

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efecto de las Nanopartículas de SiO_2 y SiO_2/Zn en la Tolerancia del Pepino
(*Cucumis sativus* L) al Estrés Hídrico.

Por:

PONCIANO SOLÓRZANO MARTÍNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Marzo del 2024.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efecto de las Nanopartículas de SiO_2 y SiO_2/Zn en la Tolerancia del Pepino
(*Cucumis sativus* L) al Estrés Hídrico.

Por:

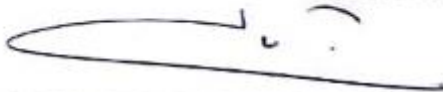
PONCIANO SOLÓRZANO MARTÍNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

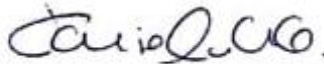
Aprobada por el Comité de Asesoría



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Asesor Principal

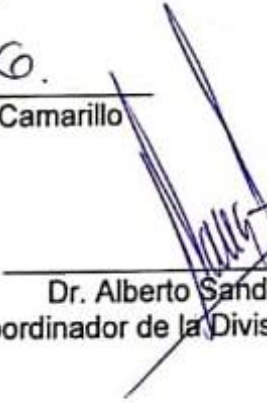


Dra. Heana Vera Reyes
Asesor Principal Externo



Dra. Daniela Alvarado Camarillo
Coasesor

Dr. Víctor Manuel Reyes Salas
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Marzo del 2024

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conociendo de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los derechos de Autor.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Pasante



Ponciano Solórzano Martínez

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme la oportunidad de concluir mi carrera profesional y sobre todo por darme la vida, salud y por estar siempre conmigo en cada paso que doy.

A mis padres

Por hacer un gran esfuerzo para que su pequeño logra cumplir uno de sus sueños. Por estar apoyarme siempre en las buenas y en las malas, al igual porque nunca me dejaron solo en este largo camino. Por inculcarme valores y formarme en una persona de bien, brindarme de sus sabios consejos. Gracias por darme su cariño y por motivarme siempre para salir adelante.

A mi asesor principal de tesis

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, gracias por darme la oportunidad de realizar este proyecto, le agradezco de todo corazón por brindarme de sus conocimientos y apoyarme siempre que necesitaba de su ayuda, aclarando cada duda que surgía durante el tiempo que tardo el proyecto. Agradezco a la Dra. Ileana Vera Reyes por hacer posible este proyecto y apoyarme con ciertos materiales. Muchísimas gracias por brindarme la beca.

A mis asesores de tesis

Agradezco infinitamente por todo el apoyo brindado a la Dra. Daniela Alvarado Camarillo por brindarme de sus conocimientos y apoyarme con el material de laboratorio y hacer posible concluir el proyecto.

Agradezco al Dr. Víctor Manuel Reyes Salas por brindarme su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

A Mi Alma Terra Mater

Le agradezco infinitamente por abrirme las puertas, por acobijarme durante toda la estancia de mi carrera. Gracias por todo el aprendizaje adquirido en tus aulas, por haber conocido a tantas amistades y amigos. Muchísimas gracias por regalarme

todas aquellas experiencias y herramientas tomadas para convertirme en lo que hoy soy.

DEDICATORIA

A mis padres Celestina Martínez Pérez y Luis Solórzano Pérez

Este logro se los dedico a ustedes. Doy gracias a Dios por haberme dado esta hermosa familia. Gracias a su gran esfuerzo que tuvieron que hacer durante todos estos años para que yo lograra este sueño. No tengo palabras para agradecerles todo lo que me han brindado, cariño, comprensión, amor, apoyo y, sobre todo, los valores que me han inculcado. Por todos aquellos consejos que me dieron para no darme por vencido y seguir luchando día con día y saber que gracias a ustedes podre ser una gran persona con principios y valores.

A mis hermanos José Damián Solórzano Martínez y María Cruz Solórzano Martínez

Gracias por brindarme su apoyo, cariño, comprensión y en su momento apoyarme económicamente. Sé que juntos podemos logran grandes cosas, siempre los llevare muy dentro de mi corazón.

A mi cuñada Rafaela Hernández Rodríguez y mi cuñado Primitivo Solórzano Martínez.

Gracias por motivarme siempre y darme ánimos para seguir luchando por cada uno de mis sueños. Infinitamente gracias por estar siempre conmigo.

A mis sobrinos Estrella Guadalupe y Jonathan

Les dedico este logro, ustedes fueron una de mis principales motivaciones para logras mi carrera profesional, gracias por darle sentido a mi vida y hacerme muy feliz.

A mis amigos

Mario, Madai, Diana, Daniel, Josué, Kevin, Carlos y Yovana

Gracias amigos por brindarme su amistad y por compartir con ustedes tantas aventuras, ustedes fueron como mi familia durante toda la estancia en la

universidad. Les deseo lo mejor de los éxitos en la vida, esperare con ansias verlos pronto.

Armando, Oscar, Jaime, Daniela, Imanol

Gracias amigos por ayudarme en cierto momento del proyecto, infinitamente les agradezco todo el apoyo brindado, al igual gracias por brindarme su amistad y compartir tantas aventuras con ustedes, fueron parte de mi familia, espero con asías un pronto recuento, les deseo el mejor de los éxitos.

Salomón, Romeo y Belén

Gracias amigos que en cierto monto de la carrera conocí, meda gusto de haber conocido personas tan lindas, increíbles y maravillosas. Gracias por brindarme su amistad. Les deseo lo mejor de los éxitos en la vida.

Gerardo Ángel y Nufo

Gracias a ustedes mis mejores amigos porque siempre estuvieron conmigo en las buenas y en las malas. Por compartir tantas experiencias juntos, gracias por darme muchos ánimos y sacarme muchas sonrisas. Sin duda alguna se convirtieron en mi familia los quiero como si fueran mis hermanos.

Fabi

Te dedico este logro, gracias por ser una parte muy importen en mi vida. Fuiste una de mis principales motivaciones para poder logra mi carrera profesional, infinitamente gracias a ti que formaste parte de este logro, por brindarme tu cariño, comprensión y por siempre motivarme para seguir adelante en la vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XVI
I. INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Centro de origen del pepino	4
Descripción botánica.....	4
Raíz	4
Tallo.....	4
Hoja	5
Flor	5
Fruto	5
Cultivo de pepino en México	5
Importancia nutrimental del pepino	7
Elementos esenciales	7
Elementos benéficos.....	8
Silicio	8
Beneficios del silicio.....	10
Formas en que absorben las plantas el silicio	11
Efectos del silicio en los cultivos	12
Nanotecnología	13
Nanopartículas	14
Efecto de la sequía en las plantas	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
Sitio experimental	17
Material vegetal.....	17
Manejo del cultivo	17
Siembra.....	17

Riego.....	17
Poda.....	18
Tutorado.....	18
Cosecha.....	18
Tratamientos.....	18
Variables a evaluar.....	19
Diseño experimental.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
Rendimiento de fruto.....	24
Aborto de flores y número de frutos.....	26
Características físicas del fruto.....	28
Sólidos solubles totales.....	31
Biomasa seca.....	32
Diámetro y longitud del tallo.....	36
Fotosíntesis e intercambio de gases.....	38
Estado nutrimental en el extracto de savia del peciolo.....	44
Estado nutrimental en el extracto de savia del fruto.....	47
V. CONCLUSIONES.....	49
VI. LITERATURA CITADA.....	50

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Producción de pepino en México por entidad federativa (SIAP, 2023).	6
Cuadro 2. Tratamientos aplicados en pepino consistentes en la aspersión foliar de nanopartículas (NPs) de dióxido de silicio (SiO ₂) y de dióxido de silicio combinado con zinc (SiO ₂ /Zn).	19
Cuadro 3. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO ₂) o bien SiO ₂ combinado con zinc (Zn) en la concentración de nitrato (NO ₃ ⁻), potasio (K ⁺) y calcio (Ca ⁺⁺) en los frutos de pepino (<i>Cucumis sativus</i> L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con p<0.05. Letra diferente indican significancia estadística.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en el rendimiento del fruto en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....25
- Figura 2.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en flores abortadas en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....27
- Figura 3.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en frutos cosechados en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....28
- Figura 4.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en el diámetro ecuatorial del fruto en el pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....29
- Figura 5.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la longitud del fruto en el pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....30
- Figura 6.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la firmeza del fruto del pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....31
- Figura 7.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en los sólidos solubles totales (SST) del fruto del pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.....32

Figura 8. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el peso seco de hoja en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 33

Figura 9. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el peso seco de raíz en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 35

Figura 10. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el peso seco de tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 36

Figura 11. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el diámetro basal del tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 37

Figura 12. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el diámetro intermedio del tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 37

Figura 13. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la longitud del tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 38

Figura 14. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la fotosíntesis de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 39

- Figura 15.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la conductancia estomática de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 41
- Figura 16.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración interna de CO_2 de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 41
- Figura 17.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la transpiración de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 42
- Figura 18.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la temperatura de la hoja de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 42
- Figura 19.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la resistencia del agua de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 43
- Figura 20.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la conductancia del agua de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística..... 43
- Figura 21.** Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de nitrato (NO_3^-) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística. 44

Figura 22. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de potasio (K^+) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.45

Figura 23. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de calcio (Ca^{++}) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.46

Figura 24. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de sólidos solubles totales (SST) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.47

RESUMEN

La nanotecnología está considerada como la tecnología de vanguardia, esta constituye un campo interdisciplinario que incluye el estudio de muchas áreas. Dentro de los materiales desarrollados por la nanotecnología están las nanopartículas (NPs), en la agricultura representa una importante innovación tecnológica, ya que surge como una alternativa de agricultura sustentable. Las nanopartículas se pueden emplear en la producción de nofertilizantes, nanocidas o pesticidas encapsulados en NPs para liberación controlada. Los nanofertilizantes ayudan a tener mejor rendimiento de los cultivos, permiten tener una buena respuesta fisiológica en las plantas, al igual estos pueden penetrar y ser absorbidos más rápido por las plantas.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto sobre la tolerancia al estrés hídrico en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) sometidas a la aplicación de NPs de SiO₂ y de SiO₂/Zn. Las plantas fueron sembradas el 13 de marzo del 2023 en invernadero. Los riegos se mantuvieron con una solución Steiner desde que las plantas emergieron.

El experimento se realizó dentro las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en el área de invernaderos del Departamento de Horticultura. Se evaluaron los efectos de la aplicación de NPs de SiO₂ y de SiO₂/Zn en la tolerancia al estrés hídrico en pepino. El experimento se realizó en el periodo de marzo a junio del año 2023. Se aplicaron foliarmente NPs de SiO₂ y SiO₂/Zn a una concentración de 0.15 gL⁻¹ cada 15 días iniciando la primera aplicación el 21 de abril y la última fue el 16 de junio. Se utilizó un diseño estadístico de bloques completamente al azar, el experimento consistió en ocho tratamientos con seis repeticiones cada tratamiento. Cada repetición fue una planta. Hubo significancia con NPs SiO₂/Zn 1.5% sin sequía en diámetro ecuatorial del fruto. Con NPs SiO₂ solo hubo significancia en transpiración, resistencia del agua tanto en plantas con riego normal y estrés hídrico. La aplicación de las NPs de SiO₂/Zn 1.5% promovieron un mayor rendimiento de frutos, estando las plantas con riego normal y con estrés hídrico, en comparación de los testigos habiendo un efecto significativo. Respecto

a los frutos cosechados se vio un aumento con la aplicación de NPs de SiO₂ y SiO₂/Zn 1.5%, aunque no hubo ningún efecto significativo. En el peso seco de raíz hubo un mayor aumento significativo con la aplicación de las NPs de SiO₂/Zn 1.5% sin sequía comparado con el testigo negativo, aunque no hubo significancia con la mayoría de los demás tratamientos de NPs. Aunque hubo variables donde no se encontró diferencia significativa con la aplicación de NPs en comparación de los testigos.

Palabras clave: Pepino, nanopartículas, estrés hídrico, dióxido de silicio, dióxido de silicio con zinc.

ABSTRACT

Nanotechnology is considered a cutting-edge technology; it constitutes an interdisciplinary field that includes the study of many areas. Among the materials developed by nanotechnology are nanoparticles (NPs), in agriculture they represent an important technological innovation, since they emerge as an alternative for sustainable agriculture. Nanoparticles can be used in the production of non-fertilizers, nanocides or pesticides encapsulated in NPs for controlled release. Nanofertilizers help to have better crop performance, allow for a good physiological response in plants, and they can penetrate and be absorbed faster by plants.

The objective of this study was to evaluate the effect on tolerance to water stress in cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) subjected to the application of SiO₂ and SiO₂/Zn NPs. The plants were planted on March 13, 2023 in a greenhouse. Irrigation was maintained with a Steiner's nutrient solution since the plants emerged.

The experiment was carried out within the facilities of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, in the greenhouse area of the Department of Horticulture. The effects of the application of SiO₂ and SiO₂/Zn NPs on the tolerance to water stress in cucumber were evaluated. The experiment was carried out from March to June 2023. SiO₂ and SiO₂/Zn NPs were foliar applied at a concentration of 0.15 gL⁻¹ every 15 days, starting the first application on April 21 and the last one on June 16. A completely randomized block statistical design was used, the experiment consisted of eight treatments with six replications each treatment. Each replication was one plant.

There was significance with 1.5% SiO₂/Zn NPs without drought in equatorial diameter of the fruit. With SiO₂ NPs there was only significance in transpiration and water resistance in both plants with normal irrigation and water stress. The application of 1.5% SiO₂/Zn NPs promoted a higher fruit yield, with the plants being under normal irrigation and under water stress, compared to the controls. Regarding the harvested fruits, an increase was seen with the application NPs of SiO₂ and SiO₂/Zn 1.5%, although there was no significant effect. In root dry weight there was

a significant increase with the application of 1.5% SiO₂/Zn NPs without drought compared to the negative control, although there was no significance with most of the other NPs treatments. Although there were variables where no significant difference was found with the application of NPs compared to the controls.

Key words: Cucumber, nanoparticles, water stress, silicon dioxide, silicon dioxide with zinc.

I. INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza de alta demanda y consumida en todo el mundo (Buelna-Tarín et al., 2023). México es exportador mundial de pepino y el principal proveedor del mercado de Estados Unidos, principalmente en la época de invierno. Cuando se produce esta hortaliza en invernadero aumenta significativamente el rendimiento, ya que en invernadero se puede controlar el clima (Barraza-Álvarez, 2012).

Las plantas necesitan nutrientes para crecer y desarrollarse correctamente, de todos los elementos químicos que existen en la naturaleza, solo 17 se consideran elementos esenciales para las plantas, los cuales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes. Los elementos esenciales son C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cl, B, Cu, Mn, Mo, Ni y Zn (Barros-Torres et al., 2022). Además, existe un grupo de elementos que pueden tener un efecto beneficioso en el crecimiento de la planta. Los elementos benéficos pueden estimular el crecimiento y son esenciales para algunas especies. Dentro de los elementos benéficos bien conocidos está el silicio (Si) (Mengel y Kirkby, 2000).

El agua es un elemento indispensable para la vida en este planeta. La escasez de agua afecta ya a todos los continentes. Cerca de 1200 millones de personas vive en áreas de escasez física de agua. Se dice que México ocupa el lugar 24 de países con mayor estrés hídrico; 15 estados tienen un promedio extremadamente alto de estrés hídrico (Romero-Guzmán y Romero-Guzmán, 2020). En los últimos años, se han presentado sequías en varias regiones de México, principalmente en la parte norte, cuyos efectos han sido significativos en la producción agrícola de riego. La sequía se presenta periódicamente en las cuencas de la mayor parte de los ríos del país, con efectos negativos para la agricultura; sin embargo, este efecto suele ser de mayor significancia en la agricultura de riego (Mejía-Sáenz et al., 2002).

El requerimiento hídrico de los cultivos depende principalmente de la especie, variedad, etapa fenológica, fecha de siembra y condiciones ambientales del ciclo fenológico. El pepino es un cultivo que demanda una buena disponibilidad de agua

para conseguir altas producciones, en especial en el período de fructificación (Martínez-Sánchez, 2017). Zamora-Pérez et al. (2014) mencionan que el déficit hídrico puede provocar una baja floración y fructificación, por lo que disminuye el rendimiento. Para satisfacer las necesidades hídricas en el cultivo de pepino, hay que aplicar riegos parciales de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con intervalos de 3 a 4 días durante todo su ciclo vegetativo. Oñate-Rea (2020) menciona que haciendo una relación consumo de agua/rendimiento se ha determinado que para producir 1 kilogramo de pepino se necesitan 168.828 L de agua.

El Si es muy abundante en la corteza terrestre, está considerado como un elemento no esencial para las plantas, debido a que no cumple con los requisitos directos y aspectos indirectos de la esencialidad, pero presenta una serie de efectos beneficiosos, ayudando en el crecimiento y producción (De Campos-Menegale et al., 2015).

En algunos cultivos, el Si aumenta la tolerancia contra insectos, enfermedades, condiciones climáticas desfavorables y presencia de metales. Además, el Si mejora el estado nutricional de las plantas y el estado físico y propiedades químicas en el suelo, ayuda a mantener los nutrientes en formas disponibles para las plantas (Severo-Dorneles et al., 2016). Se han documentado los efectos beneficiosos y favorables de la nutrición con Si, dando como resultado el crecimiento, desarrollo y estado sanitario de las plantas. Se tiene identificado como un elemento bioactivo y beneficioso en algunas especies (Romero et al., 2011).

El Si está considerado como un elemento benéfico ya que se han observado efectos benéficos en cultivos de arroz, trigo y cebada, más claramente bajo condiciones de estrés. El estrés hídrico en las plantas puede disminuirse con la ayuda del Si ya que reduce la pérdida de agua en las hojas y por ende la transpiración, que ocurre a través de la cutícula, en el cual está situado el Si, manteniendo el contenido de agua de la planta. A su vez, el Si se localiza en diferentes estructuras en la planta, se difunde a través de los tejidos y forma una capa continua entre la cutícula y la epidermis compuesta por dos subcapas, una como gel de Si y otra en complejo silico- celulosa. Ambas capas, con un espesor de 5 micras aproximadamente, aíslan

y defiende la planta de los factores adversos del medio ambiente. El Si proporciona una protección mecánica a la epidermis, lo que disminuye la transpiración y mejora el potencial hídrico de las células (Quiroga-Silva, 2016).

