

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



La Aplicación de Silicio Aumenta la Calidad de Frutos en Plantas de Fresa Crecidas
en Agricultura Vertical con Iluminación Artificial

Por:

URIEL ROGELIO JIMENEZ CABRERA

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2024

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

POR:

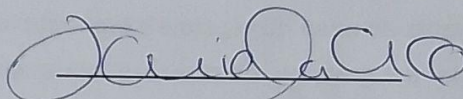
URIEL ROGELIO JIMENEZ CABRERA

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el título de:

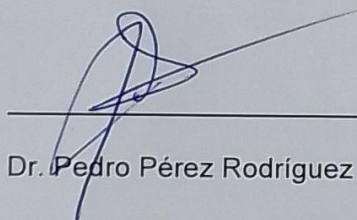
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el comité de asesoría:



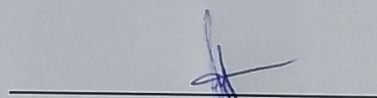
Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Asesor Principal



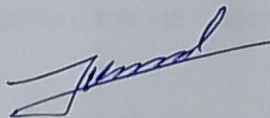
Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Coasesor



Dra. Silvia Judith Martínez Amador

Coasesor



M.C Sergio Sánchez Martínez

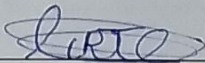
Coordinador de la División de Ingeniería

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.

Pasante



Uriel Rogelio Jimenez Cabrera

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme la dicha de vivir, por guiar mi camino en todo momento tenerme con bien, darme la fuerza y valentía por seguir adelante, porque nunca me dejó solo cuando más lo necesité ahí estuvo conmigo, y gracias a Dios por fin culminó esta gran etapa de mi vida.

A la Virgen de Guadalupe y San Judas Tadeo

Que han cuidado de mí y de todos mis seres queridos en todo momento, dándome fuerzas cuando más lo necesite siempre estaré agradecido porque nunca me dejaron solo.

A mi Alma Mater

Por ser mi segundo hogar, durante esta gran etapa de mi vida gracias por todas las enseñanzas, por abrirme las puertas de esta gran institución por forjarme como todo un profesionalista, donde tuve la dicha de conocer grandes personas gracias por todo.

A mis asesores

Dra. Daniela Alvarado Camarillo, quien tuve la fortuna y la dicha de tenerla como profesora y después trabajar con este proyecto de investigación. Gracias por todas las enseñanzas que me brindó, la confianza que siempre se tuvo, me llevó un gran recuerdo porque es una gran persona que nunca me dejó solo siempre me daba ánimos para seguir adelante y siempre pude contar con usted.

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, quien fue mi guía para que pudiera concluir con este proyecto, en donde me brindó su conocimiento y tenerme paciencia, gracias por su amistad.

Dra. Silvia Judith Martínez Amador, por su apoyo para el término de mi titulación y mi documento de tesis, muchas gracias por formar parte en el último paso para el cierre de mi carrera académica en la Universidad.

DEDICATORIA

A mis padres

Sr. Jesús Cabrera Zúñiga y la Sra. Guadalupe Hidalgo Aguilar. A ustedes principalmente por acompañarme en este gran viaje, por darme todos sus consejos, ánimos cuando más lo necesite, porque nunca me dejaron solo estuvieron conmigo en todo momento. A ustedes que tanto se han esforzado para que yo llegara hasta aquí los amo tanto y gracias por todo lo que han hecho por mí. Y por fin después de tanto tiempo les puedo decir ¡Papás lo logramos! Ya somos Ingenieros, le agradezco tanto a Dios por verme mandado a los mejores padres y dejarme compartir esto con ustedes este gran logro, los amo para toda la vida y para siempre.

A mis tíos

Eyvi Armando Cabrera Hidalgo y Anselmo de Jesús Cabrera Hidalgo parte de lo que soy ahora se los debo a estas grandes personas por que siempre me apoyaron, dieron consejos, ánimos y sobre todo mucho cariño. Gracias por siempre estar para mí siempre estaré agradecido con ustedes por todo lo que han hecho por mí, los amo tanto.

A mi familia

Gracias por siempre darme todo su apoyo, ánimo, cariño y consejos que gracias a todo eso me alentaron para llegar hasta aquí.

A mi amiga

Fanny gracias por todos tus consejos, ánimos, apoyo y cariño. Por qué siempre estabas ahí cuando más te necesitaba, gracias por todo lo que hiciste por mí.

INDICE DE CONNTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA.....	II
INDICE DE CUADRO	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	X
INTRODUCCION.....	1
Objetivos	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	2
REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1 El cultivo de la fresa	3
2.2 Origen y distribución.....	3
2.3 Descripción botánica.....	3
2.3.1 Tallo	3
2.3.2 Hoja.....	3
2.3.3 Flor.....	4
2.3.4 Fruto	4
2.3.5 Sistema radicular.....	4
2.4 Clasificación taxonómica.....	4
2.5 Valor nutricional.....	5
2.6 Producción mundial	5
2.6.1 Principales países productores.....	5

2.7 Producción nacional.....	6
2.7.1 Principales estados productores	6
2.8 Cultivo sin suelo	6
2.8.1 Sustrato	7
2.8.2 Clasificación de los sustratos	7
2.8.3 Propiedades de los sustratos.....	8
2.9 Función de los elementos en la nutrición mineral de cultivos	9
2.10 Nutrición mineral en cultivos sin suelo	10
2.10.1 Calcio.....	10
2.10.2 Potasio.....	11
2.10.3 Nitrógeno.....	11
2.11. Nutrición mineral con elementos benéficos.....	12
2.11.1 El silicio como elemento benéfico.	12
2.11.2 El silicio y su función en las plantas	13
2.11.3 El silicio en la nutrición de cultivos	13
2.12 Solución nutritiva en cultivos sin suelo.....	14
2.12.1 pH.....	14
2.12.2 Conductividad eléctrica	14
2.13 Sistemas hidropónicos abiertos en cultivos sin suelo.....	14
2.13.1 Inmersión de raíces	15
2.13.2 Flotante.....	15
2.13.3 Acción capilar	15
2.14 Sistemas hidropónicos cerrados.....	15
2.14.1 Técnica de la película nutritiva.....	15

2.14.2 Técnica de flujo profundo	16
2.14.3 Sistemas de raíz flotante.....	16
2.14.4 Sistema de subirrigación	16
2.14.5 Aeroponía.....	16
2.15 Agricultura vertical	17
2.15.1 Origen	17
2.15.2 Agricultura vertical a nivel mundial	18
2.15.3 Agricultura vertical a nivel nacional	18
2.15.4 Impacto	19
2.15.5 Beneficio	20
2.15.6 Lámparas LEDs (Light emitting diodes)	21
2.13.7 Humedad relativa.....	21
MATERIALES Y METODOS	23
3.1 Sitio de estudio	23
3.2 Material vegetativo.....	23
3.3 Preparación del sustrato	23
3.4 Trasplante.....	24
3.5 Sistema de cultivo vertical de interior	24
3.6 Control de temperatura y humedad relativa	24
3.7 Tratamientos de Silicio.....	25
3.8 Riego con solución.....	25
3.9 Podas de flores y frutos	25
3.9.1 Control de plagas y enfermedades	26
3.10 Cosecha.....	26

3.11	Variables evaluadas	26
3.11.1	Variables de rendimiento	26
3.11.2	Variables agronómicas	27
3.11.3	Variables de calidad	27
3.12	Diseño experimental.....	28
RESULTADOS Y DISCUSION		29
4.1	Rendimiento del fruto.....	29
4.1.1	Número de frutos.....	29
4.1.2	Diámetro basal del fruto.....	30
4.1.3	Peso fresco de fruto	31
4.1.4	Solidos solubles totales.....	32
4.1.5	Firmeza del fruto.....	33
4.1.6	Número de coronas	34
4.2	Longitud de corona y peso de corona y longitud de raíz.....	35
4.3	Peso fresco foliar y seco foliar	38
4.4	Ancho y largo de hoja	39
4.5	Otras variables respuesta	41
CONCLUSIONES		433
LITERATURA CITADA		444

INDICE DE CUADRO

Cuadro 1. Taxonomía de la fresa (Fragaria x ananassa Duch.) var. San Andreas	4
Cuadro 2. Composición nutricional en 100g de fruta en la planta de fresa (Fragaria x ananassa Duch.) var. San Andreas.....	5
Cuadro 3. Contenido de Vitaminas en el cultivo de fresa (Fragaria x ananassa Duch.) var. San Andreas	5
Cuadro 4. Propiedades que debe tener un buen sustrato en cultivos sin suelo	8
Cuadro 5. Beneficios de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social.....	20
Cuadro 6. Tratamientos de Silicio (Si) aplicados en el estudio con base en el producto Diatomix®	25
Cuadro 7. Efecto del Silicio aplicado en forma de drench/foliar sobre algunas variables vegetativas en plantas de fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED.....	42

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Laboratorio de Agricultura Vertical en el Departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN. Fuente: Google Maps, 2024	23
Figura 2. Rendimiento de fresa (Fragaria × ananassa Duch) cosechado de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	29
Figura 3. Numero de frutos en fresa (Fragaria × ananassa Duch) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	30
Figura 4. Diámetro basal de fresa (Fragaria × ananassa Duch) cosechada de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	31
Figura 5. Peso fresco de fresa en fruto (Fragaria × ananassa Duch) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con el uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	32
Figura 6. Sólidos solubles totales en frutos de fresa (Fragaria × ananassa Duch) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	33
Figura 7. Firmeza del fruto de la fresa (Fragaria × ananassa Duch) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámpara LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	34
Figura 8. Número de coronas en fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación	35
Figura 9. Longitud de la corona (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación	36
Figura 10. Peso seco de la corona en plantas de fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	37

Figura 11. Longitud de raíz en la fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación	37
Figura 12. Peso fresco de hojas en plantas de fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	38
Figura 13. Peso seco de hojas en plantas de fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.....	39
Figura 14. Ancho de la hoja de la fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación	40
Figura 15. Longitud de la hoja de fresa (Fragaria × ananassa Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la con concentración de Silicio y formación de aplicación	41

RESUMEN

La fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*) variedad San Andreas es uno de los cultivos de importancia económica. El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Agricultura Vertical en Ambiente Controlado del Departamento de Ciencias del Suelo, ubicado dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, El objetivo de la investigación fue determinar la concentración adecuada del Silicio (Si) foliar y drench permita mejorar el crecimiento y las respuestas de plantas de fresa.

Se estima un aumento en la demanda mundial para el 2030 por lo que se recomienda a los productores elevar el nivel de las medidas sanitarias para cumplir con las demandas de producción. Por lo tanto, se debe buscar nuevas tecnologías agrícolas para la producción de la misma. Uno de estos sistemas es la producción en agricultura vertical de ambiente controlado con lámparas LED, lo cual nos permite un mejor manejo de la planta y un eficiente control fitosanitario; así mismo, el uso adecuado de los nutrimentos y la aplicación de la nutrición adecuada complementando la misma con aplicaciones de algunos elementos benéficos.

Los efectos benéficos del Si han sido demostrados en varias especies de plantas y, en el caso de problemas fitosanitarios, es capaz de aumentar la resistencia de las plantas al ataque de insectos y patógenos.

Se aplicaron los tratamientos con diferentes concentraciones de Si los cuales fueron suministradas de forma foliar y al drench cada 15 días. Las variables evaluadas en el experimento fueron: rendimiento total, diámetro ecuatorial del fruto, longitud, firmeza, curvatura, grados solubles, concentración de NO_3^- , Ca y K en fruto, peso fresco total de hojas y tallos, longitud de tallo y diámetro de tallo. De acuerdo con los resultados, el Si no incrementa el rendimiento de frutos por planta, y con una dosis de 0.2 g L^{-1} en drench más 0.15 g L^{-1} aplicada foliarmente se tuvo efectos negativos. Con otros tratamientos se logró aumentar la calidad del fruto ya que el contenido de sólidos solubles aumenta al aplicar en Drench 0.2 y 0.3 g L^{-1} o bien en forma foliar 0.15 y 0.1 g L^{-1} , mientras que con 0.1 o 0.2 g L^{-1} de Si vía drench se obtienen frutos de mayor diámetro. El mejor tratamiento fue en el que se aplicó 0.2 g L^{-1} vía foliar y 0.2 g L^{-1} vía drench, ya que se obtuvieron frutos de hasta 35 g.

Palabras clave: Agricultura de interior, Hidropónia, Elementos benéficos, Micronutrientes.

INTRODUCCION

México es el país que ocupa la cuarta posición, con un promedio de 542,891 t (SIAP, 2022), a nivel mundial en la producción de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) pero es el primer lugar en exportación de frutillas (SIAP, 2022), dentro de las cuales se ubica a la fresa. El cultivo de la fresa es de un alto valor económico en México, el cual junto con China y Estados Unidos de América aportan el 59% de la producción total en el mundo (FAO, 2017).

Comparado con hace 40 años, la superficie cultivada con fresa en México creció en 270% y dentro de los principales estados productores se encuentran: Michoacán con 329,184 t (60.08%), Baja California con 105,403 t (16.87%) y Guanajuato con 97,499 t (18.29%), constituyendo en conjunto el 92.25% de la producción nacional (SIAP, 2022).

