

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Evaluación de Nanopartículas de Silicio en el Desarrollo, Crecimiento y Floración de  
Cempasúchil (*Tagetes erecta* L.)

Por:

**ABRAHAM ZARATE FLORES**

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de Nanopartículas de Silicio en el Desarrollo, Crecimiento y Floración de  
Cempasúchil (*Tagetes erecta* L.)

POR:

**ABRAHAM ZARATE FLORES**

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobada por el Jurado Examinador:

\_\_\_\_\_  
Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Presidente

\_\_\_\_\_  
Dr. Ileana Vera Reyes

Co-Asesor

\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Vocal

\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Vocal



\_\_\_\_\_  
M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de Nano partículas de Silicio en el Desarrollo, Crecimiento y Floración de  
Cempasúchil (*Tagetes erecta* L.)

POR:

**ABRAHAM ZARATE FLORES**

TESIS


Presentada como Requisito Parcial para Obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

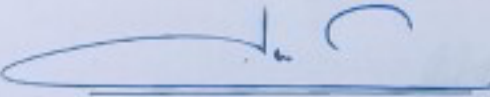
Aprobada por el Comité de Asesorías:

  
Dra. Daniela Alvarado Camarillo


Director

  
Dr. Ileana Vera Reyes

Co-Asesor

  
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Vocal

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Vocal

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

### Derechos de Autor y Declaración de no plagio.

Todo 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 (corta y pega); 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, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente.

Así mismo tengo conocimiento 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 nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.



Abraham Zarak Flores

Nombre y firma

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A MI ALMA MATER**

Eternamente agradecido con la institución que me dio la oportunidad de ser parte de su comunidad estudiantil, y de igual manera, me apoyó a lo largo de los nueve semestres que duró mi carrera, por ofrecerme una formación de excelencia, y gracias a ello pude conocer a personas, tanto compañeros como docentes, que me brindaron su apoyo durante todo el proceso y mi permanencia en la universidad

### **A MIS ASESORES.**

Dra. Daniela Alvarado Camarillo. Por brindarme las herramientas necesarias para cuando saliera al mundo laboral, los conocimientos transmitidos por ella han sido de mucha ayuda para enfrentarme a situaciones en las que se requiere de ello. Así mismo por sus asesorías que me dio durante el tiempo en que se llevó a cabo este proyecto, ya que invirtió tiempo de calidad para que saliera lo mejor posible.

Dra. Ileana Vera Reyes por formar parte del proyecto, por apoyarme con el tiempo dedicado a la supervisión del trabajo durante el desarrollo de la investigación y el financiamiento para la realización del experimento y los análisis de laboratorio.

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por ser y formar parte de mi formación en las prácticas y de los conocimientos que se me transmitieron en el transcurso de ellas.

Dr. Pedro Pérez Rodríguez por su excelente atención y dedicación, durante todo el proceso. Le agradezco de corazón su profesionalismo y amabilidad.

### **A MIS PROFESORES**

Por poner su granito de arena, al hacerme adquirir sus conocimientos y herramientas que serían de gran ayuda una vez que mi estancia en la universidad culminara.

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES**

Por hoy, al ver cumplido uno de mis más grandes sueños terminar la universidad, no puedo evitar pensar en ustedes y en todo lo que han hecho por mí, este logro no es solo mío, también es de ustedes.

Gracias por su apoyo incondicional, por sus sacrificios silenciosos, por creer en mí incluso en los momentos en que yo mismo dudaba. Cada palabra de aliento, cada esfuerzo, cada gesto de amor me ha impulsado a seguir adelante.

Ustedes han sido mi base, mi inspiración y mi mayor motivación. Me enseñaron el valor del esfuerzo, la importancia de no rendirse, y el poder de soñar en grande.

Gracias por caminar conmigo en este camino, por nunca soltarme y por estar siempre ahí. Este título lleva mi nombre, pero también lleva el amor, el esfuerzo y la entrega de ustedes dos.

Los amo con todo mi corazón. Gracias por darme las alas para volar.

### **A MI NOVIA**

Hoy quiero tomarme un momento para agradecerte desde lo más profundo de mi corazón. Gracias por estar a mi lado en cada paso, en cada reto, en cada logro. Tu apoyo ha sido mi fuerza, y tu amor incondicional, mi refugio.

No hay palabras suficientes para describir lo que significas para mí. Has creído en mí incluso cuando yo dudaba, me has levantado cuando he caído, y has celebrado conmigo cada triunfo como si fuera tuyo. Eso es amor verdadero, y tú me lo das todos los días. Gracias por amarme tal como soy, por nunca soltar mi mano y por hacer de mi vida un lugar más bonito. Eres mi mayor bendición, y cada día contigo me confirma que no podría haber encontrado una persona más especial.

Por todas sus palabras de motivación cuando ya no quería seguir, por su compañía incondicional. Te amo con todo lo que soy.

## INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO .....	7
INDICE DE CUADROS .....	9
INDICE DE FIGURAS .....	10
ABREVIATURAS.....	11
RESUMEN.....	12
PALABRAS CLAVE .....	12
ABSTRACT .....	13
KEYWORDS.....	13
1 INTRODUCCIÓN .....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo general .....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 HIPÓTESIS.....	16
4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
4.1 Importancia del Silicio.....	17
4.2 El Silicio en la planta .....	18
4.3 Nanosilicio y sus efectos en cultivos .....	19
4.4 La flor de cempasúchil.....	20
4.5 Clasificación taxonómica.....	20
4.6 Hábitat y distribución .....	21
4.7 Temperatura.....	21
5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
5.1 Sitio Experimental.....	22
5.2 Preparación de la semilla y siembra.....	22
5.3 Preparación del terreno .....	22

5.4	Material Vegetativo.....	22
5.5	Riego.....	23
5.6	Aplicación foliar en el dosel de la planta.....	23
5.7	Distribución de tratamientos.....	23
5.8	Tutoreo.....	24
5.9	Cosecha de las flores.....	25
5.10	Control de Plagas.....	25
6	RESULTADOS.....	27
7	DISCUSIÓN.....	41
8	CONCLUSIONES.....	44
9	LITERATURA CITADA.....	45

## INDICE DE CUADROS

CUADRO 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en parámetros de color de la flor de cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ .....	27
CUADRO 2. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre parámetros de calidad de la flor en cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ .....	30
CUADRO 3. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre parámetros de crecimiento en cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ .....	32
CUADRO 4. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre parámetros de crecimiento en cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ .....	34
CUADRO 5. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre la concentración de macronutrientes en hojas de cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . ....	36
CUADRO 6. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre la concentración de micronutrientes en hojas de cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . ....	38

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Distribución de los tratamientos en el lote experimental .....	24
FIGURA 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en parámetros de color de la flor de cempasúchil. (2a) Luminosidad (L), (2b) Cromaticidad (a), (2c) Matiz (b). Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . .....	29
FIGURA 3. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en parámetros de calidad de flores de cempasúchil. Columnas seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . .....	31
FIGURA 4. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en el peso fresco de ramas (a) de cempasúchil. Columnas seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . .....	33
FIGURA 5 Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en la longitud del tallo (a) y el peso fresco de la flor (b) en cempasúchil. Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . .....	35
FIGURA 6 Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en la concentración de calcio (a) y fósforo (b) en cempasúchil. Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . .....	37
FIGURA 7 Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en la concentración de hierro (a), silicio (b) y zinc (c) en cempasúchil. Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$ . .....	40

## **ABREVIATURAS**

NPs: Nanopartículas

Si: Silicio

Zn: Zinc

Cu: Cobre

CIQA: Centro De Investigación De Química Aplicada

V/V: Volumen Por Volumen

NPSi: Nano partículas de silicio

ATP: Trifosfato de adenosina

ADP: Adenosin difosfato

## RESUMEN

El cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) es una planta ornamental y medicinal de gran importancia en la cultura mexicana. En años recientes, el uso de nanopartículas (NPs), como el silicio (Si), zinc (Zn) y cobre (Cu) ha sido investigado por su potencial para mejorar el crecimiento y desarrollo de plantas, incluida esta especie. Las NPSi se han asociado con una mayor resistencia al estrés hídrico, mejor absorción de nutrientes y aumento en la producción de biomasa. Por otro lado, el Zn, en forma de NP, actúa como micronutriente esencial, favoreciendo la fotosíntesis y el crecimiento vegetativo. El Cu, aunque tóxico en altas concentraciones, en dosis adecuadas puede estimular la actividad enzimática y mejorar la resistencia a enfermedades. Diversos estudios han demostrado que la aplicación controlada de estas NPs puede aumentar la floración, el tamaño de las flores y el contenido de compuestos bioactivos en el cempasúchil. Sin embargo, también se ha observado que dosis excesivas pueden tener efectos negativos, por lo que es fundamental un manejo preciso. En el presente estudio se determinó el efecto de la aplicación foliar de NPSi, NPs Si+Zn y de NPSi+Cu en el cultivo de cempasúchil para flor de corte. Las aplicaciones de NPSi incrementaron la calidad de las flores ya que estuvo relacionado con una mejoría en la coloración y en la longitud y calibre de los tallos florales. Resultados similares fueron obtenidos con la aplicación de NPSi+Zn. La aplicación de NPSi+Cu permitió mejorar el estado nutrimental de las plantas ya que se elevó la concentración de hierro, zinc y Si, así como de calcio y fósforo.

## PALABRAS CLAVE

Nano partículas, aplicación foliar, tallos florales, longitud de flor.

## **ABSTRACT**

Marigold (*Tagetes erecta* L.) is an ornamental and medicinal plant of great importance in Mexican culture. In recent years, the use of nanoparticles (NPs), such as silicon (Si), zinc (Zn), and copper (Cu), has been investigated for their potential to improve plant growth and development, including this species. SiNPs have been associated with increased resistance to water stress, improved nutrient uptake, and increased biomass production. Furthermore, Zn, in the form of NPs, acts as an essential micronutrient, promoting photosynthesis and vegetative growth. Cu, although toxic at high concentrations, can stimulate enzymatic activity and improve disease resistance at appropriate doses. Several studies have shown that the controlled application of these NPs can increase flowering, flower size, and bioactive compound content in marigolds. However, excessive doses have also been observed to have negative effects, so precise management is essential. In this study, the effect of foliar application of SiNPs, Si+Zn NPs, and SiNPs+Cu on marigolds for cut flowers was determined. SiNPs applications increased flower quality, as they were associated with improved coloration and the length and caliber of floral stems. Similar results were obtained with SiNPs+Zn applications. SiNPs+Cu improved plant nutritional status, increasing the concentrations of iron, zinc, and Si, as well as calcium and phosphorus.

