

FUNCIONES DEL SILICIO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS Y BENEFICIOS QUE APORTA CONTRA ESTRESSES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS

Data de aceite: 02/10/2023

Lira-Saldivar, Ricardo Hugo

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo, No. 140, Col. San José de los Cerritos. Saltillo, Coah., México

Vera-Reyes, Ileana

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo, No. 140, Col. San José de los Cerritos. Saltillo, Coah., México

Ramírez-Luna Fernando

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo, No. 140, Col. San José de los Cerritos. Saltillo, Coah., México

Flores-Hernández

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo, No. 140, Col. San José de los Cerritos. Saltillo, Coah., México

Eduardo Arón

Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Torreón, Coah., México.

ANTECEDENTES

Uno de los primeros reportes documentado sobre el silicio (Si) en suelos, plantas y animales fue de Jones y Handreck (1967), quienes mencionan que entre los factores que afectan el contenido de Si de las plantas se incluye el pH del suelo y el contenido de óxidos de hierro y aluminio presentes en las plantas, las cuales absorben diferentes cantidades de Si.

El Si a veces tiene un efecto beneficioso al aliviar la toxicidad del manganeso, ya que el Si altera la distribución del Mn en los tejidos de las hojas, evitando así que se acumule en áreas localizadas que se vuelven necróticas y mueren. La presencia de Si en pastos o plantas forrajeras asegura que los rumiantes en pastoreo ingieran cantidades

bastante grandes de Si, la mayoría de las cuales se encuentran en forma sólida.

En el trabajo de Miyake y Takahashi (1978) sobre la deficiencia de Si en plantas de tomate, se diferenciaron nueve síntomas, y a partir de sus resultados concluyeron que el Si tiene un efecto sobre la fisiología y el crecimiento reproductivo de esta solanácea. Más tarde esos autores observaron que la respuesta de crecimiento de las plantas de pepino a la deficiencia de Si es similar a las plantas de tomate (Miyake y Takahashi, 1983), así como a las plantas de soya (Miyake y Takahashi, 1985) y de fresa (Miyake y Takahashi, 1986).

Después Marschner et al. (1990) concluyen que las evidencias generadas eran insuficientes para clasificar el Si como un elemento esencial para el pepino. En cambio, el Si puede actuar como un elemento útil en condiciones de desequilibrio de nutrientes, por ejemplo, en el suministro de P y Zn, coadyuva a la deficiencia de Zn inducida por P.

Posteriormente Epstein (1999) señaló que el Si está presente en las plantas en cantidades equivalentes a macronutrientes como el Ca, Mg y el P, y en los pastos con frecuencia en niveles más altos que cualquier otro constituyente inorgánico. Sin embargo, no se considera un elemento esencial para las plantas. Como resultado, se omite en las formulaciones de soluciones nutritivas de cultivos y se considera insignificante en gran parte de la investigación. Concluyó mencionando que, la evidencia es abrumadora de que el Si debe incluirse entre los elementos que tienen una mayor influencia en la fisiología vegetal.

El objetivo del presente trabajo es mostrar de manera cronológica y hasta los reportes más actualizados, importantes resultados de investigación en los que se consignan los efectos benéficos del silicio para promover la fotosíntesis, y la resistencia o tolerancia de las plantas contra estreses bióticos y abióticos, como sequía, salinidad, plagas, enfermedades y fitotoxicidad por metales pesados; esperando que el lector medite que este mineral es más significativo de lo que se cree o piensa.

SILICIO CONTRA EL ESTRÉS HÍDRICO

La escasez actual de agua es un gran problema en regiones semiáridas como Pakistán y causa el deterioro de la productividad de los cultivos y reduce los rendimientos agrícolas en todo el mundo. Entre los estreses abióticos, la sequía se considera el factor limitante del crecimiento más importante, especialmente en regiones áridas y semiáridas. La tolerancia de las plantas a la sequía se asocia con el mantenimiento de su estado hídrico, ya sea reduciendo la pérdida de agua mediante la disminución de la transpiración o mejorando la capacidad de las raíces para extraer más agua mediante el ajuste osmótico (Figura 1).

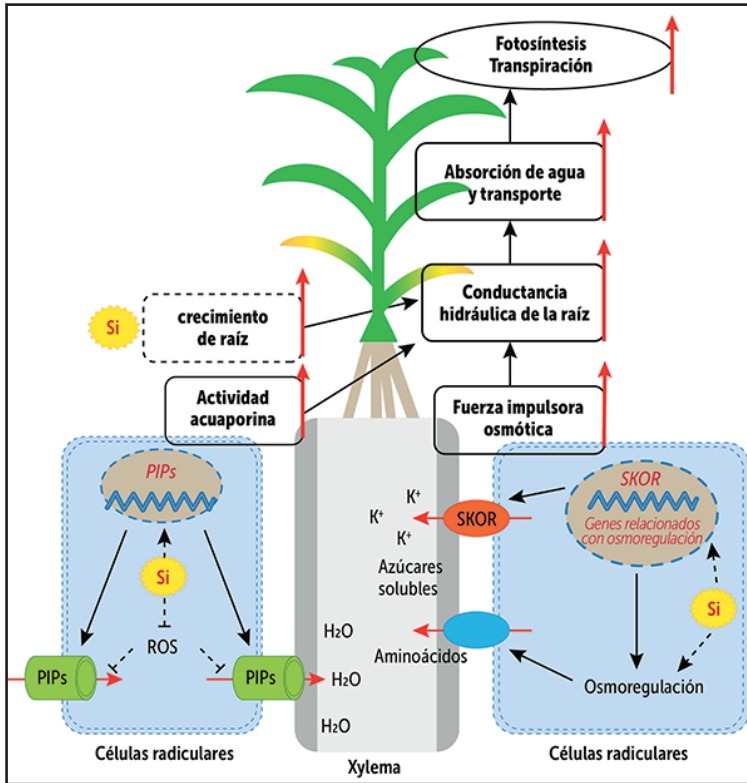


Figura 1. Esquema que ilustra deficiencia hídrica por estrés salino, la deficiencia de potasio y su interacción en procesos fisiológicos (Tomado de: <https://redagricola.com/quick-sol-entrega-una-estrategia-de-mitigacion-del-estres-hidrico-en-frutales/>).

En esta figura se ilustra el efecto del Si en el crecimiento radicular y la actividad de las acuaporinas cuando se presenta una deficiencia de potasio que afecta diversos procesos como: el potencial osmótico, la conductancia hidráulica de la raíz, la absorción y transporte de agua por los conductos del xilema y finalmente en la transpiración y fotosíntesis.

Bajo estrés por sequía, el Si aumentó la biomasa y el contenido de agua de las hojas en las plantas de pepino. El silicio también disminuyó la descomposición de la clorofila, en las hojas limitó el aumento de la permeabilidad de la membrana plasmática y el contenido de malondialdehído (MDA), alivió la respuesta fisiológica de la peroxidasa (POD) al estrés por sequía, mantuvo la superóxido dismutasa (SOD) y aumentó la actividad de la catalasa (CAT).