La nanotecnología constituye un campo interdisciplinario que incluye el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales que posean al menos una dimensión espacial en el rango de los nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Dentro de los materiales desarrollados por la nanotecnología están las nanopartículas (NPs) de Si de 1 a 5 nm de diámetro recibieron mucha atención en la última década debido a su biocompatibilidad (Romero, 2017). El propósito del presente estudio fue determinar si las NPs de SiO_2 o bien la combinación de NPs de SiO_2 con Zn (SiO_2/Zn) pueden impartir la capacidad de tolerar la sequía en una planta altamente demandante de agua como lo es el pepino.

Objetivo general

Determinar el efecto sobre la tolerancia al estrés hídrico en plantas de pepino sometidas a la aplicación de NPs de SiO_2 y de SiO_2/Zn .

Objetivos específicos

Determinar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento, crecimiento y estatus nutrimental extracto celular del peciolo en plantas de pepino cultivadas en invernadero.

Definir si la aplicación de nanopartículas de SiO_2 aumentan la tolerancia al estrés hídrico en pepino.

Definir si la aplicación de nanopartículas de SiO_2/Zn aumentan la tolerancia al estrés hídrico en pepino.

Hipótesis

Las aplicaciones foliares de nanopartículas de SiO_2 y SiO_2/Zn tienen un efecto positivo en la tolerancia de plantas de pepino a la deficiencia de humedad en el sustrato.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Centro de origen del pepino

El pepino es considerado originario de la India, posteriormente siendo domesticado en Asia y de ahí introducido a Europa, para posteriormente ser llevado a América por Cristóbal Colón (López et al., 2015). Monge-Pérez et al. (2021) mencionan también que el centro de origen es India. Se dice que es originario de las regiones tropicales del Sur de Asia, cultivado también en la India desde hace más de 3,000 años. De la India se extiende a Grecia y de ahí a Roma y posteriormente fue llevado a China. El pepino se introdujo por los romanos en otras partes de Europa; aparecen registros de este cultivo en Francia en el siglo IX, se dice que el primer híbrido apareció en 1872 (Mejía, 2010).

Descripción botánica

Las plantas de pepino poseen hojas medianas, de tipo acorazonadas, muy pilosas, más chicas que las de los zapallos. La planta es rastrera, el tallo tiene zarcillos y espinas, es anguloso, emite brotes laterales y según la variedad pueden generar una planta extremadamente grande de varios metros de longitud. Tiene flores medianas, amarillas, femeninas y masculinas presentes en una misma planta. En las yemas de cada hoja se pueden emitir brotes y flores (Del Pino, 2013).

Raíz

El pepino es una planta que tiene una raíz principal que llega a medir o alcanzar una profundidad en el suelo entre 100 y 120 cm. Se ramifica rápidamente y se desprenden raíces secundarias superficiales muy finas, alargadas y de color blanco, estas raíces son ramificaciones múltiples que extienden de forma horizontal, la mayoría se encuentran ubicadas en una parte del suelo que oscila de 10 a 20 cm (Silva, 2015).

Tallo

Los tallos son rastreros, postrados y con zarcillos, tienen un eje principal que da origen a varias ramas laterales principalmente en la base, entre los 20 y 30 primeros

centímetros. Son trepadores, llegando a alcanzar de longitud hasta 3.5 metros en condiciones normales (Fuentes-Paz, 2015).

Hoja

Las hojas tienen el pecíolo largo, tiene un gran limbo acorazonado, con tres lóbulos más o menos pronunciados (el central más acentuado y generalmente acabado en punta), son de color verde oscuro y recubierto de un vello muy fino (García-Ormaza y Soliz-Anchundia, 2016).

Flor

La flor es de corto pedúnculo y pétalos amarillos. Aparecen en las axilas de las hojas y pueden ser hermafroditas o unisexuales, actualmente todas las variedades comerciales que se cultivan son plantas ginoicas (femeninas), sólo poseen flores femeninas que se distinguen claramente de las masculinas porque son portadoras de un ovario ínfero (Muñoz-Macías, 2015). Callizaya (2015) menciona que la polinización se lleva a cabo a través de insectos (abejas). En algunos cultivares por insuficiente polinización se producen deformaciones de los frutos, volviéndose no comercializables.

Fruto

Los frutos son de color verde claro, pueden ser rectos y cilíndricos con un tamaño relativo del fruto de 20 cm de largo y 4 cm de ancho. Es una baya pepónide áspera o lisa, la pulpa es acuosa, de color blanquecino, tiene tres lóculos donde se sitúan los óvulos. Las semillas están en el interior y se encuentran repartidas a lo largo del fruto. La recolección se realiza antes de su madurez fisiológica. Dichas semillas se presentan en cantidad y son ovaladas, algo aplastadas y de color blanco-amarillento que miden de 8 a 10 mm (Callizaya, 2015).

Cultivo de pepino en México

El pepino es una verdura del grupo de las hortalizas con una gran cantidad de variedades, en 2022 se lograron producir 1 millón 29 mil toneladas de pepino, con un consumo anual per cápita de 1.2 kg. Sinaloa es preponderante en la producción de pepino, la derrama económica, por la venta de las 308 mil 487 toneladas obtenidas en 2022, fue de dos mil 57 millones de pesos y representa 26.1% del

valor total nacional. México se encuentra dentro de las 5 principales naciones productoras del orbe, superando a países como Uzbekistán, España y Estados Unidos (SIAP, 2023).

En México el cultivo de pepino es muy importante, ya que nuestro país es el principal exportador mundial de esta hortaliza y es relevante también para el consumo nacional. Para la economía agrícola de México, el sector de las hortalizas tiene una particular importancia por su contribución en la generación de empleo en el campo (Cruz-Gómez, 2015).

Las hortalizas tienen particular importancia para la economía agrícola de México, por su contribución en la generación de divisas y empleo en el campo. El tomate, melón, sandía y pepino son las más importantes. Se reporta que entre los países exportadores de pepino se encuentra México (Olalde-Gutiérrez et al., 2014).

De acuerdo al Cuadro 1, los tres principales estados productores de México son Sinaloa, Sonora y Michoacán, cultivando el 52.3 % de la producción nacional (SIAP, 2023).

Cuadro 1. Producción de pepino en México por entidad federativa (SIAP, 2023).

Rank	Entidad Federativa	Región	Volumen (toneladas)
	Total nacional		1,028,568
1	Sinaloa	Noroeste	308,487
2	Sonora	Noroeste	178,460
3	Michoacán	Centro-Occidente	111,922
4	Morelos	Centro	63,075
5	Guanajuato	Centro-Occidente	62,998
6	Yucatán	Sur-Sureste	40,025
7	Coahuila	Noreste	28,785
8	Colima	Centro-Occidente	27,263
9	Baja California	Noroeste	26,731
10	Jalisco	Centro-Occidente	25,947
	Resto		154,873

Importancia nutrimental del pepino

El cultivo del pepino es considerado una planta de gran importancia económica por su elevado índice de consumo, pues sirve tanto de alimento fresco como industrializado. Es uno de los cultivos hortícolas de mayor consumo a nivel mundial por su valor nutrimental (Rodríguez y Girón, 2020).

El pepino se puede consumir en ensalada, jugos, en crudo ya sea sólo o con limón y chile piquín, en agua fresca. También puede consumirse en encurtido, o bien para usos de cosmética. El pepino es una hortaliza de bajo aporte calórico debido a su reducido contenido en hidratos de carbono, en comparación con otras hortalizas, y a su elevado contenido de agua. El pepino aporta fibra, pequeñas cantidades de vitamina C, provitamina A y de vitamina E, y, en proporciones aún menores, vitaminas del grupo B tales como folatos, B1, B2 y B3. En su piel se encuentran pequeñas cantidades de beta-caroteno. La vitamina A es esencial para la visión, el buen estado de la piel, el cabello, las mucosas, los huesos y para el buen funcionamiento del sistema inmunológico (PROFECO, 2020).

Elementos esenciales

Los elementos esenciales para las plantas son 17, incluyendo O, H y C provenientes de H₂O, CO₂ y aire, los demás corresponden a los nutrientes minerales, los cuales, según la cantidad absorbida por la planta, se clasifican en macronutrientes y micronutrientes (Rodríguez y Flórez, 2004).

Navarro y Navarro (2013) mencionan que los elementos esenciales son: carbono, hidrógeno y oxígeno que provienen del aire y del agua del suelo. Además de: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, fierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno y boro que son suministrados a la planta a partir de las reservas del suelo o mediante la aplicación de abonos y fertilizantes.

Los nutrientes esenciales son aquellos imprescindibles para la vida del organismo vegetal y cuya función en la célula es tan específica que no pueden ser reemplazados por otros. Los elementos esenciales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes, los macronutrientes se denominan así porque las plantas deben

absorberlos en grandes cantidades para su perfecto funcionamiento. Estos a su vez se dividen en dos grupos: en nutrientes primarios y secundarios, los primarios son más utilizados abundantemente por las plantas los cuales son N, P y K y los nutrientes secundarios son: Ca, Mg y S. Por último, están los micronutrientes y se denominan así porque las plantas necesitan absorber pequeñas cantidades para que funcionen bien, los cuales son Fe, Cu, Zn, Cl, Mn, Mo y B (Beltrano y Gimenez, 2015).

Elementos benéficos

Hay elementos que no son considerados esenciales para las plantas, pero mejoran ciertas respuestas, y son conocidos como elementos benéficos. Al ser suministrados, los elementos benéficos pueden favorecer procesos de crecimiento y desarrollo vegetal, y también pueden estimular mecanismos de resistencia a factores de estrés biótico y abiótico, o favorecer el aprovechamiento de otros nutrimentos (Cuacua et al., 2017).

Gómez-Merino et al. (2015) mencionan que los elementos benéficos pueden mejorar el crecimiento y el desarrollo de las plantas, además de modular diferentes respuestas incluyendo mejoras en rendimiento, en calidad de las cosechas y estimular respuestas a factores adversos como la sequía, la salinidad de los suelos, las plagas y las enfermedades. Estos elementos incluyen aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), iodo (I), sodio (Na), lantano (La), selenio (Se), silicio (Si), titanio (Ti) y vanadio (V).

Silicio

El Si es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, sin embargo, es muy importante para algunos organismos como plantas y animales. Es arrastrado al mar por los ríos, donde lo absorben las diatomeas, que al morir se sedimentan, quedando menos Si biodisponible para otros organismos. El Si sedimentado retorna a la biósfera con la subducción y formación de montañas. En las plantas tiene un papel muy importante como protector contra estrés biótico y abiótico y en algunos

países se utiliza en la fertilización de algunos cultivos (Raya-Pérez y Aguirre-Mancilla, 2012).

El Si, después del oxígeno, es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y considerado no esencial para las plantas superiores. Su absorción puede ocasionar efectos benéficos para algunos cultivos, como la resistencia a plagas. El Si constituyendo aproximadamente el 28% de la corteza terrestre. Es encontrado solamente en formas combinadas, como la sílice y minerales siliconados. Los minerales siliconados más comunes son el cuarzo, los feldespatos alcalinos y las plagioclasas (Castellanos et al., 2015).

El átomo de Si, como el C, tiene cuatro electrones de valencia. Se combina con el O₂ para formar silicatos insolubles en agua o redes de polímeros de dióxido de Si (cuarzo), y tiende a salir de la circulación en un ambiente aeróbico. El Si está presente en plantas en cantidades equivalentes a los macronutrientes, como Ca, Mg y P. En las gramíneas el Si se acumula en cantidades mayores que cualquier otro elemento inorgánico (Aguirre et al., 2007).

Aun a pesar de que el Si es considerado un elemento no esencial para el crecimiento de las plantas, estudios relacionados con su administración y bio-distribución han reportado notables efectos benéficos en hortalizas, cereales y frutos (Tejeda et al., 2022).

Caicedo y Chavarriaga (2008) mencionan que el aumento del déficit de Si causa un número de consecuencias negativas para el suelo y la planta. El Si es un elemento constitutivo del suelo, su carencia conduce a la degradación de la fertilidad de suelo. El Si desempeña un papel importante en planta.

Se dice que condiciones de campo, el Si puede estimular el crecimiento y la productividad por aumentar la disponibilidad de elementos como el P, Ca, Mg, K y B, al contrarrestar el antagonismo generado en suelos con alta saturación de aluminio y hierro. Altos contenidos de Si en los retoños de arroz y trigo generaban coeficientes bajos de transpiración en condiciones de baja humedad este elemento

pues actúa como un “elemento alarma” frente a condiciones de estrés hídrico, al impedir la pérdida de agua por acción de la capa de Si (Borda et al., 2007).

El Si incide en la mejora de los niveles de osmolitos como la prolina, proteínas solubles, azúcares y compuestos fenólicos. 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 (Cabezas et al., 2022).

Desempeña un papel importante el Si en la obtención de altas productividades, y es considerado un elemento benéfico para las plantas con funciones, como proteger cultivos, brindar resistencia a diferentes tipos de estrés biótico y abiótico, mejorar la síntesis de metabolitos secundarios antifúngicos, como las fitoalexinas, y reducir el daño oxidativo celular a causa de la toxicidad con metales pesados (Guio-Rodríguez et al., 2023).

Los efectos benéficos del Si se atribuyen a distintos mecanismos fisiológicos como el incremento del sistema antioxidante, modificaciones en el intercambio gaseoso y reducción del estrés osmótico. En plantas sometidas a estrés salino ha sido atribuido a la reducción en la absorción de Na, regulación en el intercambio gaseoso, incremento de la actividad antioxidante, reducción de la permeabilidad de las membranas celulares, entre otros mecanismos (Garza-Alonso et al., 2022).

Beneficios del silicio

El Si es más conocido por su rol en los componentes electrónicos; sin embargo, se ha demostrado que, a pesar de no ser un elemento esencial para la planta, tiene cualidades que ayudan en el desarrollo y rendimiento de algunas especies (Villalón-Mendoza et al., 2018).

Arévalo-Castro (2017) menciona que el Si ayuda a ciertas plantas cuando están bajo condiciones de estrés, también ayuda la tolerancia a las sequías y retrasa la defoliación prematura de algunos cultivos. Mejora la capacidad de resistencia de las plantas a las toxicidades de micronutrientes y de otros metales (por ejemplo, aluminio, cobre, hierro, manganeso, zinc, etc.). Se dice que ayuda a incrementar la

resistencia del tallo e incrementa la resistencia de ciertas especies de plantas a ataques patógenos de hongos.

El Si desempeña un papel importante en la planta. Este elemento controla el desarrollo del sistema de la raíz, aumenta la resistencia de las plantas a las temperaturas bajas o altas, viento, salinidad, los metales pesados y el ataque de insectos, hongos y enfermedades (Caicedo y Chavarriaga, 2008).

El Si ayuda a una mayor eficiencia de la fertilización, evitando el déficit de nutrientes, aumenta la eficiencia del agua de riego en 30%, incentivando su ahorro, ayuda a la prevención del daño por heladas, e incrementa la resistencia de la planta a las condiciones adversas del clima (estrés hídrico y salino). El Si también puede ayudar a aliviar el estrés hídrico al disminuir la pérdida de agua en las hojas y disminuir la transpiración (Santacruz, 2016).

Onofre-Salazar (2019) menciona que el Si incrementa la productividad y calidad de las cosechas agrícolas como arroz, trigo, aguacate, café, maíz, tomate, pepino, caña de azúcar y palma aceitera, entre otros. El suelo tratado con sustancias con Si optimiza la fertilidad a través de la mejora de retención y disponibilidad de agua, sus propiedades físicas y químicas, y de mantener los nutrientes de forma disponibles para las plantas.

El Si mejora la exposición de las hojas a la luz del sol, promoviendo la fotosíntesis, también promueve el crecimiento erecto de los tallos, ayuda en el efecto sobre actividades enzimáticas. Promueve la formación de nódulos en leguminosas. El Si ayuda al sistema radicular de las plantas y puede incrementar la masa de raíces de un 50 a 200%, por lo que también estimula la generación de un mayor número de tallos por semilla (Onofre-Salazar, 2019).

Formas en que absorben las plantas el silicio

Las plantas absorben el Si principalmente en forma de ácido silícico (H_4SiO_4) o ácido monosilícico $Si(OH)_4$ soluble en agua, que sigue pasivamente el flujo de agua desde la superficie de la raíz. El Si en el suelo se encuentra en una forma inerte y se

absorbe en forma soluble como Si(OH)_4 (Sanmartín-Galván et al., 2023). El Si(OH)_4 es transportado por la xilema y su distribución dentro de la planta depende de la velocidad de transpiración de sus diferentes órganos (Intagri, 2024).

Efectos del silicio en los cultivos

Desde hace tiempo se ha informado sobre los efectos benéficos del silicio (Si) en algunos cultivos, si bien dichos efectos se centraron en gramíneas como caña de azúcar, arroz y maíz. También se han realizado trabajos en familias de plantas como cucurbitáceas, solanáceas, crucíferas y forestales. Entre los beneficios está el mejoramiento del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Se ha observado tolerancia a metales pesados, incremento en crecimiento, contenido de clorofila, fotosíntesis y por su puesto el aumento de enzimas antioxidantes, así como, el incremento en rendimiento y calidad de los frutos (Cázarez-Flores et al., 2023).

Se ha demostrado que las plantas que crecen en ausencia de Si frecuentemente son más débiles estructuralmente, tienen menor tamaño, desarrollo, viabilidad y su reproducción es anormal. También, son más susceptibles al estrés abiótico, así como a la toxicidad por metales. El Si es un fertilizante fundamental en las hortalizas. En plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L) el efecto del Si incrementó el crecimiento de las variables altura, grosor de la planta y número de frutos (Reyes-Pérez et al., 2023).

Antúnez-Ocampo et al. (2023) probaron en el cultivo de maíz la aplicación de Si mediante Silifosca o Fermiphos combinada con la fertilización N-P-K favoreciendo el aumento en el tamaño (longitud y diámetro) de la mazorca, así como en el rendimiento de grano, obteniendo los mejores resultados (longitud 11%; diámetro 10%; rendimiento 29%) con el mayor nivel (90-60-00) de fertilización N-P-K y la adición de Silifosca.

La acumulación de Si puede aumentar la resistencia de las plantas de pepino al ataque de cenicilla polvorienta (*Sphaerotheca fuliginea*). Se ha reportado que el aumento en el contenido de Si en hojas de pepino incrementa la rigidez, lo cual

favorece la mayor interceptación de luz solar y aumentó del contenido total de clorofila en hojas (Parra-Terraza et al., 2004).

Furcal-Beriguete y Herrera-Barrantes (2013) indican que una buena producción de arroz puede extraer del suelo entre 467 y 560 kg/ha de Si, incrementándose la producción y acumulación de SiO₂ en la epidermis de las hojas. El Si se acumula en forma activa en arroz en concentraciones iguales o mayores al 5%, esto le confiere a la planta no solo resistencia a enfermedades fúngicas sino también promueven un mayor crecimiento. En el caso de arroz, se ha comprobado que el Si induce una excelente resistencia contra enfermedades causadas por *Rhizoctonia*, *Pyricularia*, *Helminthosporium*, *Rynchosporium*, *Sarocladium*, etc.