## **KEYWORDS**

Nanoparticles, foliar application, flower stems, flower length

## 1 INTRODUCCIÓN

La nanotecnología ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, ganando una gran atención debido a su capacidad para transformar múltiples sectores industriales. En particular, la nanotecnología promueve el uso de nanopartículas (NPs) en una amplia gama de aplicaciones dentro de la industria agrícola, abriendo nuevas oportunidades para mejorar la productividad y sostenibilidad de los cultivos. Las NPs son materiales con un tamaño promedio inferior a 100 nanómetros, lo que les confiere propiedades únicas en términos de reactividad, superficie y solubilidad. Estas partículas pueden estar compuestas por una variedad de sustancias, entre las que se incluyen carbono, metales, óxidos metálicos y materiales orgánicos, lo que les permite desempeñar una función versátil en diversas aplicaciones, desde la mejora de la absorción de nutrientes hasta la protección contra plagas y enfermedades (Galindo et al., 2022).

En los últimos años, el sector agrícola ha experimentado progresos significativos, impulsados por el desarrollo de innovaciones tecnológicas con el propósito de garantizar una producción alimentaria sostenible y asegurar la seguridad nutricional global. Se prevé que la demanda de alimentos siga en aumento, mientras que los recursos naturales esenciales, como el agua, los combustibles fósiles, la disponibilidad de tierras arables y la calidad del suelo, se agotarán de manera progresiva. En este contexto, el surgimiento y avance de las nanociencias y la nanotecnología han ofrecido nuevas soluciones para abordar estos retos, proporcionando alternativas más eficientes y ecológicas para la producción agrícola (Vázquez-Núñez, 2023). La nanotecnología ha surgido como un avance científico-tecnológico capaz de transformar diferentes áreas de la agricultura, proporcionando herramientas innovadoras para la detección molecular del estrés biótico y abiótico (Lira-Saldívar et al., 2018).

El Silicio (Si) es el segundo elemento más abundante después del oxígeno. Las plantas lo absorben en forma de ácido silícico y es el único elemento nutritivo que no es perjudicial cuando se acumula en exceso en las plantas (Zhang et al., 2016). Aunque no es un elemento esencial para la mayoría de las plantas, ha demostrado ser un elemento benéfico para aliviar el estrés en las mismas. La aplicación de fertilizantes a base de Si es una práctica cada vez más común, ya que mejora la productividad de los cultivos y

desencadena una variedad de vías metabólicas en una variedad de plantas que alivia los efectos nocivos del estrés abiótico y biótico, incluida la salinidad, el estrés hídrico, toxicidad de metales pesados, viento, temperaturas extremas, desequilibrio de nutrientes, tolerancia a plagas y enfermedades y pastoreo (Hernández-Salinas et al., 2021).

El cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) es una planta originaria de México y América Central, donde ha florecido durante miles de años, convirtiéndose en un símbolo profundamente arraigado en la cultura y tradición de estas regiones. Su nombre proviene del náhuatl "cempohualxochitl", que se traduce como "veinte flores", una referencia a la abundante cantidad de pétalos que adornan cada una de sus flores, creando una imagen vibrante y llena de color. Esta planta no solo es conocida por su belleza, sino también por su uso en diversas aplicaciones, tanto en la medicina tradicional como en la ornamentación, y su estrecha relación con las festividades como el Día de Muertos, donde se utiliza como un símbolo de la conexión entre la vida y la muerte (Lisa et al., 2023.). El presente estudio se realizó para determinar las respuestas del cempasúchil a la aplicación de NPs de Si ya sea individual o combinado con zinc (Zn) o cobre (Cu).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el crecimiento y producción de flores de *Tagetes erecta* L. bajo tratamiento con nanopartículas de silicio.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Aplicar nanopartículas de silicio, silicio-zinc y silicio-cobre por aspersión foliar en la planta
- Evaluar el crecimiento de la planta y la producción y calidad de las flores.
- Evaluar cómo es afectado el estatus nutrimental del cempasúchil por las aplicaciones de nanopartículas.

## **3 HIPÓTESIS**

Las nano partículas de silicio mejoran el rendimiento y las características de la flor de cempasúchil.

## 4 REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Importancia del Silicio

De acuerdo con Giménez (2019), el papel del Si en el metabolismo de la planta no está del todo claro y no está demostrada su esencialidad como nutriente, sin embargo, los múltiples beneficios que supone la fertilización con Si, especialmente en el cultivo sin suelo, donde este elemento es menos accesible para las plantas, hacen que algunos autores lo consideren un elemento básico en la solución en algunos cultivos. Esto debido a que mejora el balance de nutrientes, beneficiando la disponibilidad de P cuando es deficitario y lo limita cuando está en exceso, además mejora la absorción del K, N y Ca. El Si confiere una capacidad a la planta de usar mejor los recursos disponibles, esto nos permitirá un menor uso de fertilizantes y una agricultura más sostenible.

El Si es el segundo elemento más frecuente en el planeta, y su presencia favorece la capacidad de las plantas para prosperar en situaciones de estrés, optimizando las funciones fisiológicas, procesos bioquímicos y estructuras celulares. Las investigaciones sobre el Si han progresado considerablemente, destacando su impacto positivo en diversas plantas. Sin embargo, aún se requiere más estudio sobre los mecanismos que lo hacen beneficioso para los cultivos, especialmente en condiciones difíciles y de estrés. A pesar de ello, hay evidencia de que este elemento favorece procesos como la germinación, el crecimiento, la producción de biomasa y la concentración de nutrientes importantes (Cabezas et al., 2022).

Los estudios sobre su aplicación y distribución en plantas han revelado efectos positivos en vegetales, cereales y frutas. Por ejemplo, el tomate (*Solanum lycopersicum*) se considera un fruto que excluye el Si, dado que absorbe menos del 0.5%. No obstante, parece que la absorción de Si en este cultivo mejora los niveles de calcio en hojas y frutos, previene la podredumbre en el extremo de la flor, altera el metabolismo de las hojas bajo estrés salino, aumenta el total de frutos y optimiza la producción (Tejeda et al., 2023).

El Si no se considera vital para las plantas superiores, ya que no cumple con los requisitos de esencialidad. No obstante, su absorción puede traer beneficios a ciertos cultivos, como mayor resistencia a plagas, tolerancia al estrés por metales pesados, sequía y salinidad,

reducción de la evapotranspiración, impulso del crecimiento y nodulación en leguminosas, y mejora de la actividad enzimática, la composición mineral, la estructura de la planta y el aumento de la tasa fotosintética (Castellanos et al., 2015).

#### **4.2 El Silicio en la planta**

El Si tiene varios efectos sobre las plantas, retrasa la aparición de enfermedades y/o reduce su incidencia, modulando y sincronizando mejor la respuesta al patógeno. Sin embargo, debido a la dificultad de eliminar totalmente el Si de los medios de cultivo hidropónicos para plantas, este no se había reconocido como un elemento necesario en la nutrición vegetal. Se ha propuesto que el efecto benéfico que se observa cuando se agrega un puñado de suelo a los cultivos hidropónicos podría deberse al Si añadido (Raya y Aguirre, 2012).

Aunque la mayor parte se encuentra de forma no soluble, no asimilable, está presente en todas las plantas y constituye entre el 0.1% y el 10% de su materia seca (Giménez, 2019).

Giménez (2019) señala que las plantas absorben Si por sus raíces en forma de ácido monosilícico y que se transporta a través de las plantas vía xilema y es distribuido hacia los órganos con mayores tasas de transpiración, principalmente los brotes, se condensa en sílice sólido y se deposita como sílice amorfo. Una concentración de ácido silícico muy alta polimeriza en forma de sílice gel y puede depositarse en las paredes celulares y en los vasos de la xilema.

Bajo condiciones templadas de invernadero, las plantas activamente acumulan Si mientras que, bajo una mayor demanda de evaporación en el campo, el Si se acumula pasivamente en la corriente de transpiración (Tamara et al., 2012).

El ácido silícico es tomado por transportadores específicos y polimerizado intracelularmente en una vesícula especializada dentro de una matriz orgánica que consiste de largas cadenas de poliaminas y fosfoproteínas, llamadas silafinas (Raya y Aguirre, 2012).

Aquellas plantas que crecen en ausencia de Si tienden a ser más débiles estructuralmente y son más susceptibles a estrés abiótico, así como a la toxicidad por

metales y son más fácilmente atacadas por organismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros (Raya y Aguirre, 2012).

Los fisiólogos vegetales no consideran al Si como un elemento esencial para las plantas; sin embargo, el Si que las raíces absorben en forma de ácido monosilícico ( $H_4SiO_4$ ) de la solución del suelo es depositado como sílice amorfa hidratada ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) en espacios inter o intracelulares. El ácido monosilícico es la forma en que el Si es absorbido por las plantas, este ácido reacciona con los Fosfatos insolubles de Al, Fe, Mn y Ca, formándose silicatos de cada uno de ellos y liberando el ion Ortofosfato para ser absorbido por las plantas, el Si neutraliza mejor la toxicidad del Al en suelos ácidos, aumenta la nutrición de P en las plantas de un 40 a 60% sin la aplicación de fuentes fosfatadas e incrementa la eficiencia de la aplicación de roca fosfórica de un 100 a 200%, previniendo la transformación del P en compuestos inmóviles (Aguilar, 2012).

El Si alivia los efectos dañinos de la salinidad; su presencia en el medio de crecimiento limita la acumulación de Na en las hojas y mantiene un adecuado contenido de agua, que se refleja en una más alta acumulación de biomasa. Asimismo, incrementa la tolerancia a la presencia de metales como el Zn. La concentración de Na, B y Cl en la parte aérea de las plantas de tomate y espinaca (*Espinacea oleracea*), disminuye cuando se aplica Si a los suelos sódicos y, por sus efectos sobre algunas enzimas, se propone que tendría un papel fisiológico y/o bioquímico como incrementar la capacidad defensiva antioxidante de las plantas (Raya y Aguirre, 2012).

### **4.3 Nanosilicio y sus efectos en cultivos**

El nanosilicio favorece la cantidad de nutrientes en el suelo, ayuda a mantener su equilibrio de pH y estimula el crecimiento de la microbiota del suelo. Estas mejoras en la estructura y composición del suelo contribuyen a una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas, lo que optimiza su desarrollo y salud (González-Moscoso et al., 2021).