La fresa se cultiva bajo sistemas de agricultura protegida, siendo la producción en macro túnel el sistema más preponderante, aunque también se produce bajo casa sombra e invernadero manejando sistemas de producción convencionales u orgánicos, dentro de los cuales se emplean tecnologías como macro y micro túneles e hidroponía (Valverde Salazar, 2017). Bajo estas condiciones se tiene un mejor manejo y control de la temperatura e incidencia de plagas y enfermedades, lo cual permite que existan mejores rendimientos y calidad del producto (Rocha, 2014).

Para mantener la posición de México como líder mundial en el cultivo de fresa es necesario elevar los estándares de calidad de la fruta, por lo que se requiere de instalaciones de mayor tecnología, ya que en estas es posible reducir la incidencia de plagas y enfermedades, así como los daños por efecto del clima.

Se ha demostrado que el Silicio (Si) es un elemento que permite aumentar la producción y calidad de las cosechas en especies como el tomate (Dou et al., 2023), melón (Alam et al., 2021) y pepino (Hu et al., 2022). En fresa también se ha demostrado que las aplicaciones de Si aumentan el rendimiento y calidad de los frutos (Peris-Felipo et al., 2020), sin embargo, esto no ha sido demostrado en plantas cultivadas en sistemas de agricultura vertical con iluminación artificial mediante lámparas LED. Por este motivo se planteó el presente estudio con los siguientes objetivos.

Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar la concentración adecuada del Silicio para modificar el crecimiento de plantas de fresa bajo un sistema de agricultura vertical con lámparas LED.

1.1.2 Objetivos específicos

Determinar el efecto sobre la calidad del fruto en plantas de fresa bajo diferentes concentraciones de Silicio.

Determinar el efecto de la aplicación de Silicio sobre el rendimiento de plantas de fresa.

Determinar si los efectos del Silicio son modificados por efecto de la concentración o por la forma de aplicación, siendo esta última en forma de drench o vía foliar.

Hipótesis

La concentración óptima del Si en el drench y foliar es favorable para un mayor rendimiento y para la obtención de frutos de calidad bajo un ambiente controlado

REVISION DE LITERATURA

2.1 El cultivo de la fresa

La fresa es una planta perenne de la familia de las Rosáceas y proveniente del género *Fragaria*. Posee un sistema radicular fasciculado, un tallo rastrero, hojas pecioladas de color verde en el haz y blanco en el envés. Su flor formada por cinco pétalos de color blanco posee estambres y el gineceo de color amarillo mediante el cual se obtiene el fruto de color rojo, llegando a tener hasta 6 cm de longitud dependiendo de la variedad y las condiciones climáticas donde se desarrolle. Y se ha empleado habitualmente en la elaboración de mermeladas, confites, conservas y congelados. Son ricos en vitamina C (Chiqui et al., 2010).

2.2 Origen y distribución

La fresa es una planta herbácea perteneciente a la familia de las rosáceas y al género *Fragaria*. Aunque hay numerosas especies en toda Europa en estado silvestre (entre ellas la *Fragaria vesca*, la fresa común silvestre y la *Fragaria viridis*, la más extendidas que se cultivan actualmente derivan de un cruce espontáneo de dos especies, la *Fragaria virginiana* y la *Fragaria chiloensis*, importadas entre los siglos XIV y XVIII del nuevo continente (Bianchi., 2018)

2.3 Descripción botánica

La fresa es una planta herbácea, perenne, bajo porte y un follaje normal de hojas compuestas; su reproducción puede ser sexual o asexual, esto mediante semillas o vegetativamente, por medio de la formación de estolones y la separación de coronas (SIAP, 2018).

2.3.1 Tallo

El tallo es corto y se denomina corona. De esta corona surgen ramificaciones laterales llamadas estolones que se caracterizan por tener una gran distancia entre los entrenudos. En estos entrenudos aparecen rosetas de hojas y raíces adventicias. A su vez estos estolones también se pueden ramificar y producir nuevos estolones (Gómez et al., 2023).

2.3.2 Hoja

Son compuestas por tres folíolos con bordes aserrados, su tamaño varía de acuerdo a la variedad (Paucar, 2022).

2.3.3 Flor

Contienen de 5 a 6 pétalos de color blanco, agrupadas en inflorescencias (Paucar, 2022).

2.3.4 Fruto

De tamaño proporcional a las flores, son pequeños aquenios (fruto agregado que constituyen la parte comestible (Paucar, 2022).

2.3.5 Sistema radicular

El sistema radicular está formado por raíces principales gruesas, siendo las jóvenes de color blanco. A medida que envejecen, su color cambia a marrón claro y finalmente a marrón muy oscuro o casi negro (Kirschbaum, 2022).

2.4 Clasificación taxonómica

Cuadro 1 Taxonomía de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) var. San Andreas

Nombre común	Fresa
Nombre científico	<i>Fragaria</i> L.
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Rosales
Familia	Rosaceae
Subfamilia	Potentillaea
Subtribu	Fragariinae
Genero	<i>Fragaria</i>
Especie	<i>Fragaria x ananassa</i> .

(Gómez et al., 2023).

2.5 Valor nutricional.

Cuadro 2. Composición nutricional en 100g de fruta en la planta de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) var. San Andreas

Calorías	50
Carbohidratos	11.6 g
Fibra	3.8 g
Proteína	1 g
Potasio	44.8 mg
Fosforo	31.5 mg
Calcio	23.2 mg
Selenio	1.1 mg
Hierro	0.6 mg

Fuente: (Rivadeneira, 2016).

Cuadro 3 Contenido de Vitaminas en el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) var. San Andreas

Vitamina	Mg/100gr
C	58
A	8
B2	0.06
B1	0.02

Fuente: (Rivadeneira, 2016).

2.6 Producción mundial

Se tiene registrada una producción de 3.2 millones en el caso de China, 1 millón de toneladas para Estados Unidos, 350 mil toneladas producidas por España y 861 mil toneladas por México. En el Ecuador, una producción de 1,252 toneladas para el año 2015 y para el año 2019 787 toneladas (Paucar, 2022).

2.6.1 Principales países productores

Los principales países productores de fresa en el mundo durante 2021 son China,

Estados Unidos, España y México (Paucar, 2022).

2.7 Producción nacional

El volumen de la producción nacional del 2012 al 2021 ha ido en aumento con un promedio de 533,000 t, pero en el 2020 hubo una descendencia a causa de los bajos rendimientos por el COVID-19, por lo que aún en el 2021 no se ha podido recuperar el rendimiento, teniendo 543,000 t en comparación con el 2019 cuando se produjo 861,000 t, por lo que se obtuvo un 36.94% menos de producción (SIAP, 2022).

En México, el incremento de producción de fresa para el 2030 se estima sería del 26.44%, por lo que habrá un aumento de 468.25 a 592.03 millones de toneladas y se considera que con esta cifra el país pueda cubrir la demanda a nivel local e internacional sin tener problemas por la seguridad alimentaria de esta frutilla (SAGARPA, 2017).

2.7.1 Principales estados productores

Desde principios de los años noventa, en México los principales estados productores son Michoacán y Baja California con una participación de producción de fresas de 63.56% y 35.20% respectivamente. En conjunto representan una participación a nivel nacional de 98.76% para el año 2007. El resto de los estados productores participan con 1.24%, entre los que destacan Aguascalientes, Baja California Sur, Jalisco, México y Morelos. En el año 2006, el principal estado productor de fresa fue Michoacán, seguido de otras regiones del país, principalmente en Baja California y Guanajuato, que incursionan con éxito en la producción de esta hortaliza, que tiene un futuro promisorio en el mercado norteamericano (Ávila y González, 2012).

2.8 Cultivo sin suelo

El término “cultivo sin suelo” se define como el cultivo de plantas en sistemas sin suelo “in situ”. En los últimos años se han desarrollado multitud de procedimientos de cultivo innovadores utilizando bolsas y contenedores, además de soluciones nutritivas. Estos métodos de cultivo incluyen sistemas sin medio sólido, así como sistemas agregados, en los que se utilizan sustratos inorgánicos u orgánicos. Con el aumento constante de la erosión del suelo y la pérdida de tierras cultivables, es probable que la importancia de los cultivos sin suelo aumente en un futuro próximo. Debido a su peso ligero y su sostenibilidad en términos de eficiencia de recursos, los sistemas sin suelo son especialmente adecuados para zonas urbanas (Eigenbrod, 2015).

2.8.1 Sustrato

El sustrato sólido es la base del cultivo semi-hidropónico, ya que cumple algunas funciones muy importantes como son la de ser el sostén de la planta, da protección a las raíces de la luz y es por donde circula la solución nutritiva. Estos sustratos deben presentar entre 20 al 60% de agua y del 15 al 35% de aire, por lo tanto, los sustratos deben presentar algunas características fundamentales como son: buena aireación, retenedora de suficiente humedad, ser químicamente y biológicamente inerte, ser de bajo costo y debe estar disponible a nuestro alcance (Mejía, 2017).

2.8.2 Clasificación de los sustratos

hace referencia que los sustratos se forman de diferentes componentes: en sustratos orgánicos: aserrín o viruta desmenuzada, que se las deja fermentar en abundante agua algún tiempo antes de utilizarlo no debe ser superior al 20% del total de la mezcla; tiene que ser de maderas amarillas y no de maderas rojas como las de pino, ya que estas poseen sustancias que pueden afectar a las raíces de la planta. Si se utiliza cascarilla de arroz es necesario lavarla y dejarla fermentar, tenemos que humedecerla bien antes de sembrar o trasplantar durante 10 a 20 días, según el clima de la región, más días para climas fríos y más días para climas calientes. Los materiales sólidos para sustratos inertes son escoria de carbón mineral quemado, arena de ríos que no tengan contenidos salinos (Mejía, 2017).

2.8.3 Propiedades de los sustratos

Los sustratos empleados para sistemas de cultivos sin suelo deben reunir ciertas propiedades.

Cuadro 4 Propiedades que debe tener un buen sustrato en cultivos sin suelo.

Propiedades de un sustrato	
Generales	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Facilidad de compra en el mercado y bajo precio.<input type="checkbox"/> Peso ligero y facilidad de manejo.
Físicas	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Espacio poroso total (>85%).• Capacidad de aireación (20-30%).• Alta capacidad de retención del agua.• Estructura permanente.• Tamaño de partículas homogéneas (0.25-2.5 mm).• Baja densidad aparente (<0.4 g/cm³).
Químicas	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> CIC variable (>20 meq/100 g).• Disponibilidad de los nutrientes.• Baja salinidad.• pH (5.5-6.8).• Eficiente relación C/N (<=40).
Biológicas	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Amigable con el medio ambiente.• Alta velocidad de descomposición.• Actividad reguladora del crecimiento.• Libre de plagas y semillas de malas hierbas.

Beltrano y Giménez, 2015.

2.9 Función de los elementos en la nutrición mineral de cultivos

Según Swain et al., (2021) para el desarrollo y crecimiento de las plantas, se necesitan 17 elementos esenciales, estos se dividen en macro y micronutrientes.

Macronutrientes

El carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) en comparación con los demás nutrientes no se introducen en la SN, por lo que las plantas toman el C del CO₂ del aire, el H y O lo adquieren del agua.

Nitrógeno: implicado en la formación de ácidos nucleicos, aminoácidos y proteínas; maximiza la eficiencia de productividad de estolones, mayor vigor en las hojas y le da el color verde (Pandey, 2015).

Fósforo: promueve el desarrollo de la floración, sistema radicular, en el metabolismo energético y el proceso de fotosíntesis (Aquino, 2015).

Potasio: ajusta la apertura y cierre de estomas, la absorción de CO₂, mejora la calidad del fruto (firmeza y el sabor) incrementa la productividad y resistencia a condiciones de estrés hídrico (Morales y Riquelme 2017).

Calcio: promueve el desarrollo del sistema radicular, mejora la calidad para el cuaje y firmeza del fruto, resiste a la presencia de plagas y enfermedades (IICA, 2017).

Magnesio: nutriente principal de la clorofila, le da el color verde a la hoja, participa en la fotosíntesis y síntesis de las proteínas (Aquino, 2015). Contribuye con el P para la formación de semillas y ayuda a que otros elementos puedan ser absorbidos (Morales y Riquelme, 2017).

Azufre: participa en la formación de la clorofila, aumenta el desarrollo del sistema radicular, formación de semillas y en combinación con el K mejora la calidad del fruto (Morales y Riquelme, 2017).

Micronutrientes

Los micronutrientes suelen ser necesarios en cantidades mínimas; sin embargo, son vitales para el crecimiento de las plantas. El uso adecuado de los micronutrientes es esencial para que el cultivo de hortalizas obtenga el máximo rendimiento de productos de alta calidad. El metabolismo de las plantas, la regulación de nutrientes, la síntesis de clorofila, el crecimiento reproductivo, la retención de flores, el desarrollo de frutos y semillas, etc., son funciones efectivas realizadas por varios micronutrientes. Los

micronutrientes esenciales para todas las plantas superiores son el boro (B), el cloro (Cl), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el zinc (Zn), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo) y el níquel (Ni). Los micronutrientes como Cl, Cu, Fe y Mn participan en diversos procesos fotosintéticos y Zn, Cu, Fe y Mn están asociados con diversas actividades enzimáticas; el Mo es específico únicamente del nitrato reductasa. El B está asociado con el metabolismo de los carbohidratos y la fase reproductiva de las plantas junto con la fotosíntesis o actividades enzimáticas (Sidhu et al., 2019).

2.10 Nutrición mineral en cultivos sin suelo

Fussy y Papenbrock (2022) mencionan que para la nutrición mineral en cultivos sin suelo debe considerarse dos aspectos importantes: la proporción de nutrientes por parte del sistema y la reacción de las plantas ante la nutrición.