Según investigaciones sobre el efecto del Si aplicado de forma foliar en el cultivo de azúcar (*Saccharum officinarum* L), encontraron que existe relación directa sobre el Si y su incidencia en el incremento de N y K; con tendencia de disminución del sodio (Na). En el cultivo de algodón, establecen que la aplicación de Si aumentó la tasa de asimilación de CO₂ y la eficiencia cuántica del fotosistema II (Sanmartín-Galván et al., 2023).

Cáñez-Flores et al. (2022) reportan que al aplicar Si y Cl de manera individual o en mezcla incrementa el verdor foliar del pepino significativamente, excepto con Si a 20 mg L.

Nanotecnología

La nanotecnología es un conjunto de acciones de investigación, desarrollo e innovación, esta exhibe las propiedades especiales de la materia cuando se organiza a partir de estructuras de dimensiones nanométricas y esta se miden a escala nanométrica (un nanómetro equivale a 10⁻⁹ mm, es decir, una millonésima de milímetro) (Borelli y Da Concepción, 2023). La nanotecnología es considerada tecnología de vanguardia. Se manipulan materiales pequeños y se generan partículas tan diminutas. A pesar de su gran pequeño tamaño, estos nanomateriales pueden hacer cosas asombrosas, esto se debe al cambio de sus propiedades físicas y químicas (Magdaleno-García y Méndez- López, 2023).

Nanopartículas

El uso de NPs en la agricultura representa una importante innovación tecnológica, que puede ser empleada en la producción de nanofertilizantes, nanocidas o pesticidas encapsulados en NPs para liberación controlada. Las NPs se pueden sintetizar mediante métodos físicos, químicos y biológicos (Farias de Almeida et al., 2021).

Al incorporarse las NPs a las plantas provocan cambios morfológicos y fisiológicos en función de sus propiedades. La eficiencia de las NPs se mide por su composición física, química, tamaño, forma, carga superficial, energía superficial y dosis adecuadas. La morfología de las NPs se ha mencionado que afecta sus interacciones con las membranas celulares, así como su capacidad para penetrar en las células. La forma de las NPs puede influir en la manera de interactuar con el entorno por el efecto geométrico (Magdaleno-García et al., 2023).

Las NPs y las nanoemulsiones se pueden aplicar a pesticidas, fertilizantes, sensores para monitorear el suelo, alimentos para animales, medicamentos para animales, alimentos, medicamentos a base de hierbas y empaques compuestos antibacterianos y antigases. Las NPs también se usan ampliamente de varias maneras, como aumentar el uso eficiente de fertilizantes e ingredientes naturales en el suelo, y para estudiar el mecanismo y la dinámica de los nutrientes en el suelo (Martez, 2022).

En cuanto a las NPs de Si, se han realizado diferentes trabajos que señalan que su aplicación aumenta el crecimiento de plantas bajo toxicidad por plomo, reduce la acumulación de cromo en plántulas de guisante y reduce el efecto tóxico del arsénico en plantas de maíz. Además, se ha reportado que tienen la capacidad de aumentar el sistema antioxidante en plantas de trigo y pueden mejorar el contenido de clorofila y disminuir el daño de la pared celular en plantas bajo estrés abiótico (González-Moscoso, 2020).

Efecto de la sequía en las plantas

La limitación más grande para la producción de los cultivos agrícolas es el estrés por déficit hídrico, se dice que cerca del 10% de la superficie del planeta se ve afectada y miles de hectáreas de tierra son abandonadas debido a las causas que trae consigo el estrés hídrico (Rojo-Zavala et al., 2023).

El estrés abiótico es una de las principales causas mundiales de pérdidas de producción en la mayoría de los cultivos, reduciéndose el rendimiento en más de un 50%. Dentro de estas adversidades abióticas, el estrés por sequía es el que especialmente más preocupa (Soave et al., 2011). La sequía está considerada como uno de los factores ambientales que más limita el rendimiento y el desarrollo de los cultivos y afecta significativamente la fotosíntesis, El déficit hídrico tiene diversos efectos sobre el crecimiento, uno de los cuales es la limitación de la expansión foliar (Núñez et al., 2017).

Las respuestas de la planta con estrés hídrico dependen del genotipo y el estadio de desarrollo de la misma en el momento del estrés, de la duración y la severidad del estrés y de los factores ambientales que lo provoquen. Un mecanismo importante en el mantenimiento del consumo de agua y turgencia celular en condiciones de estrés hídrico es el ajuste osmótico (Florido-Bacallao y Bao-Fundora, 2014).

La sequía puede afectar a las plantas en gran medida en el funcionamiento de las raíces al modificar la conductividad hidráulica de sus células e influir en el crecimiento y la arquitectura del sistema radicular (CORDIS, 2018).

Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, como la disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular. Una respuesta molecular de las plantas al estrés, y quizás una de las más importantes, es la modificación de la expresión de genes (Moreno, 2009).

El silicio es un elemento benéfico, hay estudios que reportan efectos positivos en el cultivo de arroz, trigo y maíz, sandía bajo condiciones de estrés hídrico. El Si ayuda

a las plantas a soportar el estrés hídrico, hay estudios que han confirmado el potencial del Si en las plantas, dando como beneficio la pérdida de transpiración, manteniendo el contenido de agua en las plantas, mejorando el régimen hídrico ante condiciones de sequía y aporta resistencia mecánica a la pared celular endureciendo los tejidos de las plantas. El Si se acumula en la epidermis de hojas, tallos y frutos. Esto ayuda a las paredes celulares y hace que la planta sea más resistente, más dura y al mismo tiempo más flexible (Landívar-Lucio, 2023).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el periodo de marzo a junio del 2023 en Saltillo, Coahuila, dentro las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en el área de invernaderos del Departamento de Horticultura, cuyas coordenadas son 25°21'20"N 101°02'12"W.

Material vegetal

El material vegetal que se utilizó para establecer el experimento fueron semillas de pepino híbrido, variedad Centauro F1 con una pureza híbrida del 99% y germinación del 95%. Las plantas de este cultivar son vigorosas, con hojas de color verde oscuro, destaca por adaptarse a distintas condiciones de cultivo y genera frutos con excelente conservación post-cosecha. Se adapta adecuadamente a condiciones de calor y mucha luminosidad.

Manejo del cultivo

Siembra

El cultivo se estableció en invernadero el 13 de marzo del 2023. La siembra fue directa y utilizó bolsas de polietileno con capacidad de 10 L en color negro, se utilizó sustrato basado en una mezcla de peat moss y perlita en una relación 80-20 (80% peat moss y 20% perlita v/v). Se requirió a ajustar el pH del sustrato con bicarbonato de sodio quedando el ajuste en 6.0. Cuando el sustrato estaba listo se comenzó a llenar 48 bolsas y por último se dio un riego pesado a cada bolsa para bajar la CE, para posteriormente colocar una semilla.

Riego

Se realizó de manera manual con solución nutritiva Steiner a diferentes concentraciones (25%, 50%, 75% y 100%) de acuerdo a la etapa de desarrollo de las plantas. En la etapa de germinación se aplicó 1 L de la solución nutritiva al 25% por planta con un intervalo de cada tercer día. Después de 2 semanas se subió la concentración de la solución nutritiva al 50% aplicando 2 L por planta diariamente. A los 12 días después se subió nuevamente la concentración de la solución nutritiva

al 75% aplicando diariamente 2 L cada planta. Finalmente, una semana después, se subió la concentración de la solución nutritiva al 100% aplicando 3 L cada planta diariamente.

Poda

Las plantas de pepino se manejaron a un solo tallo, 24 días después que emergieron las plantas se hizo una poda de chupones, cada que emergían se podaban manteniendo esto hasta terminar el experimento. Se podaron hojas y zarcillos, las hojas se cortaron con la ayuda de una tijera después de la primera cosecha, podando hasta el próximo fruto a madurar, manteniendo esto hasta terminar el experimento.

Tutorado

En esta actividad se utilizó rafia (hilo de polipropileno), sosteniendo una punta de la rafia en la base del tallo de la planta con un anillo y la otra punta se ató en un alambre que estaba a una altura de 2.5 metros. La planta se iba enredando en la rafia conforme iba creciendo, para así facilitar el manejo de la planta.

Cosecha

La primera cosecha se realizó el 9 de mayo, manualmente y con la ayuda de unas tijeras. Posteriormente, las cosechas se llevaban a cabo cuando el fruto presentaba una pequeña estrella de color verde claro en el ápice del fruto, llevando a cabo la última cosecha el 18 de junio. Todos los frutos cosechados se llevaron al laboratorio para tomarles los datos necesarios.

Tratamientos

Los tratamientos evaluados fueron NPs de SiO_2 y SiO_2/Zn a una concentración de 0.15 gL^{-1} , estas se aplicaron vía foliar cada 15 días iniciando la primera aplicación el 21 de abril y la última fue el 16 de junio. Para evitar contaminación de un tratamiento con otro se utilizó un plástico que cubría toda la planta al momento de aplicar las NPs y así evitar variaciones en los resultados.

A partir del 21 de abril los riegos se realizaban ya con la solución nutritiva al 100%. Los riegos se aplicaron normalmente a las plantas con los tratamientos T1, T3, T5, T7; el riego consistió en la aplicación manual de 3 L por cada planta diariamente.

En el caso de los tratamientos bajo sequía el riego se aplicó cada 4, 5, 6 o 7 días, dependiendo del riego aplicado a las plantas del tratamiento testigo positivo (T2); cuando las plantas de este tratamiento mostraban síntomas de estrés hídrico severo y una tensión de humedad de 5 centibares en el sustrato, se les aplicaba el riego junto con aquellas plantas de los tratamientos T4, T6, T8. Los tratamientos se indican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Tratamientos aplicados en pepino consistentes en la aspersión foliar de nanopartículas (NPs) de dióxido de silicio (SiO_2) y de dióxido de silicio combinado con zinc (SiO_2/Zn).

	Tratamiento	Tratamientos de sequía	Concentración de NPs g/L
1	Testigo Negativo	Sin sequía	0
2	Testigo Positivo	Con sequía	0
3	NPs SiO_2	Sin sequía	0.15
4	NPs SiO_2	Con sequía	0.15
5	NPs SiO_2/Zn 3%	Sin sequía	0.15
6	NPs SiO_2/Zn 3%	Con sequía	0.15
7	NPs SiO_2/Zn 1.5%	Sin sequía	0.15
8	NPs SiO_2/Zn 1.5%	Con sequía	0.15

Variables a evaluar

Rendimiento

Se registró el peso total de frutos cosechados. Se utilizó báscula digital con capacidad de 5000 g.

Flores abortadas

Se contó el número de flores abortadas por planta. Esto se realizó manualmente.

Numero de frutos cosechados

Se contabilizó cada uno de los frutos cosechados por planta. Esto se realizó de manera manual.

Diámetro ecuatorial

Se midió una sola vez, tomando como referencia la parte central del fruto. Este proceso se hizo en todos los frutos cosechados. Para esto se utilizó un vernier digital.

Longitud de fruto

Se midió el fruto desde el pedúnculo hasta la punta apical. Este proceso se hizo en todos los frutos cosechados, utilizando una cinta métrica.

Firmeza del fruto

Se eliminaba la cascara del fruto la parte central y posterior mente se introduce el penetrómetro, este proceso se hizo en todos los frutos cosechados, se utilizó un penetrómetro Wagner (1000 gf X 10 gf).

Solidos solubles totales en fruto

Se partía a la mitad el fruto y se exprimía colocando el jugo en el refractómetro (MASTER - 50H - ATAGO). Este proceso se hizo en todos los frutos cosechados.

Peso seco de hojas

Se recolectó todas las hojas de cada una de las plantas, para posteriormente secarlas estas se colocaron en una bolsa de papel estroza, posteriormente se colgó en el invernadero, se dejó durante un mes secar, para por último pesarlas. Se utilizó una báscula digital, capacidad de 5000 g.

Peso seco de raíz

Al final del ciclo se cortó la planta para poder sacar la raíz del sustrato para posteriormente secarla esta se colocó en una bolsa de papel estroza, posteriormente se colgó en el invernadero, se dejó durante un mes secar, para por último pasarla. Este proceso se hizo en todas las plantas y para pesar se utilizó una báscula digital, capacidad de 5000 g.

Peso seco de tallo

Al final del ciclo se cortó todas las hojas y frutos pequeños para dejar solo el tallo, posteriormente se dejó secar un mes y se pesó. Este proceso se hizo en todas las plantas y para pesar se utilizó una báscula digital, capacidad de 5000 g.

Diámetro basal del tallo

Al final del ciclo del cultivo se cortó la planta, al igual que todas las hojas y frutos restantes. Se colocaba el vernier en la base del tallo y se tomaba lectura. Esto se realizó en todas las plantas con un vernier digital.

Diámetro intermedio del tallo

Al final del ciclo del cultivo se cortó la planta, al igual que todas las hojas y frutos restantes. Se colocaba el vernier a la mitad del tallo y se tomaba lectura. Esto se realizó en todas las plantas con un vernier digital.

Longitud del tallo

Al final del ciclo del cultivo se cortó la planta, al igual que todas las hojas y frutos restantes. Se tomaba lectura desde la base del tallo hasta la punta apical, para estos se utilizó esto una cinta métrica y se hizo en todas las plantas.

Fotosíntesis

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Conductancia estomática

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Concentración interna de CO₂

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Transpiración

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Temperatura de la hoja

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Resistencia del agua

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Conductancia del agua

Se tomó lectura en hojas sanas entre la sexta y séptima, que estuvieran a la mitad de la planta, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Para llevar a cabo esta medición se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis marca LICOR modelo LI-6400.

Estado nutrimental en el extracto de savia del peciolo

Se determinaron: Nitratos (NO₃⁻) Potasio (K⁺) Ca⁺⁺ (Calcio) y sólidos solubles totales (SST). Se seleccionaba una hoja joven de cada planta, que estuviera entre la quinta o sexta hoja, esto se realizaba en la mañana primero se tomaba la temperatura de la hoja y esta estuviera en 25 °C para poder cortar el peciolo, se colocaba en una hielera para posteriormente llevarlo al laboratorio y macerar cada muestra, el jugo

obtenido se tomaba cada lectura correspondiente, se utilizó el ionómetro de HORIBA.

Estado nutrimental en el extracto de savia del fruto

En la sexta cosecha se muestreo el estado nutrimental del fruto, se muestrearon 4 repeticiones por tratamiento. Posterior se llevaron al laboratorio y se cortaba el fruto por la mitad y se tomaba una muestra para posteriormente macerarla y el jugo extraído se colocaba en el Ionómetro de HORIBA, posteriormente se tomaba lectura. Se determinaron: Nitratos (NO_3^-) Potasio (K^+) Ca^{++} (Calcio).

Diseño experimental

El experimento consistió en 8 tratamientos con 6 repeticiones cada tratamiento. Cada repetición fue una planta. El diseño estadístico fue bloques completamente al azar. Los datos se analizaron con análisis de varianza y la prueba de medias múltiples de Duncan 0.05, utilizando el programa estadístico SAS versión 9.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de fruto

Las plantas sometidas a sequía mostraron un rendimiento 31.1% menor al de las plantas irrigadas normalmente (Figura 1). La aplicación de NPs de SiO₂ a las plantas sometidas a sequía (3325 ± x rendimiento) indujo un incremento en el rendimiento, pero este no fue significativo; similarmente, la aplicación de NPs de SiO₂/Zn al 3% (2568 ± x rendimiento) no estuvo asociada con un aumento en el rendimiento en plantas bajo sequía. En contraste, cuando se aplicaron NPs de SiO₂/Zn al 1.5%, las plantas bajo sequía (3555 ± x rendimiento) mostraron un incremento del 45.2% en el rendimiento comparado con las plantas bajo sequía, pero sin aplicación de NPs (2449 ± x rendimiento) (Figura 1). Estos resultados indican que las NPs de SiO₂ mezcladas con Zn al 1.5% incrementan la tolerancia a la sequía en pepino.

Estos resultados son de importancia ya que incluso la aplicación de NPs de SiO₂/Zn permitió igualar el rendimiento de las plantas que estuvieron bajo riego normal. Además del incremento en la tolerancia a la sequía, la aplicación de NPs de SiO₂/Zn al 1.5% en plantas irrigadas normalmente (5134 ± x rendimiento) indujo un aumento en el rendimiento del 44.3% sobre las plantas testigo (3557 ± x rendimiento), lo que sugiere un efecto benéfico de estas NPs (Figura 1).

Alsaeedi et al. (2019) establecieron un experimento de campo en condiciones de invernadero utilizando 4 niveles diferentes de NPs de Si (100, 200, 300 y 400 mg kg⁻¹) y 3 regímenes de riego diferentes calculados en base a la evapotranspiración del cultivo (ET_c) (100%, 85% y 70% de ET_c) y encontraron que con la aplicación de NPs de Si a 200 mg kg⁻¹ ocasionaron el mayor aumento en pepino, especialmente cuando las plantas de pepino recibieron el 85% de su evapotranspiración del cultivo (ET_c) provocando un aumento del 20%, 51% y 156% en el rendimiento de frutos, respectivamente, en comparación con las plantas no tratadas. Martínez-Nava (2022) realizó un experimento en tomate tipo uva y encontró que con la aplicación de las NPs de ferrihidrita causaron un aumento significativo en el rendimiento de fruto; aplicaciones foliares desde las 500 ppm de estas NPs fueron suficientes para

aumentar un 25% la producción de fruto en comparación con las plantas del tratamiento testigo.

Boora et al. (2023) realizaron un experimento en trigo y descubrieron que el tratamiento foliar de NPs de Si en la concentración de 60 ppm fue muy eficaz para estimular tanto el crecimiento como el rendimiento en condiciones de estrés por sequía, aumentado las espigas por planta en un 98%, semillas por espiga en un 12.4% y peso de mil semillas en un 37.5% en comparación con el control.

Ding et al. (2023) descubrieron que tanto el tratamiento con NPs de TiO₂ como con ZnO mejoraban el rendimiento y los parámetros de nutrientes del girasol, pero el tratamiento con NPs de TiO₂ era potencialmente tóxico, mientras que no se detectó toxicidad con el tratamiento con NPs de ZnO. La aplicación foliar de nanofertilizantes de zinc no solo aumentó el número de hojas y los niveles de aceite esencial, sino que también aumentó significativamente el crecimiento y el rendimiento en plantas de girasol.

