.015
P	<0.001	0.735	0.576	<0.001	0.242	0.622	<0.001	0.003	<0.001
#H									
F	27.532	0.657	2.564	6.108	1.577	1.406	14.897	0.883	1.55
P	<0.001	0.527	0.061	0.006	0.225	0.259	<0.001	0.425	0.216
LR									
F	9.282	4.528	4.859	22.05	1.207	1.664	2.834	0.844	1.371
P	<0.001	0.02	0.004	<0.001	0.315	0.187	0.076	0.441	0.27
LT									
F	163.507	3.041	6.312	149.419	0.313	0.932	118.027	3.421	5.372
P	<0.001	0.064	<0.001	<0.001	0.734	0.46	<0.001	0.047	0.003
BFR									
F	21.921	1.15	6.023	41.763	7.076	1.136	7.416	0.086	2.628
P	<0.001	0.332	<0.001	<0.001	0.003	0.361	0.003	0.918	0.056
BFT									
F	41.65	1.531	6.385	89.963	0.732	0.474	20.136	2.984	4.986
P	<0.001	0.235	<0.001	<0.001	0.49	0.754	<0.001	0.067	0.004
BFH									
F	11.967	0.243	4.856	32.26	1.59	0.837	1.488	6.29	23.452
P	<0.001	0.786	0.004	<0.001	0.222	0.514	0.244	0.006	<0.001
BSR									
F	51.268	3.892	4.17	92.048	1.253	0.53	11.779	0.087	3.243
P	<0.001	0.033	0.009	<0.001	0.302	0.714	<0.001	0.917	0.027
BST									
F	46.101	0.84	2.961	97.061	0.805	1.306	12.89	2.625	7.618
P	<0.001	0.443	0.038	<0.001	0.457	0.293	<0.001	0.091	<0.001
BSH									
F	25.775	4.075	8.372	2.461	0.996	0.875	4.778	3.651	12.201
P	<0.001	0.028	<0.001	0.104	0.383	0.492	0.017	0.039	<0.001

%E = porcentaje de emergencia; TSE = tasa de emergencia; CLF = contenido relativo de clorofila; LH = largo de hoja; AH = ancho de hoja; #H = número de hoja; LR = longitud de raíz; LT = longitud de tallo; BFR = biomasa fresca raíz; BFT = biomasa fresca tallo; BFH = biomasa fresca hoja; BSR = biomasa seca raíz; BST = biomasa seca tallo; BSH = biomasa seca hoja. Las variables en las que se denotan valores en negritas de las columnas de NaCl×Si son las variables significativas a las que se realizó posteriormente la prueba de polinomios ortogonales.

%E = emergence percentage; TSE = emergence rate; CLF = relative chlorophyll content; LH = leaf length; AH = leaf width; #H = leaf number; LR = root length; LT = stem length; BFR = root fresh biomass; BFT = stem fresh biomass; BFH = leaf fresh biomass; BSR = root dry biomass; BST = stem dry biomass; BSH = leaf dry biomass. Values in bold in the NaCl×Si columns are the significant, to which the orthogonal polynomial test was subsequently performed.