Las nanopartículas de Si han mostrado un gran potencial para promover el desarrollo de las plantas, particularmente en lo que respecta al rendimiento de los cultivos en condiciones de estrés biótico o abiótico. Se ha indicado que la aplicación de nanopartículas de Si podría sustituir de manera eficaz al Si en los fertilizantes minerales

convencionales. Además, se ha planteado que las nanopartículas de óxido de Si pueden fortalecer las paredes celulares, lo que dificulta la entrada de bacterias y aumenta la resistencia a diversas enfermedades (Rezghiyan et al., 2025)

#### **4.4 La flor de cempasúchil**

Esta planta, reconocida por sus flores de tonos amarillos o anaranjados y su fragancia distintiva, tiene su origen en Mesoamérica, especialmente en México, donde es conocida por su nombre en náhuatl: cempasúchil, que significa “veinte flores” o “flor de numerosos pétalos”. Posee un valor histórico y cultural único, ya que ha sido empleada en ceremonias religiosas desde la época prehispánica. Los mexicas creían que su color intenso y su perfume contribuían a guiar a las almas de los difuntos en su travesía hacia el Mictlán, el inframundo (Mario, 2023)

#### **4.5 Clasificación taxonómica.**

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Orden: Asterales

Familia: Asteraceae

Subfamilia: Asteroideae

Tribu: Tageteae

Género: *Tagetes*

Especie: *Tagetes erecta* L.

Mario M. (2023).

#### **4.6 Hábitat y distribución**

El cempasúchil es una planta nativa de México, donde crece de manera rustica, principalmente en regiones con clima templado. Su presencia es frecuente en entidades como Morelos, Aguascalientes, Oaxaca, Sinaloa, Chiapas, Estado de México, Puebla, Jalisco, San Luis Potosí, Tlaxcala y Veracruz. (Juárez, 2023.)

En México se estima la existencia de 35 especies del total de 58 registradas en América. El género *Tagetes* se encuentra distribuido a lo largo de diversos sistemas montañosos, como la Sierra de la Laguna en Baja California Sur, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre de Chiapas, la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental y el Eje Neo volcánico (Serrato Cruz, 2006).

#### **4.7 Temperatura**

La temperatura ideal varía según la especie, aunque generalmente se encuentra entre los 10 y 30 °C. No obstante, algunos autores, señalan que el crecimiento se incrementa notablemente a 22 °C y 30 °C, debido a una mayor eficiencia en la fotosíntesis.

## **5 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 Sitio Experimental**

El experimento se realizó en los meses de junio y noviembre del 2024, en el terreno ubicado dentro del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en el Bulevar Enrique Reyna H.140, San José De Los Cerritos C.P. 25294 Saltillo, Coahuila.

### **5.2 Preparación de la semilla y siembra**

Se le dio un tratamiento a la semilla antes de sembrarse en charolas dejándolas por una noche en pre germinación con nano partículas de SiO<sub>2</sub>. Se realizó la preparación del sustrato. para lo cual se utilizó una mezcla de peat moss y perlita con una relación 70%/30% (v/v), se humedeció un poco para después rellenar las cavidades de las charolas y llenar los espacios vacíos para tener un llenado uniforme.

La siembra de la semilla se hizo en las charolas el 26 de junio de 2024 con 380 semillas por tratamiento. En la etapa de germinación se estuvo regando con regaderas de un galón de manera manual en las charolas. El trasplante se realizó el día 11 de julio, después de observar que estaba entrando a la etapa de crecimiento y desarrollo de raíz no obstante se realizó la tarea del trasplantar, de manera que cada plántula estuviera a una distancia de 30 cm entre cada una. El trasplante se hizo a doble hilera por surco de 7 m de largo. Se hicieron unos hoyos a una profundidad de 8 a 10 cm con un diámetro de 5 a 8 cm.

### **5.3 Preparación del terreno**

El barbecho se realizó de forma convencional el terreno, formando 8 camas o surcos con un borde de 28 metros de largo por 1.5 metros de ancho. Se colocó un acolchado de polietileno con orificios a 30 cm de distancia entre planta. Previo a la colocación del acolchado se instaló la cintilla de riego por abajo del mismo.

### **5.4 Material Vegetativo**

Como material vegetativo se utilizaron plantas de campasúchil variedad criolla; la semilla se consiguió con agricultores del estado de Guanajuato; para la realización de este experimento se utilizaron un total de 380 semillas por tratamiento. La variedad posee las siguientes características: es una planta herbácea perenne, de ciclo reproductivo anual, que llega a medir entre 30 y 110 cm. Tiene una raíz pivotante y profunda, y un sistema radicular secundario fuerte, extenso y superficial, crecimiento verde-oscuro o verde-claro

y produce plantas vigorosas, es una planta que no soporta altas temperaturas y requiere de riegos constantes.

### **5.5 Riego**

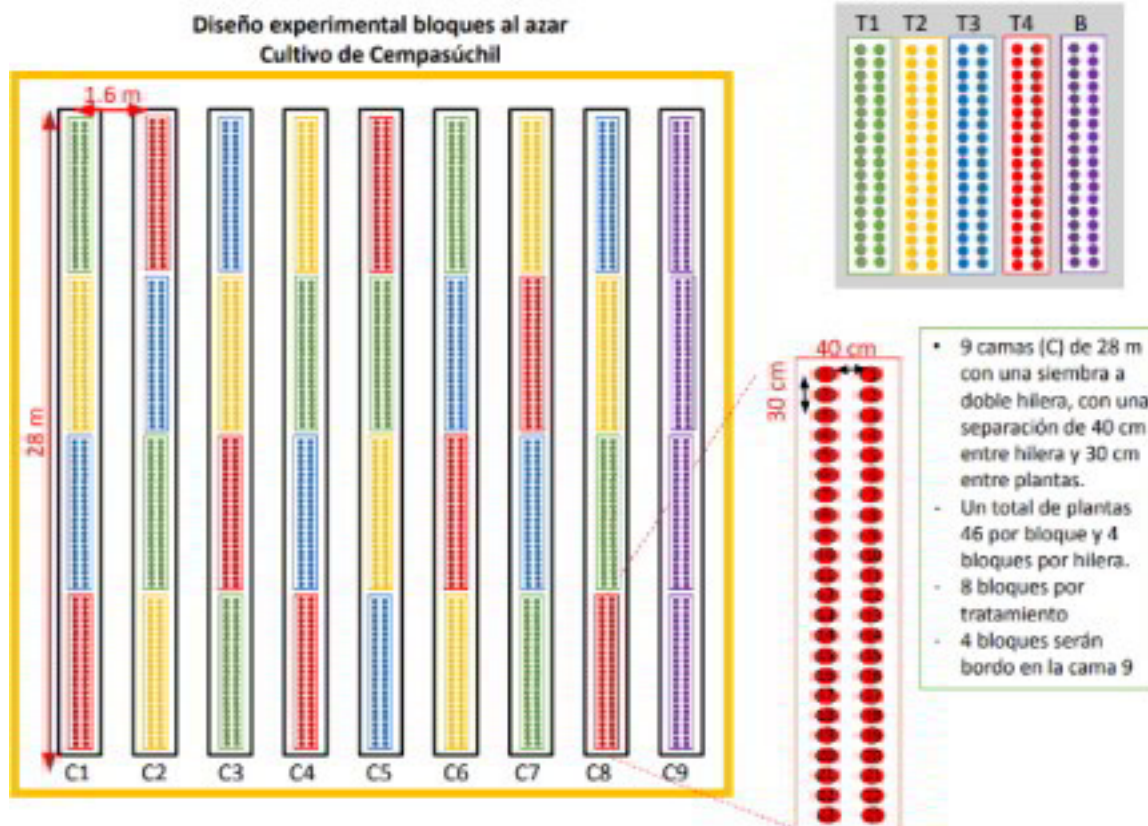
Para el riego se colocaron dos cintillas por cama dejando el gotero puesto en dirección hacia arriba. El tubo principal salía del cabezal de fertiriego donde se manipulaba para regar dos horas al día cada tercer día con agua de pozo. Se inyectaba 1 hora o a veces 1 hora y 1 hora y media de solución de fertiriego si así lo requería el cultivo. Para llevar a cabo el riego, este se efectuó según la fase de crecimiento en la que se hallaban las plantas; en la etapa de desarrollo vegetativo los riegos se realizaron de manera automática desde el cabezal de fertiriego donde cuando tres tensiómetros que se colocaron dentro del predio marcaban 25 a 30 cbar. Se encendía la bomba por 1 hora con agua de pozo y 1:30 hrs con solución fertilizante con una vez al día cada tres días a la semana, hasta llegar a la etapa de producción. Los riegos en la etapa de producción fueron de 2 horas al día, esto permitía una humedad suficiente para el suelo uno por la mañana y otro al medio día para que las plantas no se estresaran. Antes de realizar la siembra se aplicó una lámina de riego con agua previamente con agua de pozo.

### **5.6 Aplicación foliar en el dosel de la planta**

Se empezó pesando 150 mg de nanopartículas de  $\text{SiO}_2\text{-Cu}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Zn}$ ,  $\text{SiO}_2$ , por 1L de agua des ionizada. Se utilizó una bomba fumigadora de 5 L aproximadamente para hacer la primera aplicación foliar en la etapa de crecimiento; después de dos semanas se hizo la segunda pero esta vez 300 mg de nanopartículas por 2 L de agua desionizada, utilizamos la misma bombilla y se hizo la aplicación a las 11 de la mañana en la etapa de desarrollo. Por último, la tercera aplicación en etapa de floración, 450 mg de nano partículas por 3 L de agua des ionizada.

### **5.7 Distribución de tratamientos**

Los tres tratamientos, 150 ppm de NPs de  $\text{SiO}_2\text{-Cu}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Zn}$ ,  $\text{SiO}_2$ , más el tratamiento testigo se distribuyeron en un diseño en bloques al azar. Las unidades experimentales consistieron en un surco de 7 m de largo en donde se colocaron las plantas de cempasúchil a una densidad de plantas por metro cuadrado (Figura 1).



**FIGURA 1. Distribución de los tratamientos en el lote experimental**

Se formaron 9 camas (C) de 28 m de largo con una siembra a doble hilera por cama, una separación de 40 cm entre hileras, y una planta cada 30 cm, para un total de 46 plantas por bloque y 4 bloques por cama. De esta manera la distribución constaría de 8 bloques por tratamiento de los cuales 4 serán bordo en la cama 9.

### 5.8 Tutoreo

Para esta actividad se utilizó rafia y tubos de hierro galvanizado de 2 metros de altura; se excavó 35 cm aproximadamente poniendo dos en cada extremo del surco con una distancia de 5.6 m entre tubos. Se fue colocando la rafia por fuera de los tubos dándole la vuelta a las camas, lo cual se realizó dos veces en una distancia entre rafia de 50 cm de altura, ajustando con más rafia los dos extremos. El objetivo fue evitar que las ramas de la planta no se cayeran o se rompieran por el mal tiempo.