Estos resultados mostraron que bajo estrés por sequía el primer factor responsable de los efectos de la aplicación de Si sobre la biomasa fue el aumento de la fotosíntesis, y el segundo factor fue la mejora en la capacidad de retención de agua. Con base en estos hechos, se concluyó que el Si mejora la resistencia a la sequía primariamente al participar en el metabolismo de las plantas.

Entender las respuestas fisiológicas de las plantas al estrés hídrico es esencial para realizar el mejoramiento genético de los cultivos. Debido a eso, Gunes et al. (2008) investigaron los efectos del Si sobre el crecimiento de brotes y raíces, el contenido relativo de agua de la hoja (RWC), la resistencia estomática (SR), la peroxidación lipídica (MDA), la permeabilidad de la membrana (MP), la prolina y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la actividad antioxidante no enzimática y las actividades de superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX) de 12 cultivares de girasol cultivados en condiciones de sequía.

Desde hace muchos años se comenta que la productividad agrícola está muy afectada por diferentes estreses abióticos, entre los cuales el estrés hídrico es la principal restricción ambiental que limita su crecimiento. Este estrés conduce a numerosos cambios fisiológicos y bioquímicos en las plantas y da como resultado una pérdida grave en los rendimientos, por lo que existe la necesidad de encontrar formas de aumentar la resistencia de los cultivos al estrés hídrico (Sacala, 2009). Uno de los métodos alternativos que implican el alivio de los efectos negativos del estrés es la aplicación de Si como fertilizante (radicular o foliar).

Amin et al. (2014) realizaron un estudio en macetas para evaluar el efecto de la nutrición de Si (0, 50, 100 y 150 mg/kg) en el crecimiento de híbridos de maíz relativamente tolerantes (P-33H25) a la sequía y sensibles (FH-810).

Se utilizaron dos niveles de contenido de agua en el suelo: 100 y 60% de la capacidad de campo. La condición del déficit hídrico en el suelo redujo los atributos morfológicos y fisiológicos de las plantas de maíz. La aplicación de Si mejoró la altura, el área foliar, la longitud de la raíz primaria, la materia seca de brotes y raíces, así como la materia seca de la planta, en condiciones de déficit hídrico.

Pavlovic et al. (2021) mencionan que la aplicación de Si tiene el potencial para aumentar la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera y la absorción de raíces a través de mecanismos complejos, que aún no están claros. La regulación transcripcional mediada por Si de los transportadores de elementos tanto para la adquisición de raíces como para la homeostasis tisular se ha sugerido recientemente como una estrategia importante, que varía en detalle según la especie vegetal y el estado nutricional.

Estos autores resumieron la evidencia de la adquisición, absorción y translocación de nutrientes mediada por silicio como: N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Mn, Cu, B, Cl y Ni, tanto en condiciones de deficiencia como de exceso. Además, discuten las interacciones de Si con elementos benéficos como: Al, Na y Se.

La sequía es una limitación importante para la producción de arroz en las tierras de secano o temporal en China. Se ha verificado que el Si tiene una función importante en mejorar la resistencia de las plantas al estrés hídrico. Chen et al. (2011) seleccionaron dos líneas casi isogénicas de arroz (*Oryza sativa* L.), w-14 (susceptible a la sequía) y w-20 (resistente a la sequía), para estudiar los efectos de la aplicación de Si en las características

fisiológicas y el estado nutricional del arroz bajo estrés por sequía.

El estrés hídrico aumentó el contenido de K, Na, Ca, Mg y Fe de las plantas de arroz, pero el tratamiento con Si redujo el nivel de esos nutrientes. Por lo tanto, la aplicación de Si fue útil para aumentar la resistencia del arroz a la sequía, mediante la mejora de la eficiencia fotoquímica y el ajuste de la absorción de nutrientes minerales en las plantas.

El estrés por sequía obstaculiza el crecimiento de plantas forrajeras al alterar las relaciones planta-agua y las funciones fisiológicas. Saud et al. (2014) evaluaron el efecto del Si en la tolerancia a la sequía en el pasto *Poa pratensis* L. Después de tener plantas de 2 meses en invernadero se encontró que el estrés hídrico disminuyó la fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, tasa de crecimiento, eficiencia en el uso del agua y la calidad del pasto, pero aumentó la relación C: N de la raíz/brote y la hoja.

Tales alteraciones fisiológicas en las relaciones hídricas de las plantas y reducciones de crecimiento en el pasto azul de Kentucky se aliviaron con la adición de Si después del estrés hídrico. La aplicación de Si a 400 mg L^{-1} aumentó la fotosíntesis en 44%, el contenido de agua de las hojas en 33%, el color verde de las hojas en 42% y la calidad del césped en 44% después de 20 días de estrés hídrico. La aplicación de Si demostró ser beneficioso para mejorar el rendimiento del pasto. Esto sugiere que manipular el Si a través de biotecnología puede resultar en el desarrollo de resistencia a la sequía en los pastos o forrajes.

La investigación de Xie et al. (2015) tuvo como objetivo determinar los efectos de la aplicación de Si sobre las características fotosintéticas del maíz en un suelo salino-alcalino, incluidas la tasa fotosintética, la conductancia estomática, la tasa de transpiración y la concentración de CO_2 intercelular de maíz en el campo con cinco niveles de suministro de Si (0, 45, 90, 150 y $225 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Por su parte, Shi et al. (2016) investigaron los efectos del Si en la absorción de agua por la raíz y su función en la disminución del daño oxidativo en relación con la conductancia hidráulica de la raíz en tomate (*Solanum lycopersicum* 'Zhongza No.9') bajo estrés hídrico. Las plántulas de tomate se sometieron a estrés hídrico inducido por polietilenglicol-6000 al 10% (p/v) en ausencia o presencia de silicato añadido a 2.5 mM.

Los resultados mostraron que la adición de Si mejoró la inhibición en el crecimiento y la fotosíntesis del tomate, así como contenido de agua bajo estrés hídrico. La conductancia hidráulica de la raíz disminuyó bajo estrés hídrico y aumentó con la adición de Si. No hubo una contribución significativa del ajuste osmótico en la absorción de agua de la raíz mejorada con Si bajo estrés hídrico.

En el estudio de Ullah et al. (2016), el Si y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) que contienen actividad ACC-desaminasa se evaluaron como una herramienta para mejorar la tolerancia a la sequía del tomate. Los resultados revelaron que el estrés hídrico causó reducciones en el crecimiento, rendimiento, acumulación de K, Ca y Mg, así como en el contenido relativo de agua (RWC), mientras que aumentó la

concentración de Na y la fuga de electrolitos.

La suplementación con Si y PGPR aumentó la acumulación de K en las plantas, mientras se En tres temporadas sucesivas (2014, 2015 y 2016), Helaly et al. (2016) realizaron experimentos de campo con cuatro cepas de mango sometidas a dos regímenes de agua y se investigaron los parámetros fisiológicos y de crecimiento relativos a la tolerancia al estrés hídrico en plantas de mango. También se evaluó el rendimiento y sus componentes. Los datos mostraron que todos los parámetros fisiológicos y de crecimiento aumentaron con el suplemento de K_2SiO_3 (Si) y fueron seguidos por el tratamiento de interacción (tratamiento de Si y su combinación con estrés hídrico), en comparación con la condición controlada.