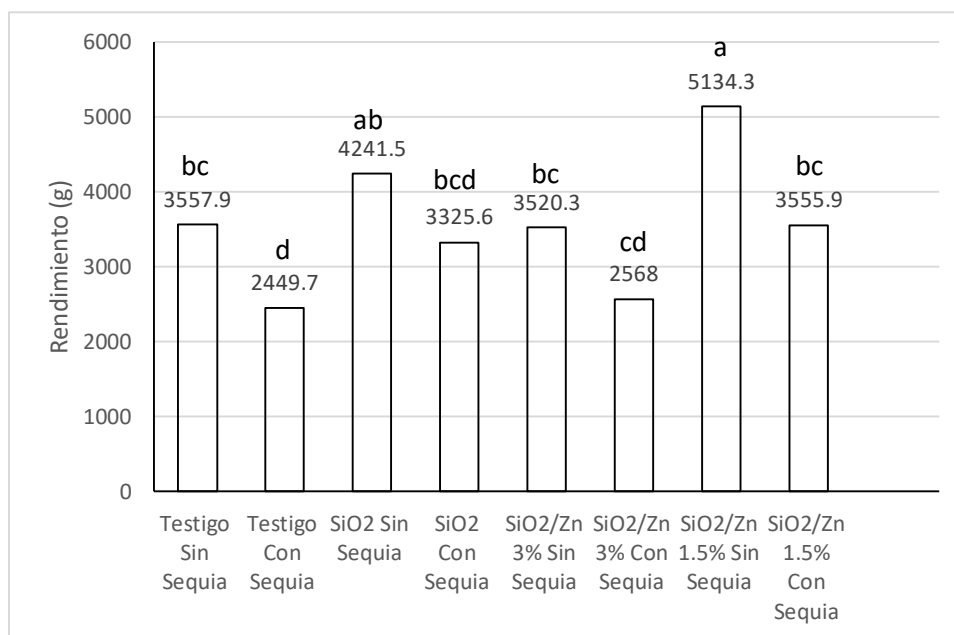


Figura 1. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el rendimiento del fruto en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Aborto de flores y número de frutos

En pepino, con frecuencia se presenta un aborto de flores o frutos, lo cual es ocasionado por la regulación interna de la planta para mantener una producción de frutos estable. Sin embargo, la tasa de aborto puede ser afectada por diversos factores del ambiente como pueden ser la disponibilidad de luz, el estatus nutrimental de la planta y la disponibilidad de agua. Zamora (2016) menciona que el aborto en frutos de pepino se presenta cuando las flores se encogen y los frutos inmaduros se tornan amarillos y de color café y estos midan de 3 a 5 cm de largo. Este fenómeno puede ser inducido cuando el cultivo es sometido a una sequía con una gran carga de frutos, exceso de sales, sobre riego, altas temperaturas, un raquítico sistema radicular o desbalance de nutrientes.

En el presente estudio, las plantas bajo sequía tuvieron un mayor número de flores abortadas en comparación con las plantas irrigadas normalmente; este aumento en el número de flores abortadas fue del 37.8% (Figura 2). La aplicación de NPs de SiO₂ (5 ± x flores abortadas) o de SiO₂/Zn (4, 5 ± x flores abortadas) permitieron reducir el número de flores abortadas a niveles comparables del tratamiento testigo negativo (con riego normal) (6 ± x flores abortadas), lo que sugiere que el mantenimiento en el rendimiento observado en la Figura 1 estuvo asociado en una menor pérdida de flores y una mayor producción de frutos relacionados con la aplicación de las NPs (Figura 2). Otro efecto positivo de NPs de SiO₂ y de SiO₂/Zn fue que en las plantas bajo riego normal las aplicaciones de estas NPs promovieron una reducción en la pérdida de flores, lo que explicaría también el mayor rendimiento obtenido por estos tratamientos (Figuras 1 y 2).

Gómez-Gómez (2021) encontró en plantas de nochebuena una respuesta altamente significativa para el número de flores tratadas con NPs de ZnO, las plantas fueron tratadas con una dosis de 750 mg L⁻¹ estas fueron aplicadas al suelo en la base de la planta más 1500 mg L⁻¹ en forma foliar, produciendo mayor número de flores comparado con plantas que no fueron tratadas con dosis de 1500 mg L⁻¹ y siendo aplicadas al suelo en la base de la planta.

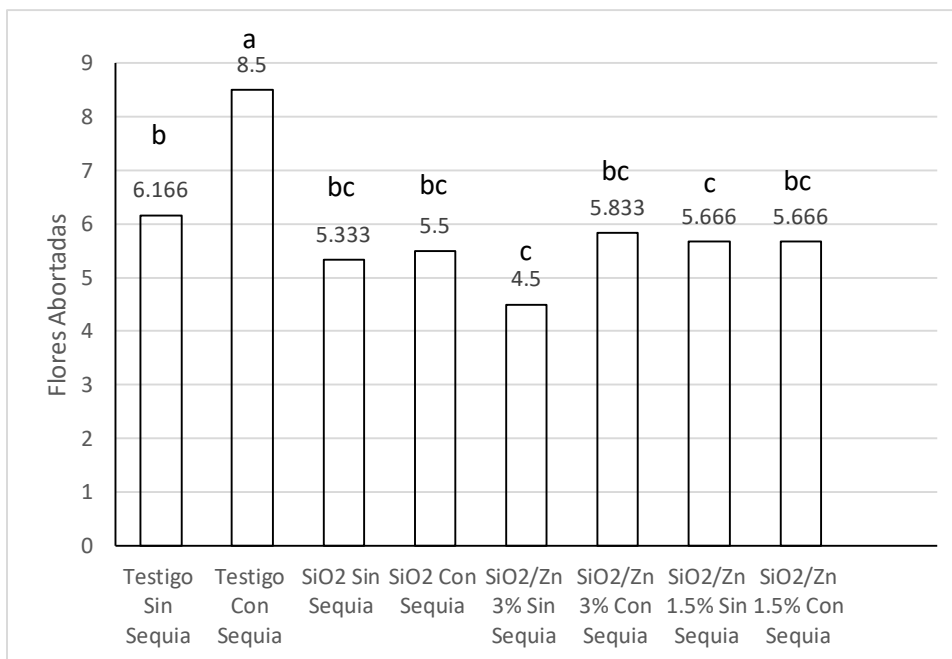


Figura 2. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en flores abortadas en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Las plantas bajo estrés hídrico mostraron un menor número de frutos cosechados en comparación de las plantas con riego normal, sin embargo, en condiciones de riego normal, la aplicación de NPs de SiO_2 permitió un aumento del 25.4% ($14 \pm x$ frutos) en el número de frutos cosechados (Figura 3) en comparación con las plantas no sometidas a sequía y sin aplicación de NPs ($11 \pm x$ frutos). En comparación del testigo positivo (con sequía), se presentó un descenso de 12.7% en frutos cosechados con la aplicación de NPs de SiO_2/Zn al 3% con sequía ($7 \pm x$ frutos). Sin embargo, los frutos cosechados con las aplicaciones de NPs de SiO_2 ($14 \pm x$ frutos) y SiO_2/Zn al 1.5% ($13 \pm x$ frutos) sin sequía se mantuvieron constantes. García-Mendoza (2019) encontró que con la aplicación de NPs-Si estimuló el aumento de número de frutos en plantas de tomate.

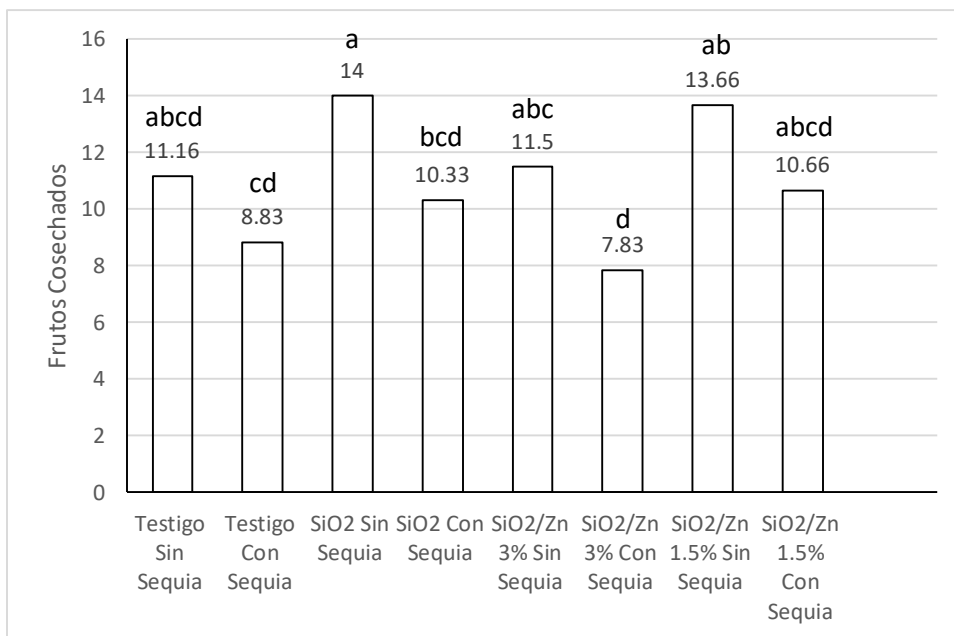


Figura 3. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en frutos cosechados en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Características físicas del fruto

Las plantas bajo estrés tratadas con NPs produjeron frutos con diámetro ecuatorial mayor que el testigo positivo, aunque no hubo significancia estadística. Cuando se hizo la aplicación de NPs de SiO₂/Zn al 1.5% en plantas sin sequía ($49 \pm x$ diámetro ecuatorial) los frutos tuvieron el mayor diámetro (Figura 4) por lo que estos fueron de un mayor tamaño. Aguilar-Santana (2020) reporta que con la aplicación de NPs de Cu aumentó a 22 mm el diámetro del fruto de tomate, mientras que sin NPs estos fueron de 20 mm, aunque la interacción no resultó significativa.

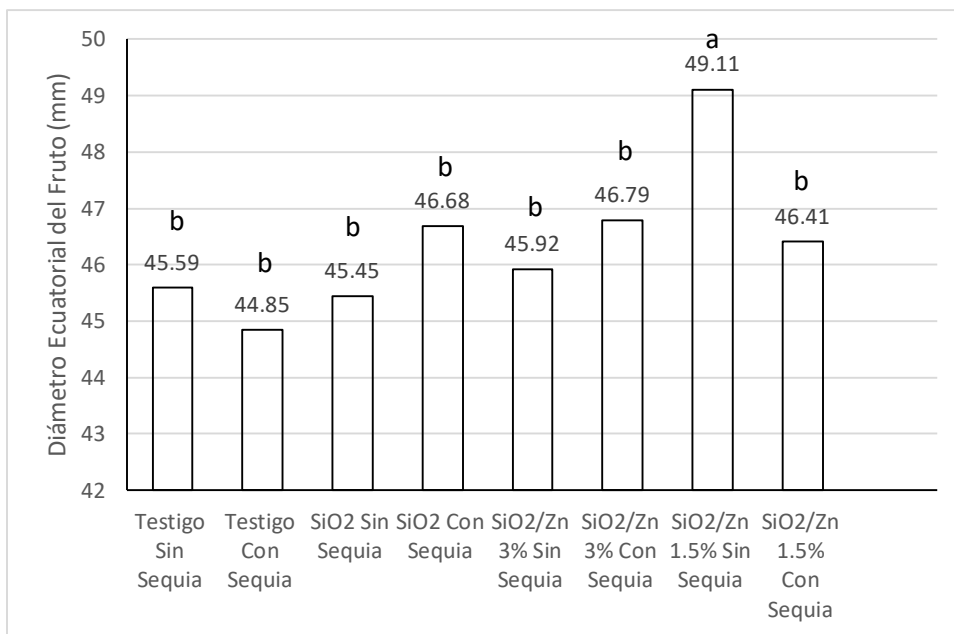


Figura 4. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el diámetro ecuatorial del fruto en el pepino (*Cucumis sativus L.*). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

La sequía no indujo una reducción en la longitud de fruto, sin embargo, la aplicación de NPs de SiO₂/Zn al 3% ($22 \pm x$ longitud) y 1.5% ($23 \pm x$ longitud) ocasionaron la producción de frutos de mayor longitud, lo que sugiere que la aplicación de NPs de SiO₂/Zn permite obtener frutos de mayor calidad a pesar de que las plantas estén sometidas a estrés hídrico en el caso de las NPs al 3% ($22 \pm x$ longitud) (Figura 5).

Nuestros resultados coinciden con Hernández-Cruz (2018) quien observó que al usar NPs de Cu se obtuvo una respuesta positiva para la variable longitud del fruto en pepino.

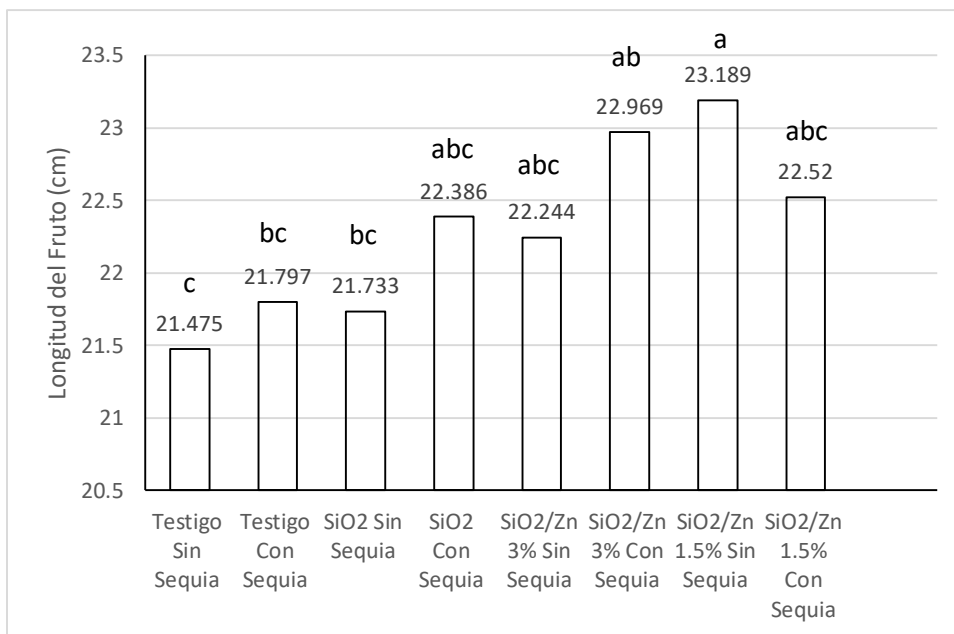


Figura 5. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la longitud del fruto en el pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

La firmeza del fruto no fue afectada por la sequía, mientras que la aplicación de NPs de SiO₂/Zn al 1.5% ($540 \pm x$ firmeza) promovieron un aumento del 11.9% en la firmeza en plantas no sometidas a sequía (Figura 6). Sin embargo, la aplicación de NPs de SiO₂ ($512 \pm x$ firmeza) y de SiO₂/Zn al 3% ($503 \pm x$ firmeza) en plantas bajo sequía tuvieron un efecto positivo en la firmeza de los frutos comparado con el testigo positivo (con sequia) ($446 \pm x$ firmeza). Esto comprueba que el Si es un elemento benéfico ayudando a las plantas a dar un mayor rendimiento como se observa en la Figura 1, dando como resultado frutos con mayor calidad como es la firmeza, por lo que el epicarpio es más resistente al daño mecánico. Calpulalpan-Espinosa (2023) realizó un experimento en plantas de pepino y encontró que la firmeza de los frutos mostró un incremento con la aplicación de NPs de zinc ferrita en comparación al testigo, pero los datos obtenidos no fueron significativos. Pinedo-Guerrero (2020) menciona que el aumento de la firmeza en los frutos se puede deber a que el Si se acumula en la epidermis, volviéndola más rígida. Linares-Nieto (2019) realizó un experimento en pimiento morrón y encontró que con la aplicación

de NPs de Si a dosis de 200 mg. L⁻¹ también mejora la firmeza. Esto debido a que el silicio puede acumularse en la epidermis haciéndola más rígida (Zhang et al., 2013).

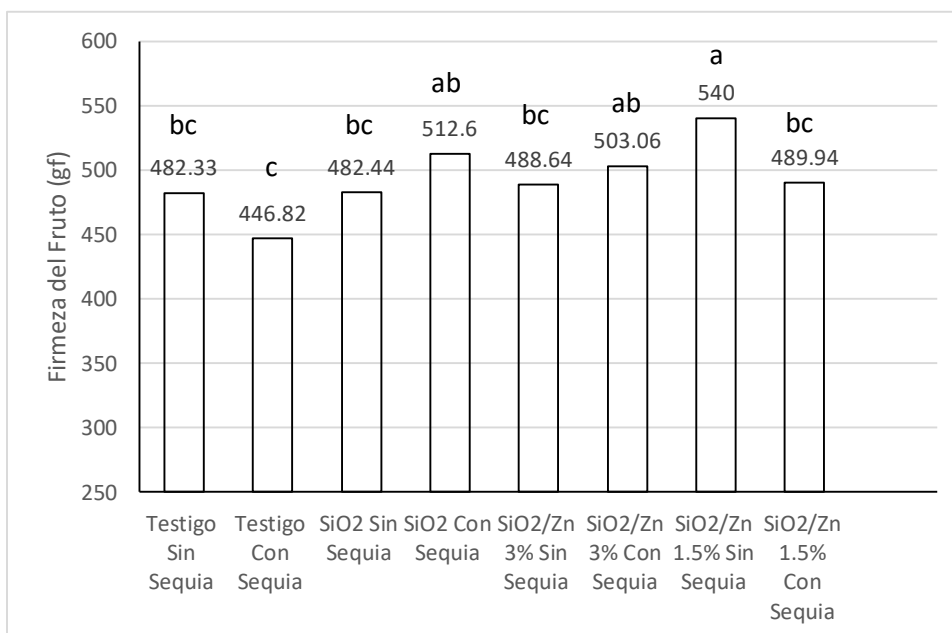


Figura 6. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la firmeza del fruto del pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Solidos solubles totales

Entre los tratamientos tratados con NPs no hubo un efecto significativo en cuanto a los SST del fruto, sin embargo, los tratamientos de NPs, independientemente de si las plantas estuvieran bajo sequía o no e independientemente del tipo y concentración de NPs aplicada, mostraron un efecto significativo comparado con el testigo positivo (con sequia) o negativo (sin sequia) (Figura 7). El aumento fue de 15.6% en los SST con la aplicación de NPs de SiO₂ en plantas con sequía ($3 \pm x$ SST), comparado con el testigo positivo (con sequia) ($2 \pm x$ firmeza). Pliego-Zúñiga (2019) empleo NPs de Se y encontró que la dosis de 10 mg L⁻¹ de NPs de Se mejoró de manera significativa los SST en el fruto de pepino. Este aumento en SST indica que se mejora la calidad de los frutos ya que puede deberse a la acumulación de

azúcares en los frutos, lo cual estaría asociado con una calidad óptima para el consumo (Pinedo-Guerrero, 2020).