Cada elemento cumple con funciones específicas en las plantas, los asimilan y absorben de forma diferente, ninguno puede ser reemplazado por otro (Goswami y Yadav, 2022).

Las técnicas de cultivo sin suelo permiten proporcionarle a la planta la cantidad de nutrientes y agua que necesita por etapa fenológica, siendo posible esto por medio de la modificación de la solución nutritiva, ya que dichos elementos se encuentran en forma iónica y permite su fácil absorción, evitando la búsqueda o competencia de nutrientes como ocurre en el suelo (Swain et al., 2021).

2.10.1 Calcio

En las plantaciones comerciales de fresa es común observar plantas que presentan las puntas de las hojas jóvenes quemadas y las hojas adultas deformadas. La anomalía ocurre principalmente entre marzo y junio, periodo de temperaturas cálidas. Se ha notado que hay diferencia varietal en la susceptibilidad, la cual por la sintomatología se presume que es debido a una deficiencia de calcio (Ca). Esto es apoyado de manera indirecta, ya que en las plantaciones de fresa manejadas mediante fertirrigación y aplicación de compuestos de Ca, la deficiencia no se presenta.

Bajo las condiciones del Bajío, se desconoce cuándo pudiera afectar la deficiencia de Ca la productividad y calidad de la fresa. No obstante, algunos agricultores realizan aplicaciones de fertilizantes a base Ca para evitar este problema asumiendo a priori que hay un efecto negativo (Espino et al., 2017).

2.10.2 Potasio

El potasio (K) es uno de los elementos principales para el desarrollo en planta de fresa, es fundamental para el crecimiento y la fructificación por lo que estimula una pronta maduración, generando mejor tamaño, aroma, acidez y azúcar (Khalil y Hammoodi, 2021).

La deficiencia de K genera un bajo rendimiento en el cultivo de fresa, presentándose con tallos débiles, hojas con poco vigor, cloróticas, pasando a tener necrosis en los bordes y puntas (Dixon et al., 2019).

Por otro lado, (Espino et al., 2017) menciona que bajas concentraciones de K afecta la calidad del fruto en cuanto a menor coloración, maduración heterogénea y firmeza, ya que esto ocasiona una disminución en la disponibilidad de Mg y Ca.

Bajo el punto de vista agrícola, en cuanto al desarrollo y producción de cosecha, la deficiencia de K resulta en una reducción de los órganos de reserva, falta de resistencia a enfermedades, así como una prolongación del periodo vegetativo y por tanto un retraso en la maduración de frutos, los cuales resultan con sabores ácidos y por tanto en una disminución general de los rendimientos (Espino et al., 2017).

2.10.3 Nitrógeno

El nitrógeno (N) es un macronutriente que se obtiene de forma natural por fijación simbiótica en el suelo. Las plantas absorben la mayor parte del nitrógeno como iones nitrato (NO_3^-) y en menor proporción como amonio (NH_4^+), es el constituyente de un gran número de compuestos orgánicos, que son esenciales en el metabolismo de la planta. La presencia del N guarda una relación directa con la cantidad de hojas, tallos, brotes y macollos debido a que es necesario para la síntesis de clorofila y por lo tanto, para el proceso de fotosíntesis. Además, forma parte de proteínas, ácidos nucleicos y vitaminas (Bolda, 2015).

El N se caracteriza por su alta movilidad en el suelo y por tener distintas vías de pérdida, como en el drenaje de los fertilizantes aplicados, fijación del N por rizobios en las raíces de leguminosas, pérdidas gaseosas (volatilización), bacterias fijadoras libres, desnitrificación por microorganismos consumidores de NO_3^- , precipitaciones, erosión y cosechas (Espino et al., 2017).

Por otra parte, cantidades excesivas de N originan plantas suculentas, con pocas partes

leñosas, disminución muy marcada en el desarrollo de las raíces y con un amplio desarrollo aéreo. Las hojas toman un color verde oscuro y la maduración se retrasa. En algunas variedades se alarga el período de crecimiento, lo que trae consigo una mayor proporción de materia verde en relación al fruto. Mientras que los frutos exhiben una piel gruesa, bajo porcentaje de jugo y poco contenido de vitamina C. El crecimiento de la planta es acelerado y utiliza rápidamente otros elementos disponibles, además, se presenta mayor susceptibilidad a enfermedades y factores abiótico como sequías y heladas (Espino et al., 2017).

2.11. Nutrición mineral con elementos benéficos.

Se 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 amorfa (Giménez 2019)

El silicio (Si) es uno de los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre. No obstante, la acción de la meteorización provoca que el Si natural sea insuficiente para desempeñar su papel. El Si aumenta la resistencia de las plantas a las temperaturas bajas o altas, viento, sol, los metales pesados y el ataque de insectos, hongos y enfermedades. El Si está presente en las plantas en cantidades equivalentes a los macronutrientes tales como calcio, magnesio y fósforo, sin embargo; en los pastos se encuentra a niveles más altos que cualquier otro constituyente inorgánico. (Caicedo y Chavarriaga, 2008)

2.11.1 El silicio como elemento benéfico.

El silicio (Si) juega un papel importante en la planta, este elemento controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, incrementa la resistencia de la planta al estrés abiótico temperatura, viento, alta concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, aluminio, etc. (Furcal-Beriguete, 2012)

El papel del Si en el metabolismo de la planta no está del todo claro y no está demostrada su esencialidad como nutriente. Pero por los múltiples beneficios que supone la fertilización con Si, especialmente en el cultivo sin suelo, lo consideran un elemento en la solución básica para algunos cultivos. Se ha descrito una amplia gama de beneficios que aporta el Si a las plantas y el gran papel que este adquiere como

protector ante estrés biótico y abiótico, por lo que es recomendable su aplicación en la solución nutritiva (SN) empleada, especialmente para los cultivos sin suelo (Giménez, 2020)

2.11.2 El silicio y su función en las plantas

Los elementos se han clasificado en esenciales, los cuales son absolutamente necesarios para el crecimiento de todas las especies de plantas. Sin embargo; los elementos benéficos, tienen efectos positivos en algunas especies de plantas o bajo condiciones específicas. El Si, es un elemento clasificado como benéfico ya que se han observado efectos positivos que el nivel de Si provoca. (Quiroga, 2016)

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).

Se mencionan que son aquellos elementos que en forma directa o indirecta benefician la nutrición de las plantas, sin ser indispensables en la nutrición mineral. Los elementos que se compensen por los efectos tóxicos de otros elementos, o que simplemente reemplacen los nutrimentos minerales en algunas funciones específicas como la manutención de la presión osmótica, estos no son esenciales, pero pueden denominarse elementos benéficos, por ejemplo: Na, Si, Co, Ni, Al, V (Favela et al. 2006)

2.11.3 El silicio en la nutrición de cultivos.

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 ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en espacios inter o intracelulares. El ácido monosilícico (H_4SiO_4), es la forma en que el Si es absorbido por las plantas, este ácido monosilícico reacciona con los fosfatos insolubles de aluminio, hierro, manganeso y calcio, formándose silicatos de cada uno de ellos, liberando el ion ortofosfato para ser absorbido por las plantas, el Si

neutraliza mejor la toxicidad del aluminio en suelos ácidos, desafortunadamente la aplicación de cal fija el fósforo y transforma el fósforo disponible en no disponible para la planta, siendo la aplicación del Si además de la anterior función, liberadora del fósforo (Aguilar González, 2015).

2.12 Solución nutritiva en cultivos sin suelo

Los métodos de cultivo sin suelo permiten a los productores controlar la disponibilidad de elementos esenciales ajustando o cambiando la solución nutritiva (SN) para adaptarla a la etapa de crecimiento de la planta y proporcionarlos en cantidades equilibradas. Como los nutrientes están presentes en formas iónicas en la SN y, además, no necesitan buscar ni competir por los nutrientes disponibles como lo hacen en el suelo, las plantas cultivadas sin suelo alcanzan la madurez mucho antes. La optimización de la nutrición vegetal es fácilmente lograda en cultivo sin suelo que en el suelo (Goswami y Yadav, 2022).

2.12.1 pH

El pH determina la disponibilidad de elementos vegetales esenciales. El rango de pH óptimo para la solución nutritiva de cultivos sin suelo está entre 5.8 y 6.5. Cuanto más cerca esté el pH del rango recomendado, mayores serán las probabilidades de éxito. Las deficiencias se harán evidentes o se desarrollarán síntomas de toxicidad si el pH es más alto o más bajo que el rango recomendado (Goswami y Yadav, 2022).

2.12.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) indica la fuerza de la SN, medida mediante un conductímetro. La unidad para medir la CE es dS/m. Una limitación de la CE es que indica sólo la concentración total de la solución y no los componentes individuales de los nutrientes. El rango de CE ideal para hidroponía está entre 1.5 y 2.5 dS/m. Una CE más alta evitará la pérdida de nutrientes. La absorción debido a la presión osmótica y la menor CE afectan gravemente la salud y el rendimiento de las plantas. (Goswami y Yadav, 2022).

2.13 Sistemas hidropónicos abiertos en cultivos sin suelo

Según Fussy y Papenbrock (2022), en estos sistemas el agua sobrante del riego que se aplica no se reincorpora al sistema, solamente se drena produciendo contaminación por los NO_3^- y fosfatos, por lo que implica un mayor gasto de agua y fertilizantes.

2.13.1 Inmersión de raíces

En esta técnica, las plantas se cultivan en pequeñas macetas llenas con poco medio de cultivo. Las macetas se colocan de tal manera que los 2 a 3 cm inferiores de las macetas se sumergen en la SN. Algunas raíces se sumergen en la solución mientras que otros cuelgan en el aire para la absorción de nutrientes y aire, respectivamente. Este método de cultivo de baja tecnología es económico de construir y necesita poco mantenimiento. Es importante destacar que esta técnica no requiere artículos costosos. semejante como electricidad, agua bomba, canales, etc. (Goswami y Yadav, 2022).

2.13.2 Flotante

Técnica donde las plantas estarán en recipientes anclado en los orificios de una lámina de poliestireno flotando sobre la SN, una ventaja es que no depende de la energía eléctrica para la producción (Goswami y Yadav, 2022).

2.13.3 Acción capilar

Consiste en plantar macetas de diferentes tamaños y formas con orificios en la parte de abajo. Las macetas son llenadas con un medio inerte en donde las plántulas/semillas se plantan. Estas macetas se colocan en lugares poco profundos. La SN alcanza el inerte medio por acción capilar. La aireación es muy importante en esta técnica. Por lo tanto, se puede utilizar polvo de fibra de coco mezclado con arena o grava. Esta técnica es adecuada para ornamentales y flores y plantas de interior (Goswami y Yadav, 2022).

2.14 Sistemas hidropónicos cerrados

Este tipo de sistemas son amigables con el medio ambiente, el sobrante del riego que se aplica se reincorpora al sistema, por lo que se adecúa la SN para su recirculación. estos sistemas dependen de la energía eléctrica, por lo que puede ser un inconveniente, sin embargo, los nutrientes y el agua se utilizan en menores cantidades (Fussy y Papenbrock, 2022).

2.14.1 Técnica de la película nutritiva

El sistema de película nutritiva (NFT) es un verdadero sistema hidropónico donde las raíces son directamente expuestas a la SN. Los sistemas de NFT deben un constante flujo de SN por lo que no se requiere un temporizador para la bomba sumergible. La solución se bombea a la bandeja de cultivo (generalmente un tubo) y fluye sobre las raíces de las plantas, y entonces se drena atrás en el reservorio. Normalmente la planta es soportada en una pequeña cesta de plástico con las

raíces colgando en la SN. Los sistemas NFT son muy susceptibles a cortes de energía y fallas en las bombas. Las raíces se secan muy rápidamente cuando el flujo de la SN se interrumpe (Goswami y Yadav, 2022).

2.14.2 Técnica de flujo profundo

En esta técnica, 2 a 3 cm de la SN a través de tuberías de PVC de 10 cm de diámetro, a las que se conecta una red de plástico. Las cestas de plástico contienen las plantas y en su fondo tocan la SN que fluye por las tuberías. Las plantas se establecen en contenedores que consisten en una red de plástico y se fijan a los agujeros realizados en los tubos de PVC. Sustratos como el polvo o fibra de coco o cáscara de arroz carbonizada o una mezcla de ambos puede ser para llenar estas cestas. Un pequeño pedazo de red se coloca como revestimiento en las cestas para evitar que el material de siembra caiga en la SN. Cuando la solución reciclada cae en el tanque de almacenamiento, la SN se airea. Los tubos de PVC tienen pendiente de caída de 1 cm en 30-40 cm para facilitar el flujo de la SN. Se recomienda pintar los tubos de PVC de blanco para reducir el calentamiento sobre de la SN (Goswami y Yadav, 2022).

2.14.3 Sistemas de raíz flotante

Este sistema es muy práctico, se cultivan hortalizas en cajas de plástico o madera, las raíces de las plantas quedarán sumergidas en la SN, mientras que la parte superior de la planta se sostiene en una lámina de poliestireno que estará flotando sobre el nivel de la solución (SIAP, 2016).