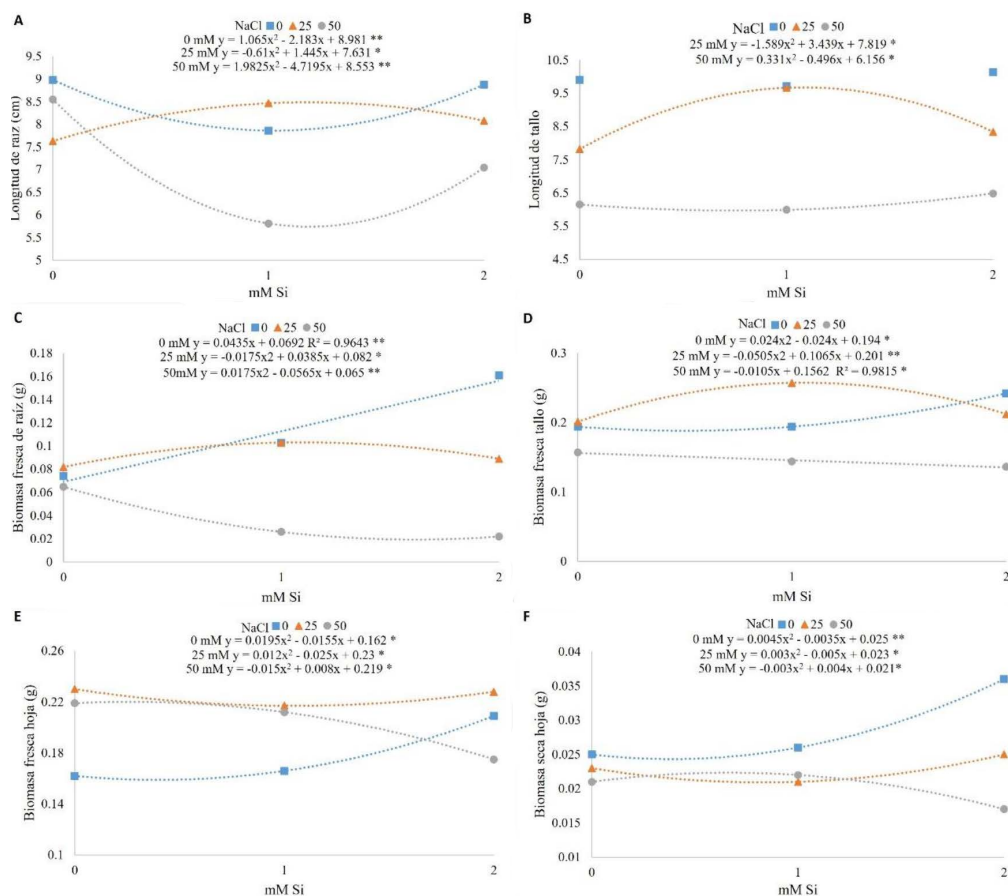


Figura 1. Efecto de la interacción de cloruro de sodio (NaCl) y silicio (Si) en plántulas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. *Cerasiforme*). (A) longitud de raíz; (B) longitud de tallo; (C) biomasa fresca raíz; (D) biomasa fresca tallo; (E) biomasa fresca hoja y (F) biomasa seca hoja. Los asteriscos indican los niveles de significancia 0.01 - 0.05*.**

Figure 1. Effect of sodium chloride (NaCl) and silicon (Si) interaction on cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *Cerasiforme*) seedlings. (A) root length; (B) stem length; (C) stem fresh biomass; (D) stem fresh biomass; (E) leaf fresh biomass; and (F) leaf dry biomass. Asterisks indicate significance levels 0.01 - 0.05*.**

En este mismo sentido, Al-Garni, Khan y Bahieldin (2019) evaluaron el efecto del Si y NaCl en plantas de cilantro (*Coriandrum sativum* L.), dando como resultado, que el Si ejerció un papel protector al aumentar el peso fresco y seco de hoja y raíz bajo estrés por NaCl. Además, Muneer, Park, Manivannan, Soundararajan y Jeong (2014) observaron la eficacia del Si en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de salinidad, al incrementarse el peso fresco y seco (raíz, tallo y hoja).

Yin *et al.* (2019) mencionan que el Si posee efectos positivos al incrementar la acumulación de poliaminas (espermidina y espermina), desempeñando así, la modulación en el sistema de defensa antioxidante de las plantas. Por lo que, la absorción del Si depende de la especie y las condiciones del cultivo. Luyckx, Hausman, Lutts y Guerriero (2017) mencionan que, los efectos que genera el Si dentro de la planta se mantienen latentes en condiciones normales, mientras que, en condiciones de control (NaCl) el Si responde a estímulos exógenos de manera positiva, activando su estado metabólico en la planta.

