

**Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio de Ciencias Agropecuarias
Facultad de Agronomía
Doctorado en Ciencias Agropecuarias**



TESIS:

**Respuestas de pepino y tomate cultivados con silicio y cloro en
casa sombra**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS**

PRESENTA:

LUZ LLARELY CÁZAREZ FLORES

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. TERESA DE JESÚS VELÁZQUEZ ALCARAZ

CO-DIRECTOR:

DR. LEOPOLDO PARTIDA RUVALCABA

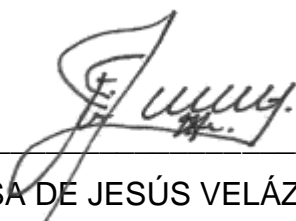
CULIACÁN, SINALOA, JULIO DE 2021

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR **LUZ LLARELY CÁZAREZ FLORES**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA, HA SIDO APROBADA POR EL MISMO Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

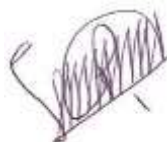
CONSEJO PARTICULAR

DIRECTORA



DRA. TERESA DE JESÚS VELÁZQUEZ ALCARAZ

CO-DIRECTOR



DR. LEOPOLDO PARTIDA RUVALCABA

ASESOR



DR. FELIPE AYALA TAFOYA

ASESOR



DR. CARLOS ALFONSO LÓPEZ ORONA

ASESOR



DR. MOISÉS GILBERTO YÁÑEZ JUÁREZ

CULIACÁN, SINALOA, JULIO DE 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA CULIACÁN
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL FUERTE
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL CARRIZO

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, el día 12 de julio de 2021, la que suscribe Luz Llarelly Cázarez Flores, alumna del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, con número de cuenta 5329221, de la Unidad Académica Facultad de Agronomía, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la UAS, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Teresa De Jesús Velázquez Alcaraz, Dr. Leopoldo Partida Ruvalcaba, Dr. Felipe Ayala Tafuya, Dr. Carlos Alfonso López Orona y Dr. Moisés Gilberto Yáñez Juárez, cede los derechos del trabajo titulado “Respuestas de pepino y tomate cultivados con silicio y cloro en casa sombra”, a la Facultad de Agronomía, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales, todo esto en apego al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ATENTAMENTE

M.C. Luz Llarelly Cázarez Flores



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el resultado de un conjunto de situaciones, lugares, sentimientos, hechos y personas, sin las cuales no hubiera podido ser posible, pero sobre todo, por la gente que creyó en mí, por mostrarme que los sueños pueden hacerse realidad.

Expreso mi profundo agradecimiento a las siguientes instituciones y personas:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, a la Facultad de Agronomía y al Colegio de Ciencias Agropecuarias, por darme la oportunidad de continuar con mi formación profesional en el Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias.

A la Dra. Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz y al Dr. Leopoldo Partida Ruvalcaba, por su asesoría, apoyo y escucha durante la elaboración del trabajo de investigación, pero sobre todo, por ser un ejemplo vivo de compromiso genuino, y porque además de ser unos grandes maestros, me brindaron el privilegio de su amistad.

Se ofrece un agradecimiento especial a los miembros de mi Consejo Particular, por sus asesorías, sus comentarios y revisión del documento.

En general, a los maestros de la Facultad de Agronomía, por la dedicación, tiempo y apoyo brindados para culminar mis estudios de Doctorado y también durante mi proceso de formación.

DEDICATORIA

CON AMOR A MI HERMANO

Prudencio Cázarez Flores (q.e.p.d †). Por todo lo que recibí, estar aquí vale la pena. Gracias a ti, seguí remando contra la marea (Pau Dones).

A DIOS

Con amor y gratitud por iluminar mi camino, colmar de bendiciones mi vida y mostrarme siempre su inmensa bondad, quien siempre está conmigo.

CON AMOR Y GRATITUD A MIS PADRES

Por guiarme y enseñarme a tener respeto por la vida, con quienes he compartido momentos maravillosos de mi vida y con quienes espero contar con su simpatía y apoyo, como hasta ahora lo he tenido.

A DOS GRANDES AMORES EN MI VIDA: a mi hija Allison y Alonso mi esposo, por ser mi fortaleza y acompañarme en todo momento ¡LOS AMO!.

A MIS HERMANOS Y HERMANA

De quienes he tenido incondicionalmente su apoyo en todo momento.

A MIS SOBRINOS Y CUÑADA

Con quienes he compartido vivencias, alegrías y tristezas. Espero seguir compartiendo la dicha y la felicidad que nos mantiene unidos.

A MIS AMIGOS.

Y a todas aquellas personas que me abrieron las puertas de su corazón y me brindaron su cariño, amistad y confianza.

Luz Llarelly

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	I
RESUMEN GENERAL	II
GENERAL ABSTRACT	IV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
1.2.1. Papel beneficioso del silicio en la agricultura	4
1.2.2. Silicio en la disponibilidad de otros elementos necesarios en la nutrición de las plantas	5
1.2.3. Compuestos de silicio solubles e insolubles presentes en la naturaleza o de origen sintético	7
1.2.3.1. Silicio de origen natural	7
1.2.3.2. Silicio de origen sintético	8
1.2.4. Influencia del silicio en la activación del material genético	8
1.2.5. Beneficios del uso del silicio en la mejora de la producción de las plantas	10
1.2.6. Absorción y acumulación del silicio por las plantas	11
1.2.7. Silicio en la inducción de la resistencia sistemática adquirida	11
1.2.8. Cloro como fertilizante agrícola	12
1.2.9. Cloro en la mejora de la producción vegetal	14
1.2.10. El cloro en el incremento de la producción de alimentos	14
1.2.11. Rutas metabólicas de silicio y cloro	15
1.2.11.1. Silicio	15
1.2.11.2. Cloro	15
1.2.12. Antecedentes de silicio y cloro	16
CAPÍTULO 2. EFECTO QUE OCASIONAN SILICIO Y CLORO EN CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL PEPINO EN CASA SOMBRA	19
2.1. INTRODUCCIÓN	19
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.3. RESULTADOS	23
2.4. DISCUSIÓN	26

CAPÍTULO 3. EFECTO DE SILICIO Y CLORO EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS, RENDIMIENTO Y CALIDAD POSTCOSECHA DE TOMATE F₃..	28
3.1. INTRODUCCIÓN	28
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.3. RESULTADOS	31
3.4. DISCUSIÓN	34
CAPÍTULO 4. RESPUESTAS DE PEPINO Y TOMATE CULTIVADOS CON SILICIO Y CLORO EN CASA SOMBRA	37
4.1. INTRODUCCIÓN	37
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS	40
4.3. RESULTADOS	43
4.4. DISCUSIÓN	47
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	50
CAPÍTULO 6. LITERATURA CITADA.....	51
ANEXO I.....	65
Paclobutrazol applied on cotyledonal leaves and quality of cucumber, squash, melon and watermelon seedlings	66
ANEXO II.....	79
CITA DEL ARTÍCULO: PACLOBUTRAZOL APPLIED ON COTYLEDONAL LEAVES AND QUALITY OF CUCUMBER, SQUASH, MELON AND WATERMELON SEEDLINGS	79

ÍNDICE DE CUADROS

Pág

Cuadro 2.1.	Verdor, altura y área foliar de plantas de pepino bajo condiciones de casa sombra.....	24
Cuadro 2.2.	Grados Brix, pH y rendimiento de frutos de pepino cultivado bajo condiciones de casa sombra.....	25
Cuadro 3.1.	Verdor, altura, área foliar, materia seca de raíz y parte aérea de plántulas de tomate.....	32
Cuadro 3.2.	Crecimiento de tomate F ₃ cultivado con Si y Cl bajo condiciones de casa sombra.....	33
Cuadro 3.3.	°Brix y pH de frutos de tomate cultivado bajo condiciones de casa sombra.....	34
Cuadro 4.1.	Verdor, altura y área foliar de plantas de pepino cultivadas con Si, Cl o Cl:Si en condiciones de casa sombra.....	44
Cuadro 4.2.	Rendimiento, grados brix y pH de frutos de pepino cultivado con Cl, Si o Cl:Si en condiciones de casa sombra.....	45
Cuadro 4.3.	Verdor, crecimiento y rendimiento de tomate F ₃ bajo condiciones de casa sombra.....	46
Cuadro 4.4.	°Brix y pH de frutos de tomate cultivado bajo condiciones de casa sombra	47

RESUMEN GENERAL

Esta investigación se realizó para dilucidar el efecto que ocasiona el silicio, cloro o la combinación de ambos en crecimiento de plántulas de tomate, rendimiento, °Brix y pH de frutos de pepino y tomate. En un experimento se sembró tomate F₃ el 25 de octubre de 2016, en charolas de poliestireno rellenas con peat moss en casa sombra, y se fertilizaron con 1.0 g L⁻¹ de N. En otro experimento se trasplantaron los cultivares Paraíso F₁ y tomate F₃ el 11 de noviembre de 2016, en un suelo vertisol crómico bajo casa sombra, las parcelas fueron de 3.5 m de largo, mismas que fueron fertilizadas dos veces con 200 kg ha⁻¹ de N y Micro-Min foliar (20-30-10), a los 30 y 50 días después de la siembra, respectivamente. Para ambos experimentos se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar, donde los tratamientos fueron: 20, 30 y 50 mg de Si o Cl y las relaciones v/v de 20:20, 30:30 y 50:50 mg L⁻¹ de Si:Cl; más el testigo. Las variables de estudio fueron: verdor, altura, área foliar, peso seco de la parte aérea y peso seco de raíz en plántulas, así como verdor, altura, área foliar, rendimiento, °Brix y pH de los frutos en pepino y tomate. En pepino las dosis de 50 mg de Si y 30 mg L⁻¹ de Cl fueron más eficaces para incrementar el verdor de hojas. Con 50 mg L⁻¹ de Si se incrementó la altura y área foliar, pero el rendimiento incrementó 53, 47 y 35% con 30 y 50 mg de Si y 30 mg L⁻¹ de Cl, respectivamente, comparados con el testigo. En el cultivo de tomate F₃, silicio y cloro en dosis de 20, 30 y 50 mg L⁻¹ fueron eficaces para incrementar el crecimiento de plántulas, pero cuando se aplicó a través del riego por goteo en plantas con cinco hojas verdaderas, los efectos fueron menores y contrarios a los que se observaron en las plantas testigos. En cambio, las dosis más adecuadas para incrementar °Brix fueron las de 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Si y Cl, respectivamente, con relación al testigo. Silicio y cloro en pepino y tomate; en pepino las dosis más adecuadas para incrementar el rendimiento fueron las de 30 y 50 mg, tanto de Si como de Cl. Mientras que en tomate los dos nutrimentos indujeron ligero incremento del verdor de las hojas y disminuyeron la altura de plantas, pero el Cl por sí solo, en la dosis más alta, fue más eficaz para aumentar el verdor, disminuir altura e incrementar rendimiento. Respecto a los °Brix, la dosis más alta de Cl y las dos relaciones v/v ocasionaron mejor respuesta

en pepino; en cambio, el tomate tuvo mejor respuesta con las tres dosis de Si o Cl, comparada a lo obtenido con las relaciones v/v y el testigo.