El Si mejora la resistencia del maíz a la sequía, pero no se conocen bien las respuestas fisiológicas y agronómicas del maíz al estrés hídrico. Por lo tanto, Ning et al. (2020) realizaron un experimento de columnas de suelo (Figura 2) bajo protección a prueba de lluvia para cuantificar los efectos de la aplicación de Si en plantas de 6 hojas (D-V6), 12 hojas (D-V12), y en la etapa de ampolla (D-R2).

Los parámetros observados incluyeron el crecimiento de las plantas, fotosíntesis, osmolitos, actividad antioxidante y el rendimiento de grano. Los resultados mostraron que el estrés hídrico disminuyó el área foliar, el contenido de agua de las hojas, la tasa fotosintética, el contenido de clorofila y la actividad antioxidante de SOD, POD y CAT y aumentó la peroxidación lipídica. D-V6, D-V12 y D-R2 redujeron los rendimientos de grano en 12.9, 28.9 y 44.8%, respectivamente, en comparación con el tratamiento con riego abundante.

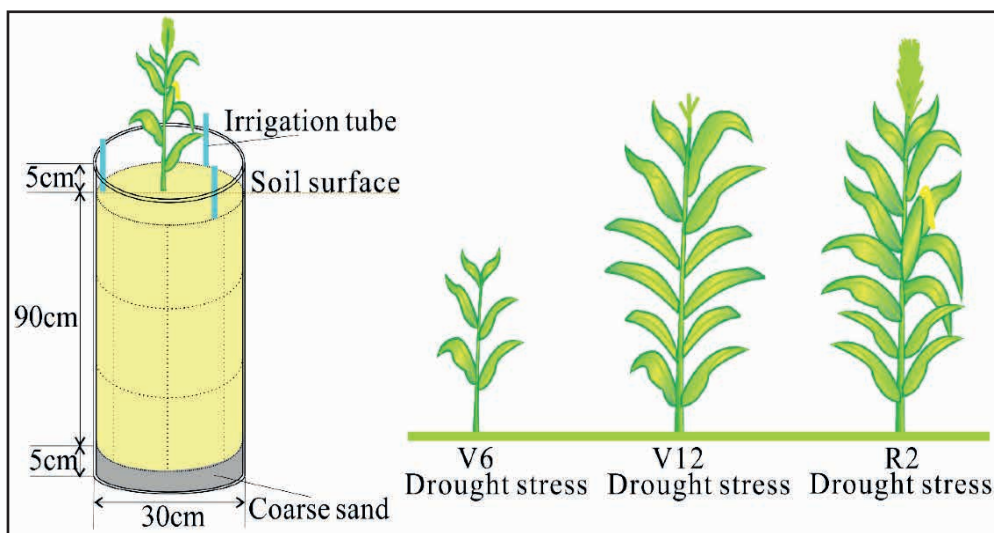


Figura 2. Diagrama de una columna experimental y los tres períodos de estrés por sequía aplicados a plantas de maíz durante las etapas de 6 hojas (V6), 12 hojas (V12) y ampolla (R2) (Tomado de: Ning et al., 2020).

El estrés por sequía se considera una de las principales limitaciones ambientales que con frecuencia restringe la producción de cultivos. En el estudio de Patel et al. (2021) se examinaron alteraciones del crecimiento, homeostasis iónica, pigmentos fotosintéticos, osmolitos orgánicos, la generación de especies ROS, los componentes antioxidantes y el perfil metabólico inducidos por el estrés hídrico (Figura 3).

De esa manera pudieron evaluar la función del Si en la mitigación de los efectos de la sequía y comprender el mecanismo de adaptación a la sequía en dos genotipos de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) contrastantes: (GG7) crecimiento rápido y alto, así como el TG26 de crecimiento lento y semienano.

La aplicación de Si mejoró el contenido de clorofila de las hojas, el porcentaje de contenido relativo de agua, el crecimiento y la biomasa en el genotipo GG7 en comparación con el genotipo TG26 bajo estrés hídrico. La suplementación con Si promovió la absorción y el transporte de nutrientes en condiciones de sequía en ambos genotipos, lo que eventualmente promueve el crecimiento de las plantas.

Además, la aplicación de Si aumentó los niveles de fitohormonas como el ácido indol-3-acético (IAA), el ácido giberélico (GA3), el ácido jasmónico (JA) y la zeatina en el genotipo GG7 bajo estrés hídrico en comparación con plántulas no tratadas con Si, lo que sugiere su participación en vías de señalización para la adaptación y tolerancia a la sequía.

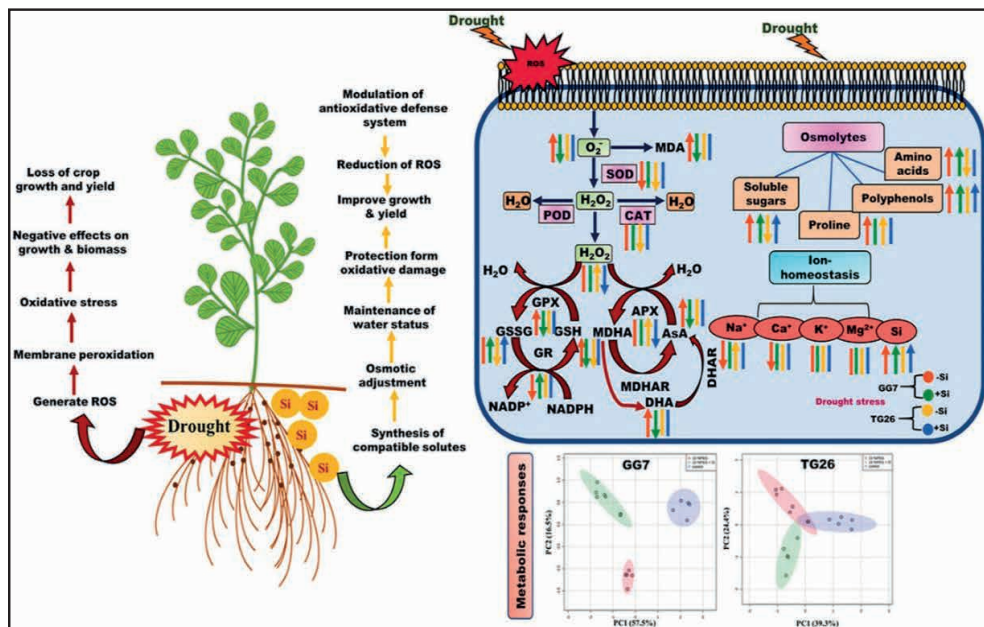


Figura 3. Mitigación del estrés por sequía inducida por silicio en dos genotipos de maní o cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) a través de la homeostasis de iones, modulaciones del sistema de defensa antioxidante y regulaciones metabólicas (Tomado de: Patel et al., 2021).

