

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



El Silicio Aplicado Foliarmente y su Efecto en el Crecimiento y Rendimiento en
Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en un Sistema de Cultivo sin Suelo bajo
Invernadero

Por:

FELIPE EDUARDO ANTONIO CRUZ

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México

DICIEMBRE 2025

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

El Silicio Aplicado Foliarmente y su Efecto en el Crecimiento y Rendimiento en
Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en un Sistema de Cultivo sin Suelo bajo
Invernadero.

POR:

FELIPE EDUARDO ANTONIO CRUZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Jurado Examinador:

Dra. Daniela Alvarado Camarillo
Director

M.C. Adolfo Baylon Palomino
Director externo

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Vocal

Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Vocal

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

El Silicio Aplicado Foliarmente y su Efecto en el Crecimiento y Rendimiento en
Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en un Sistema de Cultivo sin Suelo bajo
Invernadero.

POR:

FELIPE EDUARDO ANTONIO CRUZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Jurado Examinador:

Dra. Daniela Alvarado Camarillo
Director

M.C. Adolfo Baylon Palomino
Director externo

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Vocal

Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Vocal

Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo el contenido que se encuentra que se encuentra en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y es propiedad del autor principal, quien asume la responsabilidad y declara bajo protesta de decir la verdad, que no incurrió en plagio ni en otras prácticas académicas indebidas tales como: la reproducción de textos o fragmentos sin citar la fuente o al autor original, reproducción de un texto propio que se haya publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); adquirir de otras maneras la información como comprando, de forma robada o tomando prestado los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas; citar de manera literal sin usar las comillas; usar ideas de otro autor sin dar el crédito que le corresponde; así como emplear material digital como son los videos, imágenes, videos, ilustraciones, gráficos, mapas o datos sin dar mención del autor o la fuente original.

Así mismo tengo el conocimiento de que cualquier uso distinto al académico como la reproducción, edición, modificación con otros fines de lucro será objeto de acciones legales por parte del titular de los derechos de autor. En consecuencia, de lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio que pudiera detectarse y declaramos que este trabajo no ha sido presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Pasante

FELIPE EDUARDO ANTONIO CRUZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Agradezco profundamente a Dios por haberme permitido alcanzar esta meta, por brindarme la fortaleza e iluminarme en los momentos complicados en mi desarrollo académico y por guiarme en esta etapa de mi vida, y así como en las que están por venir.

A mi Alma Terra Mater

Expreso una profunda gratitud a esta gran casa de estudios por haberme permitido formar parte de ella y por brindarme todos sus servicios y apoyo que hicieron de mi estancia una mejor experiencia. Gracias a esta institución tuve la oportunidad de conocer a grandes amigos y profesores que me acompañaron y apoyaron en todo momento durante mi trayectoria en la universidad.

A mis asesores

A la Dra. Daniela Alvarado Camarillo le agradezco la confianza que me tuvo a mí al otorgarme este proyecto y por su guía constante durante el proyecto, así como su orientación en las clases y en la elaboración del presente documento y valoro especialmente la calidez como persona, su amistad y los buenos momentos compartidos.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar agradezco sus valiosas enseñanzas y por su constante disposición para asesorarme y orientarme a lo largo de este proyecto, contribuyendo mi formación durante este proceso.

DEDICATORIA

Con mucho amor y dedicación a mis padres y hermano.

Alberta Cruz Juana e Inocencio Antonio Reyes y hermano Marco Antonio Cruz.

Expreso mi más sincero agradecimiento ya que a lo largo de este camino estuvieron siempre a mi lado dándome motivación constante y enseñándome a no rendirme, gracias por ser mi fuente de inspiración para poder alcanzar esta meta, por confiar en mí y por todo su esfuerzo y sacrificio.

A mis abuelos y abuelas.

Mardonio Cruz Cruz (†), Felipe Antonio Catarina, María Juana Nicolás Catarina y Leonila Reyes Osorio.

A mis abuelos, quienes con su amor incondicional y sabiduría me inculcaron los valores que hoy guían cada uno de mis pasos. Este logro también les pertenece, gracias por ser mi pilar y la inspiración para no rendirme.

Agradezco profundamente su apoyo constante, su paciencia y la confianza que depositaron en mí y aunque mi abuelo Mardonio ya no este físicamente conmigo, su presencia estuvo en el inicio de este recorrido y su fe en mi permanece como una de mis mayores motivaciones.

A mis Tíos y Tías.

Por la motivación y consejos que obtuve de su parte.

A mi primo.

Kevin Estopier Antonio

A mi primo Kevin, por la orientación y apoyo incondicional. Gracias a ti conocí esta gran universidad; como egresado de la UAAAN, me compartió su experiencia, me motivo y me guio durante el proceso de ingreso. Su orientación fue clave para que hoy forme parte de esta institución.

A mis amigos

A mi círculo de amigos, Carlos Rodríguez, Ana Belén, Lesther Martínez, Daniel Cano, Lisa Pérez, Gisell Hernández, Ramsés Molina, Andrea Montero, Daysi Mejía, Diana Muños, Fernanda Torres y a mis amigos de arrollo hondo, por su amistad sincera, sus consejos y el apoyo mutuo que nos brindamos en las circunstancias más complicadas de la carrera. Gracias también por todos los buenos momentos que compartimos a lo largo de este camino, los cuales hicieron que este proceso fuera mucho más llevadero y lleno de aprendizajes.

INDICE

Contenido

INDICE DE CUADROS	xi
INDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Cultivo del tomate	3
2.3 Taxonomía del cultivo	3
2.4 Características botánicas del tomate	3
2.5. Morfología de la planta	4
2.5.1. Tallo.....	4
2.5.2. Hoja	4
2.5.3. Flor	4
2.5.4. Fruto	4
2.5.5. Sistema radicular	5
2.6. Requerimientos del cultivo de tomate en invernadero	5
2.6.1 Temperatura	6
2.6.2. Humedad	6
2.6.3. Luminosidad	7
2.7 Clasificación comercial del tomate.....	7
2.8 Producción de tomate a nivel mundial y en México	7
2.9. Manejo del tomate en cultivo sin suelo	7
2.10. Sustratos	8

2.10.1 Sustrato inerte	8
2.10.2 Peat moss.....	8
2.10.3 Perlita	8
2.10.4 Fibra de coco.....	9
2.11. Producción de tomate en invernadero	9
2.11.1 Cultivo sin suelo	9
2.11.2 Nutrición mineral del tomate en invernadero.	9
2.11.3 Elementos benéficos	10
2.11.4 Silicio	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Sitio experimental	13
3.2. Material vegetal utilizado	13
3.3. Sustrato Utilizado.....	13
3.4. Trasplante.....	14
3.5. Riego	14
3.6. Poda	14
3.7. Tutorio	15
3.8. Cosecha.....	15
3.9. Tratamientos.....	15
3.10. Muestreo de sustrato para determinar pH y CE.....	16
3.11. Control de temperatura	17
3.12. Control de plagas.....	17
3.13. Variables evaluadas.....	17
3.13.1 Rendimiento	17
3.13.2 Variables de calidad de fruto	17

3.13.3 Variables agronómicas	18
3.14. Diseño experimental	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	20
4.1. Rendimiento del fruto.....	20
4.2. Diámetro del fruto	21
4.3 Longitud del fruto	22
4.4. Solidos solubles totales	23
4.5. Firmeza del fruto.....	24
4.6. Peso fresco del tallo.....	25
4.7. Peso fresco de la hoja	27
4.8. Diámetro basal del tallo	28
4.9. Longitud del tallo.....	30
4.10. Peso seco de la planta.....	31
4.11. Peso fresco del fruto	32
V. CONCLUSIONES	34
VI. LITERATURA CITADA.....	35

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía del tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	3
Cuadro 2. Tratamientos de silicio aplicados en el experimento.....	16

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Invernadero del Departamento de Ciencias del Suelo UAAAN (extraído el 26 de septiembre del 2025).	13
Figura 2. Sustrato utilizado (Bolis) con dimensiones de 1.20 m de largo, 30 cm de ancho y 25 cm de alto.	14
Figura 3. Diseño de bloques completamente al azar	19
Figura 4. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el rendimiento del fruto en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	21
Figura 5. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el diámetro de fruto en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	22
Figura 6. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre la longitud de fruto en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	23
Figura 7. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre los sólidos solubles totales en el fruto en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	24
Figura 8. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre la firmeza de fruto en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	25
Figura 9. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso fresco de tallo en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	27
Figura 10. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso fresco de hojas en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	28
Figura 11. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el diámetro basal de tallo en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	29

Figura 12. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre la longitud de tallo en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	31
Figura 13. . Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso seco de la planta completa en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	32
Figura 14. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso fresco en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.....	33

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una hortaliza de mayor importancia económica a nivel global debido a su amplia difusión comercial. Entre los elementos benéficos que favorecen el desarrollo de los cultivos se encuentra el silicio, el cual influye positivamente en la producción, incluso bajo condiciones de estrés biótico o abiótico. Aunque no es un nutrimento primordial para la supervivencia de las plantas, se ha demostrado que su presencia mejora la resistencia frente a enfermedades y reduce la toxicidad de otras sustancias. El presente trabajo de investigación se realizó en el invernadero del Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El objetivo principal fue evaluar la concentración de silicio más adecuada para obtener el mejor rendimiento del tomate variedad El Cid, cultivado en un sistema sin suelo bajo condiciones de invernadero. Los objetivos específicos fueron determinar la dosis adecuada de silicio a fin de aumentar la calidad y productividad en el cultivo, así como identificar la concentración que favorezca el crecimiento de las plantas. Para ello, se aplicaron diferentes concentraciones de silicio de forma foliar dos veces por semana, en concentraciones de 150 mg/L, 300 mg/L y un testigo sin aplicaciones de silicio. Las respuestas medidas incluyeron la producción de fruto, el tamaño del fruto, sólidos solubles totales, la rigidez del fruto, peso fresco del fruto, peso fresco del tallo y de las hojas, diámetro del tallo, longitud y biomasa seca de la planta. Los análisis indicaron que se obtuvo una mayor producción con las aplicaciones de 150 mg/L, alcanzando un aumento del 12% comparado al tratamiento control. De igual manera, este tratamiento mostró una respuesta favorable en variables como el peso fresco del tallo, el diámetro basal del tallo y la longitud del tallo. Por otro lado, la concentración de 300 mg/L presentó mejores resultados en la longitud del fruto, los sólidos solubles totales, la firmeza del fruto, el peso fresco de la hoja y el peso seco de la planta completa.

Palabras clave: Elementos benéficos, Cultivos hidropónicos, calidad de fruto, cultivo en slabs.