Palabras claves: *Crecimiento, nutrimentos, rendimiento.*

GENERAL ABSTRACT

This research was made to explain the effect caused by silicon, chlorine or the combination of both in the growth of tomato seedlings, yield, ° Brix and pH of cucumber and tomato fruits. In one experiment, tomato F₃ was sown on October 25th, 2016, in polystyrene trays filled with peat moss in the shade house, and fertilized with 1.0 g L⁻¹ of N. In another experiment, the Paraíso F₁ and tomato F₃ cultivars were transplanted in November 11th, 2016, in a vertisol chromic soil under shade house, the plots were 3.5 m long, which were fertilized twice with 200 kg ha⁻¹ of N and foliar Micro-Min (20-30-10), at 30 and 50 days after sowing, respectively. For both experiments, the experimental design of complete random blocks was used, where the treatments were: 20, 30 and 50 mg of Si or Cl and the v / v ratios of 20:20, 30:30 and 50:50 mg L⁻¹ of Si: Cl., Plus the control. The study variables were: greenness, height, leaf area, dry weight of the aerial part and dry weight of the root in seedlings, as well as greenness, height, leaf area, yield, ° Brix and pH of the fruits in cucumber and tomato. In cucumber, the doses of 50 mg of Si and 30 mg L⁻¹ of Cl were more effective in increasing the greenness of the leaves. With 50 mg L⁻¹ of Si, the height and foliar area increased, but the yield increased 53, 47 and 35% with 30 and 50 mg of Si and 30 mg L⁻¹ of Cl, respectively, compared to the control . In the tomato crop F₃, silicon and chlorine in doses of 20, 30 and 50 mg L⁻¹ were effective to increase the growth of seedlings, but when applied through drip irrigation in plants with five true leaves, the effects they were lower and contrary to those observed in the control plants. On the other hand, the most suitable doses to increase ° Brix were 20, 30 and 50 mg L⁻¹ of Si and Cl, respectively, in relation to the control. Silicon and chlorine in cucumber and tomato; in cucumber, the most adequate doses to increase yield were 30 and 50 mg, both of Si and Cl. While in tomato the two nutrients induced a slight increase in the greenness of the leaves and decreased the height of plants, but the Cl on its own, at the highest dose, it was more effective in increasing greenness, decreasing height, and increasing yield. Regarding ° Brix, the highest dose of Cl and the two v / v relationships caused a better response in cucumber; on the other hand, the

tomato had a better response with the three doses of Si or Cl, compared to what was obtained with the v / v relationships and the control.

Keywords: *Growth, nutrients, yield.*

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. INTRODUCCIÓN

En México, la producción de hortalizas se ha incrementado significativamente durante los últimos años, siendo la producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) de gran importancia económica, pues tiene gran demanda en el mercado local e internacional, ya sea fresco o procesado (Arias, 2007). En el 2015, la superficie sembrada con pepino en Sinaloa fue de 4,202 ha; la producción alcanzó 305,326 t y el rendimiento fue de 74.02 t ha⁻¹. El valor de la producción sumó \$1,684'871,000 pesos; tan sólo en el Valle de Culiacán se sembraron 3,058 ha, con una producción de 241,629 t, y rendimiento de 80.76 t ha⁻¹; con valor de la producción de \$1,411'303,000 pesos (SIAP, 2016). En México, entre 2013 y 2016, la producción de tomate aumentó en 35%, al pasar de 2'052,000 t a 2'769,000 t. Lo anterior representa un aumento de alrededor de 717,000 t en el volumen nacional en cuatro años, las cuales fueron distribuidas en el mercado nacional e internacional. El tomate es un cultivo que se desarrolla en todas las entidades del país, las cinco principales son Sinaloa, San Luis Potosí, Baja California, Zacatecas y Michoacán, en conjunto, estos estados aportan el 52% del volumen nacional, Sinaloa es el principal productor, con 551,000 t (SAGARPA, 2017).

En la horticultura existe la tendencia de satisfacer la demanda local e internacional, lo cual conduce, en muchos casos, a un uso poco eficiente de los recursos naturales, entre ellos el agua y los nutrientes (Preciado *et al.*, 2006). Aunado a lo anterior, los nutrientes que se encuentran en el sistema suelo-plantas pueden ser: a) esenciales: sin ellos la planta no vive; b) benéficos: con ellos aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio (clima, plagas, enfermedades, compuestos tóxicos del suelo, del agua o del aire), pero la planta puede vivir sin ellos; c) tóxicos: con ellos disminuye su crecimiento y producción, pudiendo llegar a provocar la muerte (por ejemplo, Al, Pb, Cr, Cd, Hg). Cabe aclarar que todo elemento es potencialmente tóxico en altas concentraciones. Se menciona que

dentro de los elementos esenciales se encuentran los macronutrientes: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Por su parte, los micronutrientes incluyen hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu) y molibdeno (Mo) (Marschner, 1995). Por otra parte, hay indicios de que el Si pudiera entrar en la lista de los micronutrientes, aunque sería más pertinente considerarlo como benéfico o cuasi-esencial (Epstein, 1999), pues en algunos países lo usan como fertilizante para los cultivos, porque juega un papel importante en la protección de plantas contra el estrés biótico o abiótico (Raya y Aguirre, 2012).

El Si se ha utilizado para mejorar el crecimiento y rendimiento de plantas, particularmente bajo condiciones de estrés, así también con diferentes respuestas fisiológicas como son: mejoramiento en el balance de nutrientes, reducción de la toxicidad de minerales, incremento en las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales, y un aumento en la resistencia a diversos factores abióticos (sales, toxicidad de metales, desbalance nutricional, sequía, radiación, altas temperaturas, heladas, radiación UV, entre otros) y factores bióticos. Se ha demostrado que el Si tiene efectos benéficos en los cultivos, ya que al ser absorbido por la planta se transforma en cristales de Si, formando una barrera protectora que presenta una resistencia mecánica al ataque de enfermedades e insectos (Balakhnina y Borkowska, 2013).

Los efectos directos del Si se acompañan de varios efectos indirectos, como el aumento de la capacidad fotosintética, la reducción de las tasas transpiratorias, el mayor crecimiento de las plantas y el aumento de la resistencia mecánica de las células (Valente *et al.*, 2004). Los efectos benéficos de este elemento son importantes en el manejo de la fertilidad para el cultivo de *Avena sativa*, los cuales se observan en la mejor asimilación y transformación eficiente de nutrientes del suelo (incrementos en materia seca aérea, materia seca de raíz y altura) (Borda *et al.*, 2007). Al respecto, Furcal y Herrera (2013) investigaron el efecto que ocasiona el Si en la fertilidad del suelo, aplicado en dosis de 100 kg ha⁻¹ de SiO₂, junto con insecticidas en polvo, y observaron que en el suelo no hubo mayor concentración

de Si; sin embargo, el zinc y cobre se incrementaron en el suelo; asimismo, el zinc y magnesio en las hojas de arroz, aunque estadísticamente estos incrementos no repercutieron en el rendimiento y calidad del grano.

Por otro lado, el Cl es un micronutriente esencial, sin embargo, en las plantas superiores éste no es aplicado en la nutrición (Marschner, 1998), ya que generalmente puede ser suministrado a través de la lluvia, y las plantas deficientes en Cl son raramente observadas en la agricultura o en la naturaleza. Según Marschner (1995), el requerimiento mínimo de Cl, al ser un micronutriente esencial para las plantas superiores, es de 1.0 g kg^{-1} de peso seco de los cultivos. La deficiencia de dicho elemento provoca la reducción del crecimiento foliar y el marchitamiento, seguido de clorosis, bronceado y, finalmente, necrosis. Las raíces se atrofian y el desarrollo de las raíces laterales se suprime. Las frutas disminuyen en número y tamaño. Las plantas menos sensibles son los frijoles (*Phaseolus* spp.), la calabaza (*Cucurbita pepo* L.), la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y el maíz (*Zea mays* L.). La concentración de Cl en el tejido, a la que se observan síntomas de deficiencia, oscila entre aproximadamente $0.1\text{-}7 \text{ mg g}^{-1}$ de peso seco (Xu *et al.*, 2000).

1.2. REVISIÓN DE LITERATURA

1.2.1. Papel beneficioso del silicio en la agricultura

El pepino es una de las hortalizas más importantes del mundo, dicha especie de manera endógena puede absorber activamente el Si (Liang *et al.*, 2005b) y de manera exógena Si podría aumentar la tolerancia a muchos factores abióticos y bióticos (Chérif *et al.*, 1992; Kauss *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2005).

Jianpeng *et al.* (2010) encontraron en un estudio con Cd, Si-Cd y un control en plantas de pepino, que la aplicación de Si disminuyó la toxicidad de metales pesados y mejoró la fotosíntesis, la ultraestructura del cloroplasto y el metabolismo del nitrógeno. Los efectos del Si han sido relacionados con: resistencia de la planta a enfermedades fungosas, ataque de insectos, mantenimiento de hojas y tallos erectos (resistencia al vuelco), eficiencia en el uso del agua, incremento en los rendimientos del cultivo y translocación del fósforo (Primavesi, 1984). La solubilidad del silicio aumenta con el tiempo cuando el suelo se riega; igualmente, a medida que la materia orgánica es alta, la disponibilidad del silicio es mayor (Caicedo y Chavarriaga, 2007).