2.14.4 Sistema de subirrigación

Es una técnica de riego que proporciona agua o solución fertilizante al fondo de los contenedores. La acción capilar del sustrato proporciona agua y nutrientes a las raíces. Las propiedades físicas del sustrato pueden afectar la eficiencia del ascenso capilar. Se necesita una estabilidad del medio, densidad, estructura de partículas y capacidad de retención de agua adecuadas para permitir el movimiento del agua dentro de los contenedores. Los sustratos con partículas grandes tienen grandes espacios porosos, lo que reduce la acción capilar. Los sustratos sin suelo más utilizados son adecuados para subirrigación, y se pueden mezclar diferentes sustratos para satisfacer necesidades particulares (Ferrarezi et al., 2015).

2.14.5 Aeroponía

El cultivo en aeroponía es una modalidad en el manejo de plantas que permite su cultivo

sin suelo. Mediante esta técnica se producen plantas principalmente de tipo herbáceo, aprovechando sitios o áreas no convencionales, sin perder de vista las necesidades de las plantas, como luz, temperatura, agua y nutrientes. En el sistema hidropónico los elementos minerales esenciales son aportados por la SN. El rendimiento de los cultivos hidropónicos puede duplicar o más los de los cultivos en suelo. La disponibilidad de agua y nutrientes, los niveles de radiación y temperatura del ambiente, la densidad de siembra o disposición de las plantas en el sistema hidropónico, la acción de patógenos o plagas, etc. (Lakhiar et al., 2018).

Una variante de la hidroponía es la aeroponía, que consiste en rociar las raíces de las plantas con soluciones o neblinas de nutrientes atomizados. Se reduce la necesidad de fertilizantes, herbicidas y pesticidas si se logra un aislamiento eficaz del duro clima externo (Benke y Tomkins, 2017).

2.15 Agricultura vertical

La agricultura vertical se propuso con el objetivo de aumentar la cantidad de superficie agrícola mediante la "construcción hacia arriba". En otras palabras, la superficie cultivable efectiva para cultivos se puede aumentar mediante la construcción de un edificio alto con muchos niveles en la misma superficie de terreno. Un enfoque es emplear un diseño de invernadero único y alto con muchos estantes de cultivos apilados verticalmente. El modelo de agricultura vertical es esencialmente una granja cubierta basada en un diseño de varios niveles y gran altura. Las características típicas incluyen el uso innovador de agua reciclada aumentada con agua de lluvia o agua de una planta desalinizadora, control automático de temperatura y humedad del aire, iluminación y calefacción con paneles solares e iluminación LED ajustable las 24 horas. El equipo LED se puede controlar durante toda la temporada de crecimiento para emitir un espectro de luz programado que sea óptimo para la fotosíntesis de diferentes tipos de cultivos (Benke y Tomkins, 2017).

2.15.1 Origen

La agricultura vertical se origina como una respuesta a la necesidad del sector urbano y como una alternativa que garantiza la soberanía alimentaria; se desarrolló en los años 1800 cuando en Alemania durante la revolución industrial se prolongó la idea de mejorar las condiciones ambientales para los habitantes y para ello surge la idea de la

implementación de huertos (Paucar, 2022).

2.15.2 Agricultura vertical a nivel mundial

La agricultura vertical a nivel mundial es un sistema de producción que ha cautivado la atención de la población, sobre todo por ser la esperanza de la seguridad alimenticia en los próximos años (Butturini y Marcelis, 2020).

Para el 2050 se estima que la población mundial tendrá un aumento de 7.300 a 9.800 millones de personas en el planeta, por lo que se tendrá que producir un 50% más de lo alimentos para abastecer a la población.

2.15.3 Agricultura vertical a nivel nacional

Dos empresas han comenzado a colaborar en la agricultura vertical en México: Verde Compacto, ubicada en el Tecnológico de Monterrey en León Guanajuato, México (Verde compacto, 2023) y Karma Verde Fresh (KfV), ubicada en Monterrey, Nuevo León en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Saltillo, Coahuila (KfV, 2023). Algunos trabajos de investigación han generado publicaciones científicas en México, actualmente se conocen algunas por la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) y la UAAAN.

2.15.4 Impacto

Benke y Tomkins (2017) han enumerado una serie de impactos que la agricultura vertical puede aportar a la producción de alimentos, mismos que se muestran en los siguientes ámbitos:

Social

- Fuentes de empleo para los habitantes de la región.
- Progreso en el desarrollo de la tecnología agrícola.
- Estilo de vida más saludable al consumir productos frescos y de alta calidad.

Económico

- Producción eficiente para la demanda de los alimentos.
- Baja inversión en fertilizantes y biopesticidas.
- Poca inversión en maquinaria pesada.
- Libre de pérdidas por desastres naturales.
- Ahorro de transportación.

Ambiental

- No exige el uso de suelo.
- Uso de fuentes renovables.
- Restauración del suelo y ecosistemas.
- Uso de aguas residuales para riego.
- Recolección de agua transpirada por las plantas.
- Se promueve la conservación de la biodiversidad.
- Menor consumo de combustibles fósiles.

2.15.5 Beneficio

Se han señalado los beneficios que la agricultura vertical aporta a la producción de alimentos, mismos que se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5 Beneficios de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social.

Beneficio	Económico	Ambiental	Social
Menor distancia de transporte.	Ahorro de combustibles.	Menor contaminación del aire.	Mejor salud humana.
Uso de aguas residuales.	Menor costo del agua.	Menor cantidad de agua utilizada	Disponibilidad de agua.
Ejecución de restos orgánicos.	Darles utilidad a los restos.	Restricción de escombros.	Alimentos nutritivos.
Fuentes de empleo.	Mayores ingresos locales.	Menor huella ecológica.	Trabajo para los habitantes.
Menor uso de plaguicidas.	Menor compra de plaguicidas.	Menor contaminación del medio ambiente.	Alimentos libres de pesticidas.
Buena productividad.	Producción segura todo el año.	Uso de espacios pequeños o edificios.	Trabajo eficiente en menor tiempo.
Producción todo el año.	Inversiones seguras.	Menor daño en el medio ambiente.	Seguridad alimenticia.
Empleo de energías limpias.	Menor inversión monetaria.	Menor consumo de combustibles.	Aire puro y fresco.
Producción de alimentos sanos.	Costos bajos por daños al medio ambiente.	Conservar la biodiversidad de nuestro planeta.	Mejor estilo de vida.
Uso de espacios deshabitados.	Recuperación económica.	Evita el desalojo de flora y fauna.	Mejor presentación del sitio.

Fuente: (Mir et al., 2022).

2.15.6 Lámparas LEDs (Light emitting diodes)

Los diodos emisores de luz (LED) son una tecnología prometedora con potencial para mejorar la eficiencia de la irradiación, la calidad de la luz y el espectro de luz para aumentar el rendimiento y la calidad de las plantas (Amoozgar et al., 2017).

La iluminación LED permite que las plantas crezcan hasta dos veces y media más rápido y ha disminuido el ciclo de días y noches con condiciones optimizadas de temperatura y humedad. Se utiliza iluminación LED de alta eficiencia para aumentar la luz natural del diseño del invernadero (González y Laydin, 2012).

Se ha descubierto que el contenido espectral de la iluminación, como la longitud de onda azul en la iluminación LED, cambia las concentraciones de metabolitos primarios y secundarios nutricionalmente importantes en cultivos de hortalizas especiales. En particular, la respuesta de las plantas a diferentes longitudes de onda de luz de fuentes LED sugiere que es posible lograr mejoras muy significativas en la productividad (Benke y Tomkins, 2017).

Las luces LED muestran un gran potencial en la producción intensiva en espacios de cultivo vertical e interiores, debido a su alta eficiencia en emitir las diferentes longitudes de onda que las plantas requieren en sus distintos procesos. Poseen grandes ventajas frente a otras fuentes de iluminación, como lo son: la mayor eficiencia en el consumo energético, gastos mucho menores, vida útil más larga, menor tamaño, más resistentes y no emiten casi calor. (Berber, 2022).

2.13.7 Humedad relativa

La humedad relativa (HR) es una condición climática que interviene en el balance hídrico y ajusta la tasa de transpiración de las hojas; para el cultivo de fresa el rango permitido es de 60% a 75% (Bogotá, 2015).

El control de la HR por lo regular necesita la mayor ventilación posible, una baja HR aumenta en la planta la circulación de agua y por ende la transpiración es mayor (Ferrante y Mariani, 2018). Por el contrario, una alta HR disminuye asimilación de los elementos por la planta, la transpiración y el estrés hídrico (Hatfield y Prueger, 2015).

El déficit de presión de vapor (VPD) también afecta drásticamente a las plantas, un VPD bajo permite que las enfermedades lleguen rápidamente, ya que se acumula humedad en la planta y baja notoriamente la productividad (Linker et al., 2011) un VPD alto

demanda mayor agua en la planta necesitando mayor ventilación y en condiciones extremas las hojas no generarían transpiración por el cierre de estomas (Kozai et al., 2019).

MATERIALES Y METODOS

3.1 Sitio de estudio

La investigación se realizó en el Laboratorio de Agricultura Vertical de Ambiente Controlado del Departamento de Ciencias del Suelo, ubicado dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con dirección Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México (Figura 1).



Figura 1 Ubicación del Laboratorio de Agricultura Vertical en el Departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN. Fuente: Google Maps, 2024.

3.2 Material vegetativo

Se utilizaron 60 plántulas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*) variedad San Andreas, la cual se caracteriza por ser de día neutro, lo que significa que las horas luz no alteran a la producción de los frutos.

3.3 Preparación del sustrato

Se preparó una mezcla de sustrato con la proporción de 70:30 v/v perlita y peat moss al cuál se le ajustó a pH con bicarbonato de sodio a 5.8 y CE 0.9 dS/m^{-1}

Esta mezcla se empleó para llenar bolsas de polietileno de cinco litros color negro a las cuáles se les realizó una perforación en la parte inferior para facilitar el lixiviado de la solución. Una vez llenado el contenedor se realizó el primer riego pesado, utilizando solo agua ajustada a un pH a 5.5, para lavar el exceso del bicarbonato que se usó para ajustar pH.

3.4 Trasplante

Las plantas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*) variedad San Andreas, se trasplantaron en las bolsas colocando la plántula cuidadosamente para no dañarla y cubriendo con sustrato hasta dejarla firme sin cubrir lo que es la corona y así, evitar problemas de adaptación y que la planta no se empiece a secar.

3.5 Sistema de cultivo vertical de interior

Para este experimento, se utilizó una charola de aluminio de las siguientes dimensiones: 2.30 m de altura, 1.72 m de largo y 80 cm de ancho., donde dentro de ella se le colocaba otra bandeja de plástico de acrilonitrilo butadieno estireno de color negro, con las siguientes medidas: 1.71 m de largo, 73.5 cm de ancho y 10 cm de profundidad. En dichas bandejas se colocaron las bolsas de polietileno con la plántula de fresa. Se utilizaron lámparas LEDS sobre las mismas bandejas suspendidas por arriba de la plántula.

3.6 Control de temperatura y humedad relativa

La temperatura se controló y modificó con un minisplit de 2 toneladas diariamente de acuerdo a las necesidades de la planta de fresa.

La humedad relativa (HR) se mantuvo utilizando un humidificador de 0.5 L h⁻¹ dos extractores de 25 cm de diámetro, conectándose a un controlador de humedad digital de enchufe programable

3.7 Tratamientos de Silicio

Para la preparación de los tratamientos de Si se utilizó el producto comercial Diatomix® el cual contiene SiO₂ al 92% en el Cuadro 6 se encuentran los tratamientos que se utilizaron en las plantas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*) San Andreas. Los tratamientos que eran en drench (500ml por planta) y foliar (aspersión hasta el punto de goteo) se aplicaban cada 15 días.

Cuadro 6 Tratamientos de Silicio (Si) aplicados en el estudio con base en el producto Diatomix®.

Tratamientos	Drench gL ⁻¹	Foliar gL ⁻¹
T1	0.0	0.0
T2	0.1	0.1
T3	0.1	0.15
T4	0.1	0.2
T5	0.15	0.1
T6	0.15	0.15
T7	0.15	0.2
T8	0.2	0.1
T9	0.2	0.15
T10	0.2	0.2

3.8 Riego con solución

El riego se realizaba conforme a las necesidades de la planta, aplicando riego con las SN requerida y con riegos simples de agua con un pH de 6.5. El pH se tenía que ajustar con ácido sulfúrico (H₂SO₄), para así llegar al rango que es necesario para la planta que es de 5.5 a 5.8 máximo, teniendo una fracción de lixiviado de un 30%.

3.9 Podas de flores y frutos

Después del trasplante se permitió que la planta mantuviera el crecimiento vegetativo retirando las primeras flores que se formaron y así estimular un mayor vigor en la planta impidiendo que la planta joven entrará en producción.

La poda de frutos, empezó cuando la planta entró en producción de frutos, se

revisaban de dos a tres veces a la semana los frutos nuevos, retirando los que presentaban alguna malformación o deficiencia de nutrientes, también revisando que ningún fruto se pasara de madurez.

3.9.1 Control de plagas y enfermedades

Durante todo el ciclo vegetativo de la planta de fresa, estuvo expuesto a plagas y enfermedades, aun estando en un ambiente controlado.

Donde se tuvo la presencia de la araña roja (*Tetranychus urticae*), las primeras señales se presentaron con pequeños puntos de color blanco en el haz de las hojas y también en el envés se observaban los diferentes estadios de desarrollo, donde afectaba en el crecimiento de la planta. Se realizó un calendario de control que consistía en aplicar y rotar los productos una vez por semana.