El estudio de Etesami et al. (2022) donde se combinó el uso de Si con micorrizas

arbusculares (AMF) para mitigar el efecto de salinidad y sequía en plantas de arroz indica que los beneficios de la nutrición de Si, son limitados debido a su absorción restringida por la planta de arroz (Figura 4).

Respecto al efecto del Si en especies frutales como el durazno o melocotón, en el ensayo de Gao et al. (2022) se secuenciaron los transcriptomas de plántulas de durazno tratadas con Si y del control bajo estrés hídrico para identificar los genes o redes de genes, que podrían manejarse para aumentar la tolerancia a la sequía de las plántulas de durazno.

El Si viene siendo uno de los principales elementos que necesitan las plantas para hacer frente a las condiciones ambientales adversas, y se considera un elemento cuasi-beneficioso. El Si está involucrado en el crecimiento y la diferenciación de las raíces, el transporte de otros elementos, la asimilación de carbono, en actividades de enzimas clave, quelación de elementos tóxicos, regulación del sistema redox, distribución de fotosíntesis, es decir, tiene efectos directos en la modulación de la tolerancia y estabilización de la cantidad y calidad del grano producido bajo estrés (Kumar et al., 2023).

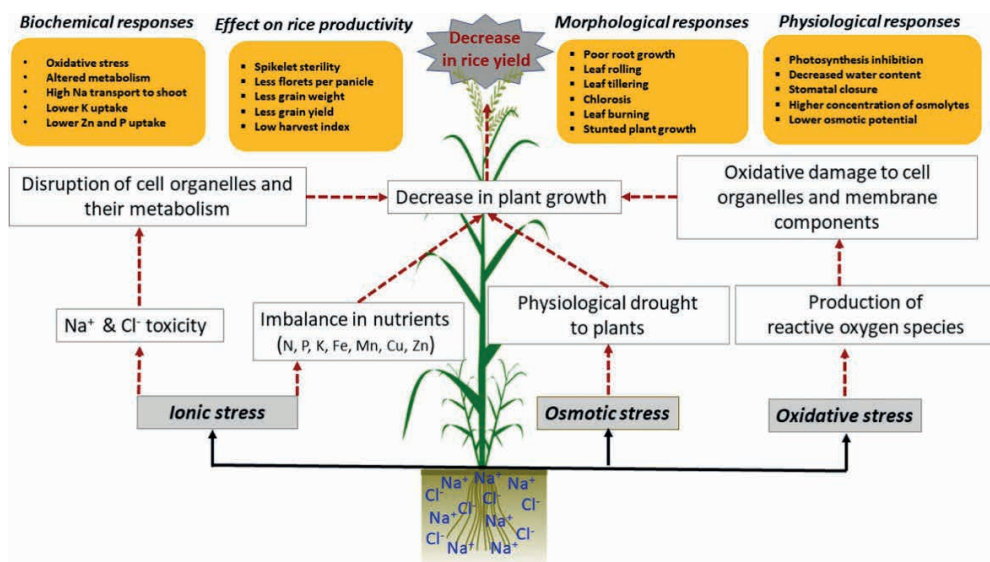


Figura 4. Efecto del estrés por sal y sequía en la planta de arroz. Esto causa estrés osmótico (sequía fisiológica), desequilibrio en los nutrientes (típicamente una disminución en la absorción de nutrientes) y estrés oxidativo, lo que provoca una disminución del crecimiento y rendimiento del arroz. Además, la salinidad conduce a la toxicidad iónica, especialmente por la acumulación de Na^+ y Cl^- (Tomado de: Etesami et al., 2022).

Por su parte Gao et al. (2022) usaron plántulas de *Prunus persica* para analizar los efectos del Si en el crecimiento y los índices fisiológicos de resistencia al estrés hídrico. La adición de Si mejoró la eficiencia del uso del agua, la capacidad antioxidante y la tasa fotosintética, la inhibición del cierre de estomas, además, promovió el desarrollo de raíces y reguló aún más la síntesis de hormonas, aminoácidos y azúcares en plántulas de durazno.

El Si también regula el metabolismo de varios aminoácidos y promueve la acumulación de sacarosa y glucosa para mejorar la resistencia a la sequía. El Si mejoró la resistencia a la sequía de las plántulas de durazno al regular la síntesis de hormonas relacionadas con el estrés y la transducción de señales, y al regular el metabolismo de aminoácidos y el azúcar.

Recientemente Shanmugaiah et al. (2023) señalan que el Si está recibiendo cada vez más atención en la agricultura por sus beneficios para el crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés. Las plantas han desarrollado un mecanismo de transporte de Si altamente eficiente que implica la localización de proteínas transportadoras de Si que establecen una red altamente coordinada entre proteínas, lo que facilita la absorción y acumulación de Si.

También se ha descubierto que el Si puede promover el crecimiento de las plantas y aliviar una variedad de estreses bióticos y abióticos. La adición de Si mejora las características fisiológicas y químicas de la planta, incluidos sus mecanismos de defensa, modulación hormonal y patrones de expresión génica.

El Si activa las enzimas relacionadas con la defensa, promueve la producción de compuestos antimicrobianos, regula las vías de señalización e induce la expresión de genes relacionados con la defensa. Esto da como resultado una resistencia combinada que domina la resistencia bioquímica/molecular durante las interacciones planta-patógeno. Además, el Si alivia los efectos tóxicos del estrés abiótico, como el estrés salino, la sequía y los metales pesados.

El sistema agrícola mundial sigue siendo vulnerable a varios tipos de estrés bióticos y abióticos espacio-temporales. Kapoor et al. (2023) señalan que, a nivel molecular y fisiológico, se ha explorado intensamente la eliminación de los desafíos asociados con estos factores estresantes en las plantas. Pero las plantas han evolucionado con estrategias físico-bioquímicas, incluido un canal de comunicación cruzada de señalización que permite a las plantas decidir entre el crecimiento activo y las vías defensivas.

Los efectos de Se-Si en las respuestas defensivas de las plantas ahora se están investigando en una variedad de sistemas de plantas. Numerosos estudios ya han establecido el número de puntos convergentes que influyen directamente en la estimulación de compuestos antioxidantes para la mitigación de especies de reactivas de oxígeno (ROS), absorción de nutrientes y fitohormonas. El tratamiento foliar y del suelo con Se y Si mitiga el efecto del estrés biótico y abiótico al aumentar la producción de enzimas antioxidantes y disminuir la producción de compuestos ROS.

Además, se ha demostrado que la administración de micronutrientes como el Si y el Se mejoran las respuestas de defensa de las plantas en situaciones de estrés. Estos micronutrientes exhibieron muchas respuestas físico-bioquímicas asociadas con vías de comunicación cruzada de señalización de estrés. Actualmente se están realizando estudios ómicos para determinar los mecanismos moleculares exactos a través de los cuales se

podría entender bien la activación de la respuesta de defensa por Si/Se.