Aunque el Si todavía no figura en la lista de los elementos esenciales para las plantas superiores (Marschner, 1995), su papel beneficioso en la agricultura ha sido ampliamente reconocidos. Se ha informado que el Si alivia el estrés biótico y abiótico en muchas especies de plantas (Ma, 2004; Hattori *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2007). El Si es un componente estructural en las plantas: ya que se encuentra en las paredes celulares epidérmicas impregnadas con una capa firme de dicho elemento, comportándose como barreras efectivas contra la pérdida de agua e infecciones por hongos (Marschner, 1995). La silicificación de la hoja de la hierba es una defensa inducible contra herbívoros (McNaughton y Tarrants, 1983).

El Si también puede desempeñar un papel en la fisiología humana y metabolismo, especialmente hueso y formación de tejido (Jugdohsingh *et al.*, 2004). Por lo tanto, una base de datos se ha informado el contenido de Si en los alimentos

(Powell *et al.*, 2005). A pesar de la abundancia de Si en los suelos, la deficiencia de Si es reconocida como un factor limitante para la producción de cultivos, especialmente para la acumulación de Si plantas (Liang *et al.*, 1994; Ma y Yamaji, 2006).

1.2.2. Silicio en la disponibilidad de otros elementos necesarios en la nutrición de las plantas

En condiciones de campo, el Si puede estimular el crecimiento (entendido como la acumulación irreversible de materia seca, que se asocia a procesos de elongación y crecimiento celular) (Loaiza, 2003) y la productividad por aumentar la disponibilidad de elementos como el P, Ca, Mg, K y B, al contrarrestar el antagonismo generado en suelos con alta saturación de aluminio y hierro (Epstein y Bloom, 2005; Hodson y Evans, 1995). Por otra parte se ha observado que las deficiencias de fósforo en cereales, principalmente arroz, disminuyen con las aplicaciones de silicatos, ya que el Si en su forma de ión silicato aumenta disponibilidad de fósforo al liberarlo a partir de los coloides del suelo y de los fosfatos de hierro, manganeso y aluminio, en suelos con reacción ácida, ya que hace una sustitución de los fosfatos por los silicatos, permitiendo a su vez contrarrestar el efecto tóxico de los microelementos metálicos (Epstein y Bloom, 2005).

El aporte al suelo de fertilizantes silícicos solubles incrementa la asimilación del fósforo por la planta, posiblemente debido a un intercambio de los fosfatos absorbidos a los hidróxidos por silicatos. En suelos ácidos pobres en sílice resulta muy apropiado adicionar escorias básicas de defosforilación, las cuales, junto al aporte de cantidades variables de Ca, Mg, Mn y Si sirven para una mejora del pH del suelo y para favorecer la asimilación del fósforo (Navarro y Navarro, 2000).

Caicedo y Chavarriaga (2007) mencionan que el Si debiese ser incluido en los planes de fertilización del café para garantizar la sustentabilidad del cultivo, y no hay razón para obviar el Si cuando han sido ya establecidos y demostrados sus beneficios en la fisiología de la planta.

Borda *et al.* (2007) mencionan que en avena forrajera las dosis de 150 y 200 mg kg⁻¹ de ácido monosilícico, decrecen la variable altura con respecto a la dosis de 50 y 100 mg kg⁻¹, ya que de forma directa la liberación de fósforo pudo generar deficiencias de Zn, elemento clave para estimular la elongación celular, y cuya deficiencia se manifiesta en la disminución de la longitud de los tallos. Si influye en muchos aspectos en la biología de la planta; ya que existe una similitud en las funciones de los iones fósforo y boro, existen investigadores que mencionen un posible reemplazo o interferencia en las funciones de estos iones, como formar compuestos con azúcares-alcoholes o ácidos orgánicos (Navarro y Navarro, 2000).

El Si disminuye los efectos de deficiencias o excesos de nutrimentos como el manganeso y el aluminio, aumenta la intercepción de la luz (mayor tasa fotosintética) y reduce la susceptibilidad a enfermedades causadas por hongos (Hodson y Evans, 1995; Epstein, 1999; Gómez *et al.*, 2006). Existen un gran número de investigaciones que indican que el Si puede mejorar la tolerancia de metales pesados de muchas plantas y revertir el síntoma de toxicidad, inducido por metales pesados (Neumann y Zur, 2001; Shi *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2007).

En los últimos años se han realizado rápidos progresos en la dilucidación de los mecanismos de cómo el exceso de metal es mediado por Si (Li *et al.*, 2008; Prabagar *et al.*, 2011; Dragisic *et al.*, 2012; Pontigo *et al.*, 2015) y las deficiencias de micronutrientes (Gonzalo *et al.*, 2013; Pavlovic *et al.*, 2013; Bityutskii *et al.*, 2014; Hernandez-Apaolaza, 2014).

También se sugiere el Si para mejorar la resistencia a los elementos tóxicos, y el papel beneficioso de Si en la desintoxicación se podría concluir que se basa en mecanismos externos (medios de crecimiento) e internos de la planta (Cocker *et al.* 1998; Wang *et al.*, 2004). Se ha encontrado que el mecanismo externo de la planta al efecto de los silicatos sobre metales tóxicos es principalmente debido a la disminución de la fitodisponibilidad de metales por pH creciente (la mayoría de los minerales que contienen Si son alcalinos) y formando precipitados de silicatos

metálicos (Cocker *et al.*, 1998; Ma *et al.*, 1997). El silicato alivia la toxicidad por manganeso (Mn) al aumentar la fracción de Mn encuadrado en la pared celular (Iwasaki *et al.*, 2002; Rogalla y Römheld 2002). Wang *et al.* (2004) mostraron que la unión apoplástica de aluminio (Al) estuvo involucrada en mejora inducida por Si de la toxicidad de Al en el maíz. El silicato también ha sido sugerido para restringir el transporte de cadmio (Cd) desde las raíces hasta los brotes en el arroz (Shi *et al.*, 2005). Los silicatos también son bien conocido por ser eficaz en el alivio del arsénico (As) estrés en el arroz (Bogdan y Schenk, 2008; 2009; Ma *et al.*, 2008; Gu *et al.*, 2012).

1.2.3. Compuestos de silicio solubles e insolubles presentes en la naturaleza o de origen sintético

1.2.3.1. Silicio de origen natural

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (Epstein, 1999) y en combinación con oxígenos forma silicatos, siendo el más grande y el grupo más abundante de minerales. Si es uno de los componentes básicos en la mayoría de los suelos. Este elemento se encuentra como silicatos primarios y silicatos secundarios cristalinos (Matichenkov y Bocharnikova, 2001). Además de las formas inertes del Si (cuarzo y vidrio), hay sustancias ricas en Si biogeoquímicamente activo presentes en la naturaleza (Savant *et al.*, 1997; Matichenkov *et al.*, 2001; Biel *et al.*, 2008). Hay ácido monosilícico (H_4SiO_4) y como ácido polisilícico o polímero del anterior, asociados con óxidos de hierro, aluminio y manganeso y por último en formas cristalinas y no cristalinas (amorfas), como de silicatos minerales (Epstein, 1999).

El ácido silícico (H_4SiO_4) que absorben las plantas (Pontigo *et al.* 2015), es el componente principal de las soluciones del suelo, principalmente como ácido silícico monomérico a pH inferior a 9 (Dietzel, 2000; Sommer *et al.*, 2006).

Existen ciclos biogeoquímicos que describen las vías, de modo cuantificable, de las formas biológicamente disponibles de un elemento a través de la biosfera. El

ácido silícico es fuente y producto del ciclo biogeoquímico del Si. Las diatomeas son miembros importantes para el ciclo biogeoquímico del Si y en la fijación global de dióxido de carbono a través de la fotosíntesis (Raya y Aguirre, 2012). Un veinte por ciento de la producción primaria neta de la tierra se debe a las diatomeas, organismos que se originaron hace unos 240 millones de años (Grachev *et al.*, 2008; Chepurnov *et al.*, 2008; Stickley *et al.*, 2009).

Borda *et al.* (2007) mencionan que dado el posicionamiento geográfico de los cultivos de avena y la dinámica del Si en los suelos, es importante considerar los niveles naturales de la mayoría de suelos que se tienen en la Sabana de Bogotá; estos provienen de elementos derivados de cenizas volcánicas y de materiales fluviolacustres, lo cual provoca que los octaedros que forma el Si todavía se mantengan estables y no hayan sufrido el proceso de meteorización relacionado a la evolución del suelo en clima frío (Suelos de Colombia, 1995), por lo cual es de esperarse que el uso de fuentes silicatadas permitirían un adecuado manejo benéfico del Si para la eficiente nutrición vegetal.

1.2.3.2. Silicio de origen sintético

- Leonarditas sólidas HUMITA•20 Granulada y HUMITA•40, ricas en Si y micro elementos quelatados con ácidos húmicos.
- Silicato de magnesio
- Fertilizante foliar a base de Si; nutri Si
- Silicato de potasio
- Ferti-Sil
- Try Micro's Silice
- Metasilicato
- Silicato de sodio

1.2.4. Influencia del silicio en la activación del material genético

El Si no es considerado esencial para los vegetales superiores porque no responde a los criterios directos e indirectos de la esencialidad (Malavolta, 2006).

A pesar de eso, su absorción puede ocasionar efectos benéficos para algunos cultivos como son resistencia a plagas, tolerancia a la toxicidad por metales pesados, al estrés hídrico y salino, menor evapotranspiración, promoción del crecimiento y nodulación en leguminosas, efecto en la actividad de las enzimas y en la composición mineral, mejoría de la arquitectura de las plantas y por consiguiente aumento de la tasa fotosintética (Epstein, 1999; Vieira *et al.*, 2008). La mayoría de las especies absorben Si por difusión pasiva, de modo que el Si llega al xilema y alcanza la parte aérea, acompañando al flujo de transpiración. Por otra parte, especies de las familias Poaceae, Equisetaceae y Cyperaceae, que presentan alta acumulación de Si (>4% de Si en peso seco), absorben Si de forma activa (Currie, y Perry, 2007). En este caso, el Si es absorbido a través de proteínas específicas de membranas, lo que garantiza la acumulación de Si por la planta, independientemente del gradiente de concentración (Oliveira *et al.*, 2007).