Farshidi, Abdolzadeh y Sadeghipour (2012) evaluaron la interacción de NaCl-Si en plantas de canola donde se evidenció efecto protector por parte del Si al aumentar la producción de la biomasa fresca (raíz, tallo y hoja), y longitud del tallo y raíz en condiciones de 100 mM NaCl. De la misma manera, Xu, Ma y Liu (2015) observaron incremento por parte del Si en el peso fresco y seco de las hojas de aloe en condiciones salinas. Tahir, Aziz, Farooq y Sarwar (2012), investigaron el efecto del Si en plantas de trigo cultivadas con estrés por salinidad, y observaron que el Si actuó de manera positiva al incrementar el contenido de clorofila, peso fresco y seco de brotes y raíces.

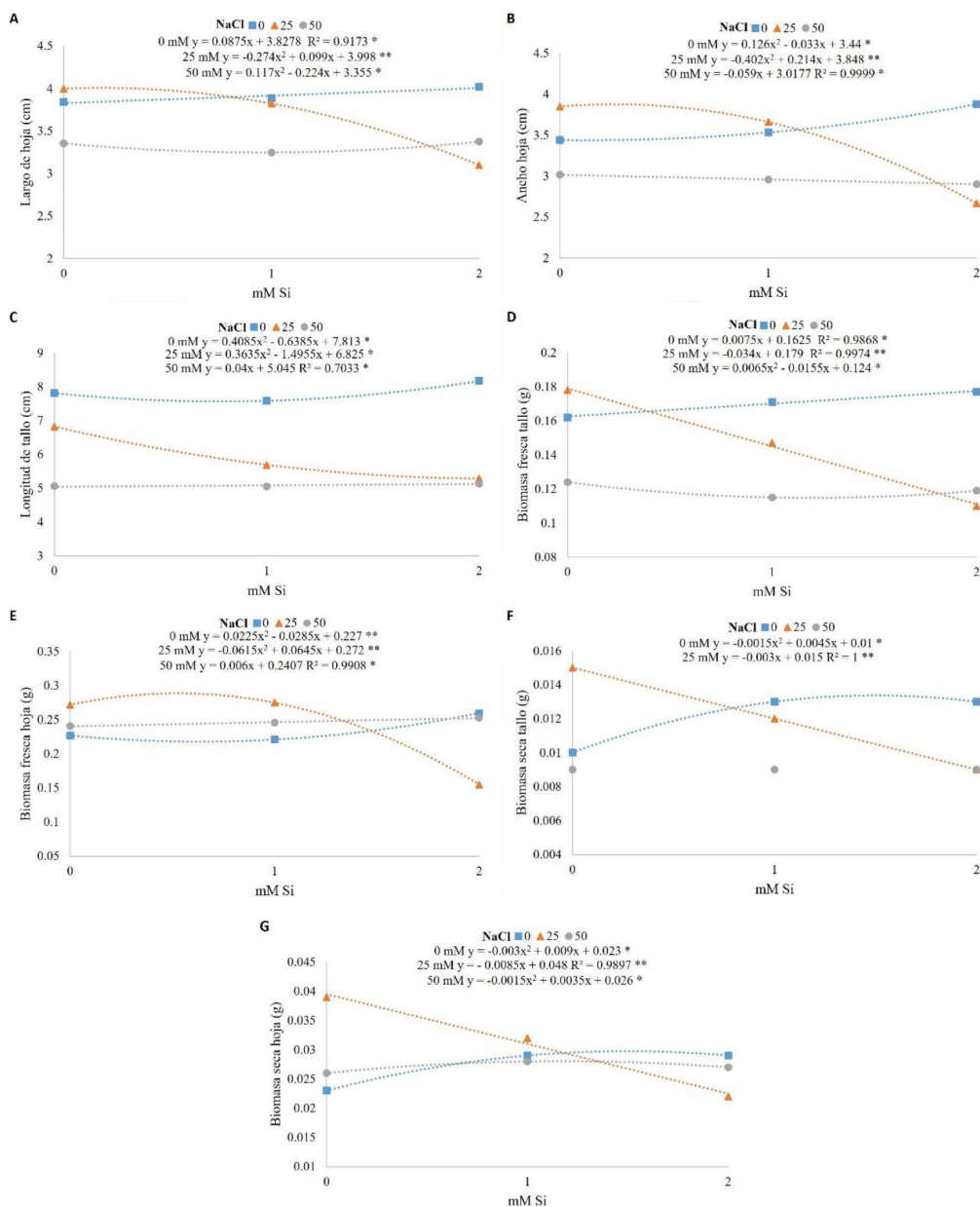


Figura 2. Efecto de la interacción de cloruro de sodio (NaCl) y silicio (Si) en plántulas de tomate saladette (*Solanum lycopersicum* var. río grande). (A) longitud de hoja; (B) ancho de hoja; (C) longitud de tallo; (D) biomasa fresca tallo; (E) biomasa fresca hoja; (F) biomasa seca tallo; (G) biomasa seca hoja. Los asteriscos indican los niveles de significancia 0.01 - 0.05*.**

Figure 2. Effect of sodium chloride (NaCl) and silicon (Si) interaction on saladette tomato (*Solanum lycopersicum* var. río grande) seedlings. (A) leaf length; (B) leaf width; (C) stem length; (D) stem fresh biomass; (E) leaf fresh biomass; (F) stem dry biomass; (G) leaf dry biomass. Asterisks indicate significance levels 0.01 - 0.05*.**

Por su parte Lemos-Neto *et al.* (2018) evaluaron el efecto interacción del NaCl-Si en plantas de lechuga donde los resultados mostraron un papel protector por parte del Si al mitigar los efectos adversos del NaCl. Calero-Hurtado, Aparecida, de Mello, da Silveira y Felisberto (2019), evaluaron la influencia del Si en plantas de sorgo y girasol bajo condiciones salinas, donde observaron que el Si alivió el estrés por salinidad al aumentar la eficiencia nutricional, favoreciendo así, incremento del peso seco de sorgo en 27% y girasol en 41 por ciento.