SILICIO CONTRA EL ESTRÉS SALINO

Romero-Aranda et al. (2006) consignan que el Si alivia el efecto nocivo de la sal en el crecimiento de las plantas de tomate al mejorar su estado hídrico, ya que las plantas tratadas NaCl solo mostraron una reducción en el peso seco y el área foliar del 55 y 58%, respectivamente, mientras que la reducción en las plantas tratadas con NaCl más Si fue solo del 31 y 22%, respectivamente. Por eso concluyeron que el Si mejora el almacenamiento de agua dentro de la planta, lo que permite una mayor tasa de crecimiento que, a su vez, contribuye a la dilución de la sal en la planta, mitigando así los efectos tóxicos de la sal.

El estrés salino es un estrés abiótico que afecta el crecimiento de las plantas y las actividades fisiológicas y bioquímicas, como la fotosíntesis y el contenido de clorofila. El estudio de Rohanipoor et al. (2013) se realizó con el fin de evaluar los efectos del Si sobre algunas respuestas fisiológicas del maíz bajo estrés salino. Las plántulas se trasplantaron a macetas de plástico que contenían suelo arenoso esterilizado y no salino. El Si se adicionó a cuatro niveles (0, 2, 4 y 6 mmol L⁻¹) de silicato de potasio K₂SiO₃ y se aplicó estrés salino a cuatro niveles (0, 3, 6 y 9 dS.m⁻¹) de cloruro de sodio (NaCl).

Con los tratamientos la salinidad disminuyó el peso fresco y seco del brote y la raíz, la longitud del tallo, el área foliar, el contenido de clorofila y el contenido relativo de agua (RWC) de las plantas de maíz, mientras que la aplicación de Si los incrementó. Hubo una notable disminución en los tratamientos con CE > 3 dS.m⁻¹, mientras que, el incremento de Si mejoró las respuestas fisiológicas del maíz. Por lo tanto, una nutrición adecuada de Si puede aumentar la resistencia a la salinidad en las plantas de maíz.

El Si puede aliviar el estrés biótico y abiótico en muchos cultivos y tiene efectos favorables sobre las plantas en condiciones de no estrés, pero hay dudas sobre la eficiencia del Si aplicado foliarmente y los efectos del Si sobre la nutrición mineral, los procesos fisiológicos y el crecimiento de las plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en condiciones de riego.

El trabajo de Haghghi y Pessaraki (2013) se realizó en un invernadero utilizando un sistema hidropónico para estudiar los efectos de Si y nano silicio (N-Si) en el crecimiento y algunas características intercambio de gases de los tomates en condiciones de estrés salino. Después de las aplicaciones de Si y N-Si y las adiciones de NaCl a las soluciones nutritivas, se permitió que las plantas crecieran durante 42 días.

Los resultados mostraron que la salinidad tenía efectos nocivos sobre el peso fresco y seco de la planta, el volumen de la raíz y el diámetro del tallo. Por el contrario, la fuga de electrolitos aumentó al aumentar los niveles de salinidad. El aumento de los niveles de salinidad disminuyó el CO₂ subestomatal, la tasa fotosintética, la conductancia del mesófilo y la eficiencia del uso del agua fotosintética.

Los pesos fresco y seco, el volumen de raíces y la concentración de clorofila aumentaron con la aplicación de Si. El Si alivió el efecto del estrés por salinidad en el peso fresco de la planta, la concentración de clorofila, la tasa fotosintética y el contenido de agua de la hoja. El CO₂ subestomatal y la conductancia estomática disminuyeron con la aplicación de Si y el N-Si mejoraron la tasa de fotosíntesis, la conductancia del mesófilo y la eficiencia del uso del agua de la planta en condiciones de estrés salino de las plantas de tomate.

El efecto del silicio sobre los daños oxidativos inducidos por la salinidad en pepino se investigó por Khoshgoftarmanesh et al. (2014) en un experimento de invernadero. Se expusieron dos cultivares (*Cucumis sativus* L. cvs. Negin y Super Dominus) a dos niveles de salinidad (0 y 50 mM NaCl) y dos niveles de Si (0 y 1 μM). El Si estimuló el crecimiento de brotes de pepino en condiciones salinas. El contenido de MDA foliar aumentó en ‘Super Dominus’ mientras que permaneció sin cambios en ‘Negin’ debido al estrés salino.

El reporte de Khan et al. (2019) señala que el estrés por salinidad dificulta el potencial de crecimiento y la productividad de las plantas de cultivo al influir en la fotosíntesis, perturbar las concentraciones osmóticas e iónicas, producir oxidantes y excesivos radicales, regular las funciones fitohormonales, contrarrestar las vías metabólicas esenciales y manipular los patrones de expresión génica (Figura 5).

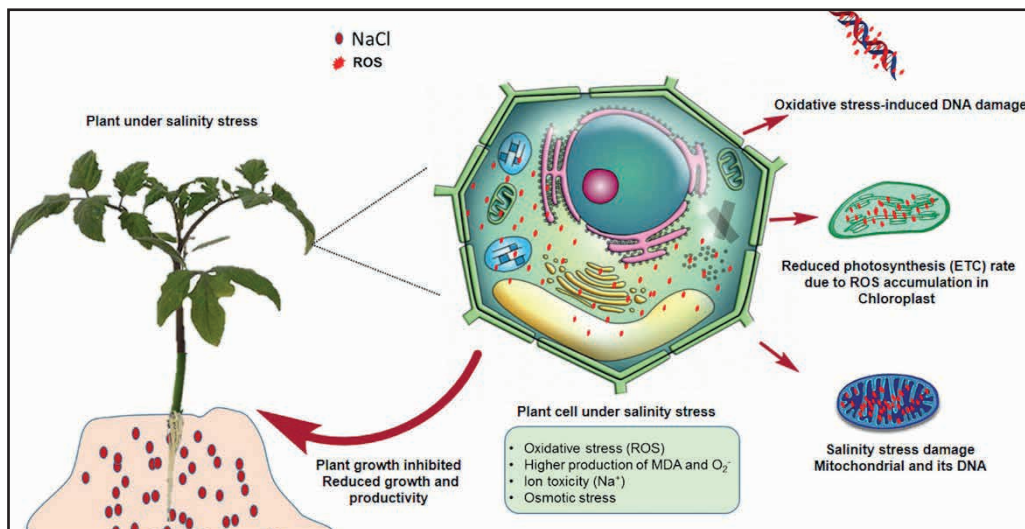


Figura 5. En plantas bajo condiciones de estrés por salinidad hay niveles altos de especies reactivas de oxígeno (ROS). Los niveles tóxicos de ROS impiden el crecimiento de las plantas al inhibir la cadena transportadora de electrones y la fotosíntesis en los cloroplastos, así como al causar mutaciones del ADN y dañar las mitocondrias (Tomada de Khan et al., 2019).

En respuesta, las plantas generan cascadas de señalización físico-bioquímica y molecular para superar el estrés por salinidad; sin embargo, la exposición continua puede abrumar el sistema de defensa, lo que provoca la muerte celular y el colapso de los aparatos

esenciales.

Las tierras agrícolas están muy afectadas por la salinidad, ya sea debido a fenómenos naturales o por prácticas agrícolas inadecuadas. Al Murad et al. (2020) señalan que el estrés salino posee dos amenazas principales para el crecimiento de los cultivos: el estrés osmótico y el estrés oxidativo. La respuesta de estos cambios va acompañada de una variedad de síntomas, como disminución del área foliar, la longitud de los entrenudos y el aumento del grosor y la succulencia de la hoja, la abscisión de las hojas y la necrosis de la raíz y el brote.