El Si cumple una importante función en la integridad estructural de las células vegetales, contribuyendo a las propiedades mecánicas, incluyendo rigidez y elasticidad (Taiz y Zieger, 2005). El Si está presente en las plantas, principalmente como gel de sílice, en las paredes celulares y como ácido monosilícico en la savia del xilema. El rol de Si en las paredes celulares parece ser análogo a la lignina como un elemento de resistencia y mayor rigidez para la sustitución del agua entre las microfibrillas y otros componentes de carbohidratos en las paredes de las células no lignificadas. Si trae como consecuencia cambios bioquímicos, como la acumulación de compuestos fenólicos, lignina y fitoalexinas (Vieira *et al.*, 2008). En plantas tales como la calabaza (*Cucurbita sp.*), la avena (*Avena sativa* L.) y el sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) se ha observado que la aplicación de Si trae como consecuencia un aumento en la síntesis de las enzimas peroxidasa, polifenoloxidasas, glucanasa y quitinasa; las cuales están relacionadas con un incremento en la producción de quinonas que tienen propiedades antibióticas, favorecen la mayor lignificación de los tejidos, la disminución en la calidad nutricional y la digestibilidad, todo lo cual genera, consecuentemente, un decrecimiento en la preferencia de los insectos por las plantas (Gomes *et al.*, 2005). Cada vez hay más evidencia de que el Si es beneficioso para crecimiento y

desarrollo de plantas saludables, particularmente para el arroz en el que el contenido de SiO₂ representa alrededor del 10% de su peso en brotes secos (Liang *et al.* 1994; Ma y Yamaji 2006).

1.2.5. Beneficios del uso del silicio en la mejora de la producción de las plantas

Existen mayores investigaciones de los beneficios del uso de Si en algunas especies, donde destacan las gramíneas. Ya que la gran variación en la concentración de Si en las plantas se atribuye principalmente a los diferentes tipos de captación y transporte de Si. La captación activa de Si ha sido demostrado en especies gramíneas como el arroz (Ma *et al.*, 2001), trigo, ryegrass (Jarvis, 1987), y cebada (Barber and Shone, 1966). Sin embargo, algunas plantas gramíneas, como la avena, toman el Si pasivamente (Jones y Handreck, 1967). Se ha demostrado la captación pasiva de Si en algunas dicotiledoneas como el pepino, el melón, la fresa y soja (Liang *et al.*, 2003). Jianpeng *et al.* (2010), mencionan que trabajaron con Cd, Si-Cd y un control en plantas de pepino, donde pudieron observar que la aplicación de Si disminuyó la toxicidad de metales pesados y mejoró la fotosíntesis, la ultraestructura del cloroplasto y el metabolismo del nitrógeno.

Los beneficios que pueden ser alcanzados con el aporte adecuado del Si, es la restauración de la fertilidad de los suelos a través del tiempo, al elevar la capacidad de intercambio catiónica, mejorar el contenido de calcio, magnesio, fósforo, entre otros elementos (Quero, 2008; Hernández, 2002; Fihlo *et al.* 2000).

Gómez *et al.* (2006) mencionan que, mediante un manejo nutrimental, donde se agregue Si, las plantas pueden incrementar hasta el doble de rendimiento, con relación al testigo. En cuanto al efecto de Si en la producción, estos estudios se han llevado a cabo mayoritariamente en arroz y caña de azúcar (Fihlo *et al.*, 2000; Hernández, 2002; Kornörfer *et al.*, 2002).

1.2.6. Absorción y acumulación del silicio por las plantas

Los ácidos silícicos (H_4SiO_4) son el componente principal de las soluciones del suelo, principalmente como ácido silícico monomérico a pH inferior a 9 (Dietzel, 2000; Sommer *et al.*, 2006), y las plantas absorbieron Si como ácido silícico (Pontigo *et al.*, 2015). Complejos de Si con compuestos inorgánicos y orgánicos también ocurre en la fase líquida del suelo (Matichenkov y Bocharnikova, 2001).

El pepino es una de las hortalizas más importantes del mundo, pueden absorber activamente el Si (Liang *et al.*, 2005b) y exógenos Si pudiera aumentar la tolerancia del pepino a muchos abióticos y estrés biótico (Chérif *et al.*, 1992; Kauss *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2005).

Por otra parte se ha observado que las deficiencias de fósforo en cereales, principalmente arroz, disminuyen con las aplicaciones de silicatos, ya que el Si en su forma de ión silicato aumenta disponibilidad de fósforo al liberarlo a partir de los colóides del suelo y de los fosfatos de hierro, manganeso y aluminio, en suelos con reacción ácida, ya que hace una sustitución de los fosfatos por los silicatos, permitiendo a su vez contrarrestar el efecto tóxico de los microelementos metálicos (Epstein y Bloom, 2005).

1.2.7. Silicio en la inducción de la resistencia sistemática adquirida

Pulz *et al.* (2008) indican que los efectos benéficos del Si han sido demostrados en varias especies vegetales, especialmente, cuando las plantas son sometidas a algún tipo de estrés, ya sea de carácter biótico o abiótico. Fauteux *et al.* (2005), exponen que, en el caso de un ataque de hongos patógenos, se desencadena un rápido y amplio despliegue de las defensas naturales de la planta, ya sea mediante el secuestro de cationes o directamente mediante el aumento de cierta actividad de las proteínas.

Estudios anteriores sobre el Si, han documentado la capacidad para aliviar el estrés abiótico y biótico al actuar como una barrera física contra la infección y también al inducir mecanismos de defensa activa (Ma, 2004; Fauteux *et al.*, 2005).

Sólo unos pocos metabolitos secundarios han sido implicados en la resistencia inducida por Si contra las enfermedades fúngicas, algunos son fitoalexinas flavonoides en pepino y fitoalexinas diterpenoides en arroz (Fawe *et al.*, 1998; Rodrigues *et al.*, 2004; Rémus-Borel *et al.*, 2005). El análisis de transcripción de los genes que codifican enzimas en las rutas biosintéticas de los metabolitos secundarios, especialmente durante las primeras etapas de la infección, podría ayudar a explicar la relación entre los metabolitos secundarios y la resistencia mediada por el Si. El análisis de transcriptomas en trigo y *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) mostró que la inoculación de plantas tratadas con Si y no tratadas, mildiú indujo alteraciones en los niveles de expresión de varios cientos de genes (Fauteux *et al.*, 2005; Chain *et al.*, 2009). Por otro lado, la aplicación de Si solo jugó un papel limitado en los cambios transcriptómicos en el trigo, *Arabidopsis* y tomate (*Solanum lycopersicum*), y no se observó ningún efecto para los genes relacionados con el metabolismo secundario (Fauteux *et al.*, 2005; Chain *et al.*, 2009; Ghareeb *et al.*, 2011).

Las investigaciones de cultivares modernos de rosa han demostrado que son una fuente rica de polifenoles tanto en las hojas como en los pétalos (Biolley *et al.*, 1994b; Helsper *et al.*, 2003).

1.2.8. Cloro como fertilizante agrícola

Los fertilizantes Cl⁻ pueden aumentar el rendimiento de las plantas, y para el algodón, Cl puede mejorar la calidad de la fibra si el suelo es deficiente en C (Chen *et al.*, 2010).

El cloro es fácilmente tomado por las plantas en su forma de ión inorgánico (Cl⁻) y es altamente móvil dentro de la misma. Este elemento está involucrado en la fotosíntesis, ya que es requerido para la fotólisis del agua en el sitio de oxidación del fotosistema II, además, juega un papel importante en la regulación estomática, sirviendo de anión acompañante al potasio en su entrada y salida de las células guardas. También, está implicado en el balance de las cargas y en el ajuste

osmótico dentro de las células (Welch, 1995). Otra función menos conocida tiene que ver con la división celular. En muchas plantas, la ausencia de cloro se manifiesta en una reducción del área foliar y, por tanto, en la masa seca de la planta, resultado de la disminución en las tasas de división y de extensión celular (Marschner, 1998). Sin embargo, es difícil que se presente la deficiencia de este elemento en las plantas cultivadas, porque, generalmente, el agua de riego tiene suficiente cantidad de cloro para suplir las necesidades del cultivo (López y Segovia, 1996). En plantas de rosa los excesos de cloruros y sodio causan necrosis y defoliaciones fuertes en las hojas viejas. Estos excesos pueden causar el agrietamiento del tallo causando alta incidencia de enfermedades (Medina, 1999).

El requisito de Cl^- para la mayoría de las plantas de cultivo es pequeño, y los insumos de Cl^- provenientes de la lluvia, la contaminación del aire, los fertilizantes como elemento secundario y el riego. Puede bastar con sus necesidades de crecimiento normal. Por lo tanto, la deficiencia de Cl^- en los cultivos no ocurre con frecuencia. Sin embargo, para algunos cultivos como el trigo, la cebada y el maíz, la aplicación de fertilizantes Cl^- pueden aumentar su rendimiento, y para el algodón, el fertilizante Cl^- puede mejorar la calidad de la fibra si el suelo es deficiente en Cl^- (Chen *et al.*, 2010).

El cloro es un micronutriente esencial para las plantas superiores. Está presente principalmente como Cl^- . El cloruro es un importante soluto osmóticamente activo en la vacuola y está involucrado tanto en la turgencia como en la osmorregulación. En el citoplasma puede regular las actividades de enzimas clave. Además, el Cl^- también actúa como un anión contrario, y los flujos de Cl^- están implicados en la estabilización del potencial de membrana, la regulación de los gradientes de pH intracelular y la excitabilidad eléctrica (Philip y Martin, 2001).

1.2.9. Cloro en la mejora de la producción vegetal

El cloro (Cl) es un micronutriente esencial para plantas superiores, se requiere 1 g kg⁻¹ de peso seco, como un requisito mínimo para el crecimiento de cultivos (Marschner, 1995). Estas cantidades pueden ser sustituidas por el agua de lluvia, y la deficiencia de cloro es raramente observada en la agricultura de manera natural (Xu *et al.*, 2000). Esto puede ser suministrado por la lluvia. Sin embargo, un aumento sustancial en el rendimiento ha sido reportado para muchos cultivos en respuesta a la fertilización con Cl (Xu *et al.*, 2000). Los fertilizantes Cl⁻ pueden aumentar su rendimiento, y para el algodón, el fertilizante Cl puede mejorar la calidad de la fibra si el suelo es deficiente en C (Chen *et al.*, 2010).