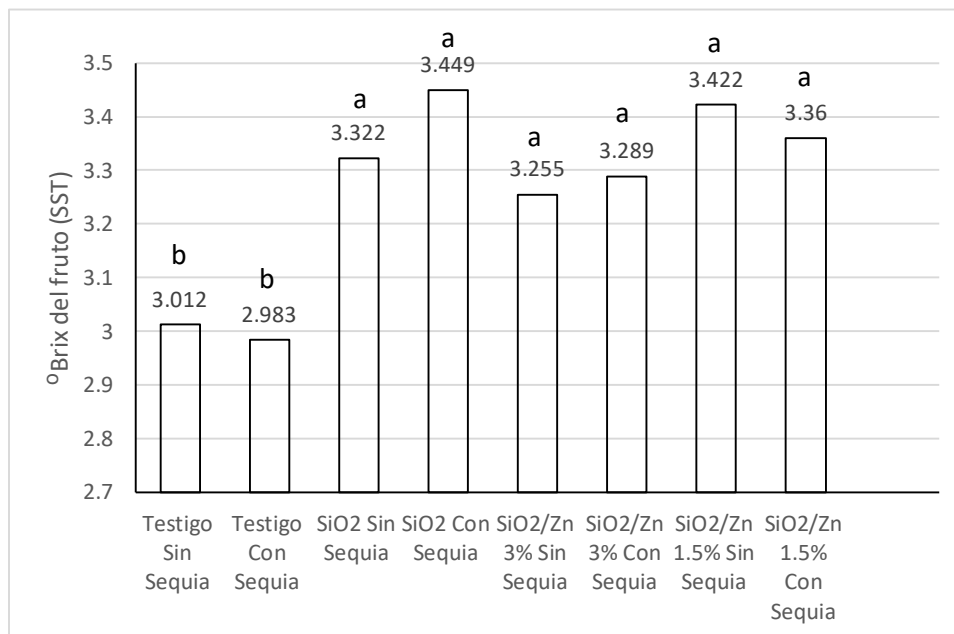


Figura 7. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en los sólidos solubles totales (SST) del fruto del pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Biomasa seca

La sequía redujo significativamente el peso seco de las hojas comparado con las plantas bajo riego normal (Figura 8). El presente trabajo muestra que con la aplicación de NPs de SiO₂ ($52 \pm x$ peso seco de hoja) y SiO₂/Zn 1.5% ($54 \pm x$ peso seco de hoja) no tuvo resultados positivos no lograron restituir la pérdida de las biomasa ocasionada por el estrés hídrico; sin embargo, las plantas tratadas con SiO₂/Zn al 1.5% ($73 \pm x$ peso seco de hoja) si mostraron una recuperación de la biomasa foliar comparado con las plantas con riego normal (Figura 8). Estos resultados comprueban que las NPs de SiO₂ en combinación con Zn es benéfico ya que permiten mantener la biomasa fotosintética y posiblemente esto se refleje en el

rendimiento (Figura 1). En plantas bajo riego normal, las aplicaciones de las NPs no manifestaron efectos significativos en la biomasa de las hojas (Figura 8).

Gómez-Gómez (2021) realizó un experimento en nochebuena y encontró que en el peso seco de las hojas no hubo efecto significativo debido a que el tratamiento testigo (sin aplicación de NPs de ZnO) tuvo mayor peso que los tratamientos restantes, sin embargo, en el peso fresco de las hojas por los tratamientos aplicados de NPs de ZnO, a las plantas tratadas con dosis de 750 ml L⁻¹ siendo aplicadas al suelo en la base de la planta más 1500 mg L⁻¹ en forma foliar si tuvieron mayor peso.

Alsaeedi et al. (2019) mencionan que el papel importante de las NPs de Si en la mitigación del déficit hídrico podría deberse al alto contenido de Si que se encuentra en las hojas, estas regulan la pérdida de agua por transpiración.

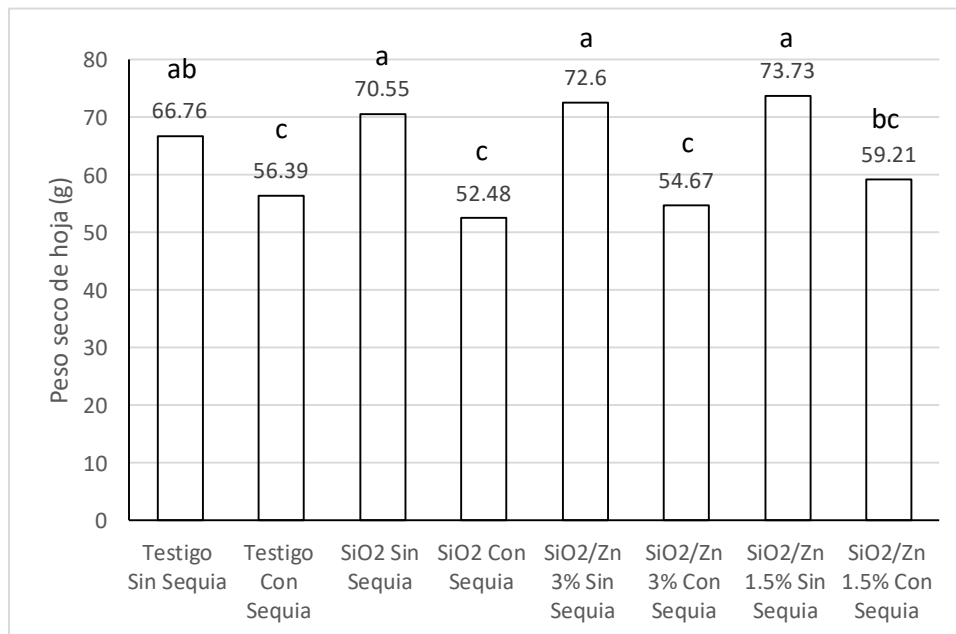


Figura 8. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el peso seco de hoja en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con p<0.05. Letras diferentes indican significancia estadística.

Las plantas bajo sequía no mostraron una reducción en la biomasa de raíces, sin embargo, cuando se les aplicó NPs hubo un aumento del sistema radical en

comparación del testigo positivo independientemente del tipo de NPs aplicada (Figura 9), siendo el incremento un 11.1%, 15.6%, 14.3% mayor al obtenido por las plantas del testigo positivo (con sequia) con aplicación de NPs de SiO₂ (11 ± x peso seco de raíz), SiO₂Zn 3% (12 ± x peso seco de raíz) y SiO₂/Zn 1.5% (12 ± x peso seco de raíz), respectivamente. Estos resultados pueden explicar que las plantas tratadas con NPs de SiO₂/Zn 1.5% (12 ± x peso seco de raíz) dieran un mayor rendimiento aun en condiciones de sequía, en el rendimiento de frutos (Figura 1), ya que tenían un sistema radicular muy grande. Esto hizo que las plantas bajo sequía expandieran más las raíces en busca de agua, dando como resultado plantas con mayor vigor y mejor rendimiento. La aplicación de NPs de SiO₂/Zn 3% (12 ± x peso seco de raíz) bajo condiciones de sequía, estas promovieron un sistema radicular más grande, aunque estas no dieron el mismo rendimiento de frutos (Figura 1). González-Moscoso et al. (2021) mencionan que el efecto estimulador de las NPs se reporta generalmente por dosis bajas, con respecto a las NPs de SiO₂, se ha reportado un incremento del 25% en la biomasa radicular seca y del 75% en parte aérea en plantas de fenogreco (*Trigonella foenumgraecum*) con aplicación de estas NPs. Hernández-Frutis (2015) realizó un experimento en girasol y encontró que el peso seco de raíz en girasol, presentaron el mismo comportamiento a los 23 y 73 días de desarrollo, ya que en ambos periodos el Óxido de Zinc a 3 g. L⁻¹ y 6 g.L⁻¹ superaron al control.

Los resultados también muestran que el las NPs de SiO₂/Zn son un promotor del crecimiento de la raíz ya que aun en condiciones de riego normal las plantas tratadas con la aplicación de estas NPs tuvieron una mayor biomasa de las raíces que el tratamiento testigo negativo (sin sequia) (Figura 9).

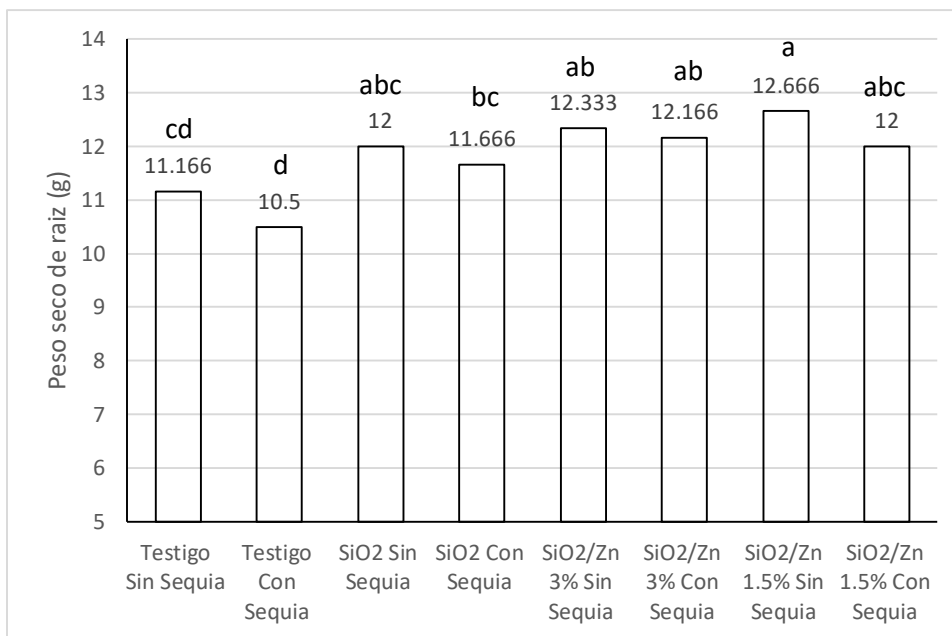


Figura 9. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en el peso seco de raíz en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

El crecimiento del tallo si fue afectado significativamente por la sequía ya que las plantas bajo estrés hídrico tuvieron una biomasa de tallo 10.7% menor que la de las plantas bajo riego (Figura 10). La aplicación de NPs no logró mejorar la respuesta de estas plantas. Lo anterior no coincide con Siddiqui et al. (2020) mencionan que con la aplicación de NPs de Si se mejora el peso fresco y peso seco de las plántulas de pepino cuando se suministran en bajas concentraciones.

Sáenz-Alarcón (2022) realizó un experimento en maíz y reporta que para el peso seco del tallo las NPs de ZnO promovieron mayor acumulación de materia seca, con 4.93 g en comparación con la NPs de MgO con 3.80 g, indicando la importancia del Zn en la fotosíntesis, como estabilizador de la molécula de clorofila.

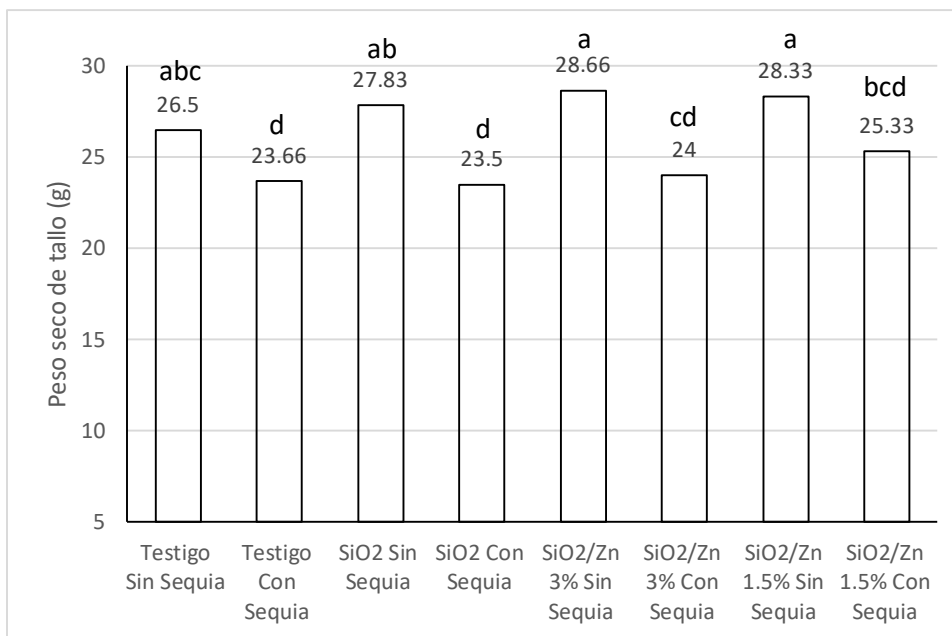


Figura 10. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en el peso seco de tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Diámetro y longitud del tallo

El efecto adverso en el tallo por la sequía se manifestó también en una reducción en el diámetro de los mismos ya que tanto en la parte superior (Figura 11) como en la parte media (Figura 12) hubo una reducción significativa. De igual manera, la aplicación de NPs no logró mejorar la respuesta de estas plantas, ni en condiciones de riego las NPs no tuvieron efecto promotor. Lo anterior no coincide con Martínez-Nava (2022) quien realizó un experimento en tomate tipo uva y encontró que la aplicación de las NPs de ferrihidrita causaron un aumento significativo en el diámetro basal de tallo; aplicaciones foliares desde las 1000 ppm de estas NPs fueron suficientes para aumentar un 8% el diámetro basal del tallo.

Vargas-Martínez (2022) realizó un experimento en tomate y reporta que en el diámetro de tallo no se presentaron diferencias significativas en los tratamientos con NPs de ZnO por diferentes vías de aplicación.

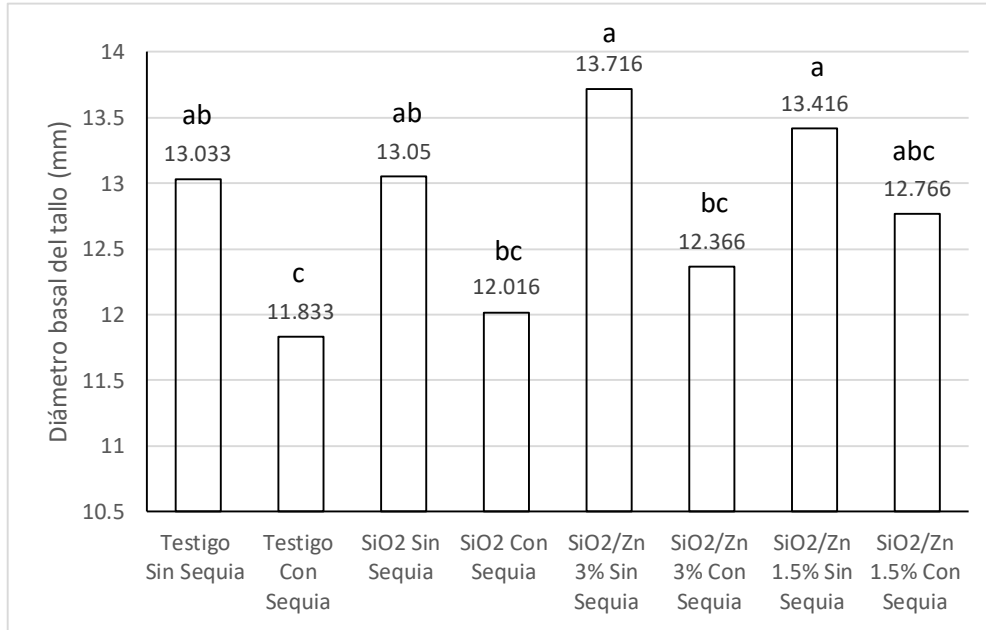


Figura 11. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en el diámetro basal del tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

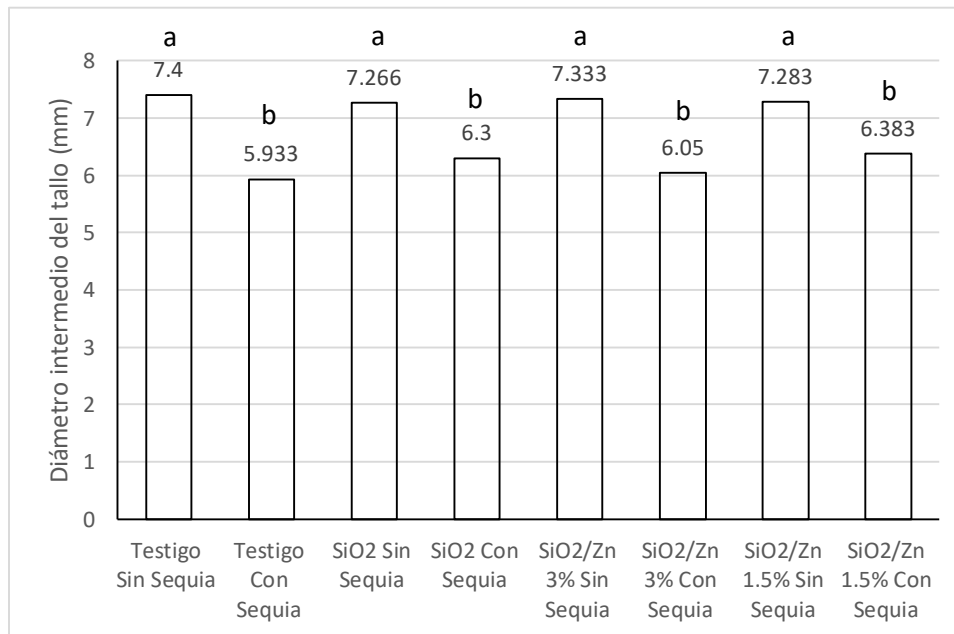


Figura 12. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en el diámetro intermedio del tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

No se encontró efectos en la longitud del tallo (Figura 13), sin embargo, en general, las plantas bajo sequía tuvieron tallos de menor longitud que las de riego. Estos resultados no coinciden con García-Mendoza (2019) quien estudió la variable altura de planta en tomate y encontró que con la aplicación de las NPs de Si tuvo un efecto positivo en la altura de las plantas de tomate, bajo condiciones de estrés por arsénico, obteniendo plantas con mayor altura (274.17 cm) fueron con dosis de As (0.8 mg L^{-1}) y NPs-Si ($0.8\text{-}250 \text{ mg L}^{-1}$). Boora et al. (2023) encontraron que después del tratamiento con NPs de Si a una concentración de 60 ppm, la altura de la planta en trigo aumentó en 8.28%, en comparación con el control.