La salinidad también retrasa las posibles actividades fisiológicas, como la fotosíntesis, la transpiración, las funciones fitohormonales, las vías metabólicas y las funciones de genes/proteínas. Los cultivos en respuesta al estrés salino generan mecanismos de señalización en cascada para hacer frente a las sales como la producción de ROS (Figura 6), mientras que la exposición continua al estrés salino supera el sistema de mecanismos de defensa, lo que da como resultado la muerte celular y compromete la función de los organelos esenciales en las células de los cultivos.

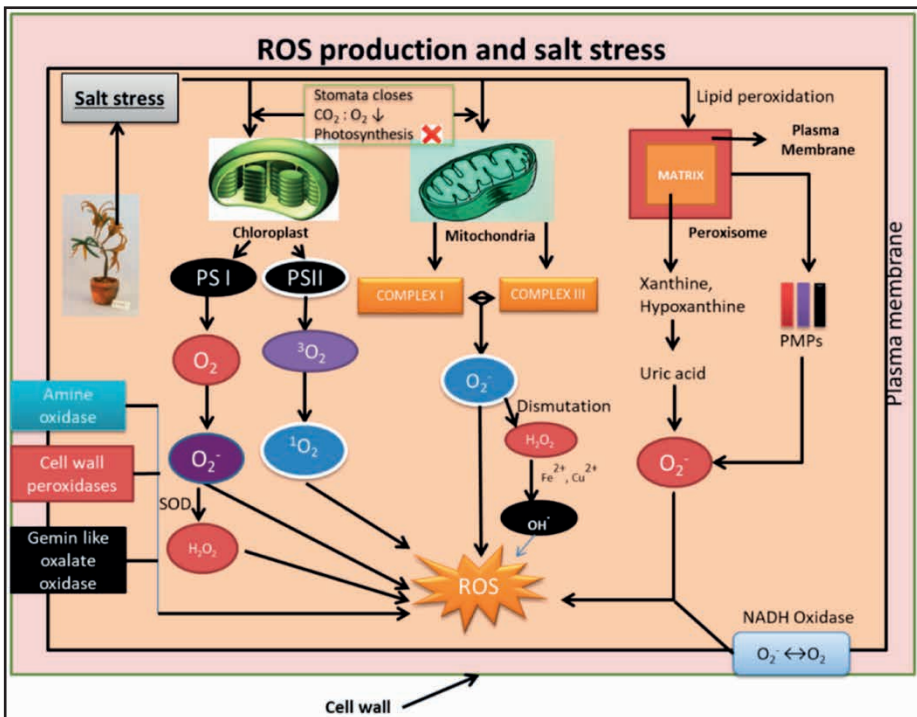


Figura 6. Esquema mostrando los mecanismos involucrados en la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) durante el estrés por salinidad. Los organelos celulares como el cloroplasto, la mitocondria y el peroxisoma están involucrados en la generación de ROS como O_2^- , oxígeno singulete (1O_2), OH y H_2O_2 (Tomado de: Al Murad et al., 2020).

Los cultivos agrícolas se enfrentan a importantes restricciones con el rápido

aumento del calentamiento global, siendo la salinidad un factor importante que afecta la productividad. Las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tienen un gran significado nutricional; sin embargo, puede verse influenciado negativamente por el estrés salino. Las nanopartículas (NPs) tienen excelentes propiedades, por lo que se utilizan en la agricultura para mejorar varios parámetros de crecimiento incluso en presencia de estrés abiótico (Figura 7).

Debido a esto el estudio de Alam et al., 2022 tuvo como objetivo investigar los efectos de las NPs de silicio (Si-NPs) mediante inmersión de raíces y aspersión foliar en plantas de tomate en presencia/ausencia de estrés salino. Los procesos de desarrollo de las plantas de tomate se vieron gravemente ralentizados por el estrés salino hasta en 35.8% (biomasa seca de los brotes), 44.3% (biomasa seca de raíces), 51% (longitud de los brotes) y 62 % (longitud de las raíces), pero esta reducción fue mitigada por el tratamiento de Si-NPs.

Los autores concluyeron que la aplicación foliar de Si-NP en plantas de tomate parece ser más efectiva que la inmersión de raíces y alivia el estrés salino al aumentar la actividad de la enzima antioxidante de la planta.

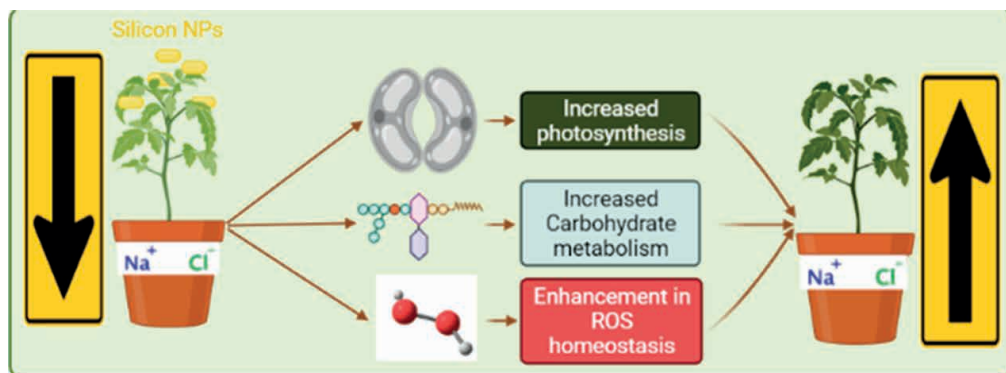


Figura 7. En estrés salino la aplicación de nanopartículas de silicio aumentó el crecimiento (altura y peso seco), contenido mineral de Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn, fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, concentración de CO_2 y actividad de enzimas antioxidantes, incluidas la superóxido dismutasa y la catalasa (Tomado de: Alam et al., 2022).

La disminución de la absorción de Na^+ y el mantenimiento de la relación Na^+/K^+ óptima se han considerado los procesos más importantes responsables de la tolerancia a la sal conferida por el Si, además, la acumulación excesiva de sodio limita la absorción de otros nutrientes e iones, incluido el K^+ (Ali et al., 2012).

La demanda de productos agrícolas sigue aumentando con el rápido crecimiento de la población. Sin embargo, los climas extremos, las plagas, enfermedades y la contaminación representan una gran amenaza para la producción agrícola de alimentos. Las nanopartículas de sílice (SNPs) son beneficiosas para el crecimiento y la producción de plantas y se pueden usar como nanopesticidas, nanoherbicidas y nanofertilizantes en la agricultura.

La suplementación con Si mejora la resiliencia de las plantas bajo estrés salino, debido a que modula varios procesos fisiológicos y bioquímicos en condiciones de estrés. Dhiman et al. (2021) hacen notar que la diafonía (o señales cruzadas) que ocurren entre el Si con la lignina y el contenido fenólico bajo estrés salino es vital, lo que ocurre por diversas vías (Figura 8) y consideran además que la evaluación de las respuestas de las plantas a niveles de proteómica es prometedora para comprender la función del Si en las plantas cultivadas.