El role del cloro en las plantas.

- En fotosíntesis, regula las funciones de enzimas
- Para la regulación estomática por pérdida de agua
- Transporta nutrientes en las plantas (Ca, Mg, K)
- Incrementa la producción en cereales
- La mayoría de los cultivos se fertilizan con cloruro de potasio, incluyendo cultivos de campo, hortícolas y plantaciones (Chapagain *et al.*, 2011).

1.2.10. El cloro en el incremento de la producción de alimentos

Los estudios sobre arroz, soja, cebada, fresa, maní y trigo de primavera mostraron que el Cl tiene el efecto de aceleración o antagonismo a otros iones, por ejemplo, los contenidos de nitrato (NO₃⁻), ácido fosfórico (H₂PO₄) y K⁺ en las plantas se encontraron afectados por la concentración de Cl⁻, y Cl tiene un efecto extremadamente competitivo sobre la absorción de NO₃⁻ (Li *et al.*, 2002; Huber y Watson, 1974). Cabe mencionar que el cloro es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, es requerido en pequeñas cantidades para todos los cultivos, el role del cloro en las plantas; ayuda a la fotosíntesis, regula las funciones de enzimas, regulación estomática por pérdida de agua, transporta nutrientes en las plantas (Ca, Mg, K) e incrementa la producción en cereales

(Chapagain *et al.*, 2003). Freeman y Girma (2006) encontraron que en trigo el rendimiento responde positivamente a Cl, ya que los fertilizantes clorados aumentan significativamente el rendimiento de grano en un 50% en comparación a los no tratados con dicho elemento. Existen estudios sobre la cebolla, los cuales mostraron que la cebolla parecía ser una planta de alto requerimiento de Cl, ya que las cebollas que recibieron la aplicación de Cl en el agua de riego tenían un follaje verde más oscuro y saludable (Randle, 2004). Por otra parte, Diaz *et al.* (2004) informaron que al aplicar 253 kg ha⁻¹ de KCl en trigo (*Triticum aestivum* L.), observaron 7% de incremento de rendimiento de grano sobre el control sin aplicación de Cl. Chapagain *et al.* (2011) mencionan que KNO₃ puede ser reemplazado total o parcialmente (dependiendo de la calidad del agua) por KCl en la producción de tomate mejorando la calidad de los frutos.

1.2.11. Rutas metabólicas de silicio y cloro

1.2.11.1. Silicio

No se ha demostrado que el silicio (Si) sea un elemento esencial para las plantas más altas, pero sus efectos beneficiosos sobre el crecimiento se han reportado en una amplia variedad de cultivos, incluyendo arroz, trigo, cebada y pepino. Las plantas absorben el Si en forma de ácido silícico, que se transporta a los ápices de la planta, y después de la pérdida de agua, se polimeriza como gel de sílice en la superficie de las hojas y los tallos. Falta evidencia sobre el papel fisiológico del Si en el metabolismo de las plantas. Dado que los efectos beneficiosos de este elemento pueden observarse en plantas que lo acumulan, se cree que el gel de sílice depositado en la superficie de la planta contribuye a los efectos beneficiosos del Si, que pueden ser pequeños en condiciones de crecimiento optimizadas, pero se hacen evidentes bajo condiciones de estrés (Ma *et al.*, 2001).

1.2.11.2. Cloro

El ion cloruro es ubicuo en la naturaleza y altamente soluble. Aunque es esencial para las plantas en su categoría de micronutriente, su presencia, relacionada con

más de 130 compuestos orgánicos descritos en las mismas. Alcanza habitualmente concentraciones de macronutriente. Casi todas las plantas absorben entre 10 y 100 veces más Cl del que necesitan. Por otra parte, su solubilidad es alta y en forma de anión se transporta vía tanto xilema como floema. Esta alta movilidad le confiere dos funciones principales:

1. Mantenimiento del gradiente de pH existente entre el citosol y la vacuola por activación del Mg, Mn ATPasa del tonoplasto.
2. Como soluto osmóticamente activo de gran importancia. Así, está implicado en el mecanismo de apertura/cierre de estomas junto con el potasio y en diversos movimientos o nastias.

Sin embargo, el papel principal que presenta el Cl⁻ en su implicación en la fotólisis del agua con emisión de oxígeno en el fotosistema II, demostrado muy tempranamente por Warburg en 1944, aunque el mecanismo preciso es todavía desconocido. En cualquier caso, su presencia es imprescindible para la estabilidad del cloroplasto, probablemente como lector de la oxidación de los componentes lipoproteicos de las membranas tilacoides (Azcón y Talón, 2000).

Las deficiencias de cloro son raras en la naturaleza dada su disponibilidad y elevada solubilidad en los suelos; normalmente, sólo pueden ser observadas en estudios realizados, muy cuidadosamente, con soluciones nutritivas. En deficiencia de Cl⁻, el desarrollo de las raíces se ve muy reducido en su longitud, aunque se engrosan en las zonas apicales. Las hojas presentan un desarrollo reducido, con manchones cloróticos y necróticos llegando a presentar, a menudo, un color bronceado generalizado (Azcón y Talón, 2000).

1.2.12. Antecedentes de silicio y cloro

Según Borda *et al.* (2007) Al aplicar las dosis de 100 y 50 mg L⁻¹ de ácido monosilícico en presiembra en el cultivo de avena forrajera, se reportó la mayor altura de dicha planta al momento de la cosecha, mostrando una diferencia altamente significativa con respecto al testigo.

Gómez *et al.* (2006) demostraron que aquellas plantas a las que se les aplicó Si vía foliar presentaron mayor resistencia a *Fusarium oxysporum*, y a pesar de la presencia de enfermedad hubo incrementó al doble en rendimiento (14.6 t ha⁻¹) con relación al testigo.

En los últimos años, se ha avanzado rápidamente en la argumentación de los mecanismos del Si ante toxicidad por metales (Li *et al.*, 2008; Prabagar *et al.*, 2011; Dragisic *et al.*, 2012; Pontigo *et al.*, 2015) y las deficiencias de micronutrientes (Gonzalo *et al.*, 2013; Pavlovic *et al.*, 2013; Bityutskii *et al.*, 2014; Hernandez, 2014).

La aplicación de Si habilita la capacidad fotosintética del pepino bajo condiciones de toxicidad de Cd, que probablemente se pueda relacionar con mecanismos de protección que mantienen la integridad de la máquina fotosintética (Jianpeng *et al.*, 2010).

La aplicación de Si mejoró significativamente los efectos de Cd en la ultraestructura de los tilacoides y la membrana de cloroplastos (Jianpeng *et al.*, 2010).

En general Si se acumula mucho más en tejidos de plantas gramíneas que en otras especies, mientras que la mayoría de las plantas dicotiledóneas lo absorben pasivamente y algunas plantas como las legumbres lo excluyen de la captación (Liang *et al.*, 2007). *Cucumis sativus* es una especie conocida por acumular altos niveles de Silicio (Si) en las partes superiores, aunque el mecanismo para su alta absorción es poco conocido (Liang *et al.*, 2005a).

Sin embargo, el papel beneficioso del Si en estimular el crecimiento y el desarrollo de muchas especies de plantas ha sido generalmente reconocido (Liang *et al.*, 2007).

Los estudios sobre arroz, soja, cabaña, fresa, maní y trigo de primavera, mostraron que el Cl tiene el efecto de aceleración o antagonismo a otros iones,

por ejemplo, los contenidos de nitrato (NO_3^-), ácido fosfórico (H_2PO_4) y K^+ en las plantas se encontraron afectados por la concentración de Cl^- , y Cl tiene un efecto extremadamente competitivo sobre la absorción de NO_3^- (Li *et al.*, 2002; Huber y Watson, 1974).

Los estudios sobre la cebolla mostraron que parecía ser una planta de alto requerimiento de Cl , y las que recibieron la aplicación de Cl en el agua de riego tenían un follaje verde más oscuro y saludable (Randle, 2004).

Diaz *et al.* (2004) informaron que al aplicar 253 kg ha^{-1} de KCl en trigo (*Triticum aestivum* L.), observaron 7% de incremento de rendimiento de grano sobre el control sin aplicación de Cl .

Chapagain *et al.* (2011) mencionan que KNO_3 puede ser reemplazado total o parcialmente (dependiendo de la calidad del agua) por KCl en la producción de tomate mejorando la calidad de los frutos.

Freeman y Girma (2006) encontraron que en cultivo de trigo el rendimiento responde positivamente a Cl , ya que los fertilizantes clorados aumentan significativamente el rendimiento de grano de trigo en 50%, en comparación a los no tratados con dicho elemento.

CAPÍTULO 2. EFECTO QUE OCASIONAN SILICIO Y CLORO EN CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL PEPINO EN CASA SOMBRA

2.1. INTRODUCCIÓN

En México, la producción de hortalizas se ha incrementado significativamente durante los últimos años, siendo importante la producción de pepino (*Cucumis sativus* L.). Cultivo de gran importancia económica, pues tiene gran demanda en el mercado local e internacional, ya sea fresco o procesado (Arias, 2007). En el 2015, la superficie sembrada con pepino en Sinaloa fue de 4202 hectáreas; la producción alcanzó 305,326 t y el rendimiento fue de 74.02 t ha⁻¹. El valor de la producción sumó \$1,684'871,000 pesos; tan solo en el valle de Culiacán se sembraron 3058 ha, con una producción de 241,629 t, y rendimiento de 80.76 t ha⁻¹; con valor de la producción de \$1,411'303,000 pesos (SIAP, 2016). En la horticultura existe una tendencia de satisfacer la demanda local e internacional. Esta tendencia conduce, en muchos casos, a un uso poco eficiente de los recursos naturales, entre ellos el agua y los nutrimentos (Preciado *et al.*, 2006).