I. INTRODUCCIÓN

México o Perú son los probables centros de origen y domesticación del tomate *Solanum lycopersicum* L. ya que en estas regiones es en donde hay una mayor concentración genética (Ríos Osorio et al., 2014). El tomate se considera dentro de las hortalizas más demandadas debido a su gran difusión comercial (Kumar et al., 2020), siendo uno de los principales cultivos en México y a nivel mundial, se calcula que en el 2024 la producción mundial alcanzó aproximadamente 45.8 millones de toneladas (Redagricola, 2025). En el caso de México está dentro de los principales cultivos de exportación con un volumen nacional de tomate es de 3,636, 927.46 toneladas. (SIAP,2024).

De manera complementaria, la superficie destinada a la agricultura protegida creció de forma exponencial, en donde alcanzó 77,417 hectáreas, en las cuales el tomate abarcó una producción del 95.8 % con 1 millón 958 mil toneladas en el 2007, mientras que en el 2022 creció a 3.8 millones de toneladas (Perea, 2023).

Para lograr este nivel de productividad, es fundamental la nutrición vegetal. Existen nutrimentos esenciales para un adecuado desarrollo de los cultivos como para el tejido vegetal como son los macronutrientes en mayor concentración y micronutrientes en menor concentración; entre estos elementos esenciales existen los beneficiosos para las plantas ya que estimulan el crecimiento, pero no son esenciales para su desarrollo, aunque podrían serlo, pero para especies específicas (Intagri, 2016)

Para ello, el objetivo del presente estudio fue determinar los efectos del silicio como elemento beneficioso en el tomate cultivado en un sistema de cultivo sin suelo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la concentración de silicio adecuada para el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum L*) variedad. El Cid en cultivo sin suelo bajo invernadero.

1.1.2 Objetivo específico

Determinar la concentración adecuada de silicio para elevar el rendimiento en el cultivo de tomate.

Determinar la concentración de silicio que mejore el crecimiento de planta de tomate.

1.2. Hipótesis

Con el silicio aplicado vía foliar, las plantas de tomate se verán favorecidas dependiendo de la concentración.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Cultivo del tomate

El tomate se ubica dentro de la familia Solanáceae, esta es una especie semiperene cuya fase de producción comienza en el primer año de establecimiento y puede extenderse hasta el segundo año. Esto puede variar según la altitud de cada zona, ya que en las zonas de mayor elevación tienden a prolongarse (Feican et al., 2016).

2.2 Origen

El tomate no tiene un origen bien definido, pero se han formado varias hipótesis; se dice que América es el centro de origen ya que, en México, centro y Sudamérica, hay mucha diversidad genética, tanto de las que son cultivadas y de forma ruderal (Rios et al., 2014).

2.3 Taxonomía del cultivo

En el Cuadro 1 se muestra la ubicación sistemática del tomate.

Cuadro 1. Taxonomía del tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Reino	Plantae
División	Magnoliopsida
subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Clase	Magnoliopsida
Familia	Solanaceae
Genero	<i>Solanum</i>
Especie	<i>lycopersicum</i>

(Semillaria, 2015)

2.4 Características botánicas del tomate

El tomate es reconocido por su relevancia comercial a nivel mundial. También se le conoce como jitomate, tomate o tomatillo.

Es una planta herbácea que alcanza hasta 3 metros de altura aproximadamente, tiene un porte erecto o decumbente. Presenta ramas verdes cubierta por tricomas blanquecinos que están de manera dispersa en la planta. Sus hojas presentan de 8 a 35 cm de longitud y de 3 a 10 cm de anchura, son hojas compuestas, sus laminas

foliares presentan formas ovaladas con márgenes dentados o en algunas ocasiones lobuladas.

Su inflorescencia mide entre 3.5 y 10 cm de largo y pueden llegar a tener hasta 5 a 15 flores dispuestas en sus racimos y sus semillas son pequeñas de hasta 0.35 cm de largo, aplanadas y lisas de un color amarillento o café (Universidad Veracruzana, 2020).

2.5. Morfología de la planta

2.5.1. Tallo

El objeto en cuestión presenta características de grosor considerable, una superficie pubescente, una forma angulosa y una tonalidad verde. Su ancho oscila entre 2 y 4 cm, presentando un grosor menor en la parte superior. En el tallo principal se desarrollan tallos secundarios, nuevas hojas y racimos florales. En la porción distal, se localiza el meristemo apical, del cual emergen nuevos primordios florales y foliares (Monardes, 2009).

2.5.2. Follaje

Las hojas presentan una estructura pinnada y compuesta. El espécimen presenta de siete a nueve folíolos peciolados, con dimensiones que oscilan entre 4 y 60 mm de longitud y entre 3 y 40 mm de ancho. Estos folíolos son lobulados y presentan un borde dentado, organizándose de manera alterna y opuesta. Generalmente, su color es verde, con una superficie glanduloso-pubescente en el haz y una tonalidad cenicienta en el envés. El tallo presenta un recubrimiento de pelos glandulares dispuestos de manera alternada (Monardes, 2009).

2.5.3. Flor

Es perfecta y simétrica. Los sépalos, los pétalos y los estambres se insertan en la parte basal del ovario. El cáliz y la corola están compuestos por 5 o más sépalos y 5 pétalos de color amarillo, los cuales se disponen de manera helicoidal. Los órganos reproductivos están constituidos por 5 o 6 estambres que se disponen de

manera alternada con los pétalos. El ovario presenta una estructura compuesta por dos o más segmentos (Infoagro Systems, 2016).

Las flores se organizan en inflorescencias racimosas, presentándose en agrupaciones que oscilan entre 3 y 10 en las variedades comerciales de tomate de tamaño mediano y grande. Las inflorescencias se localizan en las axilas, presentándose cada 2 o 3 hojas (Gutiérrez et al., 2004). La formación de la primera flor en la yema apical es un fenómeno habitual, mientras que las flores subsiguientes emergen en posiciones laterales y por debajo de la primera. Estas flores se disponen alrededor del eje principal, siendo el pedicelo el elemento que conecta la flor con el eje floral (Infoagro Systems, 2016).

2.5.4. Fruto

Se trata de una baya que puede ser bi o plurilocular, con una forma que puede ser subesférica, globosa o alargada. Su peso varía considerablemente, oscilando entre unos gramos y 600 g. El fruto se compone del pericarpio, el tejido placentario y las semillas. En su estado inmaduro, presenta un color verde, mientras que, al alcanzar la madurez, adquiere un color rojo (EDIFORM, 2006). Se identifican cultivares de tomate que presentan frutos en una variedad de colores, incluyendo amarillo, rosado, morado, naranja y verde, entre otros.

El fruto alberga semillas, las cuales presentan un tamaño promedio de 5 x 4 x 2 mm. Se presentan en forma ovoidal, con una estructura comprimida, y pueden ser lisas o presentar una notable vellosidad. Su coloración es parduzca y se encuentran inmersas en una sustancial cantidad de masa mucilaginosa. Cada semilla se compone de tres estructuras principales: el embrión, el endospermo y la cubierta seminal (Arteaga, 2015).

2.5.5. Sistema radicular

La raíz desempeña un papel fundamental en el anclaje de la planta al suelo o al sustrato, así como en la absorción y el transporte de nutrientes y agua hacia las partes superiores de la planta. El sistema radicular se compone de una raíz

principal, así como de raíces secundarias y adventicias. Estas últimas, que son numerosas y robustas, generalmente no exceden los 30 cm de profundidad (Monardes, 2009).

El interior de la raíz se compone de tres estructuras principales: la epidermis, el córtex y el cilindro vascular. La epidermis presenta estructuras pilosas que facilitan la absorción de agua y nutrientes. Por su parte, el córtex y el cilindro vascular desempeñan un papel fundamental en el transporte de dichos nutrientes (Infoagro Systems S.L., 2016).

2.6. Requerimientos del cultivo de tomate en invernadero

2.6.1 Temperatura

La temperatura desempeña un papel fundamental en el desarrollo del tomate, dado que afecta diversas funciones vitales de la planta, tales como la fotosíntesis, la transpiración y la germinación, entre otras. Cada especie vegetal presenta, en cada etapa de su ciclo biológico, una temperatura óptima (Rodríguez et al., 1997). La temperatura óptima para el desarrollo del tomate se sitúa entre 20 y 30 grados Celsius en el día, y entre 15 y 17 grados Celsius por la noche. Se ha observado que temperaturas superiores a 30-35 grados Celsius impactan negativamente en la fructificación de la planta, así como en el desarrollo de los óvulos y en el crecimiento general de la planta. Las temperaturas inferiores a 12-15 grados Celsius inciden en el desarrollo de la planta. La maduración de los frutos está influenciada significativamente por la temperatura, afectando tanto la precocidad como la coloración. En este sentido, se ha observado que las temperaturas cercanas a 10 grados y superiores a 30 grados generan tonalidades amarillentas (Caldari, 2007).

2.6.2. Humedad

La humedad relativa óptima del tomate oscila entre un 80% y un 60%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y afecta al fruto de manera que se agrieta y dificulta su fecundación, porque el polen se

apelmaza y así abortando las flores. Una humedad relativa baja dificulta la fijación del polen en el estigma de la flor (Caldari, 2007).

2.6.3. Luminosidad

La luminosidad afecta la fotosíntesis y la respuesta fotoperiodica, crecimiento de los tejidos, floración y la maduración de los frutos (Rodríguez et al., 1997).

2.7 Clasificación comercial del tomate

Los tomates se pueden clasificar en 4 diferentes tipos comerciales:

Redondos, asurcados, oblongos o alargados, tomate de tipo cereza y coctel. Aunque también pueden ser clasificados por su desarrollo y estado de madurez del fruto según su coloración, por la firmeza de la pulpa y por el diámetro del fruto en donde hay diámetros máximos y mínimos (Codex Stan, 2007).

2.8 Producción mundial y en México

En años recientes, la producción del tomate en el mundo ha ido incrementando; uno de los mayores productores fue China con aproximadamente 25,000,000 de toneladas junto a otros países productores con cifras mayores a 5,000,000 de toneladas. La producción mundial, de acuerdo a los datos de Yara (2025), es de 27 t/ha, en donde la mayor parte de la producción por área se da en los invernaderos europeos con una producción mayor a los 700 t/ha por temporada (Yara, 2025).

México es el líder mundial en exportar tomate, con un valor del 33% de exportaciones globales (Álvarez et al., 2017). Los líderes en la producción del tomate en la República Mexicana son Tamaulipas, Chiapas, Sinaloa, Michoacán, Jalisco, y Veracruz, los cuales aportan un 38.8 % del volumen en México (SADER, 2020).

2.9. Manejo del tomate en cultivo sin suelo

El cultivo en que no se emplea es un sistema de producción vegetal en el que no se utiliza el suelo como un medio de crecimiento. En su lugar las plantas se desarrollan sobre sustrato o en solución nutritiva.

De manera más práctica, los sistemas de hidroponía se clasifican en dos tipos: los que utilizan solución nutritiva con agua y los que emplean sustratos como son los bolis (Baixauli y Aguilar, 2002).