Khan *et al.* (2019) y Liang, Wong y Wei (2005), informaron que el Si mejora el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya sea de manera directa al bloquear el transporte de Na⁺ hacia el interior de la planta y de manera indirecta al activar los procesos fisiológicos para mitigar el efecto del estrés por salinidad.

Además, cuando las plantas están expuestas a condiciones salinas, el Si tiene la capacidad de cristalizarse al formar cuerpos sólidos de sílice llamados fitolitos de ópalo, los cuales se acumulan en las paredes celulares o tricomas de las plantas (Cooke y Leishman, 2011).

Por otra parte, Ibrahim, Merwad, Elnaka, Burras y Follett (2016) mencionan que el Si inhibe la captación de Na^+ de manera que reduce la acumulación de la prolina en las plantas, por lo tanto, ayuda a la absorción de nutrientes en condiciones salinas.

Soleimannejad, Abdolzadeh y Reza (2019) informaron que, el Si incrementa los niveles de solutos orgánicos osmurreguladores y reduce el Na^+ en los tejidos de las plantas. Por lo que, tiene la capacidad de mejorar la actividad de la membrana plasmática, al reducir la fuga de electrolitos, asimismo, interactúa en la biosíntesis de lignina y celulosa, de esta manera, el Si mitiga los efectos adversos por NaCl.

En la presente investigación se observó que cada variedad respondió de distinta manera a la aplicación de NaCl. Pérez-Domínguez *et al.* (2021) informaron sobre los mecanismos de tolerancia y adaptabilidad que poseen las plantas a ciertos niveles de salinidad, lo cual se puede observar entre especies e incluso entre variedades de la misma especie. Tales como: *Ficus carica* L. (Garza-Alonso, Carballo, Rodríguez, Olivares y Rodríguez, 2022), *Solanum lycopersicum* L. (Ruiz-Espinoza, Villalpando, Murillo, Beltrán y Hernández, 2014), *Ocimum basilicum* L. (Batista-Sánchez *et al.*, 2017) y *Moringa oleifera* Lam. (Carballo-Mendez *et al.*, 2019).