3.10 Cosecha

La recolección de los frutos se realizó de forma manual. Al ser recolectados, cada fruto pasaba por diferentes evaluaciones en el Laboratorio de Agricultura Vertical, donde seleccionaban aquellos en buen estado y de mejor calidad para después ser almacenados en bolsas de plástico transparentes colocándole una etiqueta con el número de tratamiento. Las bolsas se colocaron en un congelador mientras se realizaban pruebas de calidad de cada fruto.

3.11 Variables evaluadas

3.11.1 Variables de rendimiento

➤ Rendimiento del cultivo

Se determinó el peso de cada uno de los frutos de cada tratamiento en gramos con la ayuda de una báscula digital de acero inoxidable (de la marca MESVIER, de color plateado). El rendimiento total se calculó sumando el peso de cada uno de los frutos cosechados de la planta durante todo el experimento.

➤ Numero de frutos

Al terminar el ciclo del cultivo se contaron el número de frutos por cada planta, por tratamiento y nivel, después se procedió a retirarlos y guardarlos en una bolsa de papel de estraza.

➤ Longitud de la corona y diámetro basal del fruto

Se determinó estas variables con la ayuda de un vernier digital, colocando a lo largo

y ancho de cada fruto.

➤ **Ancho de hoja y longitud de hoja**

Estas variables se determinaron con ayuda de una cinta de medir colocando a lo largo y ancho de cada hoja.

➤ **Longitud de la raíz**

Cuando se retiró la raíz de la planta procedimos a medirla con ayuda de una cinta de medir para así tener los resultados.

3.11.2 Variables agronómicas

➤ **Peso fresco foliar y numero de coronas**

Al momento de haber retirado las hojas, corona y la raíz de cada una de las plantas, estas fueron pesadas con ayuda de la báscula digital en el Laboratorio de Agricultura Vertical, después se guardaron en una bolsa de papel de estraza. El número de coronas formadas también fue contabilizado.

➤ **Peso seco foliar**

Una vez que quedaron agrupados y etiquetados todas las muestras, se pasaron a una estufa de secado que estaba en el Laboratorio y se calibró a 50°C, manteniéndose por un lapso de 24 a 48 horas; al estar secas las muestras se procedió a pesar cada una con la ayuda de la báscula digital.

3.11.3 Variables de calidad

➤ **Firmeza del fruto**

Se determinó con la ayuda de un penetrómetro manual (marca WAGNER) en las unidades de gramo/fuerza (gf) en tres frutos representativos por planta: se retiró con un cuchillo una parte de la parte externa del fruto, procediendo a colocar la punta del penetrómetro de modo firme, pulsando el botón pequeño de la parte central para que nos diera la lectura.

➤ **Sólidos solubles totales**

En el contenido de sólidos solubles totales (SST) se determinó con ayuda de un refractómetro manual (marca ATAGO) en °Brix; para ello se limpió la placa donde se pondrá la muestra con un pañuelo delgado, se colocaron de dos a tres gotas de la muestra de la pulpa del fruto, y se cerró la placa para poder visualizar la lectura por medio del ocular.

3.12 Diseño experimental

Los tratamientos consistieron en cuatro concentraciones de Si aplicados en forma de drench o aspersión foliar. Cada tratamiento consistió de seis repeticiones con una planta cada uno. El diseño experimental fue en bloque completamente al azar y con los datos se realizó un ANOVA y en caso de detectar significancia estadística los promedios fueron separados mediante la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

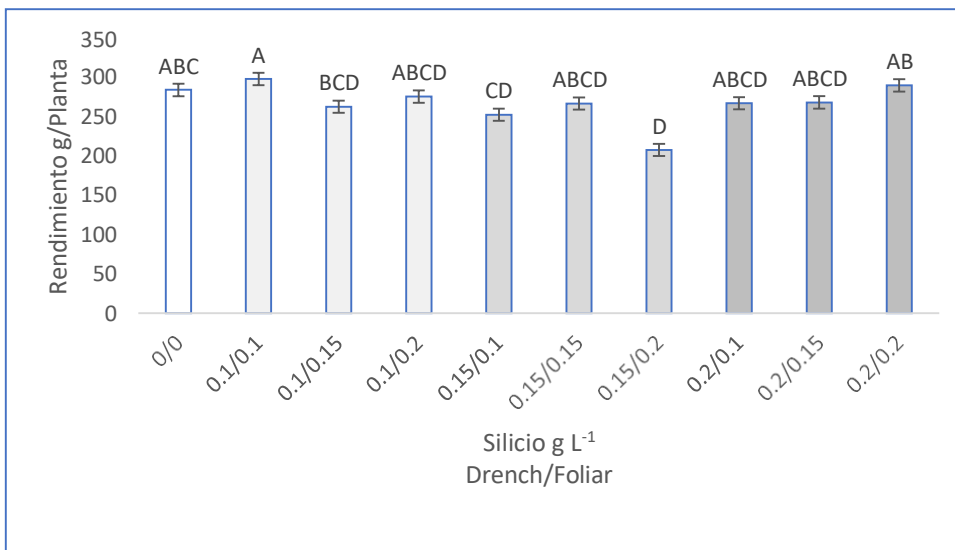
RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Rendimiento del fruto

El rendimiento del cultivo en comparación del tratamiento control donde se aplicaron diferentes concentraciones de Si donde las dosis fueron 0.15 g L⁻¹ en drench y 0.2 g L⁻¹ aplicado foliarmente fue menor que al testigo (Figura 2). Los restantes tratamientos mostraron un rendimiento de fruto similar al testigo.

Cruz Hipólito (2018) señala que el rendimiento producido por el suministro de Si en el cultivo de fresa responde a la dosis y la forma en la cual se aplicó el elemento. El mayor rendimiento se observó para la dosis más alta de Si cuando este se incorporó en la SN, mientras que la aplicación foliar alcanzó el máximo rendimiento a una concentración 2.0 g L⁻¹ de Si y disminuyó a medida que la concentración fue aumentando.

Figura 2. Rendimiento de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) cosechado de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



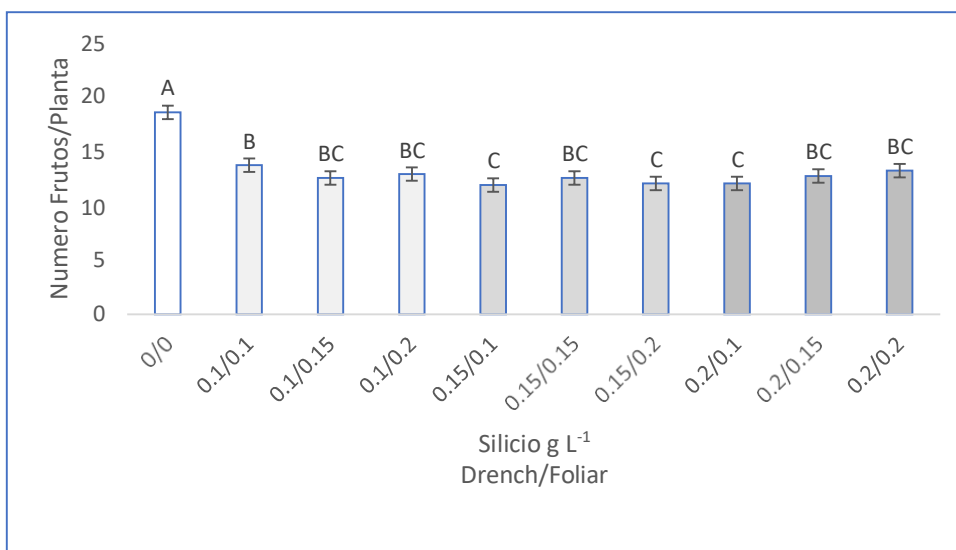
Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

4.1.1 Número de frutos

De acuerdo a los datos obtenidos se observó que hay una disminución significativa en todas las plantas en las que se aplicó el Si, comparado con las plantas del

tratamiento testigo (Figura 3). García - Mendoza (2019) encontró que con la aplicación de NPs-Si estimuló el aumento de número de frutos en plantas de tomate. Quiroga (2016) señala que al momento no existe mucha información del tema de la aplicación de Si en el número de frutos en fresa, sin embargo, estudios realizados con el pepino muestran una respuesta benéfica ya que se reflejan los resultados significativos al usar las mayores dosis evaluadas (1000 L de riego y 1500 g de silicio) teniendo en cuenta que el T8 supero a los de más tratamientos, frente a los resultados estimados con la menor dosis (500 g de silicio) y sin ninguna aplicación (0 g). Por lo tanto, esto quiere decir que de acuerdo con el autor coincide que a mayor aplicación de Si es mayor el número de frutos en pepino.

Figura 3. Numero de frutos en fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

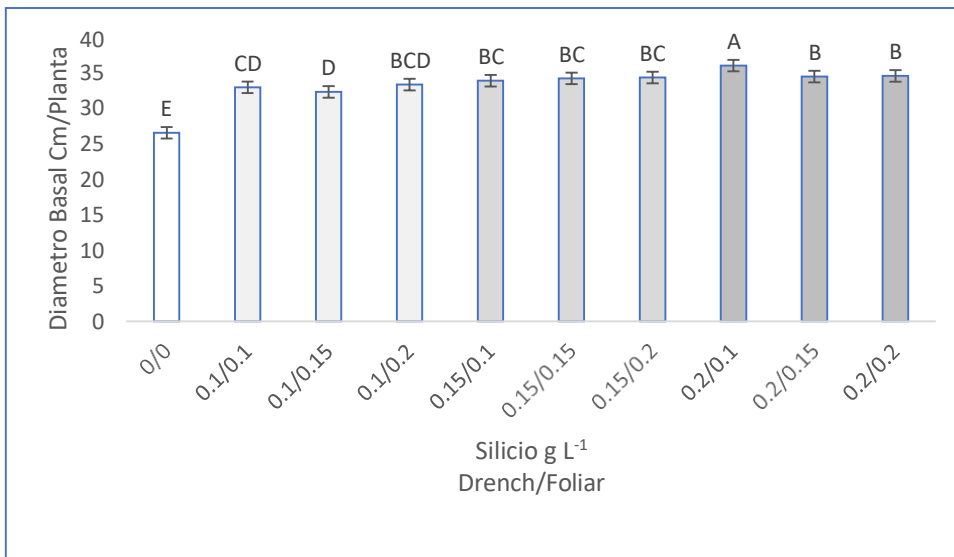
4.1.2 Diámetro basal del fruto

A pesar de disminuir el número de frutos, se observó que el diámetro de los mismos aumentó al utilizar las aplicaciones de Si (Figura 4), sin embargo, los frutos de mayor diámetro fueron los obtenidos de plantas tratadas con 0.2 g L⁻¹ de Si en drench combinado con 0.1 g L⁻¹ en forma foliar. El hecho de que las plantas de fresa tratadas con Si hayan aumentado el diámetro de los frutos puede estar relacionado con el

menor número de frutos producidos, por lo que al haber menos competencia por agua, nutrientes y reservas se permitía la mayor acumulación en aquellas plantas con menos frutos producidos.

Cázarez-Flores et al. (2023) en estudios realizados en tomate aplicando Si de manera foliar fue 7% de mayor grosor, superando a las plantas testigo, con dosis de 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Si, lo que coincide nuestros resultados con los de este autor.

Figura 4. Diámetro basal de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) cosechada de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

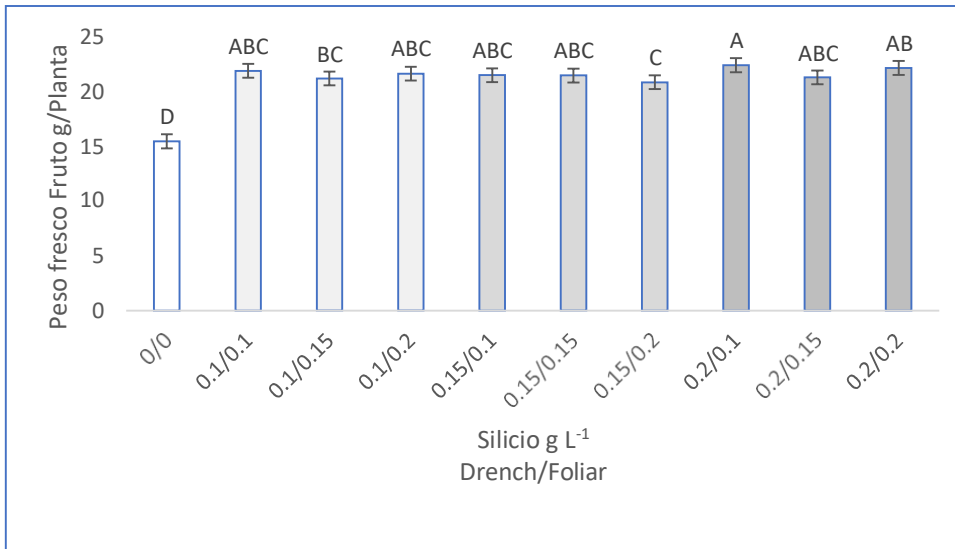
4.1.3 Peso fresco de fruto

Para el peso fresco hubo una diferencia significativa respecto al testigo ya que con concentración de 0.2 g L⁻¹ de Si en drench combinado con 0.1 g L⁻¹ aplicado foliarmente se obtiene el mayor peso de frutos. Con este tratamiento también se obtuvieron los frutos de mayor diámetro, lo que también sugiere que por la menor competencia entre menos frutos producidos permite obtener frutos de mayor tamaño y peso.