2.10. Sustratos

2.10.1 Sustrato inerte

Esta técnica agrícola no depende totalmente del suelo, ya que los materiales que se emplean son completamente inertes como perlita, lana de roca o fibra de coco. Dichos materiales no aportan nutrientes al cultivo solo cumplen con la función de proporcionar soporte físico al sistema radicular de las plantas. La nutrición vegetal se suministra a través de soluciones nutritivas de forma controlada (Plataforma tierra, 2023)

2.10.2 Peat moss

Este es un tipo de musgo perteneciente al género *Sphagnum*, el cual tiene entre 150 y 350 especies diferentes que se les denomina como musgos de turbera. Estas se llegan a desarrollar en zonas pantanosas o humedales.

El peat moss también se le conoce como musgo de turba, es un material orgánico que se utilizado ampliamente en la agricultura por sus múltiples propiedades que aporta a los cultivos como es la retención de humedad, retención de nutrientes entre otras propiedades (Valencia, 2024).

2.10.3 Perlita

La perlita es un mineral de origen natural que cuando es sometida a un proceso de expansión térmica adquiere estructura porosa y ligera. Debido a su reacción con minerales en el suelo y con los fertilizantes, es considerado un material ideal para su uso como sustrato en los sistemas de agricultura como un componente en la formulación de sustratos para las diversas especies de hortalizas y ornamentales.

En la preparación de los sustratos, la perlita optimiza la aireación y facilita el drenaje del agua y también previene la compactación del medio del cultivo y protege las raíces al no generar daños durante el desarrollo de estas (Sur química, 2024)

2.10.4 Fibra de coco

La fibra de coco, conocida, en el sector agrícola como cocopeat, es un producto completamente natural y renovable, y que se llega a utilizar por la alta capacidad de retener agua y con adecuada aireación y oxigenación del sustrato. Se puede utilizar de manera individual o en combinación de otros componentes, que proporcionan beneficios para el desarrollo radicular de las plantas como son los bolis (PROJAR, 2023).

2.11. Producción de tomate en invernadero

2.11.1 Cultivo sin suelo

Existen múltiples sistemas, que van desde la hidroponía hasta los recientemente más empleados, como aquellos que emplean medios de cultivo con destacada aireación y retención de solución nutritiva (Erreguerena, 2012)

Este es un sistema de producción en el que no se utiliza el suelo para desarrollarse, pudiéndose cultivar en una solución nutritiva o en cualquier sustrato adicionando solución nutriente.

Asimismo, se clasifican como sistemas de cultivo hidropónico, dado que se desarrollan en una solución nutritiva o en sustratos completamente inertes. Esto contrasta con los sistemas que utilizan sustratos orgánicos, los cuales se consideran cultivos sin suelo. La expresión "Cultivo sin Suelo" se utiliza de manera literal en otros idiomas, como "soiless culture", "culture senza terreno" y "culture sans sol" (Baixauli y Aguilar, 2002).

Los sistemas de cultivos sin suelo se centran en la utilización de sustratos y están relacionados con el desarrollo agro-técnico y económico de los países. Estos sistemas se implementan con el objetivo de maximizar el rendimiento y la calidad en la producción de plantas ornamentales en Latinoamérica.

Uno de los sistemas más utilizados en invernaderos es el cultivo en bolis. El boli de fibra de coco se presenta como una alternativa eficaz para el cultivo hidropónico de diversas hortalizas. Este método es aplicable tanto a plantas de porte alto, como el tomate, el chile y el pepino, como a especies de menor tamaño, tales como la fresa,

la espinaca y la lechuga. Se trata de un sistema que optimiza el uso del espacio y facilita la obtención de resultados favorables, destacándose por su practicidad en la implementación y gestión (Valencia, 2024).

2.11.2 Nutrición mineral del tomate en invernadero.

La nutrición de los cultivos reviste una importancia significativa en el manejo de las plantas, dado que puede ser determinante en la aparición de anomalías, tales como deficiencias o toxicidades. Es fundamental conocer la dosis adecuada de nutrientes para cada especie, ya que estos nutrientes desempeñan un papel esencial en la provisión de la energía necesaria para la formación de sus estructuras propias (Proain, 2021).

Los elementos esenciales para el desarrollo de las plantas son diecisiete, entre los cuales se incluyen el oxígeno (O), el hidrógeno (H) y el carbono (C), que se obtienen a partir del agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) y la atmósfera. Los restantes elementos corresponden a los nutrientes minerales, los cuales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes, en función de la cantidad que la planta es capaz de absorber (Rodríguez y Florez, 2004). Los macronutrientes identificados incluyen nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Estos elementos son fundamentales en el tejido vegetal y desempeñan diversas funciones esenciales, tales como:

El nitrógeno es un elemento fundamental para el crecimiento de las plantas, ya que promueve un desarrollo rápido y significativo. Su presencia influye en el rendimiento general de las plantas y contribuye a aumentar su tolerancia frente al estrés biótico y abiótico.

El fósforo es un elemento fundamental para la obtención de energía en las plantas y sus raíces. Este elemento desempeña un papel crucial en la estimulación del crecimiento, la aceleración del proceso de maduración, así como en la influencia sobre la floración y la adecuada formación de semillas. El potasio es un elemento que contribuye a aumentar la resistencia a enfermedades en las plantas. Además, ejerce un control indirecto sobre la fotosíntesis y la translocación de carbohidratos.

El calcio es un elemento esencial que contribuye al desarrollo de los vellos radicales, mejora el vigor de la planta y proporciona consistencia al tallo. Asimismo, constituye el componente principal de la pared celular.

El magnesio se presenta como un elemento fundamental en la activación de enzimas que desempeñan un papel crucial en procesos biológicos tales como la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de ADN y ARN (Escobar, 2022).

A partir de estos elementos y la radiación solar, las plantas tienen la capacidad de llevar a cabo la síntesis de todos los compuestos necesarios para su desarrollo. No obstante, otros elementos minerales son considerados beneficiosos, dado que son esenciales para determinadas especies de plantas en condiciones específicas (Rodríguez y Flórez, 2004).

2.11.3 Elementos benéficos

Los elementos benéficos favorecen un mejor desarrollo a los cultivos e influye de una manera positiva en la producción, aun cuando se presentan condiciones adversas que provoquen un estrés biótico o abiótico, la principal característica de estos elementos es que no son esenciales para la supervivencia de la planta.

Uno de estos es el silicio que es considerado un elemento benéfico por su capacidad de aumentar la resistencia de enfermedades en las plantas, ya que los cultivos que pueden acumular silicio en sus tejidos son menos vulnerables a ataques de patógenos, así como también ayuda a mitigar efectos tóxicos por otros elementos (Ortega y Malavolta, 2012).

2.11.4 Silicio

El término "silicio" deriva de "silex", que se traduce como pedernal. Este elemento, clasificado como metaloide o semimetálico, se representa con el símbolo Si y posee un peso atómico de 28.086. Se encuentra en el grupo 14 (IV-A) de la tabla periódica de los elementos (Fraume, 2007).

El silicio constituye el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y se encuentra predominantemente en forma de dióxido de silicio (SiO_2), integrándose en una amplia gama de minerales. A inicios del siglo XX, el silicio fue reconocido

como uno de los 15 elementos esenciales para el desarrollo de las plantas (Calderón, 2022).

A pesar de que el silicio no se clasifica como un elemento esencial para la nutrición de las plantas, diversas investigaciones han evidenciado que su presencia puede tener un impacto positivo en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Balakhnina y Borkowska, 2013).

El silicio se emplea en la agricultura como una estrategia para optimizar el crecimiento y el rendimiento de las plantas, particularmente en situaciones de estrés. Diversos estudios han evidenciado que este elemento incrementa la resistencia ante factores bióticos y abióticos, así como que induce diversas respuestas fisiológicas que resultan beneficiosas, tales como la mejora del balance nutricional y la reducción de la toxicidad provocada por ciertos minerales (Valente et al., 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo entre marzo y octubre de 2024 en las instalaciones del invernadero del Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), situado en Buenavista, Saltillo, Coahuila. La ubicación geográfica del invernadero es 25° 21' 13" N y 101° 01' 56" O, en la Calzada Antonio Narro 1923, a una distancia de 7 km al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila.



Figura 1. Invernadero del Departamento de Ciencias del Suelo UAAAN (extraído el 26 de septiembre del 2025).

3.2. Material vegetal utilizado

El material vegetal empleado fue plántula de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad El Cid, caracterizado por sus frutos de tipo saladette de forma alargada, con buen color rojo intenso, alta productividad y tolerancia a enfermedades, en donde se utilizaron 54 plántulas.

3.3. Sustrato utilizado

El material que se utilizó fue el slab de fibra de coco (Figura 2), tamizado, lavado y esterilizado, usando 18 slabs en total; en cada slab se trasplantó tres plántulas de tomate. Previo al trasplante se le realizó un lavado con el objetivo de reducir la salinidad de la fibra de coco, se utilizó una bandeja en la que se sumergían los bolis

hasta quedar completamente mojados y sacarlos para así lixiviar las sales, este procedimiento se realizaba 4 veces por semana hasta alcanzar la CE adecuado.



Figura 2. Sustrato utilizado (Bolis) con dimensiones de 1.20 m de largo, 30 cm de ancho y 25 cm de alto.

3.4. Trasplante

El trasplante de las plántulas se realizó el día 15 de mayo, trasladándolas directamente de la charola de germinación a los bolis. La plántula fue trasplantada con una pequeña cantidad adicional de sustrato para favorecer un mejor desarrollo radicular inicial. Posterior a eso se aplicó un riego para facilitar el establecimiento de las plantas.

3.5. Riego

El riego se llevó a cabo de manera manual con soluciones nutritivas con base a Steiner con diferentes concentraciones, ajustadas según la etapa fenológica en la que se encontraba la planta. Durante los primeros días después del trasplante se utilizó una solución del 50% de concentración de Steiner, aplicando un riego de aproximadamente 1L por cada dos días. A medida que la planta se desarrolló y alcanzó la etapa de fructificación, se incrementó la concentración de la solución nutritiva a 100% o 120% con base Steiner y el riego se aumentó a un suministro de 4L diarios por planta.

3.6. Poda

La primera poda se llevó a cabo al observar los primeros brotes laterales. En esta etapa, se eliminaron los brotes axilares, también conocidos como chupones, con el objetivo de conducir la planta a un solo tallo. Este manejo se mantuvo de forma

constante durante toda la duración del experimento. Las siguientes podas se realizaron después de los cortes del fruto en estas se eliminaron todas las hojas ubicadas por debajo del racimo que ya había producido frutos para así permitir dirigir la energía de la planta hacia el desarrollo de los frutos en formación.