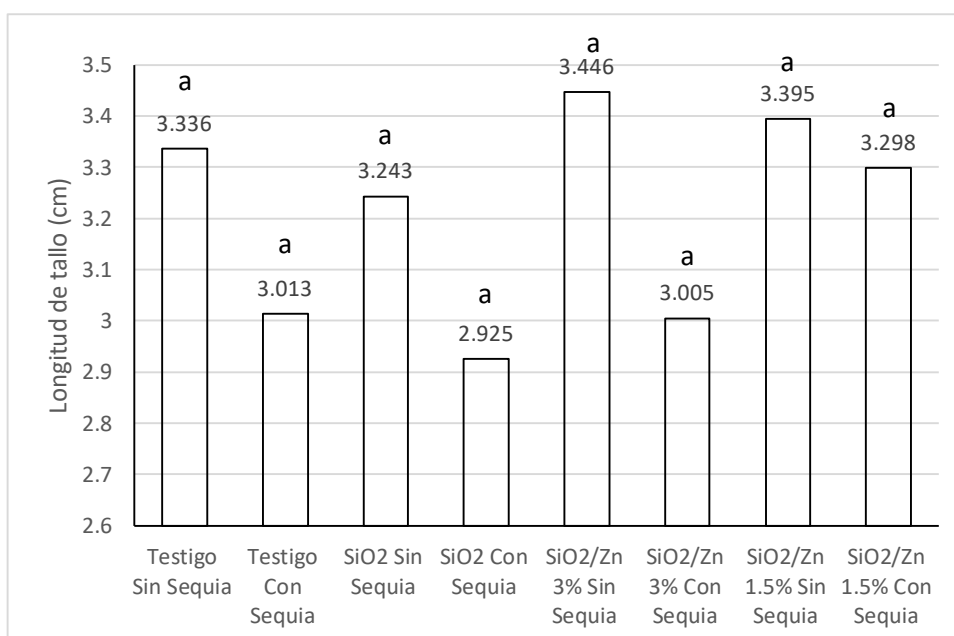


Figura 13. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la longitud del tallo en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Fotosíntesis e intercambio de gases

En la mayoría de los tratamientos con NPs no hubo significancia en la tasa de fotosíntesis en comparación con las plantas de los tratamientos testigo (Figura 14).

Sin embargo, hubo un descenso del 41.7% con la aplicación de NPs de SiO₂ sin sequía (15 ± x fotosíntesis) en comparación del testigo negativo (sin sequía), (22 ± x fotosíntesis). Ashkavand et al. (2015) realizaron un estudio en plántulas de espino (*Crataegus sp.*) y utilizaron concentraciones de NPs de Si (NPs Si a 0, 10, 50 y 100 mg L⁻¹) y tres tratamientos de humedad del suelo (sin estrés, estrés moderado y estrés severo) y demostraron que con la aplicación de NPs-Si pueden aumentar resistencia de las plantas al estrés por sequía y mejora la tasa de fotosíntesis y la conductancia estomática. Begna (2020) menciona que el estrés hídrico reduce la fotosíntesis al disminuir tanto el área foliar como la tasa fotosintética por unidad de área de hoja.

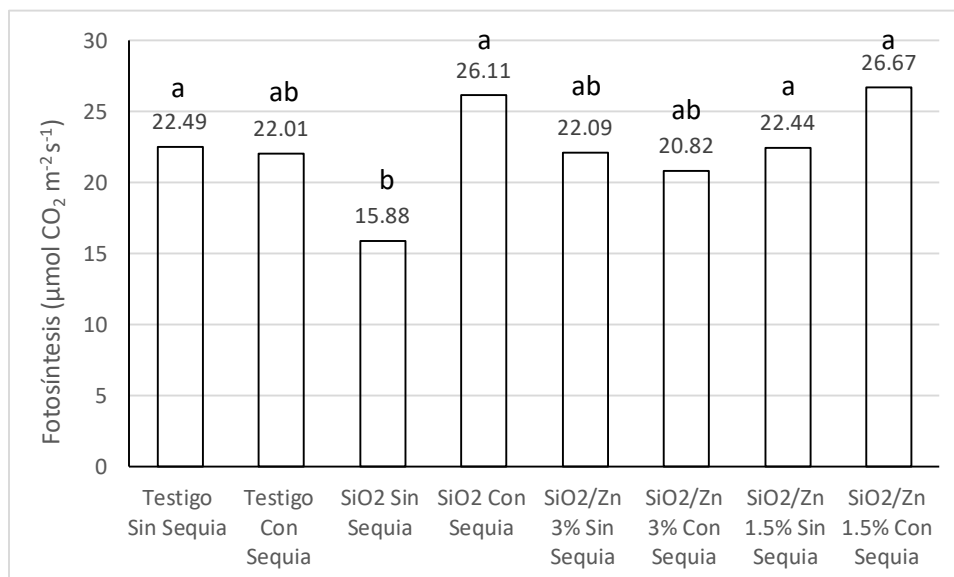


Figura 14. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la fotosíntesis de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con p<0.05. Letras diferentes indican significancia estadística.

La sequía tendió a disminuir la conductancia estomática, aunque sin efecto significativo; sin embargo, la aplicación de NPs de SiO₂ en plantas con riego normal (0.2 ± x conductancia estomática) si tuvo una disminución significativa (Figura 15). En condiciones de sequía, el SiO₂ (0.5 ± x conductancia estomática) solo o en combinación con Zn mantuvieron la conductancia (Figura 15). Este comportamiento

estuvo asociado con la concentración interna de CO₂ (Figura 16); lo cual puede deberse a que al cerrarse las estomas se disminuye el intercambio gaseoso y por lo tanto la entrada de CO₂ al mesófilo de la hoja disminuye. Por esta razón, las plantas tratadas con SiO₂ que mostraron la menor conductancia también mostraron la menor concentración de CO₂ (Figura 16).

Estos resultados estuvieron asociados con la transpiración ya que esta tiende a disminuir con la aplicación de NPs de SiO₂ (Figura 17), ya que entre menor conductancia estomática la transpiración tiende a bajar puesto que si las estomas se mantienen cerrados no hay transpiración. Lo mismo pasa con la temperatura de la hoja (Figura 18), la cual está asociada con la transpiración; es este caso, la aplicación de NPs de SiO₂ estuvo asociado con una mayor resistencia (Figura 19) y menor conductancia (Figura 20), disminuyendo así la transpiración y por lo tanto la temperatura de la hoja aumenta.

Siddiqui et al. (2020) mencionan que Las NPs de SiO₂ mejoraron la fotosíntesis, la actividad del fotosistema II, la eficiencia fotoquímica, la tasa de transporte de electrones, la extinción fotoquímica, la actividad de la anhidrasa carbónica, la tasa fotosintética neta, la tasa de transpiración, la conductancia estomática y la síntesis de pigmentos fotosintéticos en *Indocalamus barbatus* y *Cucurbita pepo*. Mahawar et al. (2013) mencionan que con la aplicación de NPs de Si previene la pérdida agua por transpiración formando una capa adicional en la cutícula de la hoja. También aumenta la longitud de las raíces para absorber agua subterránea en condiciones de estrés. Raza et al. (2023) encontraron que con la aplicación de NPs de Si la conductancia estomática disminuyó en 37.8%, 30.0% y 29.2% bajo estrés por sequía en las etapas de sequía en la etapa de amacolla miento (DTS), sequía en etapa de floración (DFS) y sequía en etapa de llenado de grano (DGFS), respectivamente, en comparación con el tratamiento de control.

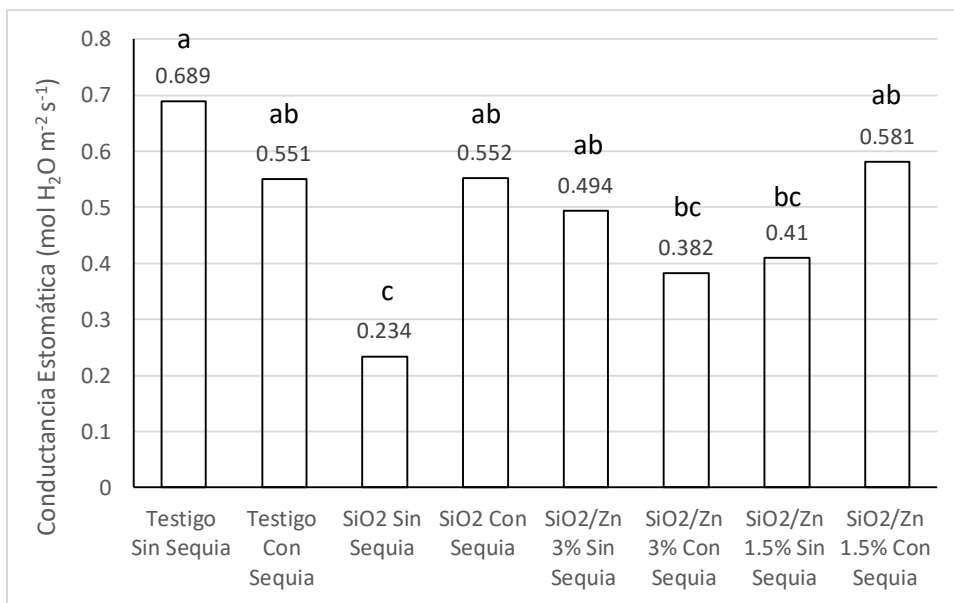


Figura 15. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la conductancia estomática de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

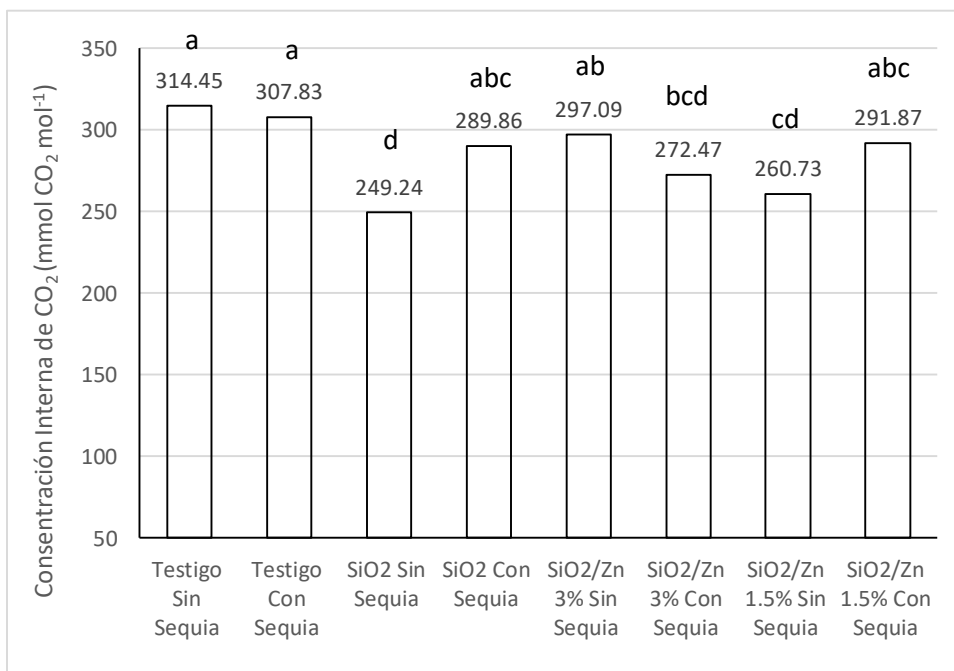


Figura 16. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la concentración interna de CO₂ de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

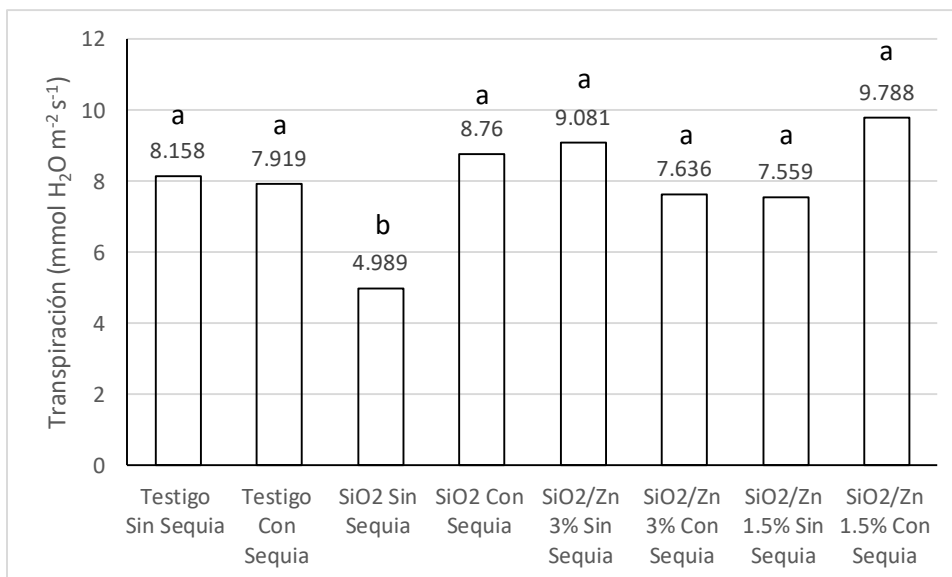


Figura 17. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la transpiración de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

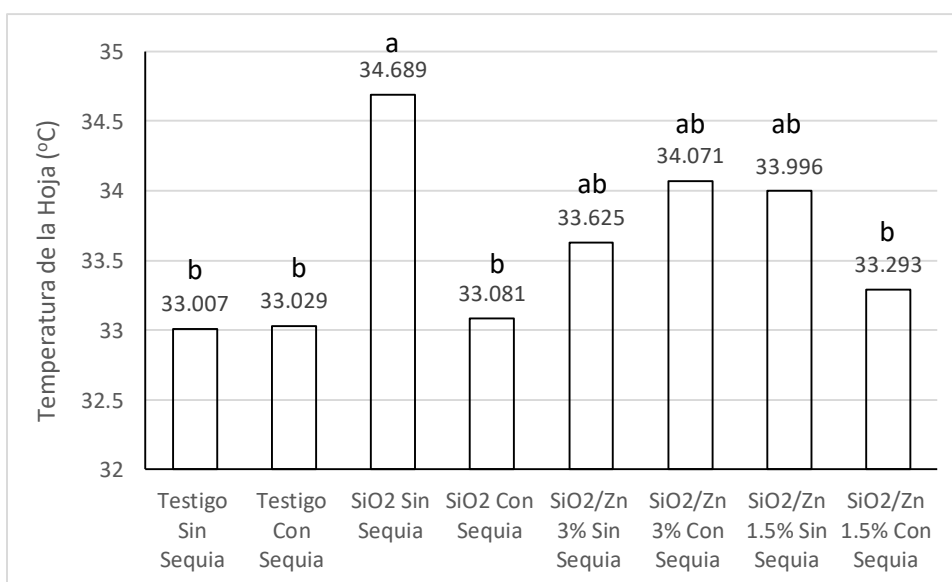


Figura 18. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la temperatura de la hoja de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

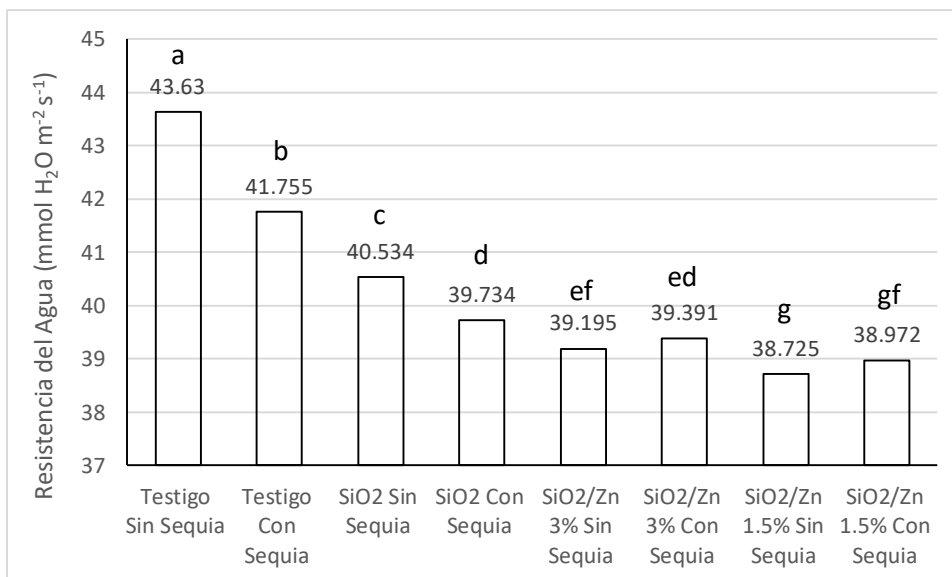


Figura 19. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la resistencia del agua de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

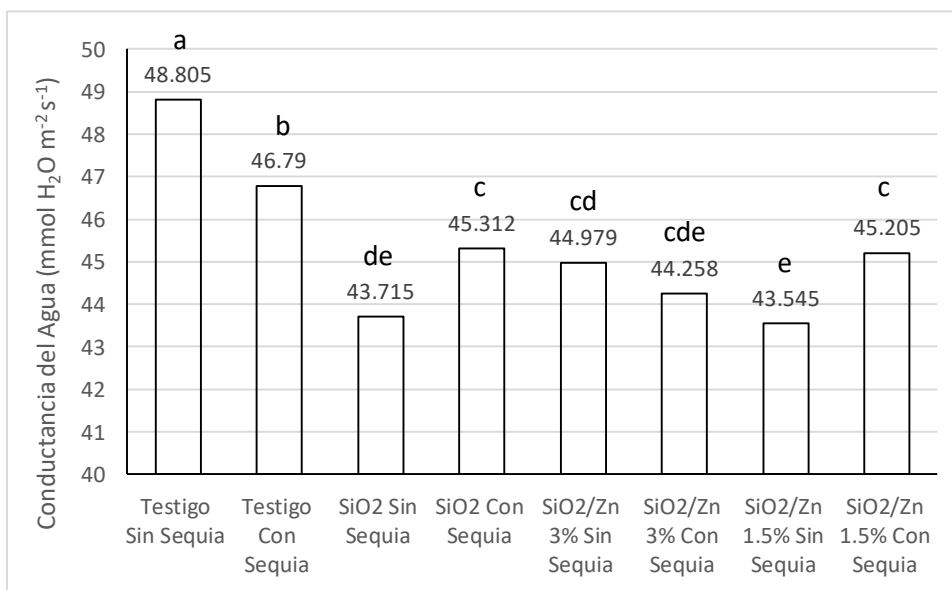


Figura 20. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la conductancia del agua de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Estado nutrimental en el extracto de savia del peciolo

El estrés hídrico no ocasionó una reducción significativa en la concentración de NO_3^- en comparación con las plantas con riego normal (Figura 21), sin embargo, bajo sequía, las plantas tratadas con NPs de SiO_2 ($6150 \pm x \text{NO}_3^-$) o bien de SiO_2/Zn al 3% ($6375 \pm x \text{NO}_3^-$) mostraron un aumento en la concentración de este ion. En condiciones de riego normal, las aplicaciones de NPs no afectaron la concentración de NO_3^- en comparación con las plantas con riego, pero sin NPs (Figura 21). Flores-Mendieta (2023) reporta que con la aplicación de NPs de ZnO_2 hubo un aumento en los NO_3^- a una dosis de 2250 ppm.