Aunado a lo anterior, los nutrientes que se encuentran en el sistema suelo-planta pueden ser: a) esenciales: sin ellos la planta no vive; b) benéficos: con ellos aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio (clima, plagas, enfermedades, compuestos tóxicos del suelo, del agua o del aire), pero la planta puede vivir sin ellos; c) tóxicos: con ellos disminuye su crecimiento y producción, pudiendo llegar a provocar la muerte (por ej. Al, Pb, Cr, Cd, Hg). Cabe aclarar que todo elemento es potencialmente tóxico en altas concentraciones. Los elementos categorizados como tóxicos lo son inclusive a muy bajas concentraciones (Malavolta *et al.*, 1997).

Se menciona que dentro de los elementos esenciales se encuentran los macronutrientes: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Por su parte, los micronutrientes incluyen hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc

(Zn), cobre (Cu) y molibdeno (Mo) (Marschner, 1995). Por otra parte, hay indicios de que el silicio (Si) pudiera entrar en la lista de los micronutrientes, aunque sería más pertinente considerarlo como benéfico o cuasi-esencial (Epstein, 1999), pues en algunos países lo usan como fertilizante para los cultivos, porque juega un papel importante en la protección de plantas contra el estrés biótico o abiótico (Raya y Aguirre, 2012).

Cabe mencionar que el Si normalmente no es considerado como un elemento esencial en la nutrición de las plantas, sin embargo, diversos estudios han mostrado que puede influir en forma positiva en el crecimiento y rendimientos de las plantas (Mitani y Ma, 2005; Epstein, 2009; Balakhnina y Borkowska, 2013). El Si se ha utilizado para mejorar el crecimiento y rendimiento de plantas, particularmente bajo condiciones de estrés, así también con diferentes respuestas fisiológicas como son: mejoramiento en el balance de nutrientes, reducción de la toxicidad de minerales, incremento en las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales, y un aumento en la resistencia a otros diversos factores abióticos (sales, toxicidad de metales, desbalance nutricional, sequía, radiación, altas temperaturas, heladas, radiación UV, entre otros) y factores bióticos. Se ha demostrado que el Si tiene efectos benéficos en los cultivos, ya que al ser absorbido por la planta se transforma en cristales de Si, formando una barrera protectora que presenta una resistencia mecánica al ataque de enfermedades e insectos (Balakhnina y Borkowska, 2013).

Los efectos directos del Si se acompañan de varios efectos indirectos, como el aumento de la capacidad fotosintética, la reducción de las tasas transpiratorias, el mayor crecimiento de las plantas y el aumento de la resistencia mecánica de las células (Valente *et al.* 2004). Los efectos benéficos de este elemento son importantes en el manejo de la fertilidad para el cultivo de *Avena sativa*, los cuales se observan en la mejor asimilación y transformación eficiente de nutrientes del suelo (incrementos en materia seca aérea, materia seca de raíz y altura) (Borda *et al.*, 2007). Al respecto, Furcal y Herrera (2013) investigaron el efecto que ocasiona el Si en la fertilidad del suelo, aplicado en dosis de 100 kg ha⁻¹ de SiO₂, junto con

insecticidas en polvo, y observaron que en el suelo no hubo mayor concentración de Si; sin embargo, el zinc y cobre se incrementaron en el suelo; asimismo, el zinc y magnesio en las hojas de arroz, aunque estadísticamente estos incrementos no repercutieron en el rendimiento y calidad del grano.

Por otro lado, el Cl es un micronutriente esencial, sin embargo, en las plantas superiores éste no es aplicado en la nutrición (Marschner, 1998), ya que puede ser generalmente suministrado por la lluvia, y las plantas deficientes en Cl son raramente observadas en la agricultura o en la naturaleza. Las altas concentraciones de Cl en el tejido pueden ser tóxicas para las plantas de cultivo, y pueden restringir la agricultura de las regiones salinas (Xu *et al.*, 2000), ya que las altas concentraciones de Cl producen quemaduras en las hojas, disminuyen la fotosíntesis e inhiben la absorción de nitratos (Aslam, 1999; Martínez y Cerdá, 1989; Zekri y Parsons, 1992).

Según Marschner (1995), el requerimiento mínimo de Cl, al ser un micronutriente esencial para las plantas superiores, es de 1.0 g kg^{-1} de peso seco de los cultivos. La deficiencia de dicho elemento provoca la reducción del crecimiento foliar y el marchitamiento, seguido de clorosis, bronceado y, finalmente, necrosis. Las raíces se atrofian y el desarrollo de las laterales se suprime. Las frutas disminuyen en número y tamaño. Las plantas menos sensibles son los frijoles (*Phaseolus* spp.), La calabaza (*Cucurbita pepo* L.), la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y el maíz (*Zea mays* L.). La concentración de Cl en el tejido, a la que se observan síntomas de deficiencia, oscila entre aproximadamente $0.1\text{-}7 \text{ mg g}^{-1}$ de peso seco (Xu *et al.*, 2000). Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue determinar el efecto que ocasionan el silicio y cloro o la aplicación de ambos elementos a la vez, así como cuál o cuáles son las dosis más eficaces en el crecimiento y rendimiento del cultivo de pepino.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó durante el ciclo agrícola otoño/invierno 2016-2017, en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa, México, ubicada en las coordenadas 24° 48' 30" LN y 107° 24' 30" LO, con altitud de 38.5 msnm.

En invernadero se sembraron semillas de pepino del cultivar Paraiso F₁ en charolas de poliestireno con 242 cavidades rellenas con peat moss. Las plántulas se regaron con 1.0 g de N L⁻¹, utilizando urea como fuente del nitrógeno. El trasplante se realizó el 11 de noviembre de 2016 bajo casa sombra con suelo vertisol crómico. La separación entre plantas fue de 25 cm y las parcelas experimentales fueron de 3.5 m de largo, con separación de 1.6 m entre hileras de plantas manejadas con sistema de riego por goteo, y en dos ocasiones fertilizadas con 200 kg ha⁻¹ de N en el lado opuesto de donde se aplicaron las soluciones con Si o Cl; asimismo, con MICRO-MIN foliar (20-30-10) a los 30 y 50 días de nacidas y después de cada corte, con un gasto de 200 L ha⁻¹ de agua.

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y nueve tratamientos: 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Si, 20, 30 y 50 mg de Cl L⁻¹, 20:20 y 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl, y un testigo fertilizado sólo con N y el fertilizante foliar.

Las dosis de Si y Cl, se diluyeron en 3.0 L de agua y estas soluciones se aplicaron sólo una vez en el fondo de un surco de 5.0 cm de profundidad, construido manualmente con un triángulo metálico a un lado de la hilera de plantas, cuando éstas tuvieron cinco hojas verdaderas, en tanto que las plantas testigo sólo recibieron 3.0 L de agua. Posteriormente todas las parcelas experimentales fueron manejadas con riego por goteo durante una hora, y la cinta del sistema de goteo se colocó sobre la superficie del suelo donde se aplicaron las soluciones. El verdor se evaluó a los 13 días después de la aplicación (dda) de los tratamientos, en una muestra de 20 plantas seleccionadas al azar, donde se utilizó un medidor de clorofila (Spad-502, Minolta) en la parte media de una hoja madura de cada planta;

al cabo de los mismos días se midió la altura de las plantas con una cinta métrica, desde la base del tallo hasta la yema apical del mismo. Asimismo, el área foliar se se determinó con una cinta métrica, al medir largo y ancho de la cuarta hoja verdadera, y se utilizó la fórmula $AF = 0.851.L.A$ propuesta por Blanco y Folegatti (2003). Se cosechó tres veces por semana, los °Brix y pH se midieron de acuerdo a la metodología propuesta por la AOAC (1998), para °Brix se colocaron tres gotas del extracto del fruto en un refractómetro digital (Sper Scientific), para pH se pesaron 10 g del fruto en una balanza analítica digital MELTTLER TOLEDO PR 802 (Switzerland), las cuales se mezclaron con 50 mL de agua destilada, previamente ajustada a un pH de 7, la mezcla se homogenizó en una licuadora comercial Osterizer modelo 85554 y posteriormente se filtró en una tela de organza: del filtrado se tomó una alícuota de 50 mL determinando el pH con un medidor de TDS/conductividad/pH (Hanna Instruments™ HI98130), así como el rendimiento por hectárea con base al peso de frutos, los cuales deberían tener no menos de 3.2 cm de diámetro y 12.7 cm de longitud, determinados con bernier.

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SAS versión 9.0, incluyendo la comparación múltiple de medias con la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.05$).

2.3. RESULTADOS

En el verdor de las hojas de pepino se detectaron diferencias estadísticas, de tal manera que donde se aplicaron Si y Cl en las dosis de 30 y 50 mg L⁻¹, se observó un incremento de 22.4 y 23.8%, respectivamente, comparados con el promedio del testigo (Cuadro 2.1). Con el resto de las dosis los promedios también superaron al testigo y los incrementos oscilaron de 11.2 a 21.3%, sin que el menor incremento fuera estadísticamente diferente del que expresaron las plantas cultivadas con 30 mg de Si, 20 ó 50 mg de Cl y con 20:20 v/v de Si:Cl.

En la altura de plantas también se observaron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 2.1), aunque el mayor incremento (20%) se logró en las plantas que recibieron 50 mg L⁻¹ de Si, pero sin diferencia estadística con respecto al testigo, a dicho incremento le siguieron los de 6.9, 10.0, 15.3, 14.1 y 14.1% con

relación al testigo, que ocasionaron las dosis de 20, 30 y 50 mg de Cl, así como las de 20:20 y 30:30 de Si:Cl, respectivamente. En el área foliar también ocurrieron diferencias estadísticas significativas entre los promedios que se indican en el mismo cuadro, de tal forma que las plantas tratadas con la dosis de 50 mg L⁻¹ de Si o Cl tuvieron un incremento de 22 y 17.7%, en comparación con el promedio del testigo. No obstante que los promedios estimados en las plantas manejadas con 20 ó 30 mg de Cl y con las relaciones v/v de 20:20 ó 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl no fueron estadísticamente diferentes con respecto al promedio del testigo, sí tuvieron incrementos en comparación con éste, en un rango que varió de 8.1 a 17.7%.