3.7. Tutorio

El tutorado de las plantas se inició aproximadamente a los 15 días después del trasplante, cuando las plántulas alcanzaron una altura cercana a los 20cm. Para ello se utilizó hilo rafia realizando un amarre de “ocho” en la base del tallo del tomate para proporcionar un soporte seguro. A medida que la planta crecía, se fue guiando manualmente en espiral alrededor del hilo tutor y una vez que la planta alcanzó una altura considerable se procedió a bajarla para que continuara su desarrollo vertical.

3.8. Cosecha

La cosecha de los frutos se llevó a cabo cuando estos alcanzaban un estado de madurez, determinado principalmente por cambio de color a un tono rojo uniforme en todos los frutos, característico del tomate, así como la firmeza y el tamaño del fruto. Los frutos cosechados fueron colocados cuidadosamente en recipientes limpios para su posterior evaluación.

La recolección se realizó de forma manual, utilizando tijeras desinfectadas para evitar propagación de enfermedades. La primera cosecha se realizó el 8 de agosto del 2024 y continuó de manera periódica conforme los frutos alcanzaban la madurez adecuada, concluyendo con la última cosecha el 27 de octubre de 2024. Cada fruto recolectado fue debidamente identificado y etiquetado de acuerdo a su tratamiento correspondiente con el fin de asegurar la precisión en la recolección de datos.

3.9. Tratamientos

Los tratamientos que se utilizaron en este experimento se muestran a continuación en el Cuadro 2. Se utilizaron concentraciones de silicio como se muestra en el Cuadro.

Cuadro 2. Tratamientos de silicio aplicados en el experimento.

Tratamientos	Silicio
T1	0.0 g/L
T2	0.15 g/L
T3	0.30 g/L

La aplicación de los tratamientos se realizó por vía foliar, como fuente de silicio se utilizó el producto comercial Diatomix, el cual contiene SiO₂ al 92%, diluyendo previamente las soluciones de silicio en agua en donde se le ajustaba el pH a 5.5. Posteriormente las soluciones fueron aplicadas a las plantas utilizando atomizadores manuales. Las aplicaciones se realizaron durante la tarde con el objetivo de evitar daños por quemaduras ocasionadas por las altas temperaturas.

Los tratamientos de silicio se distribuyeron de manera uniforme sobre toda la superficie foliar de cada planta, se aplicaron cuidadosamente para evitar el contacto con plantas correspondientes a otros tratamientos. Las aplicaciones se iniciaron en la etapa de floración inicial y se llevaron a cabo de una aplicación por semana.

3.10. Muestreo de sustrato para determinar pH y CE

Para determinar el pH y la conductividad eléctrica del sustrato, se empleó el método de extracción en proporción 1:2, en el cual consiste en tomar una muestra que represente el sustrato y colocarlo en un recipiente, a esta muestra se le añadió el doble de su volumen en agua destilada, se homogenizó cuidadosamente y se dejó reposar por 20 minutos para una adecuada disolución.

Posteriormente, se realizaron las mediciones de pH y CE utilizando un potenciómetro previamente calibrado, este procedimiento se aplicó al inicio del experimento durante el lavado de los bolis como a lo largo del experimento con el fin de monitorear los niveles de salinidad y la acidez del sustrato.

3.11. Control de temperatura

Con el propósito de mantener una temperatura óptima para el cultivo dentro del invernadero y evitar las altas temperaturas, se activaba la pared húmeda durante las horas de mayor radiación solar que van del medio día. Esta acción contribuía a la regulación térmica del ambiente. Además, se encendían los extractores para favorecer la distribución homogénea de la humedad y se abrían las ventanas laterales con el propósito de permitir una adecuada circulación de aire.

3.12. Control de plagas

Durante el experimento se presentaron algunas plagas y enfermedades, una de las principales enfermedades observadas fue el tizón foliar en el cual se manifestó como lesiones necróticas en las hojas similares a quemaduras, para su control se utilizó el fungicida LEAL aplicando una dosis de 1 g/L. Las aplicaciones se realizaron en la tarde para evitar el estrés en la planta.

Asimismo, se detectó la presencia de la plaga conocida como minador de la hoja el cual provoca galerías visibles en las hojas para su manejo se empleó PIROFOSDEL un insecticida aplicado a 1 mL/L, las aplicaciones se realizaron dirigida sobre el follaje afectado.

3.13. Variables evaluadas

3.13.1 Rendimiento

El rendimiento del cultivo se tomó con el peso fresco de los frutos de las plantas con diferentes tratamientos. Se evaluó inmediatamente después de la cosecha, cada fruto fue pesado individualmente utilizando una balanza digital, registrándose el peso en gramos.

3.13.2 Variables de calidad de fruto

Diámetro del fruto: esta variable fue determinada después de la cosecha, utilizando un vernier midiendo el diámetro ecuatorial de cada fruto.

Longitud del fruto: la longitud se midió también con ayuda del calibrador vernier, midiendo la distancia de la base hasta el ápice del fruto.

Sólidos solubles totales: esta variable fue determinada extrayendo jugo del fruto, el cual fue depositado en un refractómetro manual para medir el contenido. Cabe destacar que esta medición se realizó en el fruto más representativo de cada racimo.

Firmeza del fruto: la firmeza se evaluó utilizando un penetrómetro manual, aplicando presión sobre el fruto para registrar la resistencia. Al igual que los sólidos solubles totales, esta medición se llevó a cabo en el fruto más representativo del racimo.

El peso fresco del fruto: se determinó seleccionando una fruta representativa de cada tratamiento de tomate, la cual fue pesada en una báscula.

3.13.3 Variables agronómicas

Peso fresco del tallo: esta variable fue determinada pesando el tallo completo de la planta en una balanza de precisión, inmediatamente después de realizar el muestreo destructivo.

Peso fresco de la hoja: el peso fresco foliar se obtuvo sumando los pesos individuales de las hojas recolectadas a lo largo del experimento, en el momento que se hacían los desojos

Diámetro del tallo: el diámetro del tallo se midió utilizando un vernier, tomando como referencia la zona media del tallo principal.

Longitud del tallo: esta medida se obtuvo utilizando una cinta métrica, desde la base del tallo a nivel del sustrato hasta el ápice de la planta.

Peso seco de la planta completa: esta variable se obtuvo al realizar el muestreo destructivo y dejar que tenga un secado y posteriormente ser pesados.

3.14. Diseño experimental

Los tratamientos se establecieron en un diseño en bloques completos al azar con 6 repeticiones. Cada repetición consistió en un slab con tres plantas cada uno. Los datos se analizaron mediante un análisis de regresión que ajustara las tendencias observadas.

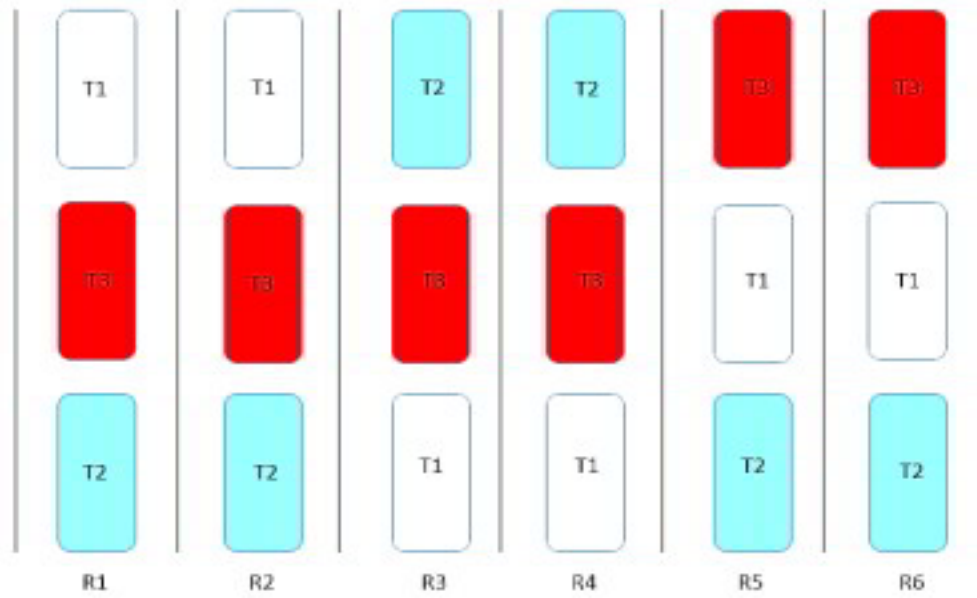


Figura 3. Diseño de bloques completamente al azar

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Rendimiento del fruto

El rendimiento de fruto fue afectado por la aplicación de silicio (Figura 3). Las plantas del tratamiento testigo tuvieron un rendimiento de 1973.9 g/planta, en cambio las plantas que recibieron silicio a una concentración de 150 mg/L tuvieron un rendimiento más alto en 12.2%, mientras que en aquellas que recibieron 300 mg/L el rendimiento disminuyó en 22.3% comparado con las plantas del tratamiento testigo.

Los resultados obtenidos coinciden con la investigación realizada por Agapito (2023) quien aplicó silicio vía drench a una dosis de 0.2 g/L y via foliar a una dosis de 0.1 g/L en el cultivo de pepino, reportando que en plantas que recibieron la concentración más baja tuvo mayor efectividad en el rendimiento, mientras que con mayores concentraciones no mostraron mejoría.

Sin embargo, los resultados obtenidos no concuerdan con lo reportado por Velázquez (2010), quien al evaluar diferentes tratamientos (sin silicio, con alta concentración de silicio y con baja concentración de silicio) no encontró diferencias significativas en el rendimiento total, aunque observó tendencias numéricas en las que el tratamiento sin silicio presentó el valor más alto (8.644 kg/m²), seguido del tratamiento con alto silicio (8.504 kg/m²) y con un menor rendimiento el tratamiento con bajo silicio (8.325 kg/m²).