## **5.9 Cosecha de las flores**

La cosecha de las flores se realizó en un estado ligeramente abierto; la flor principal de cada rama debería estar completamente abierta y el color anaranjado o amarillos intenso. Se cortó midiendo 65 cm de la penúltima rama con flor hacia abajo. Al ser recolectadas las flores se colocaban en una orilla para posteriormente hacer las correspondientes evaluaciones en el laboratorio de pos cosecha.

La cosecha se realizó de manera manual con ayuda de unas tijeras de podar, después de cada corte se llevaban al laboratorio para la evaluación. La primera cosecha se realizó el 3 de octubre de 2024, después de la cual se mantuvo de 4 a 5 cosechas por semana, realizándose la última cosecha el 25 de octubre de 2024. Cabe mencionar que cada muestra obtenida fue identificada para su correcta toma de datos.

Las variables a determinar fueron:

Luminosidad de la flor la cual se llevó a cabo con un colorímetro para determinar la intensidad del color en los pétalos de la flor, así como el número de flores.

Longitud de pedúnculo, diámetro de la flor, tallos florales, así como diámetro de tallo y longitud de tallo principal se midieron con vernier.

Peso fresco y seco de flor y rama del tallo.

Área foliar de las hojas del tallo principal (60cm).

Contenido nutrimental de la parte aérea: calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), fósforo (P), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), silicio (Si), cobre (Co) y zinc (Zn).

## **5.10 Control de Plagas**

Durante el experimento se presentaron las siguientes plagas:

Araña roja. La presencia de esta plaga fue de gran impacto en el cultivo. Para su erradicación se aplicó acibuffer (10 mL para 20 L), regulador de pH, insecticida abamectina (20 mL para 20 L), adherente penetrante dispersante (1 mL para 20 L); lo anterior se disolvió en una bomba fumigadora de capacidad de 20 L. Se realizaron dos aplicaciones durante el estudio.

Huevecillo cogollero. Esta plaga pudo ser detectada a simple vista ya que se podían notar las afectaciones al cultivo donde los daños se encontraban en hojas enrolladas con esta plaga, en el envés de las hojas y en las yemas tiernas, esta plaga es más frecuente y peligrosa en este cultivo, para su control se hicieron aplicaciones de insecticida.

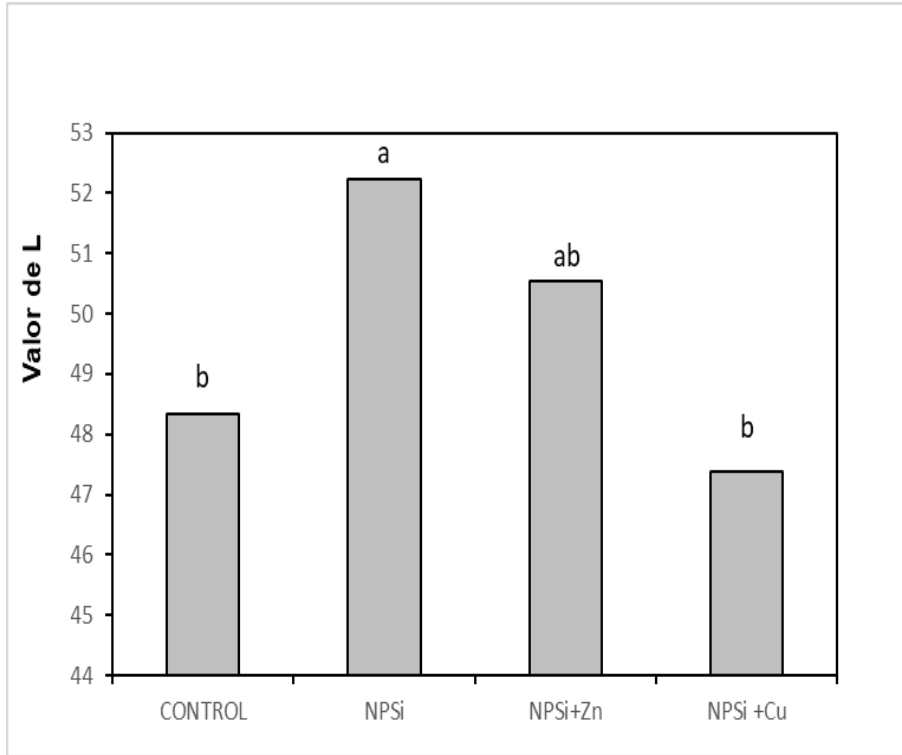
## 6 RESULTADOS

Se muestra un efecto significativo con aplicación de NPSi en luminosidad (L), la cual aumentó en un 7% sobre el control (Cuadro 1, Figura 2a), mientras que la cromaticidad (a) tuvo un incremento del 11% en las plantas tratadas con NPSi+Zn comparado con el control (Cuadro 1, Figura 2b). El matiz (b) de las flores también fue mayor en un 5% en plantas tratadas con aplicaciones de NPSi comparado con el control (Cuadro 1, Figura 2c).

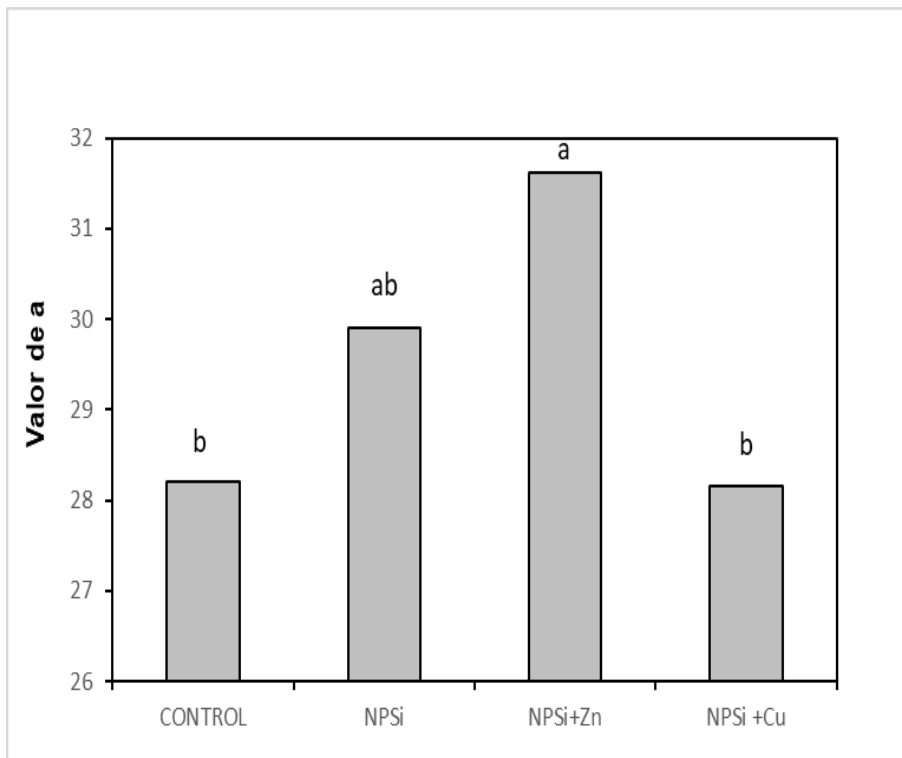
**CUADRO 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en parámetros de color de la flor de cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

Tratamiento	L	a	b
Control	48.3 b	28.21 b	75.12 b
NPSi	52.22 a	29.90 ab	79.46 a
NPSi+Zn	50.53ab	31.61 a	77.47 ab
NPSi+Cu	47.391 b	28.17b	73.64 ab
ANOVA	$p=0.0144$	$p=0.0275$	$p=0.0177$

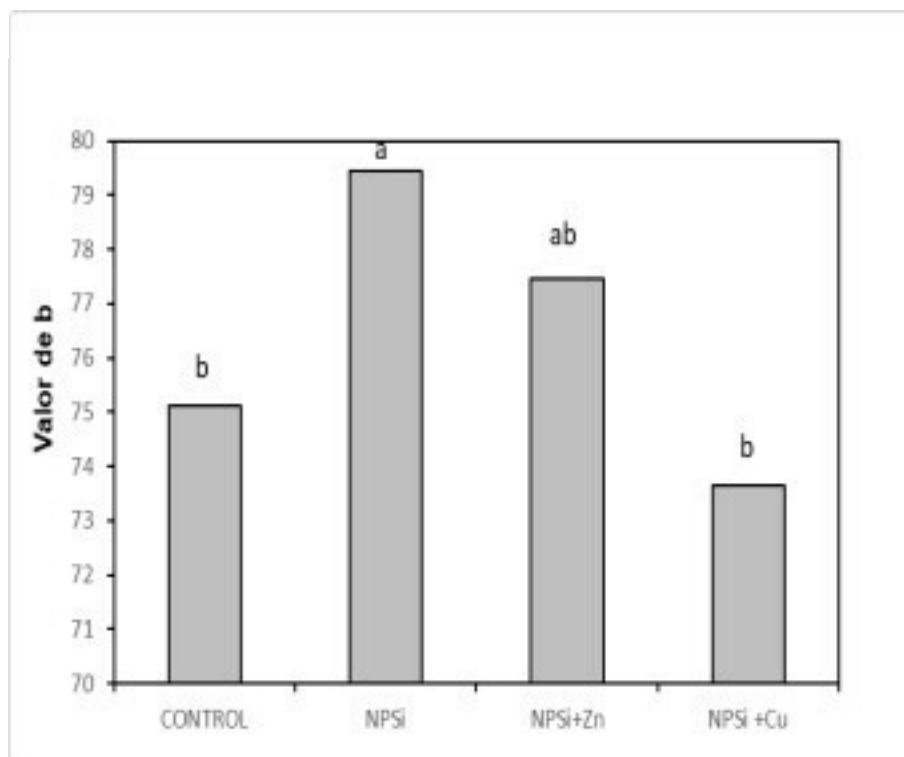
(2a)



(2b)



(2c)