Cuadro 2.1. Verdor, altura y área foliar de plantas de pepino bajo condiciones de casa sombra.

Tratamientos (dosis)	Verdor (unidades Spad)	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)
20 mg L ⁻¹ de Si	45.77 b	33.55 c	22.80 d
30 mg L ⁻¹ de Si	49.56 ab	35.95 bc	25.65 bdc
50 mg L ⁻¹ de Si	50.94 a	45.50 a	30.25 a
20 mg L ⁻¹ de Cl	48.67 ab	41.70 ab	26.80 abc
30 mg L ⁻¹ de Cl	50.37 a	40.50 abc	27.15 abc
50 mg L ⁻¹ de Cl	49.36 ab	43.70 ab	29.20 ab
20:20 mg L ⁻¹ de Si:Cl	49.94 ab	43.25 ab	27.60 abc
30:30 mg L ⁻¹ de Si:Cl	49.19 b	43.25 ab	26.80 abc
Testigo	41.15 c	37.90 abc	24.80 dc

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

Los °Brix de los frutos cosechados de las plantas tratadas con Cl o con Cl más Si, se incrementaron con respecto al testigo (Cuadro 2.2). Sin embargo, el mayor incremento (11.7%) ocurrió en las plantas cultivadas con la relación 20:20 mg L⁻¹ de Cl:Si, siguiéndole las dosis de 50 mg L⁻¹ de Cl, la combinación 30:30 mg L⁻¹ de

Cl:Si, y las de 20 y 30 mg L⁻¹ de Cl, ya que los °Brix promedio de los frutos cosechados de las plantas cultivadas solamente con Si, fueron estadísticamente iguales a los del testigo, aunque en valores absolutos tuvieron incrementos de 5.4 a 8.3%. Aparentemente lo anterior indica que el Cl ocasionó efectos individuales superiores a los que induce el Si. Asimismo, que entre los dos se da una sinergia que hace que los °Brix se incrementen aún más, sobre todo con la relación más baja de los dos elementos (20:20). Contrariamente a lo que se observó en los °Brix, los promedios de pH no variaron en los frutos de las plantas cultivadas con las diferentes dosis de Cl, Si o con las de ambos nutrimentos a la vez.

El rendimiento se expresó sin diferencias estadísticas (Cuadro 2.2); no obstante, en relación al testigo las diferencias fueron de 8.38, 7.45, 3.88, 5.48, 5.27, 2.44 y 2.98 t ha⁻¹, mismas que representaron incrementos porcentuales de 53.4, 47.4, 24.7, 34.9, 33.6, 15.5 y 19.0, ocasionados por las dosis de 30 y 50 mg de Si, 20, 30 y 50 mg de Cl, 20:20 y 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl, respectivamente.

Cuadro 2.2. Grados Brix, pH y rendimiento de frutos de pepino cultivado con Si y Cl bajo condiciones de casa sombra.

Tratamientos (dosis)	°Brix	pH	Rendimiento (t ha ⁻¹)
20 mg L ⁻¹ de Si	2.60 cd	5.44 a	14.06 a
30 mg L ⁻¹ de Si	2.53 cd	5.44 a	24.08 a
50 mg L ⁻¹ de Si	2.53 cd	5.45 a	23.15 a
20 mg L ⁻¹ de Cl	2.64 cb	5.44 a	19.58 a
30 mg L ⁻¹ de Cl	2.64 cb	5.51 a	21.18 a
50 mg L ⁻¹ de Cl	2.84 ab	5.45 a	20.97 a
20:20 mg L ⁻¹ de Si:Cl	2.88 a	5.46 a	18.14 a
30:30 mg L ⁻¹ de Si:Cl	2.68 abc	5.44 a	18.68 a
Testigo	2.40 d	5.43 a	15.70 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

2.4. DISCUSIÓN

Los resultados en el verdor coinciden con los de Jianpeng *et al.* (2010), ya que ellos encontraron que con el Si incrementan significativamente los niveles de clorofila a, clorofila b, clorofila total, así como los carotenoides en hojas de pepino a los 10 y 15 días de ser tratadas con dicho elemento. Con relación al Cl, Li *et al.* (2002) observaron que éste se acumula principalmente en los cloroplastos, y es esencial para la función fotosintética. Las plantas con deficiencia de cloro muestran síntomas de marchitez, clorosis, necrosis y una decoloración de bronce inusual. Por eso los resultados de esta investigación concordaron con los referidos en el párrafo anterior, así como con los de Chapagain *et al.* (2003), quienes mencionan que el Cl es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, que es requerido en pequeñas cantidades por todos los cultivos, y su rol es ayudar a la fotosíntesis, regular las funciones de enzimas, la regulación estomática por pérdida de agua, transportar nutrientes en las plantas (Ca, Mg, K), incrementar la producción en cereales, aumentar la resistencia a las enfermedades, y con niveles adecuados del suministro, el Cl mejora los rendimientos y la calidad de muchos cultivos, como la cebolla y el algodón (Chen *et al.*, 2010). Esta coincidencia no sólo fue con las plantas tratadas con Si y Cl de manera individual, sino también con la combinación de ambos.

La respuesta de altura de las plantas cultivadas con Si tienen relación con los de Borda *et al.* (2007), toda vez que ellos descubrieron que al aplicar, en presiembra, las dosis de 100 y 50 mg L⁻¹ de ácido monosilícico, en el cultivo de avena forrajera, la altura fue mayor hasta el momento de la cosecha, donde observaron una diferencia altamente significativa con respecto al testigo. Aunque tales diferencias las pudieron registrar a los 45 dds (etapa de macollamiento), donde aplicaron las dosis de 150, 120, 100, 50 y 0 mg L⁻¹. Esto puede explicarse porque a partir de los 45 días se inicia la etapa reproductiva, que al final se manifiesta con la emisión de la espiga, siendo esta mayor o menor de acuerdo con la cantidad de fotoasimilados, misma que depende en gran medida de la nutrición que se suministró al cultivo en su fase vegetativa. Por ello, las plantas a las cuales se les

aportó Si expresaron mayores alturas al momento de la cosecha, ya que este elemento tuvo un efecto benéfico sobre el balance nutricional, principalmente de elementos necesarios en las primeras etapas. Sánchez (1981) encontró resultados similares en la caña de azúcar, ya que ésta tuvo respuesta positiva en el aumento de tallos y número de hojas activas.

El incremento del verdor, altura y área foliar de las plantas de pepino confirma lo reportado por Marshner (1995) y Philip y Martin (2001), acerca de que Cl es un micronutriente esencial, pero con un mínimo requerimiento para muchos cultivos. Además, los incrementos en el rendimiento de pepino cultivado con Cl son resultados que tienen relación con los de Chen *et al.* (2010), quien refiere que los fertilizantes clorados pueden aumentar el rendimiento de las plantas y puede mejorar la calidad de la fibra en el algodón. Asimismo, con los de Diaz *et al.* (2004), ya que ellos informaron que al aplicar 253 kg ha⁻¹ de KCl en trigo (*Triticum aestivum* L.), el rendimiento de grano se incrementó en 7% sobre el testigo sin aplicación de Cl.

Con el Si y Cl en relaciones de 20:20 y 30:30, los resultados indicaron que el rendimiento también se puede incrementar, aunque en menor proporción que cuando se aplican de manera individual, sin que por altas concentraciones en los tejidos el Cl cause toxicidad, como lo señalan Jacoby (1999), Al-Karaki (2000) y Zhu (2001), o como lo menciona Xu *et al.* (2000), que en altas concentraciones en los tejidos puede causar toxicidad y restringir la agricultura, sobre todo en suelos salinos.

Furcal y Herrera (2013), al investigar el efecto que ocasiona, en la fertilidad del suelo, el silicio junto con insecticidas en polvo aplicado en dosis de 100 kg ha⁻¹ de SiO₂, notaron que en el suelo no hubo mayor concentración de Si; sin embargo, el zinc y cobre se incrementaron en el suelo; asimismo, el zinc y magnesio en las hojas de arroz, aunque estadísticamente estos incrementos no repercutieron en el rendimiento y calidad del grano.

CAPÍTULO 3. EFECTO DE SILICIO Y CLORO EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS, RENDIMIENTO Y CALIDAD POSTCOSECHA DE TOMATE F₃

3.1. INTRODUCCIÓN

En México, entre 2013 y 2016, la producción de tomate aumentó en 35%, al pasar de 2'052,000 t a 2'769,000 t. Lo anterior representa un aumento en el volumen nacional en cuatro años de alrededor de 717,000 t, las cuales son distribuidas en los mercados nacional e internacional. El tomate es un cultivo que se desarrolla en todas las entidades del país, las cinco principales son Sinaloa, San Luis Potosí, Baja California, Zacatecas y Michoacán, en conjunto, estos estados aportan el 52% del volumen nacional. Sinaloa es el principal productor con 551,000 t (SAGARPA, 2017).

El rendimiento y la calidad de los cultivos depende de varios factores, los internos de la planta que están determinados por el genotipo y otros que son de tipo externo como las condiciones climáticas, las características del suelo, las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato, calidad del agua, factores nutrimentales, la técnica de producción y los factores bióticos (Salazar y Juárez, 2013). Respecto a nutrición, las plantas requieren de los nutrientes que se encuentran en el sistema suelo-plantas que pueden ser: a) esenciales: sin ellos la planta no vive; b) benéficos: con ellos aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio, pero la planta puede vivir sin ellos; c) tóxicos: con ellos disminuye su crecimiento y producción, pero también puede provocar la muerte. Cabe aclarar que todo elemento es potencialmente tóxico en altas concentraciones. Los elementos categorizados como tóxicos, lo son inclusive a muy bajas concentraciones (Malavolta *et al.*, 1997). En las plantas superiores está bien establecido que existen 17 elementos minerales esenciales, aunque el níquel sólo lo es en un número limitado de plantas. También el sodio y el silicio, muy abundantes en la biosfera, se comportan como esenciales para algunas especies de plantas (Azcón y Talón, 2013).