Castro-Brindis et al. (2000) mencionan que el extracto de peciolo es un índice que permite conocer el estado nutrimental y su relación con el rendimiento. Sáenz (2022) menciona que el Zn desempeña un papel importante en regular el uso de N por parte de la planta. El N es considerado muy importante, por ser el que se encuentra en mayor proporción de 1 a 3 % con respecto a su materia seca de las plantas (Cárdenas-Navarro et al., 2004).

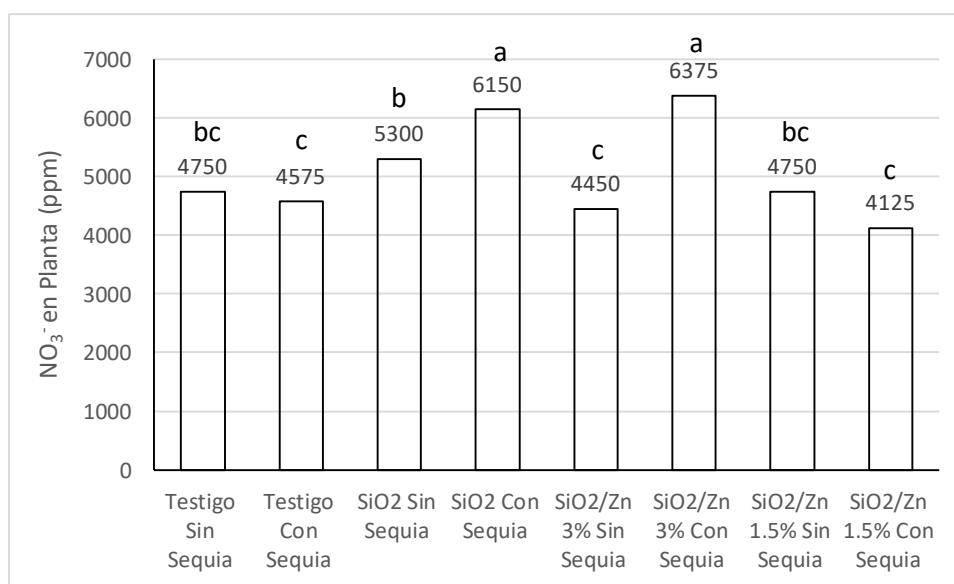


Figura 21. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de nitrato (NO_3^-) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

El K^+ no disminuyó significativamente en plantas bajo condiciones de estrés hídrico, y en comparación con las plantas del testigo positivo (con sequía), la aplicación de NPs no produjo cambios en la concentración de este ion (Figura 22). En contraste, bajo condiciones de riego normal, la aplicación de NPs de SiO_2/Zn al 1.5% ($2675 \pm x K^+$) o al 3% ($2550 \pm x K^+$) causaron una reducción en la concentración de K^+ . Los resultados sugieren que las plantas tratadas con NPs y que produjeron un mayor rendimiento (Figura 1) estuvo asociado con una mayor demanda de K para el fruto, resultando en una disminución de este ion en los tejidos vegetativos de las plantas. Asimismo, estos datos sugieren que cuando se haga la aplicación de NPs de SiO_2/Zn hay que aumentar el K^+ en la solución nutritiva para satisfacer la demanda de los frutos.

Flores-Bernal et al. (2021) mencionan que el K se acumula en mayores cantidades dentro de la planta en las etapas productivas, mientras que forma estructuras y es transportador de fotosintatos. Begna (2020) dice que la sequía en las plantas puede afectar la absorción de nutrientes y la translocación de algunos nutrientes, como lo es el K, ya que es un elemento nutritivo muy importante y tiene un papel importante en la resistencia de las plantas en situaciones de estrés.

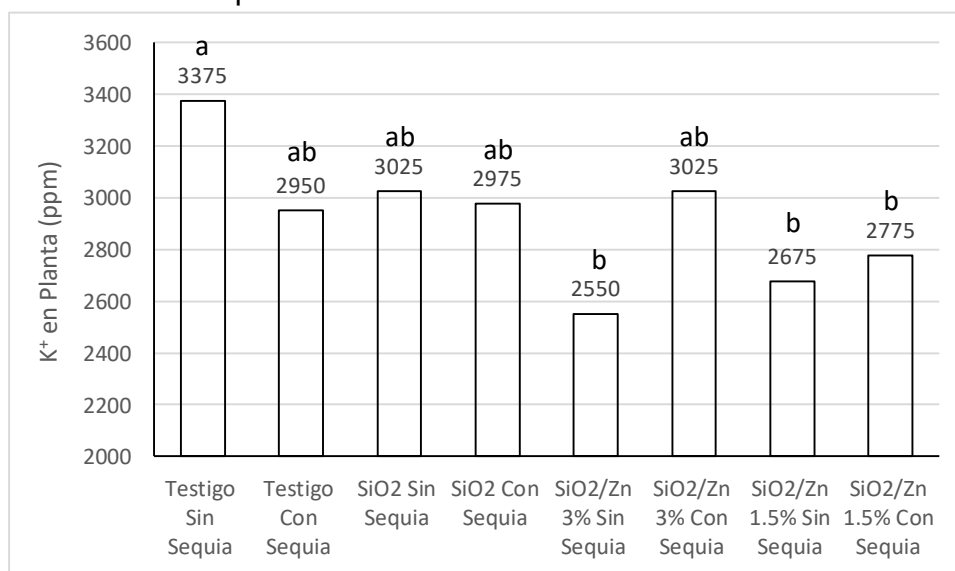


Figura 22. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de potasio (K^+) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

El estrés hídrico no ocasiono un efecto en la concentración de Ca^{++} en la savia, sin embargo, bajo condiciones de sequía la aplicación de NPs de SiO_2 ($155 \pm x \text{Ca}^{++}$) y de SiO_2Zn al 3% ($162 \pm x \text{Ca}^{++}$) estuvo asociada con una mayor concentración de Ca^{++} (Figura 23). En el caso de las plantas bajo riego normal, no se produjeron diferencias significativas en la concentración de Ca^{++} (Figura 23). Estos resultados muestran que el Si puede tener un efecto benéfico en el incremento del Ca^{++} en las plantas sometidas bajo sequía, por lo que hay que hacer ajustes a las soluciones nutritivas. Sin embargo, estos datos no coinciden con lo reportado por Flores-Mendieta (2023) quien reporta que no encontró interacción para la variable de Ca^{++} en la planta de pepino con la aplicación de NPs de magnetita y ZnO_2 . El Ca^{++} es un elemento muy importante ya que le brinda mayor firmeza al fruto y a los tallos de las plantas, además de que incrementa la transpiración y reduce la absorción del agua. La extracción de jugo del peciolo, está compuesto por una mezcla de líquidos citoplasmáticos, vacuolares y savia. A partir de este jugo se pueden determinar elementos minerales, orgánicos y fracciones orgánicas (Guato-Molina, 2022).

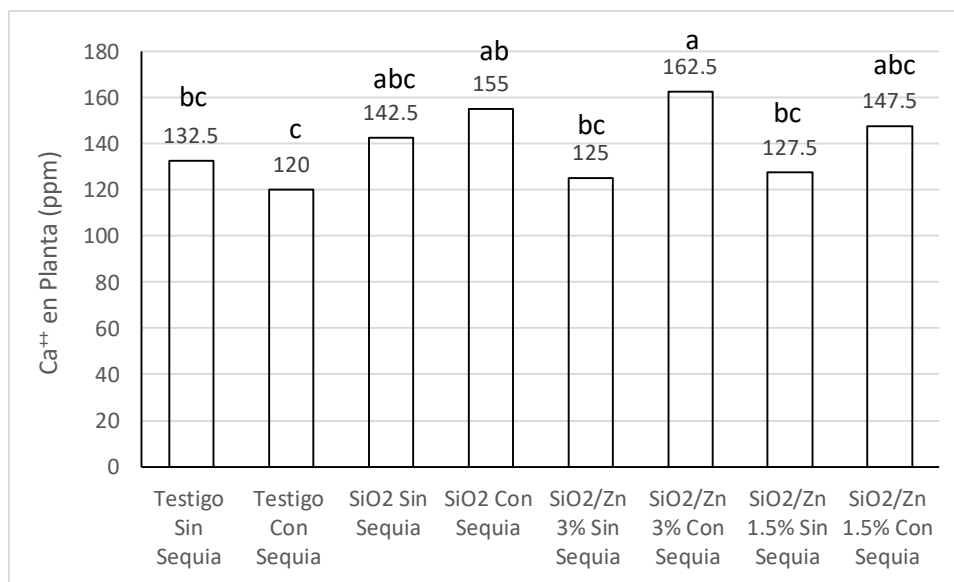


Figura 23. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de calcio (Ca^{++}) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Los SST no fueron afectados por el estrés hídrico, sin embargo, bajo condiciones de sequía, la aplicación de NPs de SiO₂Zn al 3% ($2 \pm x$ SST) resultó en un mayor contenido de SST en comparación con las plantas del tratamiento control positivo (con sequia) ($2 \pm x$ SST) (Figura 24). En contraste, en las plantas bajo riego normal no se produjeron diferencias significativas en la concentración de SST (Figura 24). Esto concuerda con Hernández-Cruz (2018), quien menciona que encontró un mayor incremento en SST en plantas de pepino injertado, en la cual no apreció diferencia estadística entre tratamientos, pero si una clara diferencia numérica, ya que el tratamiento con NPs de Cu comercial, fue el que generó mayor concentración de SST.

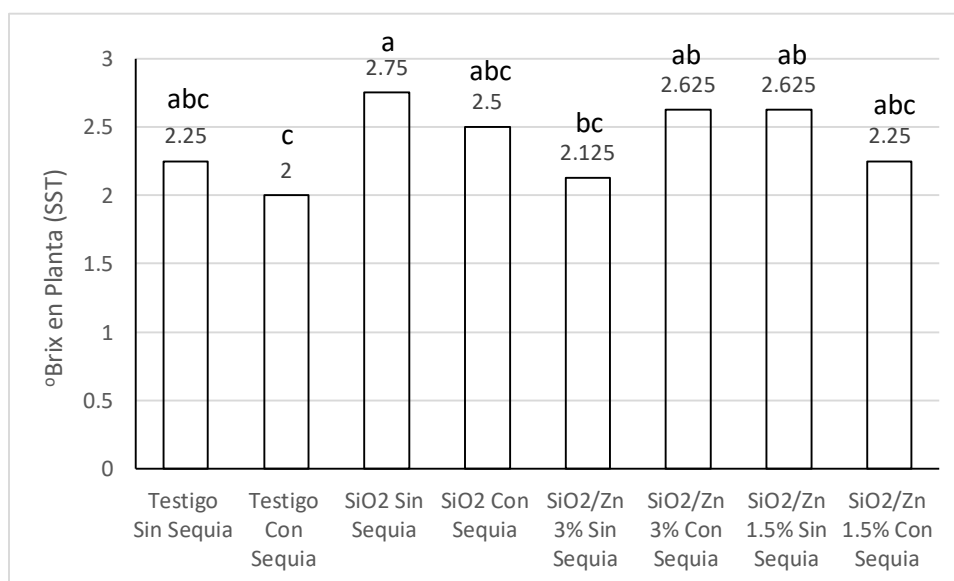


Figura 24. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) o bien SiO₂ combinado con zinc (Zn) en la concentración de sólidos solubles totales (SST) en el extracto celular del peciolo en pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letras diferentes indican significancia estadística.

Estado nutrimental en el extracto de savia del fruto

De acuerdo a la comparación de medias de las variables NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en los frutos, los datos obtenidos no fueron significativos (Cuadro 4). Lo anterior no

concuenda con los siguientes trabajos Aguilar-Santana (2020) quien menciona que con la aplicación de NPs magnesita se elevó a 2.47 % el contenido de N en el fruto de tomate. López-Cortéz (2013) menciona que con la aplicación de NPs de Cu en las concentraciones de 250 y 500 mg se manifestó un aumento significativo del K en el fruto de tomate. Calpulalpan-Espinosa (2023) reporta que el contenido de calcio en el fruto de pepino hubo una tendencia de crecimiento conforme las dosis de NPs de zinc ferrita eran más altas.

Cuadro 3. Efecto de la sequía y la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) o bien SiO_2 combinado con zinc (Zn) en la concentración de nitrato (NO_3^-), potasio (K^+) y calcio (Ca^{++}) en los frutos de pepino (*Cucumis sativus* L.). Las columnas muestran el promedio más las letras correspondientes a la comparación de promedios por la prueba de Duncan con $p < 0.05$. Letra diferente indican significancia estadística.

Tratamientos	NO_3^- ppm	K^+ ppm	Ca^{++} ppm
Testigo Sin Sequía	383.33 a	688.33 a	16.667 a
Testigo Con Sequía	335 a	608.33 a	16 a
SiO_2 Sin Sequía	371.67 a	780 a	19.167 a
SiO_2 Con Sequía	461.67 a	728.33 a	20.833 a
SiO_2/Zn 3% Sin Sequía	368.33 a	696.67 a	20.333 a
SiO_2/Zn 3% Con Sequía	351.67 a	658.33 a	17.667 a
SiO_2/Zn 1.5% Sin Sequía	363.33 a	755 a	18.5 a
SiO_2/Zn 1.5% Con Sequía	390 a	686.67 a	19.833 a

V. CONCLUSIONES

La aplicación de NPs vía foliar tuvo un efecto positivo en la tolerancia al estrés hídrico en plantas de pepino. El estrés hídrico afectó negativamente el rendimiento y crecimiento de las plantas de pepino. Sin embargo, algunas variables como el rendimiento de fruto, se mantuvieron similares al de las plantas con riego normal si a las plantas bajo sequía se les aplicaban NPs de SiO_2 o de SiO_2/Zn al 1.5%. Lo anterior puede estar relacionado con el efecto de las NPs sobre el crecimiento de la raíz ya que el peso seco de la misma se mantuvo igual que el de las plantas con riego o incluso superándolo como cuando se aplicaron NPs de SiO_2/Zn al 3%. La calidad del fruto en términos de longitud, diámetro, firmeza y SST también fue mejorada cuando se aplicaron las NPs de SiO_2 y de SiO_2/Zn en condiciones de sequía. Los parámetros fotosintéticos y de intercambio de gases en plantas bajo sequía no mostraron en efecto diferente al de las plantas con riego, mientras que la concentración de NO_3^- y en Ca^{++} en el peciolo fueron aumentados por el SiO_2 y SiO_2/Zn , lo que pudo ser debido al mejor estado hídrico de las plantas aun en condiciones de sequía.

VI. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Santana, J. A. (2020).** Respuesta del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de nanopartículas de magnetita. Tesis de licenciatura, Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Departamento de Horticultura Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Aguirre, C., Chávez, T., García, P., & Raya, J. C. (2007).** El silicio en los organismos vivos. *Interciencia*, 32(8), 504-509.
- Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany, M., Elhawat, N. & Al-Otaibi, A. (2019).** Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*. 139, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008>
- Antúnez-Ocampo, O. M., Sabino-López, J. E., Hernández-Galeno, C. A., & Espinosa-Rodríguez, M. (2023).** Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo y silicio al suelo. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1682. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1682>.
- Arévalo-Castro, T. J. (2017).** Respuesta del cultivo de arroz (*Oriza sativa* L.) a dos fuentes y dos dosis de silicio orgánico. Tesis de Licenciatura Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.
- Ashkavand, P., Tabari, M., Zarafshar, M., Tomášková, I., & Struve, D. (2015).** Effect of SiO₂ nanoparticles on drought resistance in hawthorn seedlings. *Leśne Prace Badawcze*, 76(4), 350–359. <https://doi.org/10.1515/frp-2015-0034>
- Barraza-Álvarez, F. V. (2012).** Acumulación de materia seca del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. (2012). *Temas Agrarios*, 17, 2, 18-29. <https://doi.org/10.21897/rta.v17i2.699>.
- Barros-Torres, P., Calderón-Uchuari, L., Guerra-Carrión, J., Martínez-Tamayo, C., Jumbo-Narváez, E., Nicolalde-Sarango, S., & Delgado-Cueva, T.**

- (2022).** Los elementos químicos de las plantas - Nutrientes imprescindibles para el desarrollo vegetal. Poster científico. Conferencia: Botánica En: Carrera de Pedagogía de las Ciencias Experimentales, Química y Biología. Universidad Nacional de Loja (UNL). Loja. Ecuador.
- Begna, T. (2020).** Effects of drought stress on crop production and productivity. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences (IJRSAS)*, 6(9). 34-43 <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0609005>
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015).** Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). Primera edición. Buenos Aires, Argentina.
- Boora, R., Rani, N., Kumari, S., Yashveer, S., Kumari, N., & Grewal, S. (2023).** Efficacious role of silica nanoparticles in improving growth and yield of wheat under drought stress through stress-gene upregulation. *Plant Nano Biology*, 6, 1-9. 100051. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100051>
- Borda, O. A., Barón, F. H., & Gómez, M. I. (2007).** El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana*, 25(2), 273-279.
- Borelli, E., & Da Concepción, M. H. (2023).** Nanotechnology: innovation and sustainability. *International Journal of Scientific Management and Tourism*, 9,1, 422–440. <https://doi.org/10.55905/ijsmtv9n1-020>.
- Buelna-Tarín, S., Romero-Félix, C. S., Bojórquez-Ramos, C., Lugo-García, G. A., & Sánchez-Soto, B. H. (2023).** Sustancias nutritivas en plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) en el norte de Sinaloa. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 11, 2, 274-287. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v11i2.504>.
- Cabezas G, A., Camus A, F., Condori W. E., González V, F. A., & Mazuela A, P. (2022).** El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *Idesia (Arica)*, 40(1), 129–133.