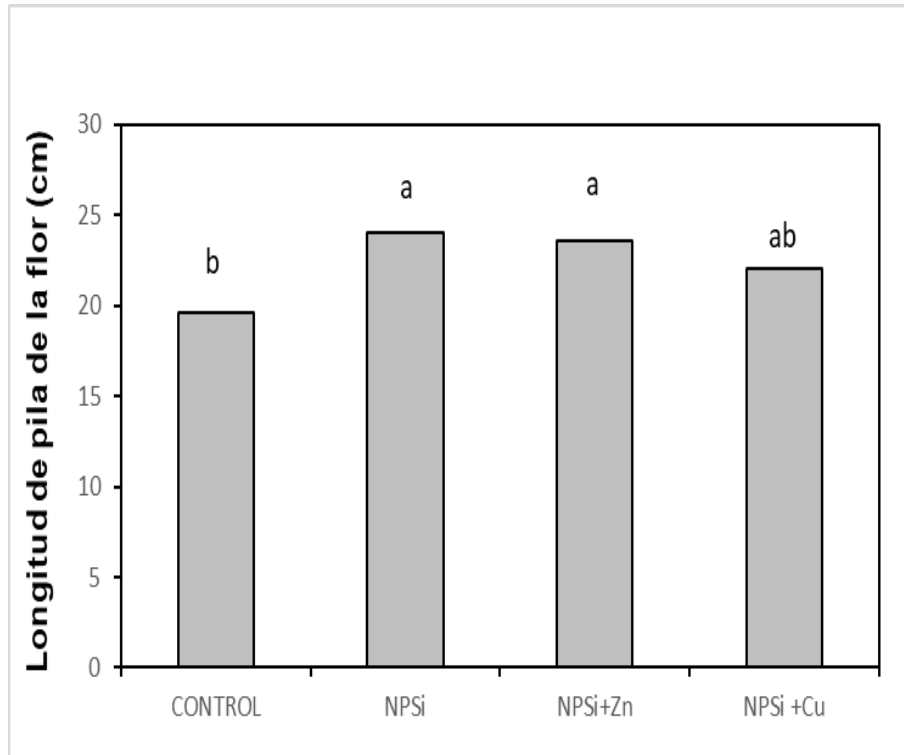
**FIGURA 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en parámetros de color de la flor de cempasúchil. (2a) Luminosidad (L), (2b) Cromaticidad (a), (2c) Matiz (b). Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

En relación con las plantas del control, hubo un incremento del 23% en la longitud del pedúnculo floral con la aplicación de NPSi y de 20% con NPSi+Zn en comparación con el tratamiento control, no obstante, el tratamiento al que se le aplicó NPSi+Cu tuvo un parecido con el control (Cuadro 2, Figura 2a). En cuanto al diámetro de la flor, se observó un aumento significativo de los tratamientos con NPSi, NPSi+Zn y NPSi+Cu comparado con el control del 10%,6%,9% respectivamente (Cuadro 2, Figura 2b). El número de tallos florales no experimentaron cambios significativos debido a los tratamientos aplicados (Cuadro 2).

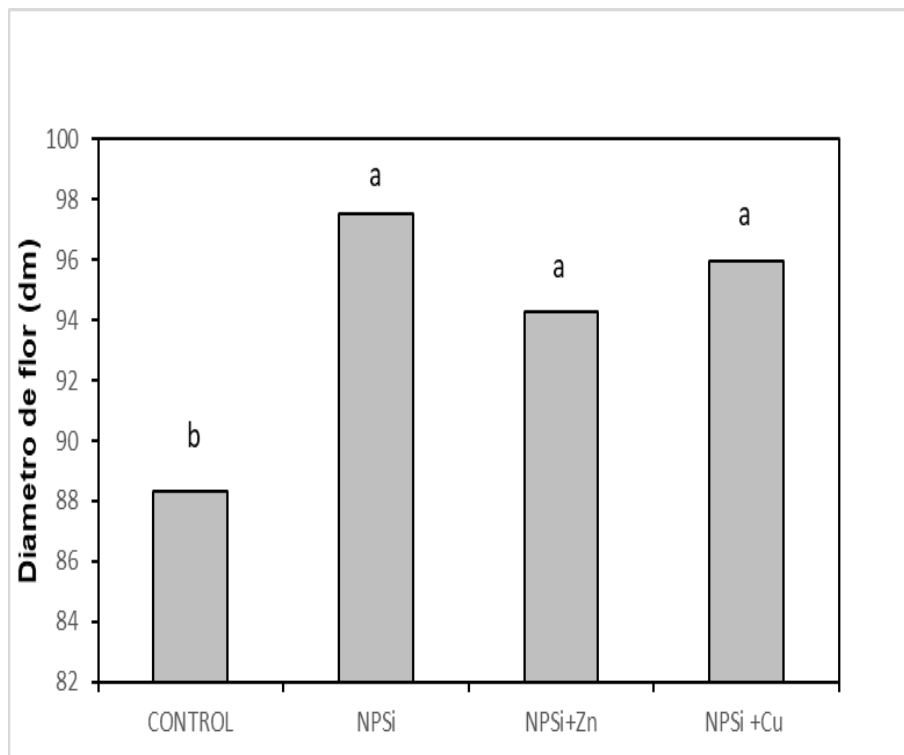
**CUADRO 2. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre parámetros de calidad de la flor en cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

Tratamiento	Longitud de pedúnculo (cm)	Diámetro (mm)	Numero de tallos florales (cm)
CONTROL	19.58 b	88.34 b	13.78 a
NPSi	24.02 a	97.53 a	14.66 a
NPSi+Zn	23.58 a	94.28 a	14.18 a
NPSi+Cu	22.08 ab	95.94 a	13.56 a
ANOVA	$p=0.012$	$p=0.0033$	$p=0.4780$

(a)



(b)

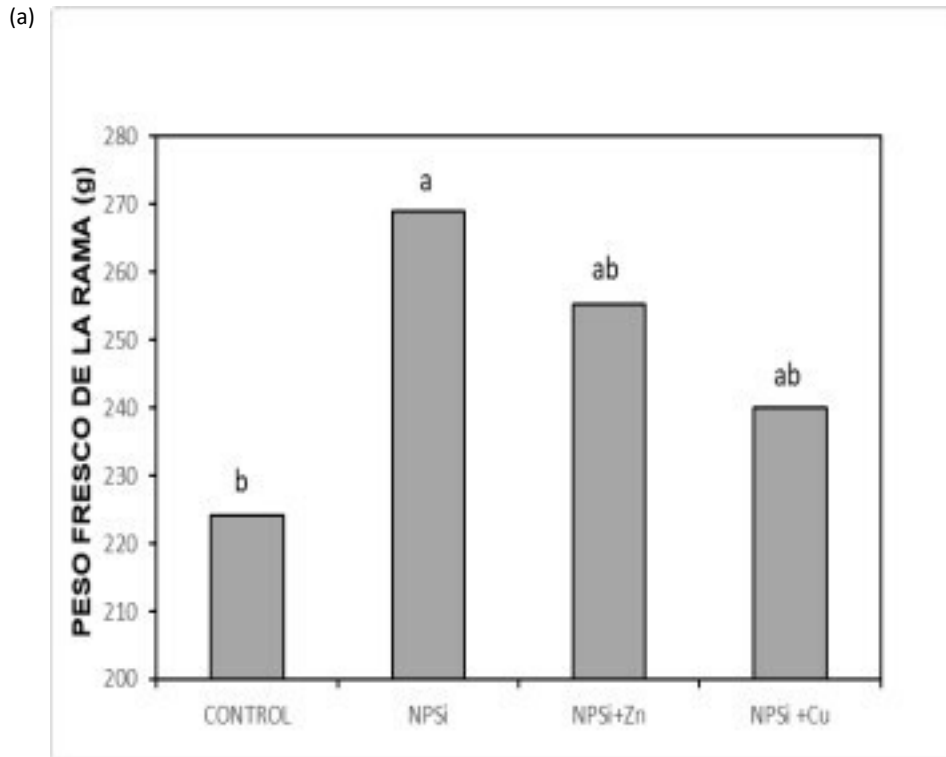


**FIGURA 3.** Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en parámetros de calidad de flores de cempasúchil. Columnas seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .

En comparación con las plantas del tratamiento control, el peso fresco de la flor y el número de flores no fueron afectados significativamente por los tratamientos aplicados (Cuadro 3). En contraste, el peso fresco de las ramas de las plantas tratadas con NPSi mostraron un aumento del 20% en comparación con las ramas del control, mientras que las plantas que recibieron aplicaciones de NPSi+Zn y de NPSi+Cu mostraron un peso de ramas similar al del control (Cuadro 3, Figura 3).

**CUADRO 3. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre parámetros de crecimiento en cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

Tratamiento	Peso fresco de flor (g)	Peso fresco de rama (g)	Numero de flores
CONTROL	11.70	224.22 b	22.92
NPSi	13.30	268.97 a	25.39
NPSi+Zn	13.02	225.37 ab	21.27
NPSi+Cu	12.82	239.08 ab	22.06
ANOVA	$p=0.248$	$p=0.050$	$p=0.110$