El estrés por salinidad implica varios cambios en diversos procesos fisiológicos, morfológicos y metabólicos, según la gravedad del estrés y la especie. Khan *et al.* (2019) mencionan que las plantas tienen la capacidad de activar su mecanismo de defensa ante condiciones desfavorables tales como: ajuste osmótico, homeostasis iónica, óxido nítrico, enzimas antioxidantes (peroxidasa, catalasa, superóxido dismutasa, entre otras), compuestos no enzimáticos (glutación, aminoácidos no proteicos, ácido ascórbico y compuestos fenólicos). Además, las plantas al estar en condiciones salinas promueven la acumulación de solutos u osmolitos compatibles (prolina, glicina betaina y azúcares), y compuestos que contienen nitrógeno (aminoácidos, poliaminas y polioles). Por lo anterior, el Si tiene la capacidad de regular la síntesis de osmolitos compatibles en las plantas, lo cual ayuda a mantener su actividad metabólica en condiciones salinas.

Los presentes resultados evidencian que el Si mitigó los efectos adversos de NaCl en plántulas de tomate, en las variables evaluadas como: longitud de tallo, biomasa fresca del tallo y biomasa seca de hoja. Sin embargo, la absorción de Si dependerá de cada especie vegetal e inclusive de cada variedad.

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron efecto diferenciado del Si en las tres variedades de tomate. En tomate cherry, la presencia de Si (2 mM) aumentó el crecimiento en condiciones no salinas (0 mM de NaCl) y salinas (25 mM de NaCl). En tomate bola no mostró impacto por parte del Si. Sin embargo, para tomate saladette, la presencia de Si incremento el crecimiento de la plántula en condiciones no salinas (0 mM de NaCl). Dicho lo anterior, los productos a base de Si pueden ser una opción viable para mitigar el estrés por salinidad, particularmente NaCl, y de esta manera incrementar el crecimiento de plántulas de tomate cherry y saladette.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles a solicitud razonable por parte de los interesados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no existir conflicto de interés.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: F.H.R.E. y F.J.C.M.; Metodología: E.A.E.A. y F.A.B.M.; Software: F.H.R.E.; Validación: C.E.C.L.; Análisis formal: E.A.E.A. y F.J.C.M.; Investigación: D.G.C.A. y E.A.E.A.; Recursos: F.H.R.E. y F.A.B.M.; Curación de datos: E.A.E.A. y F.H.R.E.; Escritura: preparación del borrador original, E.A.E.A. y F.H.R.E.; escritura: revisión y edición, E.A.E.A. y F.J.C.M.; visualización, C.E.C.L.; supervisión, F.H.R.E. y F.J.C.M.; administración del proyecto, F.H.R.E. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de germoplasma de la UABCS por la disponibilidad del material biológico utilizado en este experimento.