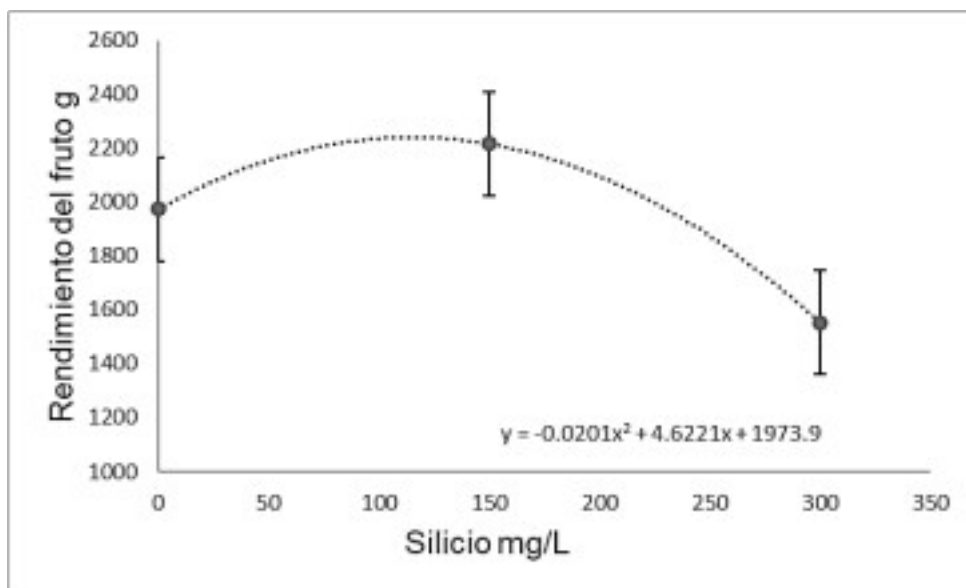


Figura 4. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el rendimiento del fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.2. Diámetro del fruto

En esta variable se observó que comportamiento del diámetro del fruto presentó una tendencia negativa conforme aumentó la concentración de silicio (Figura 4). Los tratamientos con 150 y 300 mg/L mostraron una reducción en comparación con el testigo, que obtuvo los valores más altos con un promedio de 46.26 mm.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Torres (2023), quien indicó que no se presentaron diferencias estadísticas significativas en el diámetro ecuatorial de los frutos tratados con distintas concentraciones de SiO₂ y ácidos húmicos, aunque sí se observaron ligeras variaciones numéricas. En su investigación, el tratamiento con 1.5 mm de SiO₂ y 2 mL de ácidos húmicos mostró un incremento del 1.4 % respecto al testigo, mientras que concentraciones más altas 1.5 mm de SiO₂ y 4 mL de ácidos húmicos provocaron una disminución del 15 % en el diámetro ecuatorial.

Estos resultados también concuerdan con los reportados por Hernández et al. (2022) en su experimento, quien, al evaluar diferentes concentraciones de silicio, hasta 20 mg/L, no detectaron diferencias significativas en el diámetro polar ni ecuatorial de los frutos, encontrando valores comparables entre las plantas con y sin adición del silicio.

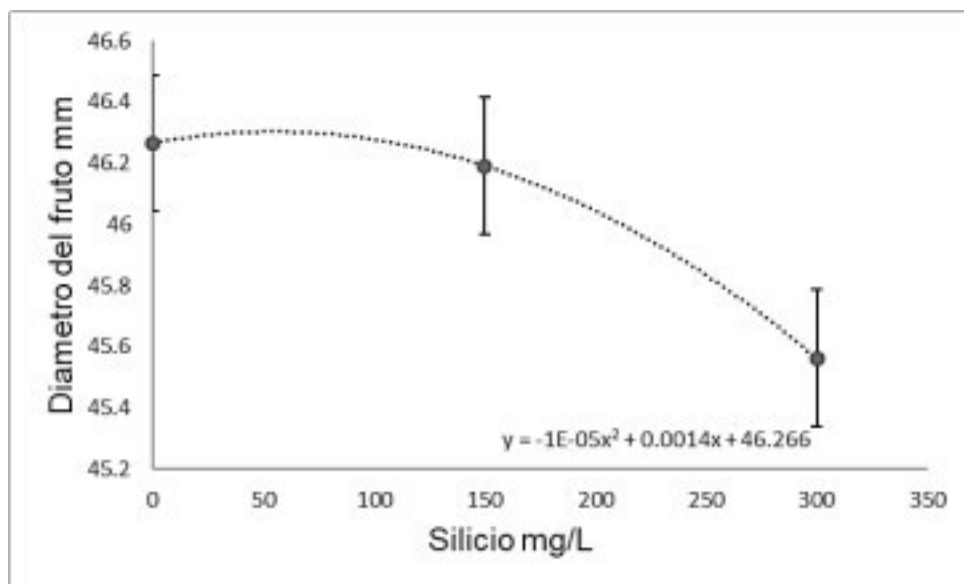


Figura 5. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el diámetro de fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.3 Longitud del fruto

De acuerdo con los resultados obtenidos para la variable de longitud del fruto, se observó que los frutos más largos se presentaron en el tratamiento con 300 mg/L de silicio, con un promedio de 67.34 mm, seguido del tratamiento con 150 mg/L (Figura 5). Por el contrario, el tratamiento testigo mostró los frutos de menor longitud. Estos resultados indican que, conforme aumenta la concentración de silicio, se incrementa también la longitud de los frutos.

De manera similar, Agapito (2023) reportó que la aplicación de silicio a una dosis de 0.4 g L⁻¹ vía drench combinada con 0.2 g L⁻¹ aplicada foliarmente tuvo un efecto significativo sobre la longitud del fruto en el cultivo de pepino, alcanzando una media de 29.19 cm, y superando estadísticamente al tratamiento testigo. Dicho autor observó que el silicio promovió un mayor desarrollo de los frutos, mientras que los tratamientos con concentraciones menores o mayores no mostraron diferencias significativas.

Sin embargo, Torres (2023) en su experimento en fresas, a las que le aplicó diferentes concentraciones de silicio y ácidos húmicos, observó una diferencia en la tendencia de respuesta, ya que no encontró diferencias estadísticas significativas

en el diámetro ecuatorial de los frutos tratados con distintas concentraciones de SiO₂ y ácidos húmicos. Incluso, menciona que en algunos tratamientos con concentraciones elevadas de silicio se presentó una disminución numérica del 15 % del diámetro respecto al testigo, atribuyendo este comportamiento a que el silicio no se transloca hacia los frutos.

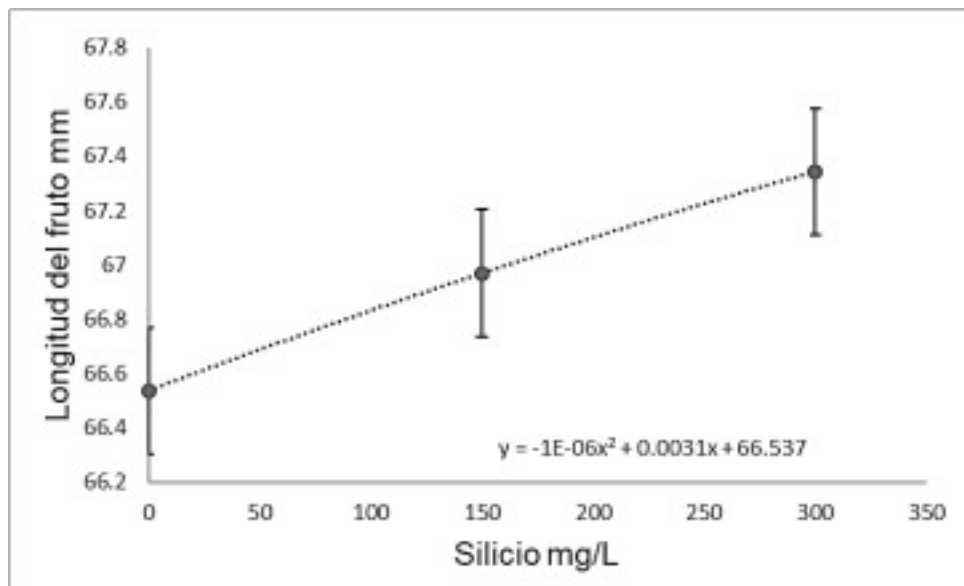


Figura 6. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre la longitud de fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar

4.4. Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales mostraron una respuesta positiva ante la aplicación del silicio, de acuerdo a la tendencia que se observa en la Figura 6, al incrementar la concentración del silicio se favoreció el contenido de sólidos solubles en el fruto, alcanzando un valor más alto con el tratamiento de 300 mg/L con un promedio de 4.57 °Brix, en comparación a los otros tratamientos con menor concentración de silicio presentaron valores menores de SST.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Aguilar (2012), quien observó en el cultivo de tomate que la aplicación foliar de silicio en forma de ácido silícico

favorece la acumulación de sólidos solubles totales, demostrando el efecto benéfico de este elemento en la calidad de los frutos.

Los resultados obtenidos también concuerdan con Agapito (2023), quien reportó en su estudio sobre el cultivo de pepino que la aplicación de silicio vía drench a una dosis de 0.3 g L^{-1} , combinada con 0.1 g L^{-1} foliar, tuvo un efecto significativo sobre el contenido de sólidos solubles, superando al testigo en un 12 % a 13 %. El autor atribuye este comportamiento a la posible relación del silicio con la síntesis o regulación de ácido giberélico.

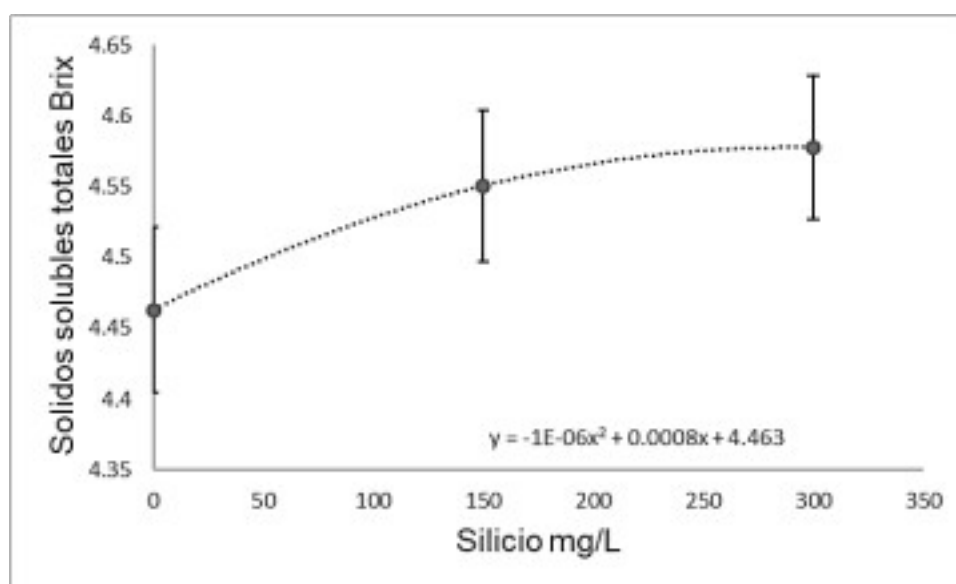


Figura 7. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre los sólidos solubles totales en el fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.5. Firmeza del fruto

En la Figura 7 se muestra el efecto sobre la firmeza del fruto, mostrándose que el tratamiento con 300 mg/L de silicio se presentó los mejores resultados, alcanzando una firmeza promedio de 18.08 g f. Este valor fue superior al obtenido en el tratamiento con 150 mg/L, mientras que el tratamiento testigo registró los frutos con menor firmeza. Estos resultados sugieren que el aumento en la concentración de silicio favoreció la consistencia y resistencia del fruto, posiblemente debido a la participación del silicio en el fortalecimiento de las paredes celulares.