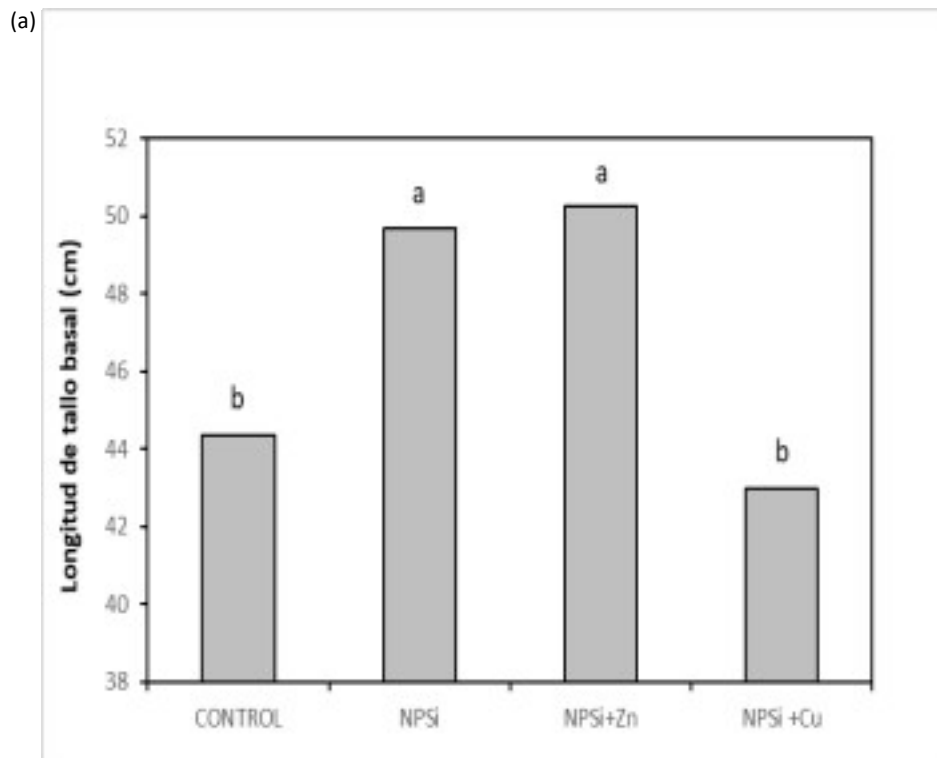


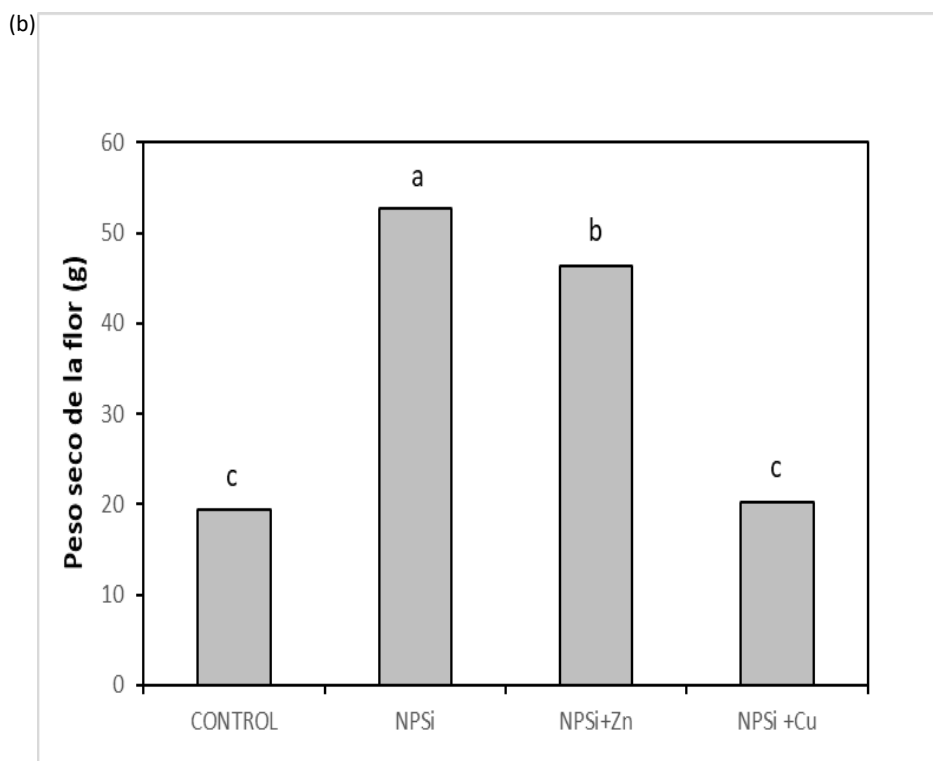
**FIGURA 4. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en el peso fresco de ramas (a) de cempasúchil. Columnas seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

El área foliar y el diámetro de tallo no fueron afectados significativamente por los tratamientos aplicados (Cuadro 4), sin embargo, las plantas que recibieron aplicaciones de NPSi y de NPSi+Zn mostraron una mayor longitud de tallo y el peso seco de la flor comparado con las plantas del tratamiento control. La longitud del tallo en plantas con NPSi superó a la de las plantas testigo en un 12%, en tanto que las que recibieron NPSi+Zn lo superaron en 13% (Cuadro 4, Figura 4a). En cambio, el incremento en el peso seco de las flores fue de 173% y 140%, respectivamente (Cuadro 4, Figura 4b). Con el aumento del peso seco de la flor se disminuyó el peso seco de la rama de los tratamientos que se les aplicó NPSi y NPSi+ Zn; esta disminución con el tratamiento NPSi fue de 44.4% mientras que el de tratamiento NPSi + Zn fue de 44.3%.

**CUADRO 4. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre parámetros de crecimiento en cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

Tratamiento	Peso seco rama (g)	Peso seco de flor (g)	Diámetro de tallo (mm)	Longitud de tallo (cm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )
Control	43.05 a	19.32 c	15.15	44.33 b	2455.1 b
NPSi	23.93 b	52.67 a	15.99	49.69 a	2925.5 a
NPSi+Zn	23.99 b	46.41 b	16.04	50.27 a	2812.9 ab
NPSi +Cu	44.10a	20.19 c	15.28	42.99 b	2611.0 ab
ANOVA	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.098$	$p = 0.003$	$p = 0.004$



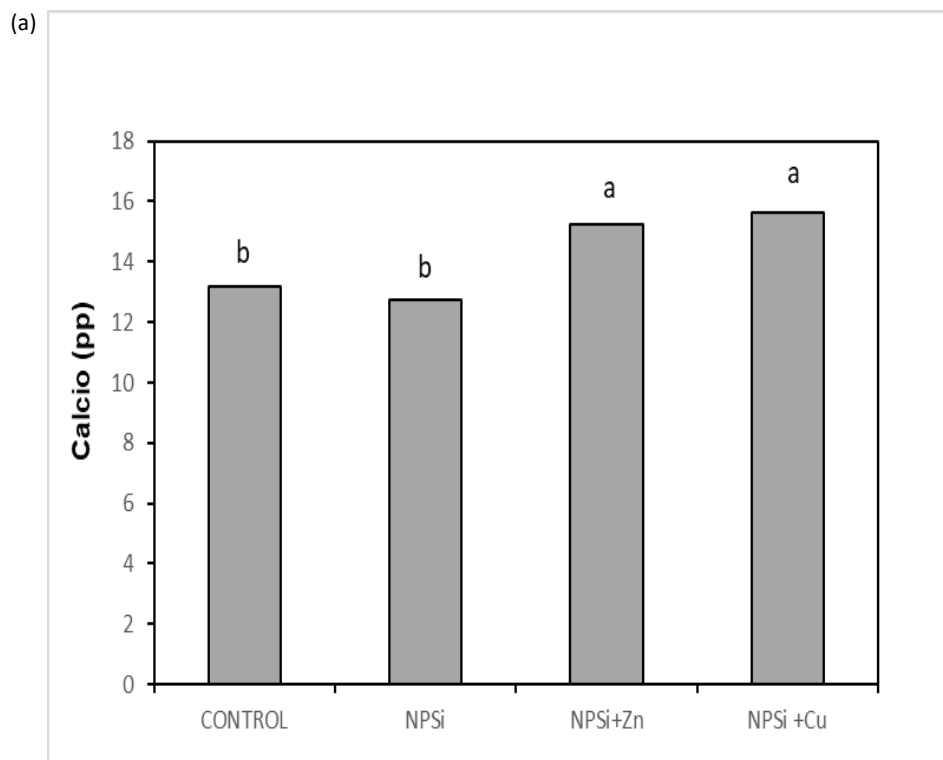


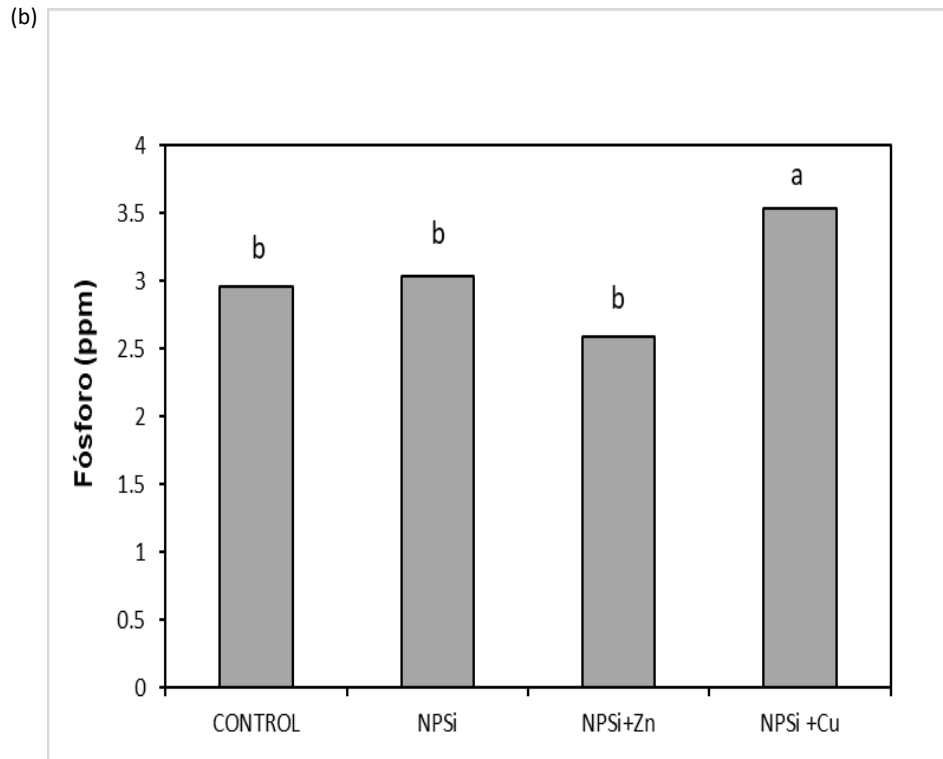
**FIGURA 5 Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en la longitud del tallo (a) y el peso seco de la flor (b) en cempasúchil. Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

La concentración de Calcio foliar aumentó en plantas que recibieron aplicaciones de NPSi+Zn y NPSi+Cu en 15% y 18%, respectivamente, en comparación de las plantas control (Cuadro 5, figura 5a). También se presentó un aumento del 19 % de P en plantas con el tratamiento NPSi+Cu (Cuadro 5, Figura 5b). LA concentración de potasio, magnesio y sodio no fue afectada significativamente por la aplicación de nanopartículas (Cuadro 5).