Hernández Valencia et al. (2022) reportan una diferencia significativa en el peso total de fruto por planta en el cultivo de fresa. Según los autores, las plantas tratadas

con la fertilización de origen animal (pescado) comparadas con el tratamiento de Si en las que se aplicaron 0, 15, y 20 ppm, por lo que coincide con los resultados del presente estudio ya que al aplicar más Si en drench se obtienen mejores resultados.

Figura 5. Peso fresco de fresa en fruto (*Fragaria x ananassa Duch*) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con el uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



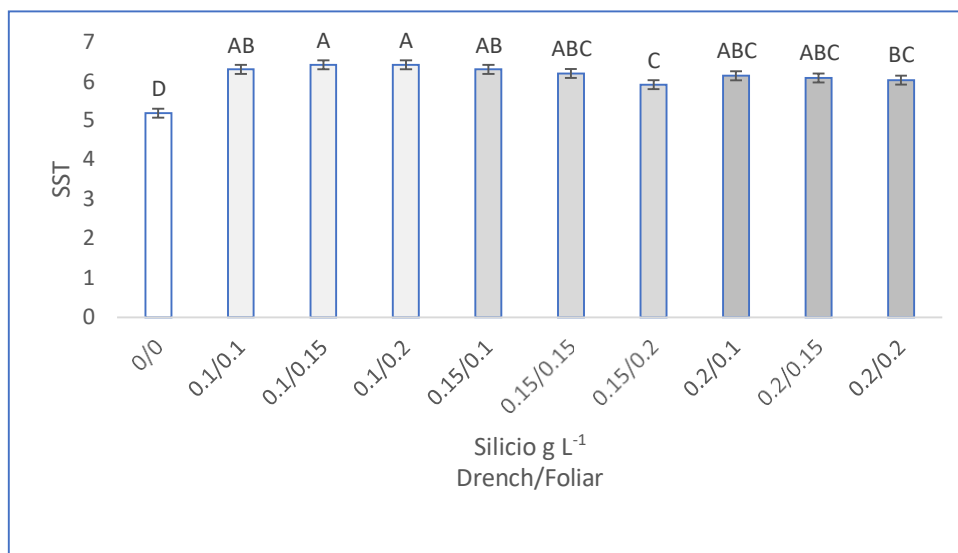
Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

4.1.4 Sólidos solubles totales

Con respecto a los SST, se puede observar que todos los tratamientos con Si superaron al testigo (Figura 6), corroborando que en las plantas que se obtuvieron menos frutos se logra obtener frutos más grandes, de mayor peso y de un mayor contenido de SST. Este aumento en SST indica que se mejora la calidad de los frutos ya que puede deberse a la acumulación de azúcares en los frutos, lo cual estaría asociado con una calidad óptima para el consumo (Pinedo-Guerrero, 2020).

Cruz Hipólito (2018) informa que en el contenido de SST no difirió entre los tratamientos, pero la respuesta para ambas formas de aplicación fue muy similar que se muestra mejor respuesta de los frutos a dosis bajas de Si (entre 1.0 y 2.0 g L⁻¹). Por lo que concuerda con nuestros resultados.

Figura 6. Sólidos solubles totales en frutos de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

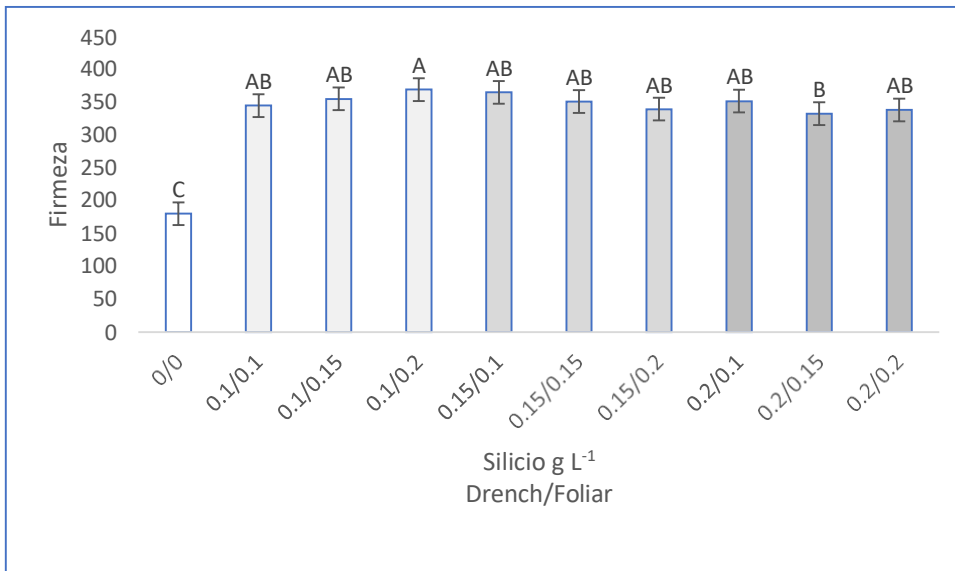
4.1.5 Firmeza del fruto

En firmeza podemos observar que todos los tratamientos lograron superar el testigo ya sea cuando el Si se aplicó vía foliar o en drench (Figura 7). La mayor firmeza de los frutos se atribuye a que el Si forma una capa rígida sobre la parte externa de los frutos, así como fuerza a la pared celular, por lo que el epicardio es más resistente al daño mecánico. Pinedo - Guerrero (2020). Menciona que el aumento de la firmeza en los frutos se puede deber a que el Si se acumula en la epidermis, volviéndola más rígida. Linares - Nieto (2019). realizó un experimento en pimiento morrón y encontró que con la aplicación de Si a dosis de 200 mg. L^{-1} también mejora la firmeza. Cruz Hipólito (2018) señala que la firmeza de los frutos en los tratamientos foliares de Si fue superior a aquellos en los que la aplicación fue a través de la solución exceptuando la concentración 3.0 g L^{-1} .

El aumento en la firmeza de los frutos de pepino por SiO_2 fue reportado por Abd-Alkarim et al. (2017), lo cual se ha atribuido al papel del Si en la estabilización de la pared celular al protegerla de enzimas degradativas, como la poligalacturonasa, la β -galactosidasa y la pectin metilesterasa (Karagiannis et al., 2021), aumentando la

resistencia de las paredes celulares, y la disminución de celobiosa en la cáscara de los frutos. El aumento en la firmeza de los frutos de tomate debido a las aplicaciones de SiO₂ también se ha atribuido a la unión de la sílice a la estructura de la celulosa en las paredes celulares (Sayed et al., 2022).

Figura 7. Firmeza del fruto de la fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) cosechados de plantas en condiciones de ambiente controlado con uso de lámpara LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.

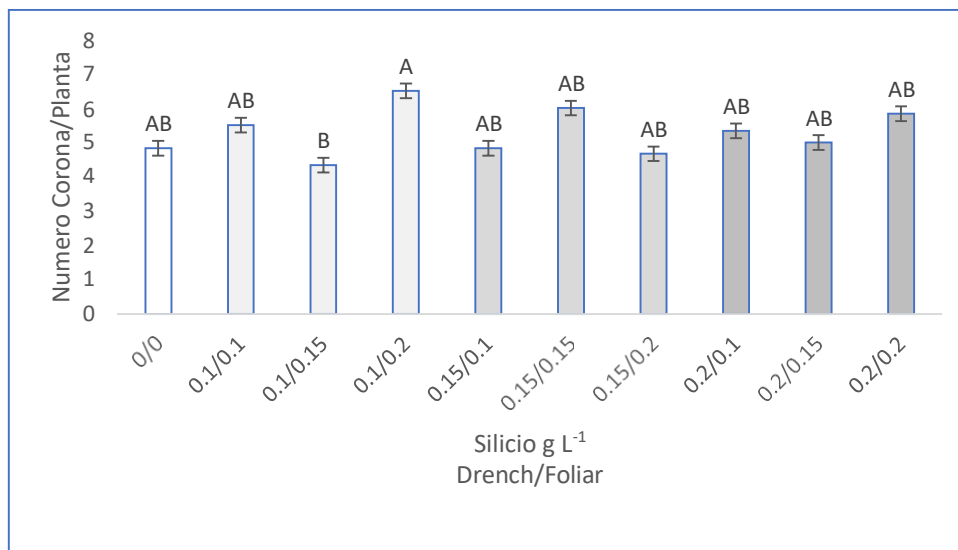


Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

4.1.6 Número de coronas

En cuanto al número de coronas se observó que ningún tratamiento con Si pudo superar al obtenido por las plantas del tratamiento testigo (Figura 8). Hernández Valencia et al. (2022) indican que aplicaciones con Si en drench no se obtuvo resultados favorables, mientras que para el testigo el número de coronas presentó un 2 % mayor sin Si, con lo que no coincide el resultado del autor con los tratamientos que se utilizaron.

Figura 8. Número de coronas en fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

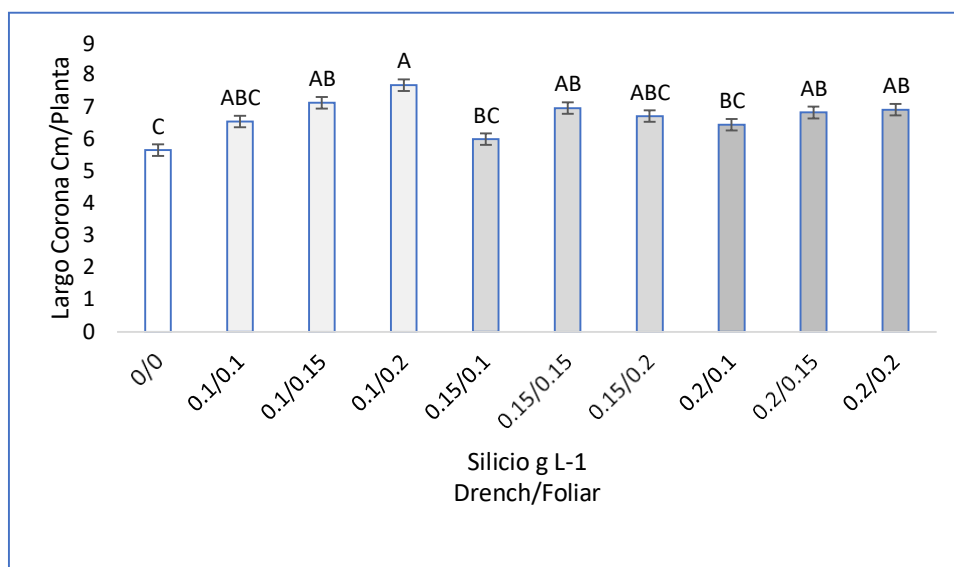
4.2 Longitud de corona y peso de corona y longitud de raíz

En la longitud de corona podemos observar que todos los tratamientos con Si en drench pudieron aumentar la longitud de las coronas siempre y cuando se utilizaran las dosis de 0.15 y 0.2 g L⁻¹ aplicados foliarmente (Figura 9). No se encuentra mucha información de la aplicación de Si en la longitud de la corona. Sin embargo, el peso seco de la corona también fue incrementado en plantas tratadas con 0.1 g L⁻¹ de Si aplicados en el drench combinados con 0.2 g L⁻¹ en aspersiones foliares (Figura 10). Estos resultados sugieren que para la aplicación de Si en drench la concentración no es importante sino más bien la concentración de Si en las aspersiones foliares debe ser más alta para estimular el crecimiento de las coronas.

Esto estuvo relacionado también con la longitud de las raíces ya que estas fueron más largas en plantas que recibieron la misma concentración de Si (Figura 11). Nuestros resultados están en línea con los informes de Dehghanipoodeh et al. (2016) en fresas ya que la aplicación de nSiO₂ resultó en un aumento de la biomasa de las raíces, mientras que Li et al., (2022) informaron un aumento en el peso fresco

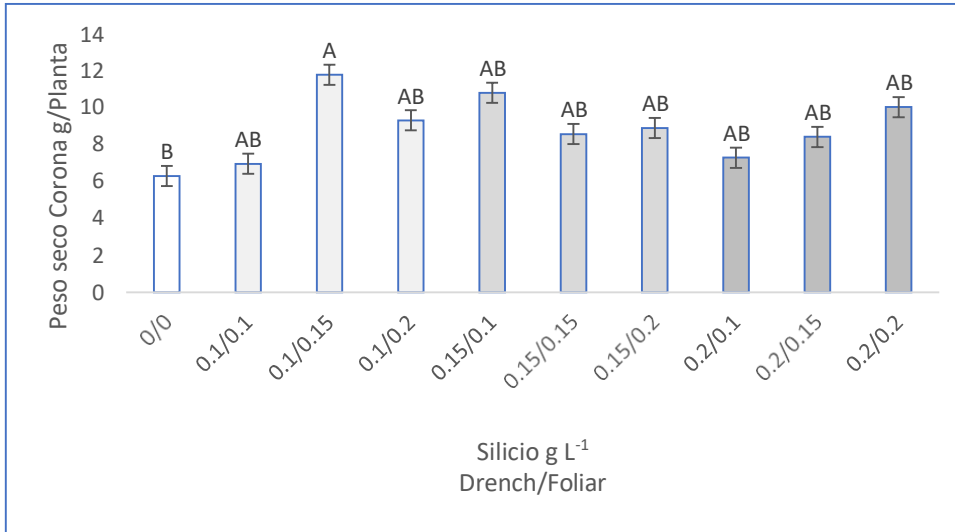
y seco de las raíces en plantas de pepino asperjadas con nSiO₂ a 50 y 20 mg L⁻¹, respectivamente. Siddiqui et al., (2020) mencionaron que la aplicación de Si mejora la longitud, el diámetro, el número de raíces laterales, así como el peso fresco y seco de las raíces en varias especies, lo cual puede atribuirse a la acumulación de fotosintatos que se almacenan en las raíces.