LITERATURA CITADA

- Ahmad, R., Hussain, S., Anjum, M. A., Khalid, M. F., Saqib, M., Zakir, I., ... & Ahmad, S. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense mechanisms in plants under salt stress. In M. Hasanuzzaman, K. H. Hakeem, & H. F. Alharby (Eds.). *Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, molecular and biotechnological approaches* (pp. 191-205) Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_8
- Al-Garni, S. M., Khan, M. M. A., & Bahieldin, A. (2019). Plant growth-promoting bacteria and silicon fertilizer enhance plant growth and salinity tolerance in *Coriandrum sativum*. *Journal of Plant Interactions*, *14*(1), 386-396. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1641635>
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
- Batista-Sánchez, D., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Alcaráz-Meléndez, L., Troyo-Diéguez, E., Hernández-Montiel, L., & Ojeda-Silvera, C. M. (2017). Mitigación de NaCl por efecto de un bioestimulante en la germinación de *Ocimum basilicum* L. *Terra Latinoamericana*, *35*(4), 309-320.
- Calero-Hurtado, A., Aparecida-Chiconato, D., de Mello-Prado, R., da Silveira-Sousa, J. G., & Felisberto, G. (2019). Silicon attenuates sodium toxicity by improving nutritional efficiency in sorghum and sunflower plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *142*(1), 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.07.010>
- Carballo-Mendez, F., Olivares-Saenz, E., Bolivar-Duarte, M., Antonio-Bautista, A., Vazquez-Badillo, M. E., & Nino-Medina, G. (2019). Effect of silicon on germination of moringa *Oleifera Lam.* *Fresenius Environmental Bulletin*, *28*(11), 8823-8830.
- Casierra-Posada, F., Carreño-Patiño, A., & Cutler, J. (2017). Growth, fiber and Nitrogen content in Sisal Plants (*Furcraea* sp) Under NaCl Salinity. *Gesunde Pflanzen*, *69*(2), 83-89. <https://doi.org/10.1007/s10343-017-0390-z>
- Cooke, J., & Leishman, M. R. (2011). Silicon concentration and leaf longevity: is silicon a player in the leaf dry mass spectrum? *Functional Ecology*, *25*(6), 1181-1188. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01880.x>
- Cuartero, J., Bolarín, M. C., Asíns, M. J., & Moreno, V. (2006). Increasing salt tolerance in the tomato. *Journal of Experimental Botany*, *57*(5), 1045-1058. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj102>
- Durukan, H., & Demirbas, A. (2018). The effects of different salt doses on yield and nutrient uptake of tomato plant. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, *61*(1), 71-76.
- Farshidi, M., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H. R. (2012). Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, *34*(5), 1779-1788. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-0975-1>
- Frew, A., Weston, L. A., Reynolds, O. L., & Gurr, G. M. (2018). The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. *Annals of Botany*, *121*(7), 1265-1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
- Garza-Alonso, C. A., Carballo-Méndez, F. J., Rodríguez-Salinas, P. A., Olivares-Sáenz, E., & Rodríguez-Ortiz, J. C. (2022). Salinidad y silicio en el crecimiento vegetativo y la concentración de pigmentos en cuatro cultivares de higuera (*Ficus carica* L.). *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, *118*(1), 19-35.
- Guerriero, G., Hausman, J. F., & Legay, S. (2016). Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in Plant Science*, *7*(1), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>
- Hoffmann, J., Berni, R., Hausman, J. F., & Guerriero, G. (2020). A review on the beneficial role of silicon against salinity in non-accumulator crops: tomato as a model. *Biomolecules*, *10*(9), 1284. <https://doi.org/10.3390/biom10091284>
- IBM SPSS Statistics (2013). *Statistical Package for the Social Sciences User's Guide. version 25*. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Ibrahim, M. A., Merwad, A. M., Elnaka, E. A., Burras, C. L., & Follett, L. (2016). Application of silicon ameliorated salinity stress and improved wheat yield. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, *7*(7), 81-91. <https://doi.org/10.5897/JSSSEM2016.0571>
- ISTA (International Seed Testing Association). (2017). International Seed Testing Association International rules for seed testing. Consultado el 24 de febrero, 2022, desde <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html>
- Jan, S., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., Alam, P., Siddique, K. H., & Ahmad, P. (2018). Interactive effect of 24-epibrassinolide and silicon alleviates cadmium stress via the modulation of antioxidant defense and glyoxalase systems and macronutrient content in *Pisum sativum* L. seedlings. *BMC Plant Biology*, *18*, 1-18. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1359-5>
- Khan, A., Khan-Latif, A., Muneer, S., Kim, Y., Al-Rawahi, A., & Al-Harrasi, A. (2019). Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, *10*(1), 1-21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01429>

- Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., Shim, J. K., Kim, D. H., Lee, K. Y., & Lee, I. J. (2014). Silicon application to rice root zone influenced the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, *33*, 137-149. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9356-2>
- Lemos-Neto, H., Guimarães, M., Mesquita, R., Gomes-Sampaio, I., Régia-Hendges, A., & Bosco-de Olivera, A. (2018). Silicon Potential as Attenuator of Salinity Effects on Growth and Post-harvest Quality of Lettuce. *Journal of Agricultural Science*, *10*(7), 455-463. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n7p455>
- Li, H., Zhu, Y., Hu, Y., Han, W., & Gong, H. (2015). Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiologiae Plantarum*, *37*(4), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1818-7>
- Liang, Y., Wong, J. W. C., & Wei, L. (2005). Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, *58*(4), 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.034>
- Luyckx, M., Hausman J. F., Lutts, S., & Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, *8*(1), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, *2*, 176-177.
- Maliro, M. F. A., Guwela, F. V., Nyaika, J & Murphy, K. (2017). Preliminary studies of the performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) Genotypes under irrigated and rainfed conditions of central Malawi. *Frontiers in Plant Science*, *8*(1), 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00227>
- Meng, Y., Yin, Q., Yan, Z., Wang, Y., Niu, J., Zhang, J., & Fan, K. (2020). Exogenous silicon enhanced salt resistance by maintaining K⁺/Na⁺ homeostasis and antioxidant performance in alfalfa leaves. *Frontiers in Plant Science*, *11*(1), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01183>
- Muneer, S., Park, Y. G., Manivannan, A., Soundararajan, P., & Jeong, B. R. (2014). Physiological and proteomic analysis in chloroplasts of *Solanum lycopersicum* L. under silicon efficiency and salinity stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *15*(12), 21803-21824. <https://doi.org/10.3390/ijms151221803>
- Pérez-Domínguez, G., Peñuelas-Rubio, O., Núñez-Vázquez, M., Martínez-González, L., López-Padrón, I., Reyes-Guerrero, Y., & Argente-Martínez, L. (2021). El estrés salino en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L). Papel de los Oligogalacturónidos como protectores de las plantas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *44*(3), 283-283.
- Rehman, S., Abbas, G., Shahid, M., Saqib, M., Farooq, A. B. U., Hussain, M., ... & Farooq, A. (2019). Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in conocarpus exposed to cadmium stress: Implications for phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *171*, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.077>
- Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M. Z., Malik, S., Adrees, M., Qayyum, M. F., ... & Ahmad, P. (2019). Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative stress, and cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa*). *Acta Physiologiae Plantarum*, *41*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2828-7>
- Ruiz-Espinoza, F. H., Villalpando-Gutiérrez, R. L., Murillo-Amador, B., Beltrán-Morales, F. A., & Hernández-Montiel, L. G. (2014). Respuesta diferencial a la salinidad de genotipos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) En primeras etapas fenológicas. *Terra Latinoamericana*, *32*(4), 311-323.
- Sehrawat, N., Yadav, M., Sharma, A. K., Kumar, V., & Bhat, K. V. (2019). Salt stress and mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]: effects, physiological perspective and management practices for alleviating salinity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *65*(9), 1287-1301. <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2018.1562548>
- Soleimannejad, Z., Abdolzadeh, A., & Reza-Sadeghipour, H. (2019). Beneficial effects of silicon application in alleviating salinity stress in halophytic puccinellia distans plants. *Silicon*, *11*(1), 1001-1010. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9960-7>
- Tahir, M. A., Aziz, T., Farooq, M., & Sarwar, G. (2012). Silicon-induced changes in growth, ionic composition, water relations, chlorophyll contents and membrane permeability in two salt-stressed wheat genotypes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *58*(3), 247-256. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.518959>
- Villegas-Espinoza, J. A., Reyes-Pérez, J. J., Nieto-Garibay, A., Ruiz-Espinoza, F. H., Cruz-Falcón, A., & Murillo-Amador, B. (2018). Bioestimulante Liplant®: su efecto en *Solanum lycopersicum* (L.) cultivado en suelos ligeramente salinos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *9*(20), 4137-4147. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.985>
- Xu, C. X., Ma, Y. P., & Liu, Y. L. (2015). Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany*, *98*(1), 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.008>
- Yin, J., Jia, J., Lian, Z., Hu, Y., Guo, J., Huo, H., ... & Gong, H. (2019). Silicon enhances the salt tolerance of cucumber through increasing polyamine accumulation and decreasing oxidative damage. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *169*, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.105>
- Zhu, Y. X., Gong, H. J., & Yin, J. L. (2019). Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: a review. *Plants*, *8*(6), 147-168. <https://doi.org/10.3390/plants8060147>