**CUADRO 5. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre la concentración de macronutrientes en hojas de cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

Tratamiento	Ca (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)	P (ppm)
Control	13.2 b	21.8 a	5.16 ab	0.37 a	2.96 b
NPSi	12.7 b	21.5 a	4.80ab	10.81 a	3.04 b
NPSi+Zn	15.2 a	22.0 a	4.76 b	0.80 a	2.59 b
NPSi+Cu	15.6 a	23.2 a	5.44 a	0.96 a	3.53 a
ANOVA	$p=0.0008$	$p=0.6143$	$p=0.0962$	$p=0.4281$	$p=0.0008$





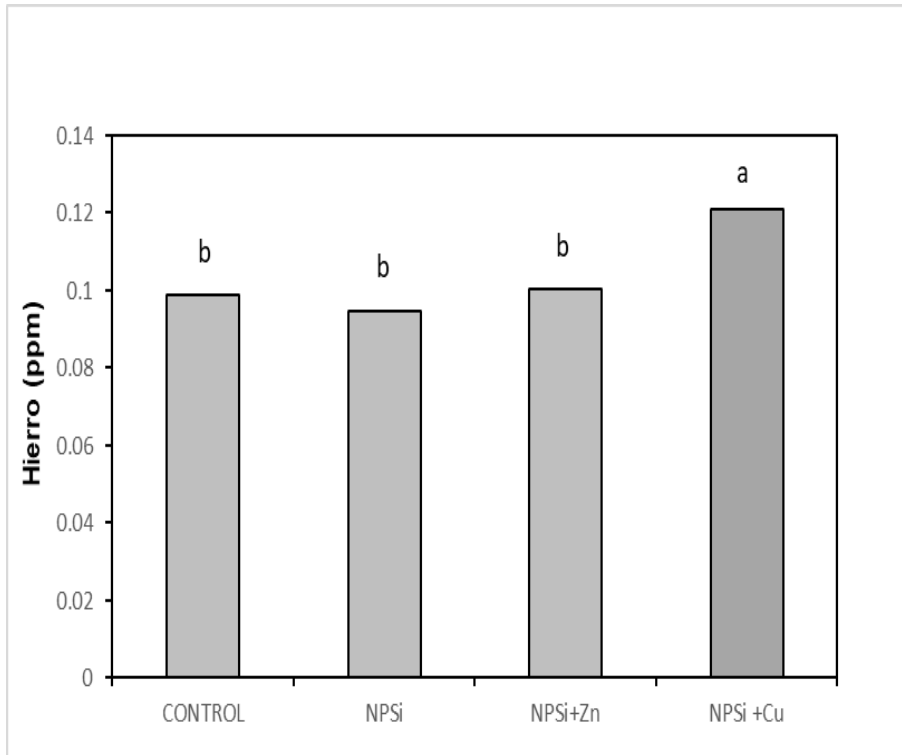
**FIGURA 6 Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en la concentración de calcio (a) y fósforo (b) en cempasúchil. Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

La concentración de hierro Fe aumentó en 23% en plantas con la aplicación de NPSi+Cu en comparación con el control (Cuadro 6, Figura 6a), mientras que el Si aumentó en 11% y 7% en plantas que recibieron aplicaciones de NPSi+Zn y NPSi+Cu un 11% y el 7% en comparación con el control, respectivamente (Cuadro 6, Figura 6b). Igualmente se presentó un aumento significativo en la concentración de Zn en plantas con los tratamientos de NPSi, NPSi+Zn y NPSi+Cu, los cuales fueron del 18%, 23%, y 41%, respectivamente /Cuadro 6, Figura 6c). La concentración de manganeso, cobre no fueron afectadas por la aplicación de nanopartículas (Cuadro 6).

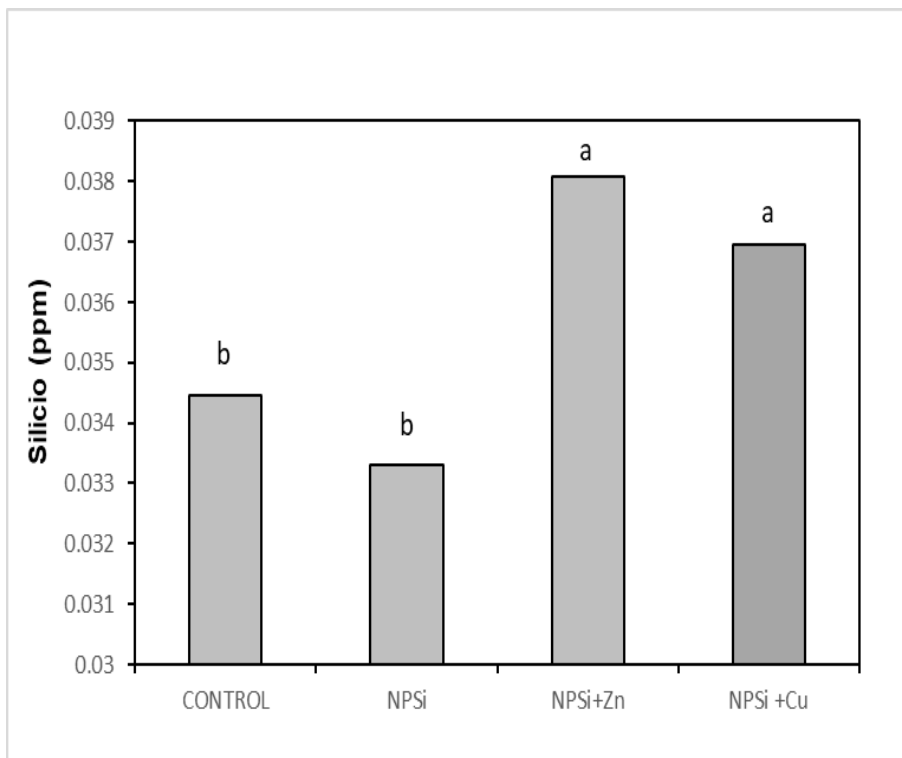
**CUADRO 6. Efecto de la aplicación de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) sobre la concentración de micronutrientes en hojas de cempasúchil. Promedios seguidos con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

Tratamiento	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Mo (ppm)	Si (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)
Control	0.09870 3 b	0.21264 a	0.024507 a	0.0344606 b	0.03582 a	0.09854 b
NPSi	0.09476 7 b	0.24244 a	0.020933 ab	0.0333144 b	0.01692 a	0.11633 ab
NPSi+Zn	0.10021 6 b	0.20376 a	0.009614 c	0.0380845 a	0.00806 a	0.12126 ab
NPSi +Cu	0.12100 5 a	0.23133 a	0.019683 b	0.0369506 a	0.02366 a	0.13943 a
ANOVA	$p=0.004$ 5	$p=0.806$ 3	$p=<0.000$ 1	$p=<0.0001$	$p=0.530$ 8	$p=0.021$

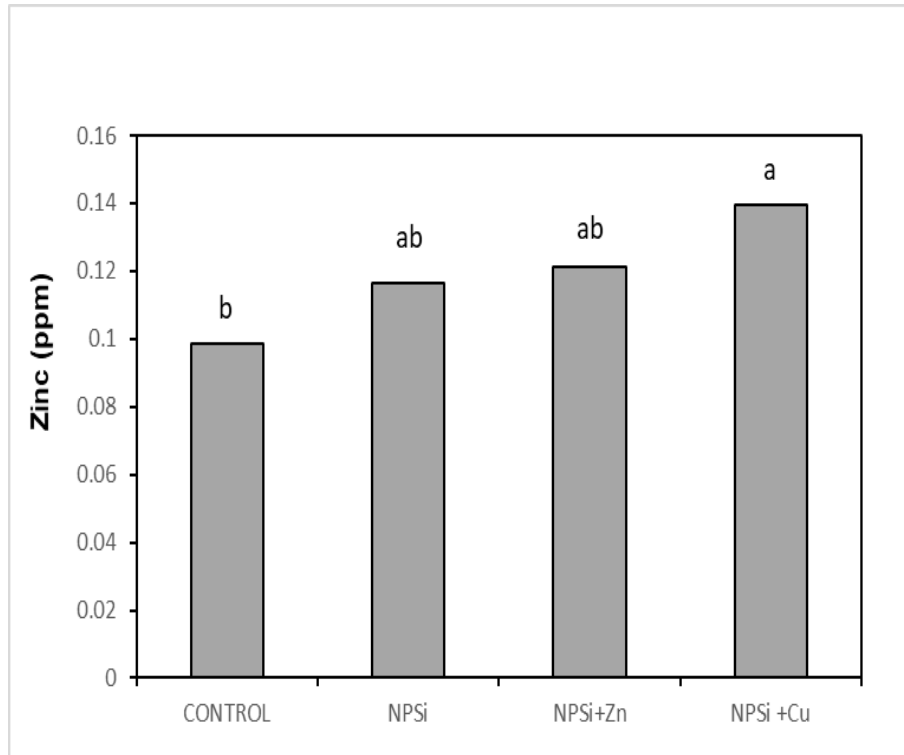
(a)



(b)



(c)



**FIGURA 7 Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NPSi) solas o combinadas con zinc (Zn) o cobre (Cu) en la concentración de hierro (a), silicio (b) y zinc (c) en campasúchil. Barras seguidas con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .**

## 7 DISCUSIÓN

En el presente estudio se demostró que la aplicación de NPs de Si mejoraron la calidad de las flores de cempaxúchitl producidas por las plantas. Cuando se asperjó NPSi se produjo un mejor color puesto que la luminosidad y el matiz se incrementaron, mientras cuando se aplicó junto con zinc (NPSi+Zn) aumentó la cromaticidad. Similarmente, las flores resultaron con tallos más largos y de mayor calibre puesto que la longitud y el diámetro del pedúnculo fueron incrementados al aplicar NPSi y NPSi+Zn, en tanto que el NPSi permitió una mayor biomasa seca de los tallos florales.

La aplicación combinada de NPSi de Si en el suelo y foliar en el mejoramiento del crecimiento, el período de floración y las características florales de la caléndula (*Tagetes erecta* L.) teniendo como un efecto significativo en la longitud del tallo floral con la concentración de 100 mg /L adicionado con aplicación foliar; los autores concluyeron que mientras aumentaban la dosis en el método de aplicación foliar, la longitud de tallo iba mejorando, por lo que es aplicación foliar es mejor que la aplicación del suelo (Eman y Nevien, 2021).

Otros autores señalan también indican diferencias positivas en la longitud del brote floral después de la aplicación por el método foliar, ya que concentraciones de 600 y 1000 mg L<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub>, las NP mostraron incrementos de 27.77% y 30.27%, respectivamente, en comparación con el control (Sánchez-Navarro et al., 2021

Karimian et al. (2021) estudiaron el impacto de las nanopartículas de Si (SiNPs) y el Si en las propiedades morfológicas, bioquímicas, el contenido nutricional en hojas y la vida en florero del nardo (*Polianthes tuberosa* L.). Ambos tratamientos, aplicados a 200 y 400 mg L<sup>-1</sup> por vía radicular o foliar, aumentaron los niveles de fósforo y Si, mejorando los carbohidratos, proteínas y varios parámetros morfológicos como el peso y volumen de las raíces, la longitud del tallo floral y el número de floretes.