Figura 9. Longitud de la corona (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



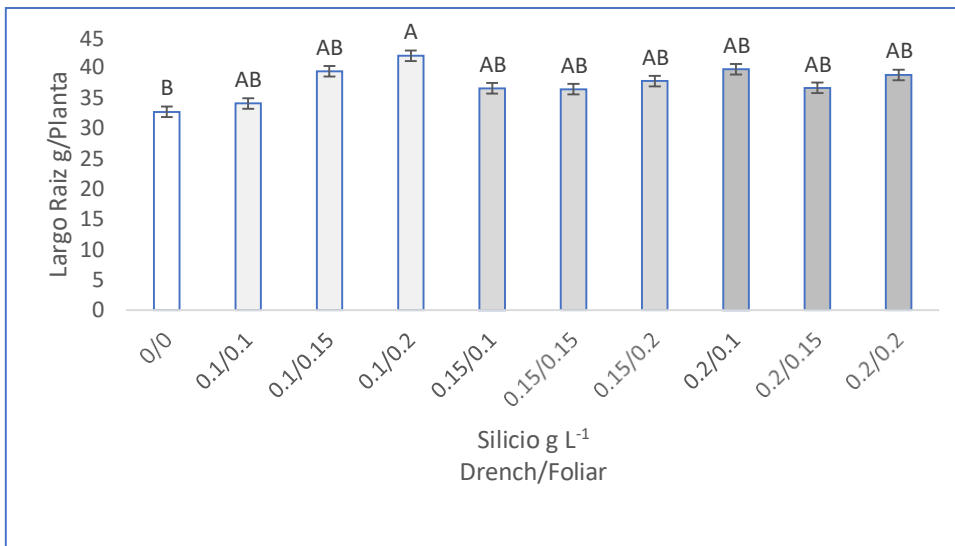
Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

Figura 10. Peso seco de la corona en plantas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

Figura 11. Longitud de raíz en la fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



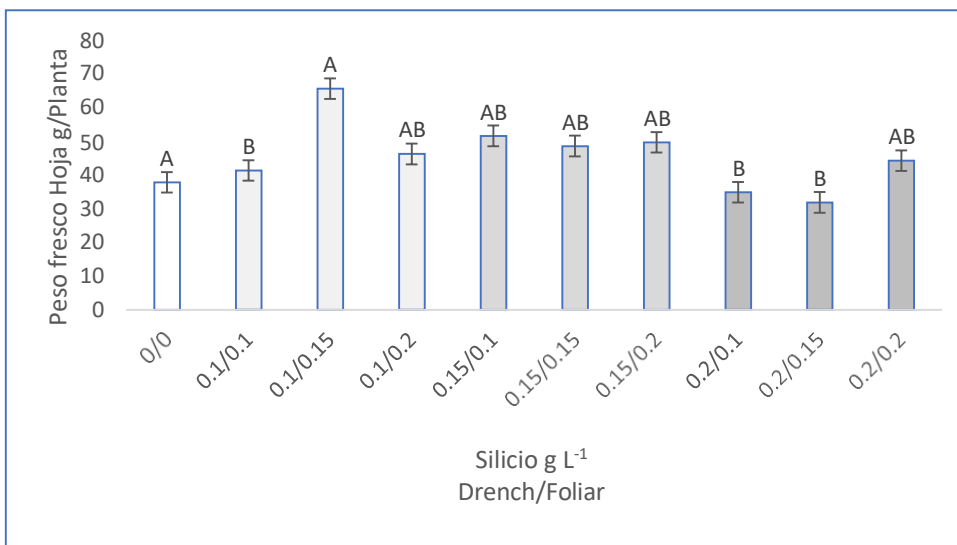
Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

4.3 Peso fresco foliar y seco foliar

Para el peso fresco (Figura 12) y seco (Figura 13) de las hojas se pudo observar es que con la concentración de 0.1 g L⁻¹ en drench y 0.15 g L⁻¹ en aspersión foliar se logra aumentar los valores de estas variables en comparación con las plantas testigo. Espinoza y Natali, (2018), señaló que en estudios realizados en el cilantro se observó que el tratamiento con Si en el drench ocupó el primer lugar en el orden de mérito con 110.66 g de peso fresco por planta, superando estadísticamente a los demás tratamientos, mientras que el tratamiento que ocupó el último lugar fue el testigo con 54.76 g de peso fresco por planta. Esto concuerda con nuestros resultados que se obtuvieron con los tratamientos.

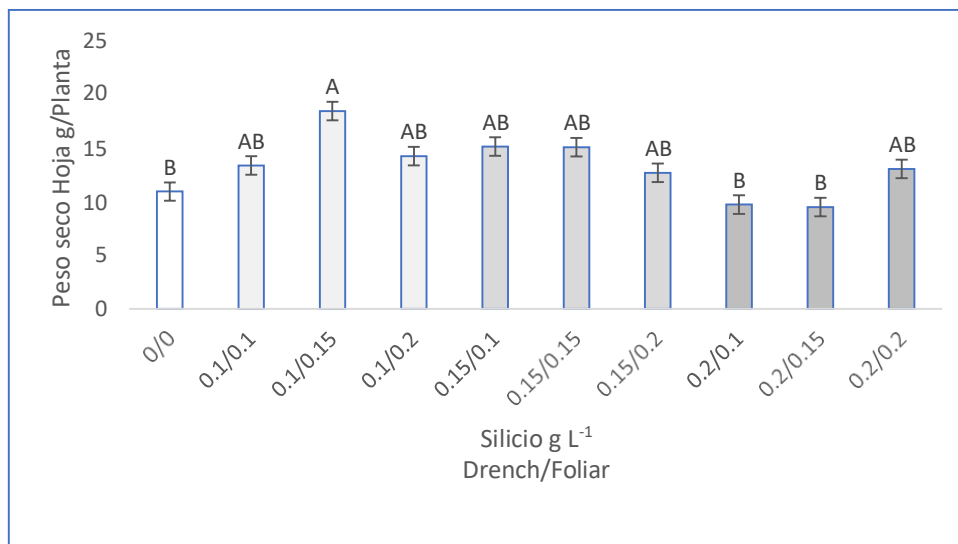
Caicedo y Chavarriaga, (2008) muestran que a mayor área foliar y a mayor altura de las plantas tratadas con Si en combinación con fosfato diamónico, mayor es su peso en la parte aérea, lo que lleva a concluir que la combinación de Si con una fuente fosfórica da como resultado un almácigo sano y vigoroso.

Figura 12. Peso fresco de hojas en plantas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

Figura 13. Peso seco de hojas en plantas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



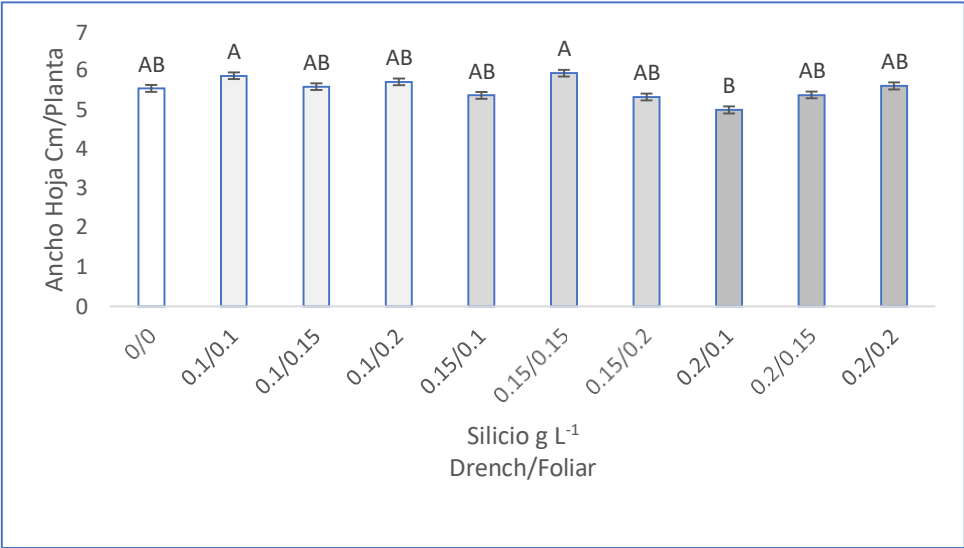
Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.4 Ancho y largo de hoja

Se observó que ancho (Figura 14) y largo (Figura 15) de la hoja no fue afectada por los tratamientos de Si pues estos fueron similares al obtenido por las plantas del tratamiento testigo.

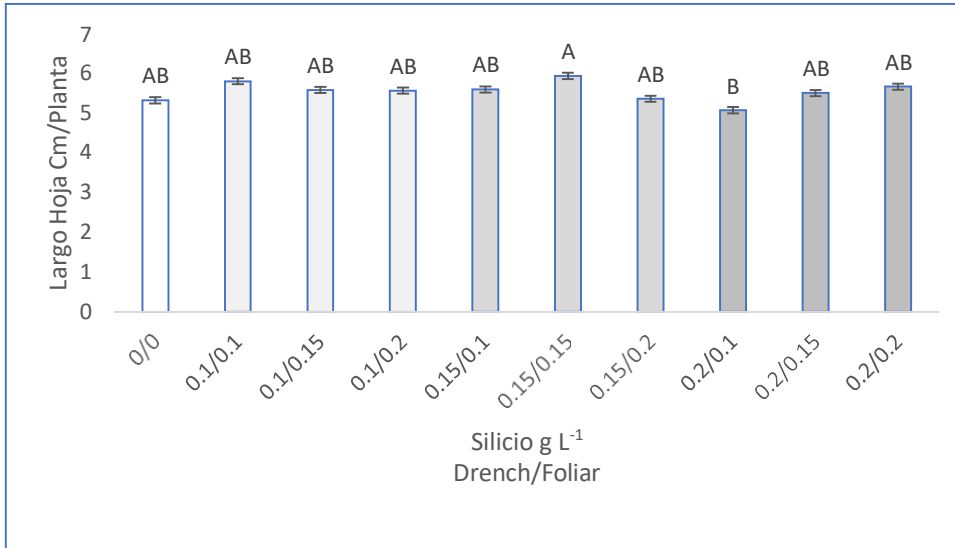
Llarelly et al., (2019) No se encontró mucha información respecto a la aplicación de silicio en la planta de fresa, sin embargo, estudios realizados en el tomate se observaron diferencias significativas, siendo estadísticamente mayor las hojas de la planta testigo, donde las aplicaciones fueron 50 g de silicio por L⁻¹ y el testigo 0. (Hernández Valencia et al., 2022) Confirma que en el estudio las fuentes de fertilización aplicados vía riego donde fueron 15 g y 20 g, en variables de crecimiento de plantas de fresa en la longitud de hoja fue mayor a la fertilización de químico Steiner donde se aplicaron diferentes abonos orgánicos (RDN 100 %), lo que nos lleva a coincidir que es mejor la aplicación de silicio en las plantas.

Figura 14. Ancho de la hoja de la fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y forma de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

Figura 15. Longitud de la hoja de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED en función de la concentración de Silicio y formación de aplicación.



Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$

4.5 Otras variables respuesta

En el Cuadro 7 se incluyen algunas variables que no fueron afectadas significativamente por los tratamientos aplicados. No hubo diferencia significativa entre los tratamientos peso fresco corona, peso fresco raíz, peso seco raíz, diámetro se corona y de la longitud del fruto. (Drusch et al., 2005) reportan resultados similares a los de esta investigación en maíz; ellos muestran que una dosis de Si 2.0 g L^{-1} de manera foliar en comparación con el control no produjo diferencias significativas en el peso de la raíz, aunque si una disminución en el peso fresco del órgano. Caicedo et al., (2008) mostraron que para la variable peso seco de raíz fueron muy similares a la variable peso seco total, señalan que hay una mayor emisión de raíces de las plantas tratadas con silicio y DAP

Cuadro 7 Efecto del Silicio aplicado en forma de drench/foliar sobre algunas variables vegetativas en plantas de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED.

Silicio DRENCH g L ⁻¹	Silicio FOLIAR g L ⁻¹	Peso fresco de coronas g/planta	Peso fresco de raíz g/planta	Peso seco de raíz g/planta	Diámetro de corona mm	Longitud del fruto cm
0	0	29.74	82.32	14.83	40.11	2.8062
0.1	0.1	30.51	52.99	12.05	38.56	3.6093
	0.15	47.57	72.45	16.22	39.96	3.6348
	0.2	42.09	86.55	17.59	43.13	4.0410
0.15	0.1	46.47	82.25	16.69	42.31	3.7181
	0.15	35.85	71.00	15.13	43.87	3.7749
	0.2	36.02	63.97	13.05	43.11	3.7840
0.2	0.1	30.63	56.22	11.33	33.93	4.2311
	0.15	30.49	69.30	12.50	37.55	3.6761
	0.2	41.66	79.88	15.75	43.04	3.6681
ANOVA		P=0.188	P=0.629	p=0.646	P=0.736	p=0.089

CONCLUSIONES

La aplicación de Si ocasionó un menor número de frutos; sin embargo, esto no ocasionó un menor rendimiento. La menor producción de frutos estuvo asociada con un aumento de la calidad de estos ya que fueron de mayor tamaño y de mayor peso, así como con una mayor firmeza y contenido de sólidos solubles totales. Estos resultados fueron independientes de la concentración del Si empleada y de la forma en la cual fue aplicado. El desarrollo de las coronas y la raíz en cuanto a longitud fue favorecido con aplicaciones en drench a 0.1 g L^{-1} mientras que foliar menté la concentración más favorable contenía 0.2 g L^{-1} mientras que el desarrollo de las hojas fue mayor con 0.1 g L^{-1} de Si en drench combinados con 0.15 g L^{-1} vía foliar.