- Caicedo M, L. M., & Chavarriaga M, W. (2008).** Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía Colombiana*, 15(1), 27-37.
- Callizaya H, S. (2015).** Efecto de la aplicación de biol sobre el comportamiento productivo del pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de carpa solar. Universidad Mayor De San Andrés Facultad De Agronomía. Viacha – La Paz Bolivia.
- Calpulalpan-Espinosa, S. E. (2023).** Aplicación de nano partículas de zinc ferrita en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.). Tesis de licenciatura, Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Departamento de Horticultura Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Cárdenas-Navarro, R., Sánchez-Yáñez, J. M., Farías-Rodríguez, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2004).** Los aportes de nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10(2), 173-178.
- Castellanos G, L., De Mello P, R., & Silva C, C. N. (2015).** El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. *Cultivos Tropicales*, 36, 16-24 Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, Cuba.
- Castro-Brindis, R., Sánchez-García, P., Peña-Lomelí, A., Alcántar-González, G., Baca-Castillo, G., & López-Romero, R. M. (2000).** Niveles críticos, de suficiencia y toxicidad de N-NO₃ en el extracto celular de pecíolos de tomate de cáscara. *Terra Latinoamericana*, 18 (2), 141-145.
- Cázarez-Flores L. L., Angulo-Castro A., Vega-Gutiérrez T. A., Ayala-Tafoya F., Aguilar-Quiñonez J. A., & Román-Román L. (2023).** Producción de tomate en respuesta a dosis de silicio. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(3), 1-7: e3851. DOI: 10.19136/era. a10n3.3851.
- Cázarez-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. J., Ayala-Tafoya, F., Díaz-Valdés, T., Yáñez-Juárez, M. G., y López-Orona, C. A. (2022).** Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha

de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. e994.
<https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.994>.

CORDIS, C. (2018). Plants in search of water: physiological and molecular interplay between root hydraulics and architecture during drought stress. CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/article/id/239413-how-drought-affects-plant-roots/es>.

Cruz-Gómez, B. A. (2015). Efectos de la aplicación de biofertilizantes y fosfitos de potasio durante cultivo y un recubrimiento de poli (acetato de vinilo - co - alcohol vinílico) sobre la calidad y vida poscosecha de pepino (*Cucumis sativus* L.). Tesis de Maestro en Ciencias en Agroplasticultura. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Saltillo, Coahuila, México.

Cuacua T, C., Trejo T, L. I., Velasco V, J., & Gómez M, F. C. (2017). Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se y Si en la nutrición de heliconias (*Heliconia sp.*). *Agro Productividad III*. 10 (3), 62-68.

De Campos-Menegale, M. L., Amaral Castro, G. S., & Cuzato-Mancuso, M. A. (2015). Silicio: interacción con el sistema suelo-planta. *Revista de Ciencias Agronómicas, Umuarama*, 4, 435-454.

Del Pino, M. (2013). El pepino. *Contacto Rural*. no. 3. pp. 10-11.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65894>

Ding, Y., Zhao, W., Zhu, G., Wang, Q., Zhang, P., & Rui, Y. (2023). Recent Trends in Foliar Nanofertilizers: A review. *Nanomaterials*, 13(21), 1-13. 2906.
<https://doi.org/10.3390/nano13212906>

Farias de Almeida, A. S., Corrêa-Junior, A., & Da Silva- Bentes, J. L. (2021). Synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) by *Fusarium concolor* and inhibition of plant pathogens. *Summa Phytopathologica*, 47(1), 9–15.
<https://doi.org/10.1590/0100-5405/235097>.

Flores-Bernal, E. F., Sandoval-Villa, M., Guzmán-Martínez, M., Espinosa-Rodríguez, M., Vázquez-Villamar, M., Sabino-López, J. E. (2021). Estado

nutrimental en el extracto celular de pecíolo y hojas de genotipos de Jamaica. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 8(2), 24. 1-10. II: e2928. DOI: 10.19136/era.a8nII.2928

Flores-Mendieta, M. (2023). Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita y dióxido de zinc en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.). Tesis de licenciatura, Ingeniero Agrícola y Ambiental. Departamento de Ciencias del Suelo Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Florido-Bacallao, M., & Bao-Fundora, L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(3), 70-88.

Fuentes-Paz, E. S. (2015). Descripción de la dinámica de absorción nutrimental en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L. híbrido Diomedea), bajo condiciones de invernadero en el Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía (CEDA), Guatemala, C.A. Tesis de Doctorado, Facultad de Agronomía Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Furcal-Beriguete, P., & Herrera-Barrantes, A. (2013). Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. *Agronomía Mesoamericana*, 24 (2), 365-378.

García-Mendoza, J. (2019). Inducción de Tolerancia a Arsénico con la Aplicación de Nanopartículas de Silicio en Tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Tesis de licenciatura, Ingeniero en Agrobiología. Departamento de Botánica Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

García-Ormaza, J. H., & Soliz-Anchundia, C. L. (2016). Influencia del tutorado y densidad poblacional en el rendimiento del cultivo de pepino H. Diamante. Tesis de Licenciatura, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador.

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. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.018>

Gómez-Gómez, Z. A. (2021). Respuesta de la flor de nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*) a la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc. Tesis de licenciatura, Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Departamento de Horticultura Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Cuacua-Temiz, C., Jácome-Chacón, M. A., & Senties-Herrera, H. E. (2015). Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. Agro Entorno. 166,19-20

González-Moscoso, M. (2020). Aplicación de nanopartículas de silicio en plantas de tomate para inducir tolerancia al estrés por arsénico. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida. Buena Vista, Saltillo, Coahuila.

González-Moscoso, M., Martínez-Villegas, N. V., Meza-Figueroa, D., Rivera-Cruz, M. C., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Las nanopartículas de SiO₂ mejoran la absorción de nutrientes en plantas de tomate desarrolladas en presencia de arsénico. Revista Bio Ciencias, 8. 1-25. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1084>

Guato-Molina, A. B. (2022). Establecimiento de parámetros nutricionales con la técnica de extracto celular de peciolo (ECP) bajo influencia de fertilizantes en el cultivo de banano. Tesis de licenciatura. Carrera de Ingeniería Agronomía, Facultad de Ciencias Agropecuaria Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ). Quevedo, Los Ríos- Ecuador.

Guio-Rodríguez, V. A., Álvarez-Herrera, J. G., & Gutiérrez-Villamil, D. A. (2023). Estado nutricional en rosa hidropónica "Snowflake" bajo diferentes

tratamientos de silicio. Acta Agronómica 71(3).
10.15446/acag.v71n3.105681.

Hernández-Cruz, D. (2018). Producción y micromorfología de pepino injertado (*Cucumis sativus* L.) cultivado con nanopartículas de cobre. Tesis de Licenciatura Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Departamento de Horticultura Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Hernández-Frutis, M. (2015). Efecto de la aplicación de nanopartículas de titanio, hierro y zinc, en la micromorfología de raíz y tallo de girasol y frijol en invernadero. Tesis de licenciatura, Ingeniero en Agrobiología, Departamento de Botánica Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Intagri S.C. (2024). Silicio para la nutrición y protección vegetal. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/silicio-para-la-nutricion-y-proteccion-vegetal>. (Consultado: 17/01/2024).

Landívar-Lucio, J. (2023). Uso del silicio en la reducción del estrés hídrico de la planta de sandía (*Citrullus lanatus* L.) en el Ecuador. Trabajo de Titulación. Facultad De Ciencias Agropecuarias, Carrera De Ingeniería Agropecuaria, Universidad Técnica De Babahoyo. Babahoyo, Los Ríos, Ecuador.

Linares-Nieto, U. (2019). Aplicación de nanopartículas de Selenio, Silicio y Cobre en el crecimiento y desarrollo del cultivo de permito morrón (*Capsicum annum* L.). Tesis de licenciatura, Departamento de Botánica. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

López E, J., Garza O, S., Huez L, M. A., Jiménez L, Rueda P, E. O., & Murillo A, B. (2015). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función de la densidad de plantación en condiciones de invernadero. European Scientific Journal, ESJ Vol.11No.24. pp. 25-36.

- López-Cortés, L. (2013).** Estudio y caracterización de la magnetita para su aplicación de fertilización de suelos agrícolas. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- Magdaleno-García, G., & Méndez-López, A. (2023).** Nanotecnología en la agricultura: pequeñas soluciones para grandes desafíos. Revista de Divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia Del Suelo, AC. 1, 1, 59-64.
- Magdaleno-García, G., Juárez-Maldonado, A., Betancourt-Galindo, R., González-Morales, S., Sánchez-Vega, M., Cabrera-de La Fuente, M., & Méndez-López, A. (2023).** Aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y cloruro de sodio en chile pimienta. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Vol. 10. Núm. Esp. III. Pp. 1-17: e3679. DOI: 10.19136/era.a10nIII.3679.
- Mahawar, L., Ramasamy, K. P., Suhel, M., Prasad, S. M., Živčák, M., Brestic, M., Rastogi, A., & Skalický, M. (2023).** Silicon nanoparticles: Comprehensive review on biogenic synthesis and applications in agriculture. Environmental Research, 232, 116292. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116292>
- Martez, L. (2022).** Uso de la nanotecnología en el desarrollo de fertilizantes orgánicos y pesticidas. International Journal of Science and Society, 4(4), 547-556. <https://doi.org/10.54783/ijssoc.v4i4.604>
- Martinez-Nava, R. S. (2022).** Respuesta del Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Tipo Uva a la Aplicación de Nanopartículas de Ferrihidrita. Tesis de licenciatura, Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Departamento de Horticultura Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Martínez-Sánchez, Y. P. (2017).** Determinar los requerimientos hídricos del pepino (*Cucumis sativus* L) mediante el lisímetro volumétrico, en el sector la trinidad perteneciente al sistema de riego campana-malacatos. Tesis de licenciatura de Ingeniería Agrícola. Facultad Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.

- Mejía V, R. (2010).** Comparación del método de siembra del pepino (*Cucumis sativus* L.) con dos tipos de acolchado plástico y riego por goteo. Tesis de licenciatura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Mejía-Sáenz, E., Palacios-Vélez, E., Exebio-García, A., & Santos-Hernández, A. L. (2002).** Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. *Terra Latinoamericana*, 20 (2), 217-225.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000).** Principios de nutrición vegetal. 4ta. Edición. Instituto Internacional del Potasio. Impreso en la EEA INTA Pergamino (B) Argentina.
- Monge-Pérez, J. E., Chacón-Padilla, K., & Loría-Coto, M. (2021).** Criterios de selección para el rendimiento en pepino (*Cucumis sativus*) cultivado en invernadero en época seca. *UNED Research Journal*, 13(1), e3373.
- Moreno P, L. (2009).** Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía colombiana*, 27(2), 179-191.
- Muñoz-Macías, N. M. (2015).** Respuesta del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) a la nutrición química y orgánica bajo riego por goteo. Tesis de licenciatura de Ingeniera Agrónoma. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil. Rocafuerte, Manabí, Ecuador.
- Navarro G, G., & Navarro G, S. (2013).** Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. Ediciones Mundi-Prensa. 3.^a edición. España. Pag-639.
- Núñez V, M., Amico R, J., Pérez H, M. C., & Betancourt G, M. (2017).** Estrés hídrico y salino en cítricos. Estrategias para la reducción de daños. *Cultivos tropicales*, 38(4), 65-74. San José de las Lajas, La Habana, Cuba.
- Olalde-Gutiérrez, V. M., Mastache-Lagunas, Á. A., Carreño-Román, E., Martínez-Serna, J., & Ramírez-López, M. (2014).** El sistema de tutorado y

poda sobre el rendimiento de pepino en ambiente protegido. *Interciencia*, 39(10), 712-717.

Onofre-Salazar, J. F. (2019). El Silicio (Si) como mineral multifuncional en la agricultura. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Agropecuarias Carrera de Ingeniería Agronómica Universidad Técnica de Babahoyo. Babahoyo, Los Ríos, Ecuador.

Oñate-Rea, J. C. (2020). Estudio comparativo de tres sistemas de riego y fertilización en pepino (*Cucumis sativus* L.). Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

Parra-Terraza, S., Baca-Castillo, G. A., Carrillo-González, R., Kohashi-Shibata, J., Martínez-Garza, A., & Trejo-López, C. (2004). Comparación de tres métodos de análisis de silicio en tejido foliar de pepino. *Terra Latinoamericana*, 22 (4), 401-407.

Pinedo-Guerrero, Z. H. (2020). Nanopartículas de SiO₂ para inducir tolerancia al estrés abiótico en plantas de tomate y pepino. Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Pliego-Zúñiga, C. A. (2019). Nanopartículas de selenio aplicadas a plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) como inductoras de tolerancia al estrés salino. Tesis de Maestro en Ciencias en Horticultura. Subdirección de Postgrado Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO). (2020). Pepino, fresco y saludable. <https://www.gob.mx/profeco/documentos/pepino-fresco-y-saludable?state=published>. (Consultado: 12/01/2024).

Quiroga-Silva, A. M. (2016). Respuesta a las aplicaciones de silicio en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L) variedad Modan, en condiciones de estrés hídrico bajo cubierta en Culiacán, Sinaloa. Tesis de Licenciatura de Ingeniera Agrónoma. Facultad de Ingenierías Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. <https://repositorio.udca.edu.co/handle/11158/582>

- Raya-Pérez, J. C., & Aguirre-Mancilla, C. L. (2012).** El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia tecnológica*, no. 43, pp. 42-46.
- Raza, M. A. S., Zulfiqar, B., Iqbal, R., Muzamil, M. N., Aslam, M. U., Muhammad, F., Amin, J., Aslam, H. M. U., Ibrahim, M. A, Uzair, M., & Habib-Ur-Rahman, M. (2023).** Morpho-physiological and biochemical response of wheat to various treatments of silicon nano-particles under drought stress conditions. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29784-6>
- Reyes-Pérez, J. J., Rodríguez-Rodríguez, S., Torres-Rodríguez, J. A., Llerena-Ramos, L. T., Hernández-Montiel, L. G., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2023).** Biofortificación con silicio en el crecimiento y rendimiento de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en ambiente controlado. *Terra Latinoamericana*, vol. 41, pp. 1-10. e1749. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1749>.
- Rodríguez F, P & Girón A, J. (2020).** Producción ecológica de pepino (*Cucumis sativus* L.) en las condiciones edafoclimáticas del III Frente. *CIGET*. vol. 1, núm. 2, pp. 71-81. Santiago de Cuba, Cuba. <https://www.redalyc.org/journal/1813/181369731006/html/>
- Rodríguez, S. M., & Flórez, R. V. J. (2004).** Elementos esenciales y beneficiosos. CORE. *Nociones Básicas del Ferti-riego. Ferti-Riego: Tecnologías y Programación en Agroplasticultura*. pp. 25-36.
- Rojo-Zavala, C. S., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguéz, E., Lucero-Vega, G., & García-Galindo, E. (2023).** Estado hídrico y crecimiento de plantas de menta (*Mentha spicata* L.) bajo tratamientos con vermicompost y déficit hídrico. *Terra Latinoamericana*, 41, pp.1-12. e1634. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1634>.
- Romero, A., Munévar, F., & Cayón, G. (2011).** Silicio y enfermedades de las plantas. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, v.29, n.3, pp. 473-480.
- Romero, J. J. (2017).** Desarrollo de nanomateriales basados en silicio semiconductor. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas

Departamento de Química Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina.

Romero-Guzmán, E. T., & Romero-Guzmán, L. (2020). Estrés hídrico y escasez del agua: ¡No al día cero del agua!. Glosa, Revista de Divulgación. vol. 8, no 14, 28-30.

Sáenz-Alarcón, M. (2022). Aplicación de nanopartículas de ZnO y de MgO para determinar su efecto en plantas de maíz cultivadas en invernadero. Tesis de licenciatura, Ingeniero Agrónomo en Producción. Departamento de Fitomejoramiento Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

Sanmartín-Galván, J., Cuenca-Moreno, A., Luna-Romero, Á., Jaramillo-Aguilar, E., & Villaseñor-Ortiz, D. (2023). Efecto nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano (*Musa spp.*) en Ecuador. Agronomía Costarricense. 47(2), pp. 47-56. <https://doi.org/10.15517/rac.v47i2.56131>

Santacruz L. (2016). Importancia del silicio en palma de aceite y otros cultivos. Boletín Técnico La Palma. GREPALMA.

Severo-Dorneles, A. O., Soares-Pereira, A., Rossato, L.V., Possebom, G., Martini-Sasso, V., Bernardy, K., De Quadros-Sandri, R., Teixeira-Nicoloso, F., Avelar Ferreira, P. A., & Almeri-Tabaldi, L. (2016). El silicio reduce el contenido de aluminio en los tejidos y mejora sus efectos tóxicos sobre el crecimiento de las plantas de papa. Ciencia Rural, v.46, n.3, pp. 506-512. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150585>

SIAP. (2023). Servicio de informacion agroalimentaria y pesquera. https://drive.google.com/file/d/1FWHntHMgju_uOse_MsOF9jZQDAm_FOD9/view. (Consultado: 11/01/2024).

Siddiqui, H., Ahmed, K. B. M., Sami, F., y Hayat, S. (2020). Silicon nanoparticles and plants: current knowledge and future perspectives. Sustainable Agriculture Reviews 41, 129-142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33996-8_7

- Silva T, J. R. (2015).** Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.), tutorado y sin tutorar con dos abonos orgánicos. Universidad técnica estatal de Quevedo. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- Soave, S., Faustinelli, P., Buteler, M. I., Soave, J. H., Moresi, A., Oddino, C., & Torre, D. (2011).** Selección de germoplasmas de maní con tolerancia a sequía. Jornada Nacional de Maní. 26. 2011 09 15, 15 de septiembre de 2011. General Cabrera, Córdoba. Argentina.
- Tejeda V, E. A., Hernández A, L., Nieto N, F., & Anzaldo M, M. (2022).** Nanopartículas de silicio como vehículos de transporte para moléculas de interés agrícola. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 16(30), 1e-20e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69732>
- Vargas-Martínez, G. (2022).** Efecto de la aplicación de NPsZnO y microorganismos rizosféricos en el crecimiento de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Tesis de Maestro en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Villalón-Mendoza, H., Castillo-Villarreal, M. A., Garza-Ocañas, F., Guevara-González, J. A., & Sánchez-Castillo, L. (2018).** Dióxido de silicio como estimulante del índice de calidad de plantas de chile piquín (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*) producidas en vivero. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(50), 294-303.
- Zamora, E. (2016).** Algunas fisiopatías de frutos, tallos y hojas en cultivos protegidos. Cultivos Protegidos HORT. CP, 1, 1-15.
- Zamora-Pérez, M., Peña-Figueredo, R., & Verdecía Rondón, M. (2014).** Respuesta del pepino a un manejo variable del riego. Centro Agrícola, 41(1), 5-11.