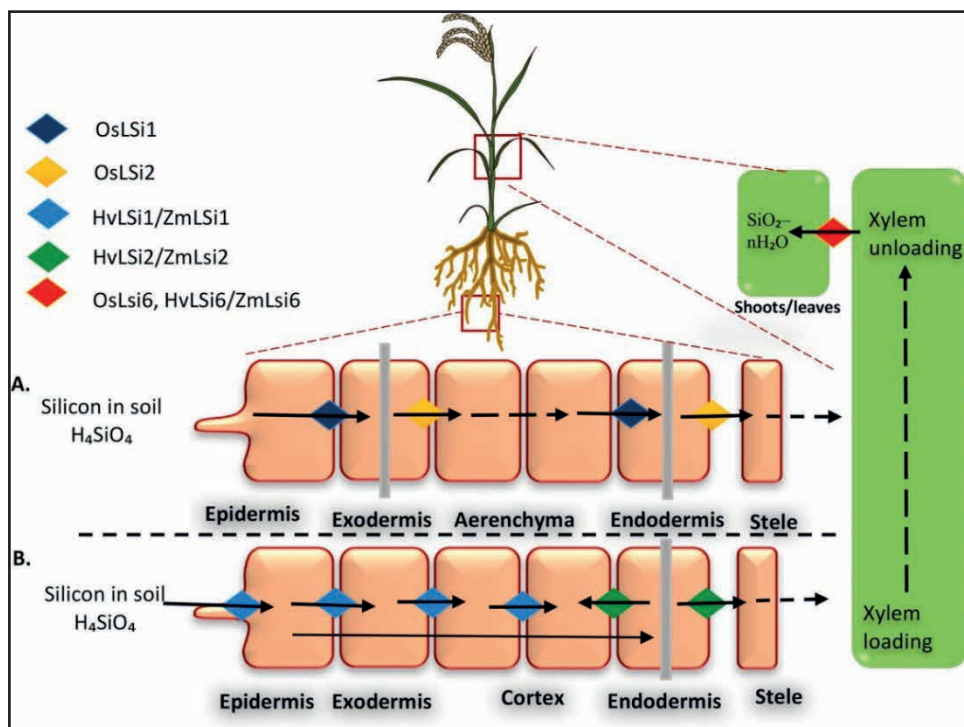


Figura 8. Esquema que ilustra la vía de absorción y el transporte de silicio (Si) a través de genes transportadores en (A) Arroz, (B) Maíz y Cebada. Los miembros de las familias *Brassicaceae* y *Solanaceae* se clasifican como excluidores de Si debido a la falta del gene transportador Lsi1 (Tomado de: Dhiman et al., 2021).

Los estreses abióticos, como la salinidad y la sequía, son las principales limitaciones para el crecimiento óptimo de las plantas, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Por lo tanto, en los últimos años, los científicos agrícolas han comenzado a investigar sobre los fertilizantes que tienen un uso multifacético y que pueden usarse para mantener el crecimiento y rendimiento óptimos de plantas muy importantes bajo estrés ambiental.

El artículo de Wang et al. (2022) hace una revisión de la absorción y el transporte de SNPs en las plantas, así como su función y mecanismos para promover su crecimiento y mejorar la resistencia contra los estreses biótico y abiótico. En general, las SNPs inducen la resistencia de las plantas contra los factores de estrés al fortalecer la barrera física,

mejorar la fotosíntesis, activar la actividad enzimática defensiva, aumentar los compuestos antiestrés y activar la expresión de genes relacionados con la defensa.

Debido a que el trigo es el cultivo más importante del mundo, la tolerancia al estrés tiene una función crucial en la seguridad alimentaria. Cheraghi et al. (2023) señalan que, por diferentes mecanismos (Figura 9), el Si mejora la tolerancia de las plantas de trigo al estrés por salinidad y sequía, incluida la regulación de las relaciones hídricas de las plantas, el intercambio de gases, la fotosíntesis, el equilibrio de nutrientes, la reducción del estrés oxidativo, la reducción de la toxicidad iónica, la osmorregulación, el crecimiento de las raíces, la absorción de potasio y la estimulación de hormonas vegetales.

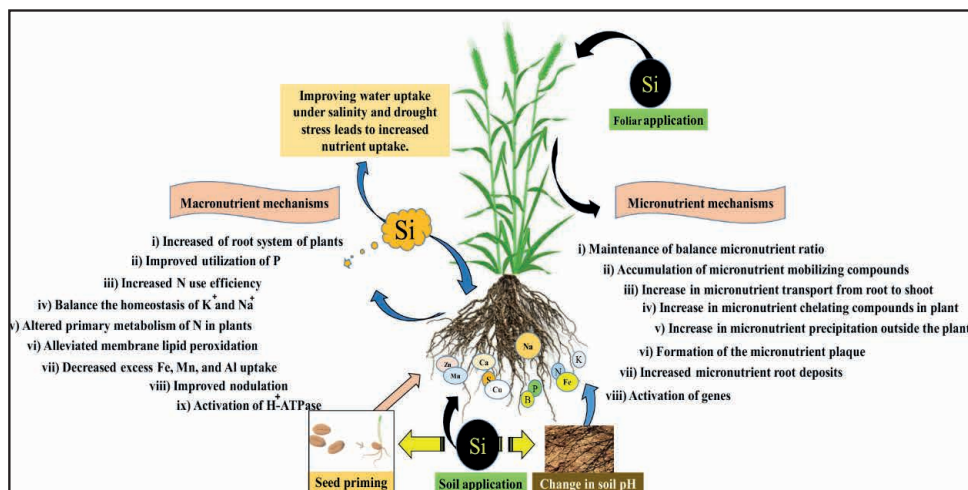


Figura 9. Resumen de los mecanismos por los cuales el Si alivia la deficiencia de nutrientes derivada del estrés por sequía y salinidad en el trigo. El Si aumenta la fotosíntesis al aumentar la actividad de la enzima Rubisco y la cantidad de clorofila en las hojas. Aumenta el contenido de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y carotenoides), afectan la división celular y el crecimiento, mejoran las propiedades morfológicas y fisiológicas, así como el crecimiento vegetativo al aumentar el número de hojas (Tomado de: Cheraghi et al., 2023).

El riego con agua salina, los drenajes inadecuados y el uso de fertilizantes convencionales se consideran las principales razones del aumento de la salinidad del suelo. Otros estreses abióticos, incluida la contaminación por metales pesados, el frío, las heladas y la luz UV-B, afectan de forma destructiva a los productos agrícolas, pero sus efectos adversos en las plantas son menores que los del estrés por sequía y salinidad (Aminiyan et al. 2022).