LITERATURA CITADA

Alam, A., Hariyanto, B., Ullah, H., Salin, K. R., y Datta, A. (2021). Effects of silicon on growth, yield and fruit quality of cantaloupe under drought stress. *Silicon*, 13, 3153-3162.

Aguilar G. J. C. (2012). Aplicación de Silicio en Tomate y su Efecto en la Calidad Nutricional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Tesis de Licenciatura. Saltillo, Coahuila. 31p.

Abd-Alkarim, E., Bayoumi, y., Metwally, E., y Rakha, M. (2017). Silicon supplements affect yield and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus L.*) grown in net houses. *African Journal of Agricultural Research*, 12(31), 2518-2523.

Aquino, M. A. Z. (2015). Manual de hidroponía. 52 p.

Aguilar González, J. C. (2015). Aplicación de silicio en tomate y su efecto en la calidad nutricional.

Amoozgar, A., Mohammadi, A., y Sabzalian, M. R. (2017). Impact of light-emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly. *Photosynthetica*, 55, 85-95.

Ávila-Arce, A., y González-Milán, D. D. J. (2012). La competitividad de las fresas (*Fragaria spp.*) mexicanas en el mercado nacional, regional y de Estados Unidos. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 9(1), 17-27.

Benke, K., y Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26 p.

Berber, B. J. M. (2022). Caracterización morfológica y fisiológica de plántulas de fresa en luz led roja, azul y violeta.

Beltrano, J., y Gimenez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).

- Bianchi, P. G. (2018). Guía completa del cultivo de las fresas. Parkstone International. 5 p.
- Bogotá, C. D. C. (2015). Manual de fresa. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial. 1-11 p.
- Butturini, M., y Marcelis, L. F. (2020). Vertical farming in Europe: Present status and outlook. *Plant Factory*, 77-91 p.
- Bogotá, C. D. C. (2015). Manual de fresa. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial. 1-11 p.
- Beltrano, J., y Gimenez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). 180 p.
- Chiqui Chiqui, Flor Azucena; Lema Cumbe, Marcia Leonor. (2010). Evaluación del rendimiento en el cultivo de fresa (*Fragaria sp*) variedad oso grande, bajo invernadero mediante dos tipos de fertilización (orgánica y química) en la parroquia Octavio Cordero Palacios, Cantón Cuenca. Tesis de Licenciatura. Tomado de : <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4745/1/UPS-CT001855.pdf>
- Cruz Hipolito, J. P. (2018). Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*) a la aplicación de silicio (Master's thesis).
- Cázarez-Flores, L. L., Angulo-Castro, A., Vega-Gutiérrez, T. A., Ayala-Tafoya, F., Aguilar-Quiñonez, J. A., y Román-Román, L. (2023). Producción de tomate en respuesta a dosis de silicio. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(3).
- Caicedo, L., y Chavarriaga, W. (2008). Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía Colombiana*, 15(1), 3-4.
- Dehghanipoodeh, S., Ghobadi, C., Baninasab, B., Gheysari, M., y Bidabadi, S. S. (2016). Effects of potassium silicate and nanosilica on quantitative and qualitative characteristics of a commercial strawberry (*Fragaria x ananassa cv. 'camarosa'*). *Journal of Plant Nutrition*, 39(4), 502-507

Drusch, M., Wood, E. F., y Gao, H. (2005). Observation operators for the direct assimilation of TRMM microwave imager retrieved soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 32(15).

Dou, Z., Abdelghany, A. E., Zhang, H., Feng, H., Zhang, Y., Yu, S., ... y Fan, J. (2023). Exogenous silicon application improves fruit yield and quality of drip-irrigated greenhouse tomato by regulating physiological characteristics and growth under combined drought and salt stress. *Scientia Horticulturae*, 321, 112352.

Epstein, E. "Silicon". *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, vol. 50, no. 1, 1999, pp. 641-664, ISSN 1040-2519, DOI 10.1146/annurev.arplant.50.1.641.

Espinoza, B., y Natali, N. (2018). Efecto de la aplicación de dos dosis de potasio y silicio en el rendimiento del cultivo de culantro (*Coriandrum sativum*) en condiciones de Yanahuanca.

Espino, L. F. D., González, P. A. D., Jofre, A. E., y Martínez, G. T. O. M. (2017). Fresa, deficiencias y síntomas nutricionales "una guía visual para fertilizar". Folleto técnico,(36).

Eigenbrod, C., y Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 483-498.

Enríquez-Acosta, E. A., de Jesús Carballo-Méndez, F., Ruiz-Espinoza, F. H., Beltrán-Morales, F. A., Camacho-Aguiñiga, D. G., y Calvopiña-León, C. E. (2024). Efecto Diferenciado del Silicio en la Interacción con NaCl en la Emergencia de Tres Variedades de (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Terra Latinoamericana*, 42.

Ferrante, A., y Mariani, L. (2018). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: High and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae*, 4(3), 21 p.

Favela C. E., Preciado R. P. Y Benavides M. A. (2006). Manual Para la Preparación de Soluciones Nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 146p.

Ferrarezi, R. S., Weaver, G. M., Van Iersel, M. W., y Testezlaf, R. (2015). Subirrigation: Historical overview, challenges, and future prospects. *HortTechnology*, 25(3), 262-276.

Fussy, A., y Papenbrock, J. (2022). An overview of soil and soilless cultivation techniques chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants*, 11(9), 1153 p.

Fao. 2017. Final 2009 Data <http://faostat.fao.org>. Consultado 05 de octubre del 2022.

Furcal-Beriguete. P. (2012). Efecto del silicio en la fertilidad del suelo, en la incidencia de enfermedades y el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) var CR 4477.

Goswami, B., y Yadav, V. (2022). Soil-less culture (hydroponics) a review. *Just Agric*, 2(12), 1-12 p.

Giménez M. J. M. (2019). Efecto del Silicio Sobre la Productividad de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum*) Tipo RAF en Cultivo sin Suelo. Universidad de Almería. Trabajo Técnico Experimental. San Urbano Almería. 59p.

Giménez Martínez, J. M. (2020). Efecto del silicio sobre la productividad de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tipo RAF en cultivo sin suelo.

Gómez Vergara, H. A. Z. E. L. (2023). Efecto de extractos de Spirulina máxima en el desarrollo vegetativo de fresa (*Fragaria x ananassa*), en sistema aeropónico vertical con luz LED blanca a partir de vitroplantas.

Gonzalías, Y. R., Laydin. (2012). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores-Vertical Farming (VF). *Informador técnico*, 80(2), 111-120.

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

Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10, 4-10 p.

Hu, W., Su, Y., Zhou, J., Zhu, H., Guo, J., Huo, H., y Gong, H. (2022). Foliar application of silicon and selenium improves the growth, yield and quality characteristics of cucumber in field conditions. *Scientia Horticulturae*, 294, 110776.

Hernández Valencia, R. D., Juárez Maldonado, A., Pérez Hernández, A., Lozano Cavazos, C. J., Zermeño González, 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*, 14(28).

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2017). Manual de buenas prácticas agrícolas y de producción para el cultivo de la fresa. 72 p.

Kozai, T., Niu, G., y Takagaki, M. (2019). Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic press. 35-68 p.

Kirschbaum, D. S. (2022). Características botánicas, fisiología y tipos de variedades de fresas. SPE3 (España).

Khalil, N. H., y Hammoodi, J. K. (2021). Effect of nitrogen, potassium and calcium in strawberry fruit quality. *Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 16-1967 p.

Karagiannis, E., Michailidis, M., Skodra, C., Molassiotis, A., y Tanou, G. (2021). Silicon influenced ripening metabolism and improved fruit quality traits in apples. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 270-277.

Linker, R., Kacira, M., y Arbel, A. (2011). Robust climate control of a greenhouse equipped with variable-speed fans and a variable-pressure fogging system. *biosystems engineering*, 110(2), 153-167 p.

Lakhari, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., y Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of plant interactions*, 13(1), 338-352 p.

Li, X. D., Gao, Y. Q., Wu, W. H., Chen, L. M., y Wang, Y. (2022). Two calcium-dependent protein kinases enhance maize drought tolerance by activating anion channel ZmSLAC1 in guard cells. *Plant Biotechnology Journal*, 20(1), 143-157.

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

Llarelly, C. F. L., De Jesús, V. A. T., Leopoldo, P. R., Felipe, A. T., Tomás, D. V., Carlos, L. O., ... y Delia, Z. T. N. (2019). Efecto De Silicio En El Crecimiento De Plántulas Y Rendimiento De Plantas De Tomate F3. *Compendio Científico en Ciencias Agrícolas y Biotecnología*, 41.

Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R. H., Bahar, F. A., Bhat, M. A., Nazir, A., y Ahngar, T. A. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. *Pharma Innov. J*, 11, 1175-1195 p.

Morales, C. G., y Riquelme, J. (2017). Manual de manejo agronómico de la frutilla. 100 p.

Mejía Chiriboga, D. I. (2017). Respuesta de tres variedades de fresa (*Fragaria vesca*), sometidas a tres sustratos, mediante sistema semi-hidropónico en canales de polietileno en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura-Ecuador (Bachelor's thesis, El Ángel: 2017).

Paucar Guamialamá, L. J. (2022). Evaluación del rendimiento del cultivo de fresa (*Fragaria sp*) en las variedades Albión y Monterrey mediante dos sistemas de producción en el Centro Experimental "San Francisco" cantón Huaca, provincia del Carchi. UPEC.

Pandey, R. (2015). Mineral nutrition of plants. *Plant Biology and Biotechnology: Volume I: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement*, 499- 538 p.

Peris-Felipo, F. J., Benavent-Gil, Y., y Hernández-Apaolaza, L. (2020). Silicon

beneficial effects on yield, fruit quality and shelf-life of strawberries grown in different culture substrates under different iron status. *Plant physiology and biochemistry*, 152, 23-31.

Quiroga Silva, A. M. (2016). Respuesta a las aplicaciones de silicio en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus L*) variedad modan, en condiciones de estrés hídrico bajo cubierta en Culiacán, Sinaloa.

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

Rocha, N. A. (2014). Crecimiento y desarrollo de tres variedades de fresa en tres tipos de sustrato. Tesis de maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada. 51 p.

Rivadeneira, D. (2016). Evaluación de tres dosis de zeolita para optimizar el rendimiento del cultivo de Fresa (*Fragaria x ananassa*), en el cantón Tulcán provincia del Carchi (Bachelor's thesis).

Raya P. J. C. y Aguirre M. C. L. (2012). El Papel del Silicio en los Organismos y Ecosistemas. Instituto Tecnológico de Roque, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Revista. 46p.

Ramírez Padrón, Laura Cecilia, Caamal Cauich, Ignacio, Pat Fernández, Verna Grisel, Martínez Luis, David, y Pérez Fernández, Alberto. (2020). Análisis de los indicadores de competitividad de las exportaciones de fresa mexicana. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(4), 815-827.

Sayed, E. G., Mahmoud, A. W. M., El-Mogy, M. M., Ali, M. A., Fahmy, M. A., y Tawfic, G. A. (2022). The effective role of nano-silicon application in improving the productivity and quality of grafted tomato grown under salinity stress. *Horticulturae*, 8(4), 293.

Siddiqui, H., Ahmed, K. B. M., Sami, F., y Hayat, S. (2020). Silicon nanoparticles and plants: current knowledge and future perspectives. *Sustainable Agriculture Reviews* 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development, 129-142.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Fresa mexicana.

Recuperado el 05 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257075/Potencial-Fresa.pdf>

SIAP. (2022). Panorama Agroalimentario. Recuperado el 4 de diciembre de 2022, de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2022/Panorama-Agroalimentario-2022

SIAP. (2016, abril 29). Hidroponía ¿Sabes qué es y cómo funciona? Recuperado el 4 de diciembre de 2022 de <https://www.gob.mx/siap/articulos/hidroponia-sabes-que-es-y-como-funciona>.

Swain, A., Chatterjee S., Viswanath, M., Roy, A., y Biswas A. (2021). Hydroponics in vegetable crops: A review. 10(6). 629-634 p.

Sidhu, M. K., Raturi, H. C., Kachwaya, D. S., y Sharma, A. (2019). Role of micronutrients in vegetable production: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(1S), 332-340.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018, diciembre 07). Fresa mexicana: un producto con reconocimiento a nivel internacional.

¿Recuperado el 05 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/aguascalientes/articulos/fresa-mexicana-un-producto-con-reconocimiento-a-nivel-internacional?idiom=es>

Valverde Salazar, C. A. (2017). Estudio comparativo in vitro sobre la efectividad de las técnicas de desobturación de conductos uniradiculares con fresas gates glidden Vs. ultrasonido en la Universidad Regional Autónoma de Los Andes Uniandes (Bachelor's thesis).