De acuerdo con Linares (2019), al evaluar la calidad del fruto bajo la aplicación de nanopartículas de silicio, se encontró que el tratamiento con 200 mg/L se presentó la mayor firmeza, con una diferencia del 41.01 % superior al testigo absoluto, aunque no se detectaron diferencias estadísticas significativas. Este resultado respalda los datos obtenidos del presente estudio, ya que ambos indican que el silicio contribuye al incremento de la firmeza del fruto, aunque las concentraciones efectivas varían según el tipo de cultivo.

De igual manera, los resultados obtenidos por Velázquez (2010) en relación con la firmeza del fruto concuerdan con la tendencia observada en el presente experimento. En su estudio realizado en el cultivo de tomate, los frutos con mayor firmeza se registraron en el tratamiento con fertilizante de alta concentración de silicio, presentando un incremento del 16 % en comparación con el tratamiento con baja concentración de silicio, mientras que el tratamiento sin aplicación de silicio mostró los valores más bajos.

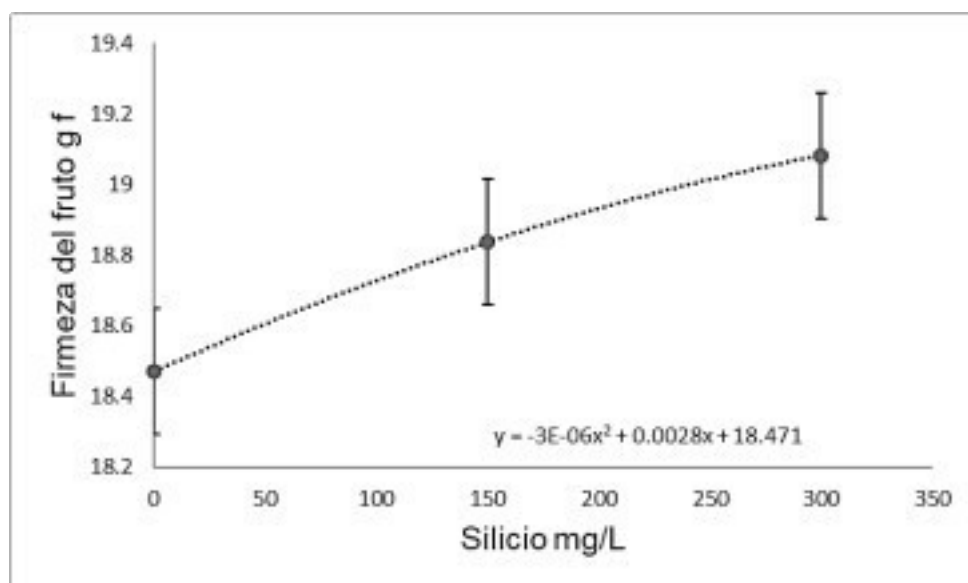


Figura 8. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre la firmeza de fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.6. Peso fresco del tallo

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa un incremento en el peso fresco del tallo conforme aumenta la concentración de silicio, pero disminuye a

medida que incrementar la concentración de silicio (Figura 8). El valor más alto se registró en el tratamiento con 150 mg/L, con un peso promedio de 285 g. Este resultado fue seguido muy de cerca por el tratamiento con 300 mg/L, el cual mostró un valor ligeramente menor del peso fresco de tallo. En contraste, el tratamiento testigo presentó el peso más bajo, observando el efecto positivo de la aplicación de silicio en concentraciones moderadas en el desarrollo del tallo.

Los resultados obtenidos no concuerdan completamente con los reportes de Agapito (2023), quien al evaluar el efecto del silicio en el cultivo de pepino señaló que ninguno de los tratamientos evaluados aplicados vía drench y foliar, logró superar al tratamiento testigo y que el tratamiento con 0.3 g/L de silicio vía drench más 0.15 g/L aplicado foliarmente mostró una disminución del 19 % en el peso fresco del tallo respecto al testigo, mientras que los demás tratamientos presentaron valores similares al control.

De manera similar, Corona (2023), al evaluar la aplicación de silicio en tomate tipo uva, reportó que no se observaron diferencias estadísticas significativas en el peso fresco del tallo entre los tratamientos, aunque sí se observó una tendencia a la disminución cuando se incrementó la dosis de silicio. Dicho autor menciona que las concentraciones elevadas no generaron un efecto positivo y que los mejores resultados se obtuvieron con dosis moderadas, mientras que las más altas produjeron tallos más delgados.

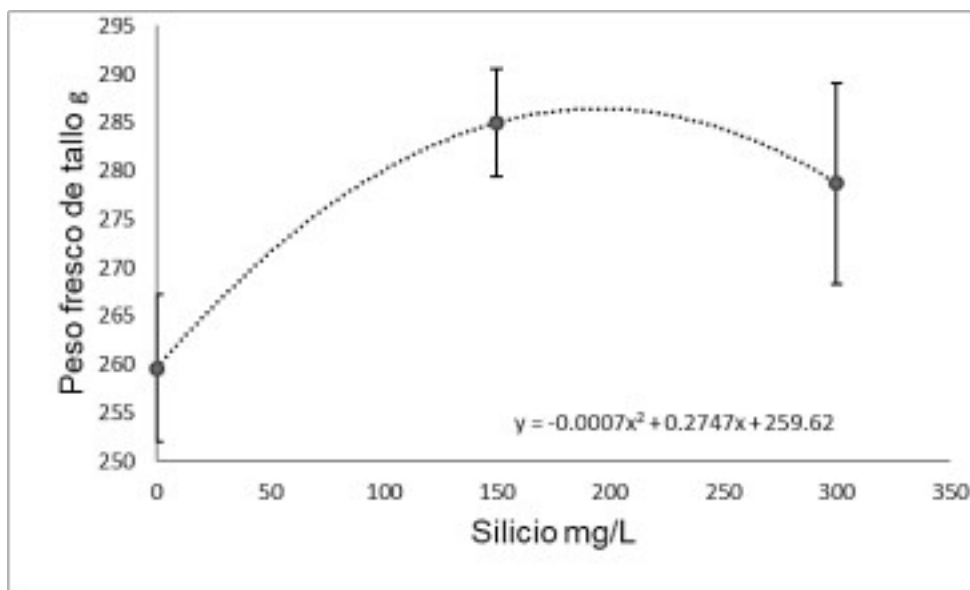


Figura 9. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso fresco de tallo en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.7. Peso fresco de la hoja

De acuerdo con los resultados obtenidos para el peso fresco de la hoja, el tratamiento con 300 mg/L de silicio presentó el valor más alto con 463.75 g, superando al tratamiento 1 en más del 14 % y al tratamiento 2 en un 8.67 % (Figura 9). Estos datos demuestran que la aplicación de silicio tuvo un efecto positivo en la acumulación de biomasa foliar.

Los resultados coinciden con lo reportados por Agapito (2023), quien reportó que en el cultivo de pepino las plantas tratadas con 0.4 g/L de silicio vía drench más 0.15 g/L foliar superaron el peso fresco de las hojas del testigo en un 42 %, mientras que aquellas tratadas con 0.3 g/L vía drench y 0.1 g/L foliar mostraron una disminución del 7 %, concluyendo que el silicio, en concentraciones adecuadas, promueve un mayor desarrollo foliar, posiblemente al mejorar la eficiencia fotosintética y la estructura celular de las hojas.

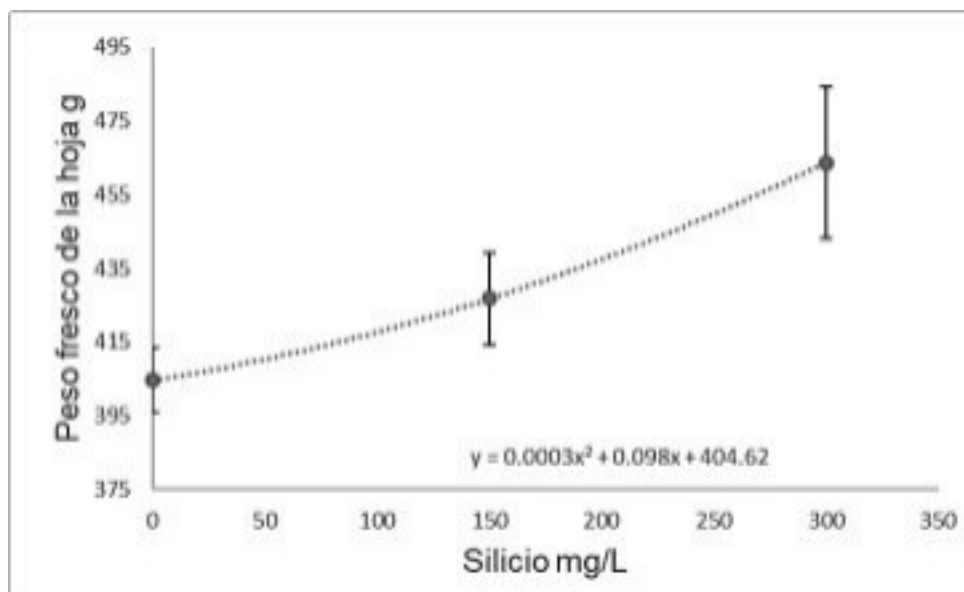


Figura 10. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso fresco de hojas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.8. Diámetro basal del tallo

De acuerdo con los resultados obtenidos en el diámetro basal del tallo, se observó una mejor respuesta en el tratamiento con 150 mg/L de silicio, el cual presentó el mayor diámetro con un valor de 17.1 mm, superando a los demás tratamientos evaluados (Figura 10). En comparación al tratamiento con 300 mg/L, mostró una ligera disminución en el diámetro, con valores similares al tratamiento testigo, lo que indica que concentraciones más elevadas de silicio no favorecen de manera significativa el engrosamiento del tallo.

Estos resultados concuerdan parcialmente con lo reportado por Reyes et al. (2023) en un estudio con biofortificación con silicio en el crecimiento y rendimiento de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en ambiente controlado, en el cual, aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, se observó una tendencia positiva en el crecimiento y grosor del tallo en plantas tratadas con silicio respecto al control. Dicho trabajo menciona que las plantas con dosis bajas de silicio mostraron un incremento numérico en el diámetro del tallo, mientras que las dosis más altas no generaron mejoras adicionales, lo cual coincide con el comportamiento observado en el presente estudio.

De igual manera, Trejo-Téllez et al. (2020) obtuvo resultados similares en su experimento de sobre silicio y sus efectos dosis-respuesta sobre el crecimiento y las concentraciones de clorofilas, aminoácidos y azúcares en plantas de pimiento durante la etapa temprana de desarrollo”, donde las plantas tratadas con 60 mg/L de silicio obtuvieron el mayor diámetro de tallo, valor que fue estadísticamente similar al de 125 mg/L y al control, mientras que la dosis más alta (250 mg/L) produjo el diámetro más bajo. Dichos hallazgos coinciden con la tendencia observada en el presente estudio, ya que en ambos casos las concentraciones intermedias de silicio promueven una mejor respuesta en el grosor del tallo, mientras que las dosis excesivas provocan una disminución en esta variable.