CONCLUSIONES

La aplicación de Si mediante fertirrigación, aspersión foliar o pretratamiento de semillas actúa como un refuerzo para la maquinaria de defensa ya existente en las plantas, para hacer frente a los efectos drásticos de factores abióticos. La fertirrigación con silicio

también mejora las propiedades del suelo, incluida su capacidad de retención de agua, lo que indirectamente ayuda a mejorar la salud de las plantas. Queda claro que el Si es un elemento abundante en la Tierra y sus efectos positivos en las plantas lo hacen importante en la agricultura. En el futuro, las investigaciones centradas en aspectos específicos de la interacción Si-plantas serán importantes para diseñar estrategias agrícolas destinadas a mejorar el rendimiento de los cultivos con la fertilización del Si como micronutriente.

REFERENCIAS

- Alam, P., Arshad, M., Al-Kheraif, A.A., Azzam, M.A., y Al Balawi, T. (2022). Silicon nanoparticle-induced regulation of carbohydrate metabolism, photosynthesis, and ROS homeostasis in *Solanum lycopersicum* subjected to salinity stress. *ACS omega*, 7(36), 31834-31844.
- Ali, A., Basra, S.M., Iqbal, J., Hussain, S., Subhani, M., Sarwar, M., Haji, A. (2012). Silicon mediated biochemical changes in wheat under salinized and non-salinized solution cultures. *Afr. J. Biotechnol.*, 11, pp. 606-615.
- Al Murad, M., Khan, A.L. y Muneer, S. (2020). Silicon in horticultural crops: cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. *Plants*, 9(4), 460.
- Aminiyan, M.M., Rahman, M.M., Rodríguez-Seijo, A., Hajiali Begloo, R., Cheraghi, M., Aminiyan, F.M. (2022) Elucidating of potentially toxic elements contamination in topsoils around a copper smelter: spatial distribution, partitioning and risk estimation. *Environ Geochem Health* 44(6):1795–1811.
- Chen, W., Yao, X., Cai, K. y Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological trace element research*, 142, 67-76.
- Cheraghi, M., Motesharezadeh, B., Mousavi, S. M., Ma, Q. y Ahmadabadi, Z. (2023). Silicon (Si): a regulator nutrient for optimum growth of wheat under salinity and drought stresses-a review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-25.
- Dhiman, P., Rajora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S.S., Kumar, A., Raturi, G. y Deshmukh, R. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 110-123.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant biology*, 50(1), 641-664.
- Etesami, H., Li, Z., Maathuis, F.J. y Cooke, J. (2022). The combined use of silicon and arbuscular mycorrhizas to mitigate salinity and drought stress in rice. *Environmental and experimental botany*, 201, 104955.
- Gao, H., Yu, W., Yang, X., Liang, J., Sun, X., Sun, M. y Peng, F. (2022). Silicon enhances the drought resistance of peach seedlings by regulating hormone, amino acid, and sugar metabolism. *BMC Plant Biology*, 22(1), 422.
- Gunes, A., Pilbeam, D.J., Inal, A. y Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(13-14), 1885-1903.

- Haghighi, M. y Pessaraki, M. (2013). Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161, 111-117.
- Helaly, M.N., El-Hoseiny, H., El-Sheery, N.I., Rastogi, A. y Kalaji, H.M. (2017). Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 31-44.
- Jones, L.H.P. y Handreck, K.A. (1967). Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*, 19, 107-149.
- Khan, A., Khan, A. L., Muneer, S., Kim, Y. H., Al-Rawahi, A. y Al-Harrasi, A. (2019). Silicon and salinity: Crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1429.
- Kapoor, B., Kumar, P., Gill, N.S., Sharma, R., Thakur, N. y Irfan, M. (2023). Molecular mechanisms underpinning the silicon-selenium (Si-Se) interactome and cross-talk in stress-induced plant responses. *Plant and Soil*, 486(1-2), 45-68.
- Khoshgoftarmansh, A.H., Khodarahmi, S. y Haghighi, M. (2014). Effect of silicon nutrition on lipid peroxidation and antioxidant response of cucumber plants exposed to salinity stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5), 639-653.
- Kumar, R.R., Rai, G.K., Kota, S., Watts, A., Sakhare, A., Kumar, S. y Praveen, S. (2023). Fascinating dynamics of silicon in alleviation of heat stress induced oxidative damage in plants. *Plant Growth Regulation*, 100(2), 321-335.
- Marschner, H., Oberle, H., Cakmak, I. y Römheld, V. (1990). Growth enhancement by silicon in cucumber (*Cucumis sativus*) plants depends on imbalance in phosphorus and zinc supply. *Plant and Soil*, 124, 211-219.
- Miyake, Y. y Takahashi, E. (1978). Silicon deficiency of tomato plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 175-189.
- Miyake, Y. y Takahashi, E. (1983). Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, 29(1), 71-83.
- Miyake, Y. y Takahashi, E. (1985). Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. *Soil science and plant nutrition*, 31(4), 625-636.
- Miyake, Y. y Takahashi, E. (1986). Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. *Soil science and plant nutrition*, 32(2), 321-326.
- Ning, D., Qin, A., Liu, Z., Duan, A., Xiao, J., Zhang, J. y Liu, Z. (2020). Silicon-mediated physiological and agronomic responses of maize to drought stress imposed at the vegetative and reproductive stages. *Agronomy*, 10(8), 1136.
- Patel, M., Fatnani, D. y Parida, A.K. (2021). Silicon-induced mitigation of drought stress in peanut genotypes (*Arachis hypogaea* L.) through ion homeostasis, modulations of antioxidative defense system, and metabolic regulations. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 290-313.
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E.A. y Nikolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697592.

Rohanipoor, A., Norouzi, M., Moezzi, A. y Hassibi, P. (2013). Effect of silicon on some physiological properties of maize (*Zea mays*) under salt stress. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 7(20).

Romero-Aranda, M.R., Jurado, O. y Cuartero, J. (2006). Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of plant physiology*, 163(8), 847-855.

Sacala, E. (2009). Role of silicon in plant resistance to water stress. *Journal of Elementology*, 14(3), 619-630.

Saud, S., Li, X., Chen, Y., Zhang, L., Fahad, S., Hussain, S. y Chen, Y. (2014). Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morphophysiological functions. *The Scientific World Journal*.

Shanmugaiah, V., Gauba, A., Hari, S.K., Prasad, R., Ramamoorthy, V. y Sharma, M.P. (2023). Effect of silicon micronutrient on plant's cellular signaling cascades in stimulating plant growth by mitigating the environmental stressors. *Plant Growth Regulation*, 100(2), 391-408.

Shi, Y., Zhang, Y., Han, W., Feng, R., Hu, Y., Guo, J. y Gong, H. (2016). Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, 7, 196.

Ullah, U., Ashraf, M., Shahzad, S.M., Siddiqui, A.R., Piracha, M.A. y Suleman, M. (2016). Growth behavior of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under drought stress in the presence of silicon and plant growth promoting rhizobacteria. *Soil Environ*, 35(1), 65-75.

Wang, L., Ning, C., Pan, T. y Cai, K. (2022). Role of silica nanoparticles in abiotic and biotic stress tolerance in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1947.

Xie, Z., Song, R., Shao, H., Song, F., Xu, H. y Lu, Y. (2015). Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. *The Scientific World Journal*, 2015.