En el estudio publicado por Hassanein et al. (2021) sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de las plantas de rosella (*Hibiscus sabdariffa* L.) se reportó que la aplicación de nano zinc condujo a aumentos significativos en el crecimiento, el rendimiento, los pigmentos fotosintéticos, así como el contenido de antocianinas, lo cual estuvo asociado con un mayor contenido de zinc en las hojas. Los valores más altos de todos los rasgos ocurrieron bajo el tratamiento de 10 ppm de nano zinc. Elsheery et al. (2020) reportaron

que los árboles de mango "Ewais" respondieron positivamente a diferentes niveles de nZnO (nanopartículas de óxido de zinc) y NPSi, cuando se aplicaron aspersiones foliares de nZnO a 50, 100 y 150 mg L<sup>-1</sup>, de NPSi a 150 y 300 mg L<sup>-1</sup>; el crecimiento de las plantas, la absorción de nutrientes y la asimilación de carbono mejoraron con estos tratamientos. Con el estudio de Prasad et al. (2012) en el cultivo de maní se demostró que el tratamiento con Zn a nanoescala (25 nm) a una concentración de 1000 ppm promovió la germinación de las semillas de maní, el vigor de las plántulas y un establecimiento temprano, lo que resultó en una floración anticipada y un mayor contenido de clorofila en las hojas, por lo que estas partículas demostraron ser efectivas para aumentar el crecimiento del tallo y las raíces. Esto respalda la investigación de Mohit et al. (2022) ya que en valeriana (*Valeriana officinalis* L.), achicoria (*Cichorium intybus* L.), withania (*Withania coagulans*) y equinácea púrpura (*Echinacea purpurea* L.), las plantas se rociaron foliarmente con ZnO NP (0, 1, 2 y 3 g L<sup>-1</sup>) durante 20, 40 y 60 días después del trasplante, reportando que la valeriana mostró que 3 g L<sup>-1</sup> de NPs de ZnO promovieron la mayor altura, longitud de raíz, número de hojas, volumen de raíces y peso fresco y seco de raíces y brotes. En achicoria, las plantas tratadas con 3 g L<sup>-1</sup> de NPs de ZnO tuvieron la mayor biomasa y pigmentos fotosintéticos, mientras que, en equinácea morada, 3 g L<sup>-1</sup> de NPs de ZnO aumentaron los valores morfológicos. En withania, las plantas tratadas con 3 g L<sup>-1</sup> de NPs de ZnO mostraron la mayor altura, longitud de raíz, número de hojas, volumen de raíces y pesos frescos y secos de raíces y brotes.

Araújo et al. (2022) informan que el Si reduce los efectos de la deficiencia de fósforo en plantas forrajeras. La falta de este nutriente afecta varias funciones, ya que el fósforo es clave en el metabolismo energético y en la producción de ATP y ADP. El mismo autor menciona que el Si atenúa la carencia nutricional de calcio en plantas forrajeras. Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron que la concentración de fósforo se incrementa significativamente al realizar aplicaciones foliares de NPSi+Cu, lo cual coincide con lo señalado por Araújo et al. (2022). En otro artículo publicado por Silva y Prado (2021) mencionan que se comprobó que las plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) tratadas con Si presentaron una mayor capacidad para absorber fósforo, en comparación con aquellas que no recibieron dicho elemento; sin embargo, la inclusión de

Si en la solución nutritiva tuvo un impacto positivo claro, reflejado en un crecimiento significativamente superior en las plantas de sorgo tratadas.

De acuerdo con Buchelt et al. (2020), se corroboró que en plantas forrajeras la aplicación de Si en plantas con nutrición completa generó incrementos en la masa seca de los brotes del 23%, 36%, 21% y 30% en la primera, segunda, tercera cosecha, y en el total acumulado, respectivamente. En las plantas con deficiencia de potasio, el Si estimuló aumentos del 51%, 39% y 39% en las mismas etapas. Para las plantas con deficiencia de calcio, se registraron mejoras del 25%, 38% y 33% en la masa seca de los brotes en la primera, tercera y total de las cosechas. En cuanto a la deficiencia de magnesio, la inclusión de Si impulsó incrementos del 20%, 17% y 18% en la segunda, tercera y evaluación, respectivamente, lo cual no fue observado en el presente estudio. En general, las aplicaciones de NPSi+Cu ocasionó un aumento en el Si contenido en los tejidos vegetales, así como de zinc y hierro, mejorando el estatus nutrimental del cempasúchil.

## **8 CONCLUSIONES**

Las aplicaciones de NPSi incrementaron la calidad de las flores de cempasúchil ya que estuvo relacionado con una mejoría en la coloración y en la longitud y calibre de los tallos florales. Resultados similares fueron obtenidos con la aplicación de NPSi+Zn. La aplicación de NPSi+Cu permitió mejorar el estado nutricional de las plantas ya que se elevó la concentración de hierro, zinc y Si, así como de calcio y fósforo.

## 9 LITERATURA CITADA

- Araújo, W.B.S., Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Souza Rocha, A.M. (2022). El silicio mitiga el estrés nutricional de la deficiencia de nitrógeno, fósforo y calcio en dos plantas forrajeras. *Sci Rep* 12, 6611. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10615-z>
- Buchelt, A.-C., Marques Teixeira G.C., Silva Oliveira, K., Souza Rocha, A.M., de Mello Prado, R., Caione, G. (2020). Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 2020
- Cabezas Gutiérrez, A., Camus Araya, F., Condori Wladimir, E., González Vallejos, F.A., Mazuela Águila, P. (2022). El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *Idesia (Arica)*, 40(1), 129-133. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000100129>
- Castellanos González, L., de Mello Prado, R., Silva Campos, C. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36 (Supl. 1), 16-24. Recuperado en 09 de abril de 2025, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362015000500002&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500002&lng=es&tlng=es)
- Elsheery, N. I., Helaly, M. N., El-Hoseiny, H. M., Alam-Eldein, S. M. (2020). Óxido de zinc y nanopartículas de silicona para mejorar el mecanismo de resistencia y la productividad anual de los árboles de mango estresados por la salinidad. *Agronomía*, 10(4), 558. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040558>
- Eman A. Attia, Nevien Elhawat. (2021), Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (*Tagetes erecta* L.), *Scientia Horticulturae*, 282, 110015, ISSN 0304-4238, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423821001229>)
- Silva, J. L. F. da, & Prado, R. de M. (2021). Dilucidar los mecanismos de acción del silicio en la mitigación de la deficiencia de fósforo y la mejora de su respuesta en plantas de sorgo. *Revista de Nutrición Vegetal*, 44(17), 2572–2582. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918155>

- Galindo-Guzmán, Alma Patricia, Fortis-Hernández, Manuel, De La Rosa-Reta, Claudia Verónica, Zermeño-González, Héctor, Galindo-Guzmán, Magdalena. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(spe28), 299-308. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284>
- Giménez Martínez J.M. 2019. Tecnología específica en hortofruticultura jardinería. Trabajo técnico- experimental. pp. 67
- González-MoscOSO, M., Martínez-Villegas, N.V., Meza-Figueroa, D., Rivera-Cruz, M.C., Cadenas-Pliego, G., Juárez-Maldonado, A.. (2021). Las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> mejoran la absorción de nutrientes en plantas de tomate desarrolladas en presencia de arsénico. *Revista Bio Ciencias*, 8, e1084. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1084>
- Hassanein, Y.Z., Abdel-Rahman, S.S.A., Soliman, W.S. et al. (2021). Crecimiento, rendimiento y calidad de las plantas de rosella (*Hibiscus sabdariffa* L.) afectadas por tratamientos con nano zinc y bioestimulantes. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 62. 1-12. 10.1007/s13580-021-00371-w.
- Hernández-Salinas M., Valdez-Aguilar L. A., Alia-Tejacal I., Alvarado-Camarillo D., Cartmill A. D. (2021). Silicon Enhances the Tolerance to Moderate NaCl-salinity in Tomato Grown in a Hydroponic Recirculating System. *Journal of Plant Nutrition*. 45:1-4.
- Juárez Leyte, J.A (2023). Temporada de cempasúchil marvel orange en “las ánimas”. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/f9d88e65-0a4a-4aa8-890d-216ce2aa553c/251541.pdf>
- Karimian, N., Nazari, F., Samadi, S. (2021). Propiedades morfológicas y bioquímicas, contenido de nutrientes en las hojas y vida en florero de nardo (*Polianthes tuberosa* L.) afectado por aplicaciones radiculares o foliares de silicio (Si) y nanopartículas de silicio (SiNPs). *Regulación del crecimiento de las plantas* 40, 2221–2235. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10272-4>
- Lira Saldivar, R.H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G., Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>

- Lisa M. (2023). Origen y significado del cempasúchil. 1 de noviembre de 2023. <https://azapflores.com>
- Mario M. (2023). Cempasúchil, entre la tradición y la innovación... ¿Sabías que?., Boletín cerebral Nov 20, 2023. <https://boletincerebral.com>
- Mohit Rabary, P., Movahedi, Z., Ghabooli, M., Rostami, M. (2022). Efectos de la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc sobre los rasgos de varias plantas medicinales en condiciones de sistema aeropónico. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Hortícola, 9(4), 445-452. doi: 10.22059/ijhst.2021.316933.433
- Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., ... Pradeep, T. (2012). Efecto de las partículas de óxido de zinc a nanoescala en la germinación, crecimiento y rendimiento del cacahuete. Revista de Nutrición Vegetal, 35(6), 905–927. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663443>
- Raya Pérez, J.C., Aguirre Mancilla, C. L.(2012). El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. ConCiencia Tecnológica Núm. 43 Pág. 42-46.
- Rezghiyan, A., Esmaeili, H., Farzaneh, M. (2025). La aplicación de nanosilicio cambia los atributos morfológicos y las composiciones de aceites esenciales del cáñamo (*Cannabis sativa* L.) bajo estrés por déficit de agua. *Sci Rep* 15, 3400. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87611-6>
- Sánchez-Navarro, J.F., González-García, Y., Benavides-Mendoza, A., Morales-Díaz, A.B., González-Morales, S., Cadenas-Pliego, G., García-Guillermo, M.D.S.; Juárez-Maldonado, A. (2021). Silicon nanoparticles improve the shelf life and antioxidant status of *Lilium*. *Plants* 10, 2338. <https://doi.org/10.3390/plants10112338>
- Serrato-Cruz M A, Díaz-Cedillo, F., Barajas-Pérez, J.S. (2006). Poblaciones silvestres de *Tagetes filifolia* Lag. en el centro-sur de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29 (2):7-12. Cempoalxóchitl (*Tagetes* spp.). <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/cempoalxochitltagetes-spp>
- Tejeda Villagómez, E.A., Hernández-Adame, L., Nieto Navarro, F., Anzaldo Montoya, M. (2023). Nanopartículas de silicio como vehículos de transporte para moléculas de interés agrícola. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y*

nanotecnología, 16(30), e00064. Epub 14 de agosto de 2023.<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69732>

Vázquez-Núñez, E. (2023). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 16(30), e00061. Epub 14 de agosto de 2023.<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704>

Zhang Y., Han W., Feng R., Hu Y., Guo J., Gong H. (2016). Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*. 7(196):1-2.