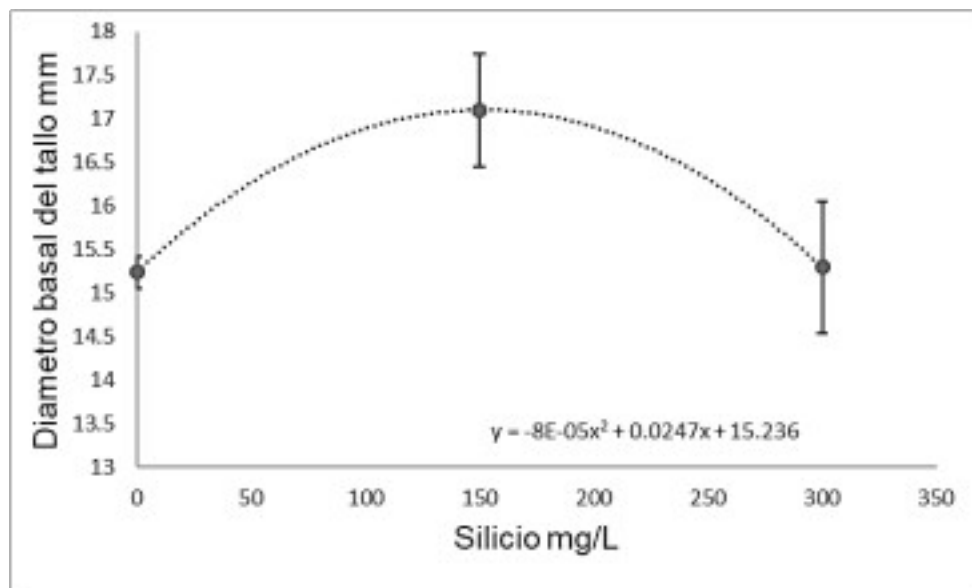


Figura 11. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el diámetro basal de tallo en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.9. Longitud del tallo

De acuerdo con los resultados obtenidos para la variable de longitud del tallo, se observó que el tratamiento con 150 mg/L presentó un desempeño ligeramente superior al de los demás tratamientos, con una altura promedio de 3.35 m (Figura 11). Sin embargo, al incrementar la concentración de silicio, la altura de las plantas mostró una tendencia a disminuir. El tratamiento testigo registró la menor altura, aunque la diferencia con respecto a los demás tratamientos fue relativamente pequeña.

Estos resultados coinciden parcialmente con lo reportado por Varas (2021) en su estudio sobre variables agronómicas en el cultivo de pimiento para la severidad de *Phytophthora capsici* bajo diferentes dosis de silicio, donde se observó que la aplicación de silicio no siempre genera un incremento lineal en el crecimiento del tallo. En dicha investigación, los tratamientos con dosis intermedias de silicio mostraron un mejor desarrollo vegetativo, mientras que las concentraciones más elevadas tendieron a reducir la altura de las plantas. Este comportamiento sugiere que el silicio puede ejercer un efecto benéfico sobre el crecimiento estructural solo dentro de un rango óptimo de concentración, y que un exceso del elemento podría ocasionar desequilibrios fisiológicos.

Estos resultados también concuerdan con los reportados por Agapito (2023) en el cultivo de pepino, quien observó que las plantas tratadas con una aplicación de 0.2 g/L de silicio, vía drench y foliar, presentaron un incremento del 1 % en la longitud del tallo con respecto al tratamiento testigo. No obstante, al aumentar la dosis a 0.4 g/L más 0.2 g/L, se observó una disminución en esta variable, comportamiento similar al registrado en el presente estudio, donde concentraciones elevadas de silicio redujeron el crecimiento en altura.

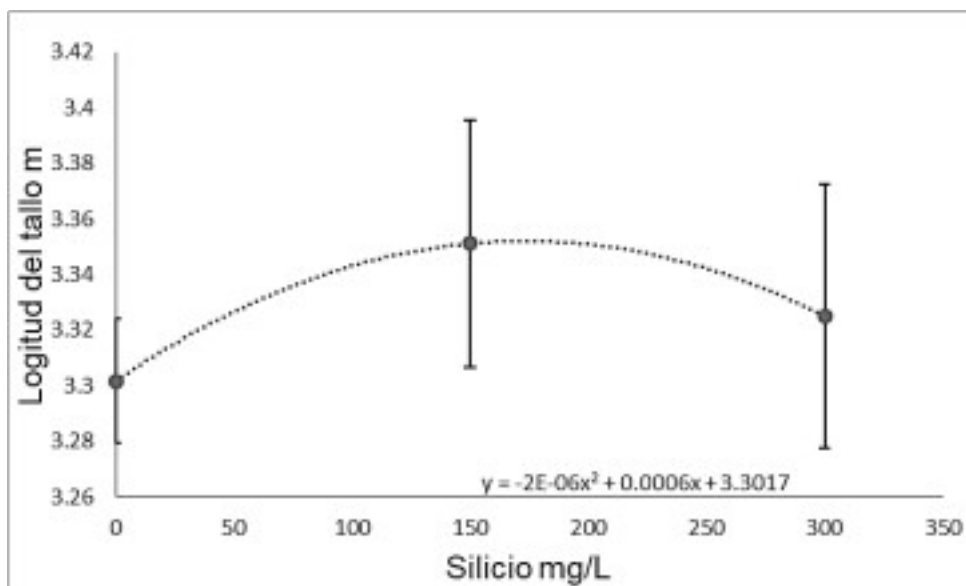


Figura 12. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre la longitud de tallo en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.10. Peso seco de la planta

En esta variable del peso seco de la planta completa, se observó que el tratamiento con 150 mg/L de silicio) presentó el valor más bajo con un peso de 114 g en comparación con los demás tratamientos (Figura 12). Por otro lado, el tratamiento con 300 mg/L mostró un comportamiento muy similar al tratamiento testigo, registrando valores casi iguales en el peso seco total.

De manera similar Agapito (2023) reportó que, en el cultivo de pepino, los tratamientos con 0.3 y 0.4 g/L de silicio vía drench, combinados con 0.1 y 0.2 g/L aplicados foliarmente, presentaron una disminución en el peso seco del tallo respecto al tratamiento testigo. Además, los tratamientos restantes no mostraron diferencias significativas.

De igual manera, estos resultados concuerdan con lo reportado por Velázquez (2010) en su estudio realizado en el cultivo de tomate, donde en el primer muestreo se observaron los valores más altos de peso seco en los tratamientos que recibieron fertilizantes con alta concentración de silicio, alcanzando un promedio de 20.89 g. En contraste, el tratamiento sin silicio presentó valores intermedios, mientras que

los valores más bajos correspondieron a los tratamientos con fertilizantes de baja concentración de silicio.

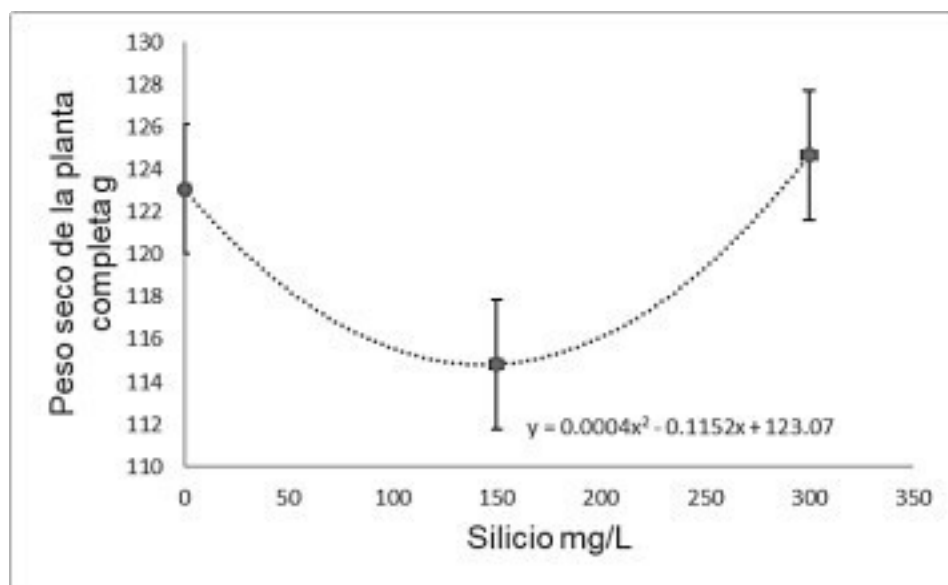


Figura 13. . Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso seco de la planta completa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

4.11. Peso fresco del fruto

De acuerdo con los resultados obtenidos para la variable de peso fresco del fruto, se observó que el tratamiento testigo presentó los valores más altos, con un promedio de 81.45 g por fruto (Figura 13). A medida que se incrementó la concentración de silicio en los demás tratamientos, el peso fresco mostró una tendencia a bajar no favoreciendo las concentraciones de silicio al peso del fruto.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden en algunos aspectos con lo reportado por Torres (2023) en su experimento realizado en el cultivo de fresa, donde se aplicaron tratamientos con silicio y ácidos húmicos. En dicho estudio, los valores medios más altos correspondieron al tratamiento testigo, con un promedio de 8.17 g, sin que ninguno de los tratamientos posteriores superara este valor.

Estos resultados están relacionados con lo reportado por Cruz (2018), quien observó que la aplicación de silicio, tanto en solución como por vía foliar no generó diferencias significativas en el peso de los frutos, destacando que las plantas

tratadas con silicio produjeron frutos uniformes, pero con variaciones ligeras según la dosis. También señala que los frutos más pesados se presentaron en la dosis más alta, aunque la diferencia respecto a los demás tratamientos no fue estadísticamente significativa.

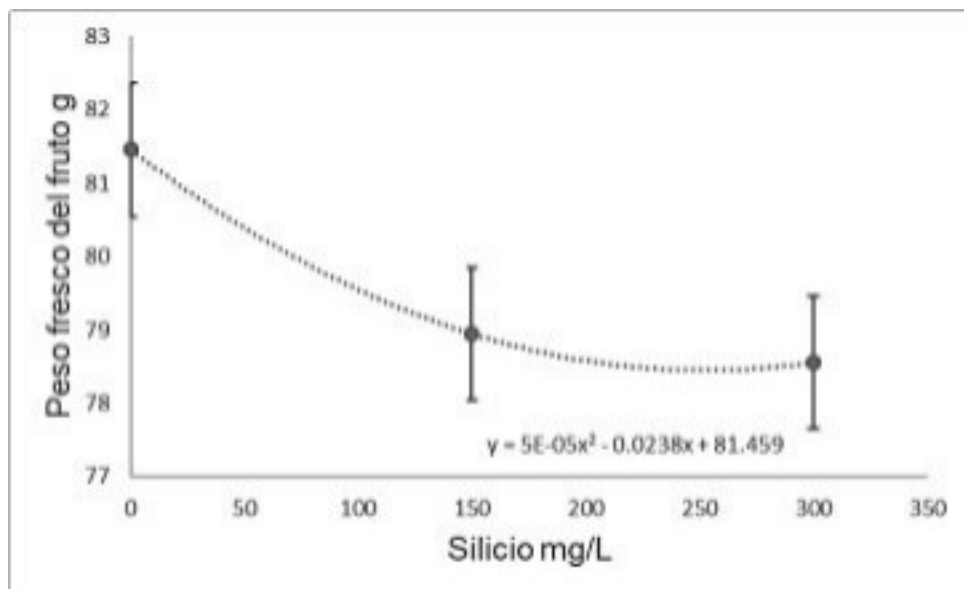


Figura 14. Efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre el peso fresco en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Las barras representan el error estándar.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de silicio tuvo un efecto positivo en el rendimiento del tomate cultivado bajo invernadero, la concentración de 150 mg/L resultó la más efectiva en el incremento del rendimiento del fruto en un 12.2 % con respecto al tratamiento testigo y al tratamiento de 300 mg/ L, mejorando variables como el peso y diámetro del tallo, así como la longitud de la planta.

La aplicación de silicio a 300 mg/L redujo algunas características físicas del fruto como el diámetro del fruto, pero mejorando las siguientes variables como la firmeza del fruto, los sólidos solubles totales y el peso fresco de la hoja. En general las concentraciones moderadas de silicio favorecen el desarrollo y productividad de la planta, mientras que en dosis excesivas pueden generar efectos negativos en algunos parámetros.

VI. LITERATURA CITADA

Agapito Hernández, F. J. (2023). Efecto del silicio en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.). Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 45 p.

Aguilar González, J. C. (2012). Aplicación de silicio en tomate y su efecto en la calidad nutricional. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 37 p.

Álvarez, M., Núñez R., y Wendlant A. (2017). Caracterización de la cadena de valor del tomate rojo fresco en México. Revista Global De Negocios. 5: 45-58.

Arteaga Reséndiz, A. M. (2015). Evaluación del rendimiento en tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en invernadero bajo diferentes fuentes nutricionales. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 107 p.

Baixauli Soria C., y Aguilar Olivert, J. M. (2002), Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. Generalitat valenciana consellería de agricultura, pesca y alimentación. P 110.

Balakhnina, T y Borkowska, A. (2013). Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. Int. Agrophys. Volumen (27): 225-232.

Caldari, P. (2007). Manejo de la luz en invernaderos los beneficios de la luz de calidad en el cultivo de hortalizas. simposio internacional de invernaderos. Ciba especialidades químicas Ltda. Brasil. 5 p.

Calderón Revelo, J. J. (2022). Evaluación de la aplicación de silicio en el control de *bactericera cockerelli* (*sulc*) en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en san Vicente de Pusir, Carchi. Universidad Técnica del Norte. Tesis de Licenciatura. Ibarra. 81 p.

Corona Galindo, O. (2023). Respuestas del tomate uva (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de silicio. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 39 p.

Cruz Hipolito, J. P., (2018). Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (*fragaria x ananassa duch.*) a la aplicación de silicio. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México, Texcoco. 91 p.

EDIFORM. (2006). Vadiagro: Principales problemas fitosanitarios. Tomo I. Curridabat. Costa Rica. Edifarm Internacional Costa Rica. 3 ed. 212 p.

Erreguerena. J. M. (2012). Tecnologías de producción en CSS y sostenibilidad de estos sistemas. IDESIA. 30:3-6.

Escobar Ramírez, E. (2022). Necesidades nutricionales del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en sus diferentes etapas fenológicas. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. México, Xochimilco. 38 p.

Feican, C., Encalada C., y Becerril E. (2016). Descripción agronómica del cultivo de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cab.). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 86 p.

Fraume Restrepo, N., J. (2007), Diccionario Ambiental. Eco ediciones. Colombia. P 38.

Hernández, R., Juárez A., Pérez A., Lozano J., Zermeño A., y González Fuentes, J. A. (2022). Influencia de fertilizantes orgánicos y del silicio sobre la fisiología, el rendimiento y la calidad nutracéutica del cultivo de fresa. Nova Scientia. Volumen 14:1-16.

Gutiérrez, C., Laguna T., Sarria M., Molina D., Cano E., Castillo P., Monterrey J., Padilla D., Rojas A., y Jiménez E. (2004). Manejo integrado de plagas: cultivo del tomate. 1ra Edición. Managua. 64 p.

Linares, N. U. (2019). Aplicación de nanopartículas de selenio, silicio y cobre en el crecimiento y desarrollo del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L). Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 44 p.

Monardes, H. (2009). Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill): características botánicas. Chile. Universidad de Chile 13 p. recuperado 10 noviembre 2024.

Ortega, A. E., y Malavolta, E. (2012). Los más recientes micronutrientes Vegetales. Inta Eea. Salta, Argentina. 25 p.

Reyes, J. Rodríguez S., Torres A., Llerena T., Hernandez G., y Ruiz. (2023). Biofortificación con silicio en el crecimiento y rendimiento de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en ambiente controlado. *Teerra Latinoamericana* 41:1-10.

Ríos Osorio, O., Chávez J., y Rodríguez C. (2014). Producción tradicional y diversidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativo: un estudio de caso en Tehuantepec Juchitán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 51 p.

Rodríguez Mariela S., Flórez Víctor R., (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. Naciones Básicas del Fertirriego. En: CYTED 2004, FERTI-RIEGO: TECNOLOGÍAS Y PROGRAMACIÓN EN AGROPLASTICULTURA, Guzmán, M. & López Gálvez, J. (Ed) ISBN: 84-96023-27-3. 25-35.

Rodríguez, R., José T., José A., y Juan M. (1997). Cultivo moderno del tomate. 2da Edición. Ed. Mundi Prensa México, S.A de C.V. México D.F. 255 p.

Torres Linares, F. (2023). Respuesta de plantas de fresa (cv. Albión) a las aplicaciones de silicio y ácidos húmicos. Tesis de licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 34 p.

Trejo-Téllez, L. I., García-Jiménez, A., Escobar-Sepúlveda, H. F., Ramírez-Olvera, S. M., Bello-Bello, J. J., & Gómez-Merino, F. C. (2020). Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ*, 8, e9224.

Valente, A., Moráis R., Couto C., Correira H. (2004). Modeling simulation and testing of a silicon soil moisture sensor based on the dual probe heat-pulse method. *Sens and Actuators A*. 115:434-439.

Varas Carvajal, I. A. (2021). Efecto de la aplicación edáfica del silicio en el control de *Phytophthora capsici*, en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*). Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador. 49 p.

Velázquez Malacara, N. S. (2010). Análisis de la fertilización a base de silicio en el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum Mill.*) en condiciones de invernadero y cultivo sin suelo. Tesis de Licenciatura. Saltillo, Coahuila. UAAAN, 53 p.

CITAS ELECTRÓNICAS

Infoagro systems s.l. 2016. El cultivo de tomate: Parte I. Madrid, España. s.p. http://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_del_tomate__parte_i_.asp. (20, octubre, 2016).

Intagri. 2016. Los elementos benéficos para las plantas. [file:///C:/Users/particular/Downloads/70.%20Los%20Elementos%20Beneficos%20para%20las%20Plantas%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/particular/Downloads/70.%20Los%20Elementos%20Beneficos%20para%20las%20Plantas%20(1).pdf). (23, septiembre, 2025)

Norma del codex para el tomate. 2007. (codex stan 293-2007). file:///C:/Users/particular/Downloads/CXS_293s.pdf. (26, noviembre. 2025).

Perea E., 2023. Agricultura protegida, 15 años de crecimiento exponencial en México. https://imagenagropecuaria.com/2023/agricultura-prottegida-15-anos-de-crecimiento-exponencial-en-mexico/?utm_source=chatgpt.com#google_vignette. (23, septiembre, 2025).

Plataforma tierra. 2023. Tipos de agricultura sin suelo. https://www.plataformatierra.es/innovacion/tiposagriculturasinsuelo?utm_source=chatgpt.com. (13, septiembre,2025).

Proain tecnología agrícola. 2021. Importancia de los nutrientes esenciales en las plantas. <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/importancia-de-los-nutrientes-esenciales-en-las-plantas?srsIid=AfmBOoqKhtGctOS371h4pUh1MYtuxwM9t6BJ9lfMaHqw6g1TbVnqpMIP>. (6, enero, 2025).

Projar. 2023. Fibra de coco. <https://www.projar.es/wp-content/uploads/VENTAJAS-Y-COMO-USAR-FIBRA-DE-COCO-2018.pdf>. (23, septiembre, 2025).

Redagricola. 2025. Producción global de tomate para 2025 sería 11,5 % mas baja que el año pasado. <https://redagricola.com/produccion-global-de-tomate-para-2025-seria-115-mas-baja-que-el-ano-pasado/>. (02, noviembre, 2025)

SADER. 2020. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. <https://www.gob.mx/siap>. (23 enero 2021).

Semillaria. 2015. Clasificación taxonómica de tomate. <http://semillaria.es/index.php/cultivos-ok/29-cultivos/94-taxonomia>. (13, septiembre, 2025)

SIAP. 2013. Anuario estadístico de la producción agrícola. http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=35<https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4nspe6/v4spe6a1.pdf>. (25, febrero, 2025).

SIAP. 2024. Cierre de la producción agrícola. <https://www.agricultura.gob.mx/datos-abiertos/siap>. (02, noviembre, 2025)

Sur química. 2024. Perlita: características fisicotécnicas. https://www.gruposur.com/download/hojas_tecnicas/ht-556-54030-000.pdf. (23, septiembre, 2025)

Valencia, M. 2024. Hidroponía con bolis de fibra de coco: pasos esenciales. hydro environment. https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=481. (4, enero, 2025).

Valencia, M. 2024. Peat moss ¿qué es? Origen, Usos Y Variedades. HYDRO Environment. <https://hydroenv.com.mx/id355/>. (27, julio, 2025).

Yara. 2025. Producción mundial de tomates. <https://www.yara.es/nutricion-vegetal/tomate/produccionmundial/#:~:text=Los%20otros%20productores%2C%20con%20cifras,%2C%20India%2C%20Italia%20y%20Egipto.&text=La%20producci%C3%B3n%20media%20actual%20en,toneladas%20de%20tomates%20por%20a%C3%B1o>. (23, septiembre, 2025).