El Silicio (Si) normalmente no es considerado como un elemento esencial en la nutrición de las plantas, sin embargo, diversos estudios han mostrado que puede influir en forma positiva en el crecimiento y rendimiento de las plantas (Balakhnina y Borkowska, 2013; Epstein, 2009; Mitani y Ma, 2005). Por otro lado, el Cl es un micronutriente esencial, sin embargo, en las plantas superiores éste no es aplicado en la nutrición (Marschner, 1998), ya que puede ser generalmente suministrado por la lluvia, y las plantas deficientes en Cl son raramente observadas en la agricultura o en la naturaleza. Las altas concentraciones de Cl en el tejido pueden ser tóxicas para las plantas de cultivo, y pueden restringir la agricultura de las regiones salinas (Xu *et al.*, 1999), ya que las altas concentraciones de Cl producen quemaduras en las hojas, disminuyen la fotosíntesis e inhiben la absorción de nitratos (Aslam *et al.*, 1994; Martínez y Cerdá, 1989; Zekri y Parsons, 1992). Por lo anterior el objetivo de la investigación fue determinar el efecto que ocasionan el silicio, cloro o la combinación de ambos elementos, así como cuál o cuáles son las dosis más eficaces en el crecimiento de plántulas, rendimiento y calidad postcosecha del cultivo de tomate.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, ubicada a 24° 37' 29" LN y 107° 26' 36" LO, en Sinaloa, México. Durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2016-2017.

3.2.1. Primer experimento

La siembra se realizó el 12 de octubre de 2016 en charolas de poliestireno con 242 cavidades rellenas de peat moss, se utilizó semilla de tomate F₃. Las plántulas se fertilizaron con 1.0 g L⁻¹ de N tomado de urea. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y diez tratamientos: 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Si, 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Cl, 20:20, 30:30 y 50:50 mg L⁻¹ de Si:Cl, más el testigo fertilizado sólo con N. Las dosis se aplicaron mediante el riego por decantación manual sobre la superficie del sustrato contenido en las charolas de

poliestireno, ésta se realizó sólo una vez cuando las plántulas tuvieron bien definida la primera hoja verdadera. En las plántulas testigo sólo se utilizó agua. A los 15 después de la aplicación de los tratamientos, se evaluó el verdor con un medidor de clorofila (Spad 502, Minolta) en la parte media de una hoja de cada planta, en una muestra de 20 plantas seleccionadas al azar. La altura de plántulas se midió con una regla de 30 cm, desde la base del tallo hasta la yema apical de la misma. El área foliar se determinó con una cinta métrica, al medir largo y ancho de la primera hoja verdadera, y se utilizó la fórmula $AF = 0.35 \cdot L^2 - 5.31 \cdot L + 57.6$ propuesta por Blanco y Folegatti (2003). El peso de materia seca de raíz y parte aérea de las plántulas se hizo después del secado en estufa a 70 °C durante (72 h), con báscula de precisión.

3.2.2. Segundo experimento

Se sembró tomate F₃ bajo condiciones de casa sombra en noviembre de 2016, en un suelo vertisol crómico. La separación entre plantas, después de realizar aclareo, fue de 25 cm. Las parcelas experimentales constaron de surcos de 32 m de largo, con separación de 1.6 m entre surcos. Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y nueve tratamientos: 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Si, 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Cl, 20:20 y 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl, y un testigo fertilizado sólo con N tomado de urea y fertilizante foliar (Micro min 20-30-10). Las dosis se diluyeron en 3.0 L de agua y se aplicaron sólo una vez en el fondo de un surco de 5.0 cm de profundidad, cuando éstas tuvieron cinco hojas verdaderas, en tanto que las plantas testigo sólo recibieron 3.0 L de agua. Posteriormente todas las parcelas experimentales fueron manejadas con riego por goteo durante una hora. En cada unidad experimental se seleccionaron 20 plantas al azar. Las variables de estudio fueron: verdor que se determinó con un medidor de clorofila (Spad 502, Minolta) en la parte media de dos folíolos de una hoja fisiológicamente madura y sin deterioro en cada planta. La altura de plantas de tomate se midió con una cinta métrica, desde la base del tallo hasta la yema apical de la misma. El área foliar se evaluó en la séptima hoja verdadera a los 20 días después de la aplicación de silicio y se utilizó la fórmula $AF = 0.347 (L \cdot W) - 10.7$ de

Blanco y Folegatti (2003). Se cosechó tres veces por semana, se registraron los °Brix y el pH de los frutos, se midieron de acuerdo a la metodología propuesta por la AOAC (1998), para °Brix se colocaron tres gotas del extracto del fruto en un refractómetro digital (Sper Scientific), para pH se pesaron 10 g del fruto en una balanza analítica digital MELTTLER TOLEDO PR 802 (Switzerland), las cuales se mezclaron con 50 mL de agua destilada, previamente ajustada a un pH de 7, la mezcla se homogenizó en una licuadora comercial Osterizer modelo 85554 y posteriormente se filtró en una tela de organza: del filtrado se tomó una alícuota de 50 mL determinando el pH con un medidor de TDS/conductividad/pH (Hanna Instruments™ HI98130), así como el rendimiento, se realizó cuando los frutos estuvieron en la madurez fisiológica Turning según la clasificación establecida por USDA (1992).

Los datos recabados se analizaron con el paquete estadístico SAS, y se hizo comparación múltiple de medias con la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.05$).

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Primer experimento

En el Cuadro 3.1 se puede notar que las plantas cultivadas en casa sombrano mostraron diferencias estadísticas en verdor. Sin embargo, las plantas tratadas con Si en dosis de 20 y 30 mg L⁻¹, incrementaron ligeramente su verdor (5 y 10%, respectivamente), comparados con el verdor promedio de las plantas testigo. En altura se mostraron diferencias estadísticas, aunque el mayor incremento ocurrió en las plantas tratadas con Si en dosis de 30 mg L⁻¹ y en aquellas cultivadas con 20:20 mg de Si:Cl la altura disminuyó. En área foliar también ocurrieron diferencias estadísticas significativas entre los promedios que se indican en el Cuadro 3.1, de tal manera que las plantas testigo superaron a las tratadas con Si, Cl o la combinación de ambos elementos. La materia seca de raíz se expresó con diferencias estadísticas, de tal manera que las dosis 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl incrementaron la materia seca en 127% con relación al testigo. En peso seco de parte aérea las plántulas tratadas con las dosis de 30 mg L⁻¹ de Si y 30:30 mg L⁻¹

de Si:Cl fueron estadísticamente iguales al testigo con valores porcentuales superiores de 8 y 3%, respectivamente.

Cuadro 3.1. Verdor, altura, área foliar, materia seca de raíz y parte aérea de plántulas de tomate.

Tratamientos (dosis)	Verdor (U. Spad)	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)	Materia seca de raíz (g)	Materia seca parte aérea (g)
20 mg L ⁻¹ de Si	37.13 a	8.50 cde	37.30 abc	0.21 ab	0.31 bc
30 mg L ⁻¹ de Si	38.89 a	10.47 a	35.32 c	0.19 ab	0.39 a
50 mg L ⁻¹ de Si	35.68 a	8.90 bcd	35.77 c	0.15 ab	0.29 cd
20 mg L ⁻¹ de Cl	34.68 a	8.60 cde	37.28 abc	0.23 a	0.27 cd
30 mg L ⁻¹ de Cl	35.49 a	8.61 cde	36.39 bc	0.10 b	0.24 d
50 mg L ⁻¹ de Cl	35.78 a	9.11 cd	35.67 c	0.24 a	0.34 abc
20:20 mg L ⁻¹ de Si-Cl	35.74 a	7.70 e	38.00 ab	0.12 b	0.22 d
30:30 mg L ⁻¹ de Si-Cl	34.88 a	9.91 ab	35.97 c	0.25 a	0.37 ab
50:50 mg L ⁻¹ de Si-Cl	35.47 a	8.03 cde	38.59 a	0.12 b	0.23 d
0 mg L ⁻¹ (testigo)	35.28 a	7.83 de	38.51 a	0.11 b	0.36 ab

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

3.3.2. Segundo experimento

En el Cuadro 3.2 se puede notar que en verdor las plantas cultivadas en casa sombra mostraron diferencias estadísticas, de tal manera que las plantas tratadas con Si, Cl y Si:Cl en dosis de 20, 20 y 30:30 mg L⁻¹, incrementaron su verdor en 0.5, 3 y 2%, respectivamente, comparados con el verdor promedio de las plantas testigo. En altura también mostraron diferencias estadísticas, aunque el mayor incremento ocurrió en las plantas testigo y en aquellas cultivadas con 30:30 mg de Si:Cl. Con el resto de los tratamientos la altura de las plantas fue menor. En área foliar también ocurrieron diferencias estadísticas significativas entre los promedios que se indican en el Cuadro 3.2, de tal manera que las plantas tratadas con Si:Cl en dosis de 30:30 mg L⁻¹ tuvieron un incremento de 11% en comparación con el testigo. Con el resto de las dosis las plantas decrecieron en área foliar en 4 a 39%. El rendimiento se expresó con diferencias estadísticas (Cuadro 3.2), pero en

relación al testigo las plantas tratadas con Cl en dosis de 50 mg L⁻¹ representaron incrementos porcentuales superiores en 3%. Con el resto de las dosis se obtuvieron menores rendimientos que oscilaron en 5 a 27%.

Cuadro 3.2. Crecimiento de tomate F₃ cultivado con Si y Cl bajo condiciones de casa sombra.

Tratamientos (dosis)	Verdor (U. Spad)	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
20 mg L ⁻¹ de Si	49.85 abc	68.00 bcd	308.66 bc	23.21 a
30 mg L ⁻¹ de Si	47.19 c	73.47 b	335.95 ab	23.20 a
50 mg L ⁻¹ de Si	48.12 bc	53.87 e	214.61 d	17.84 b
20 mg L ⁻¹ de Cl	51.12 a	63.47 cd	282.12 bcd	23.22 a
30 mg L ⁻¹ de Cl	48.46 abc	71.83 b	300.18 bc	21.49 ab
50 mg L ⁻¹ de Cl	50.24 ab	70.03 bc	302.33 bc	25.14 a
20:20 mg L ⁻¹ de Si-Cl	48.37 abc	62.70 d	233.57 cd	21.75 ab
30:30 mg L ⁻¹ de Si-Cl	50.78 ab	80.13 a	390.57 a	21.75 ab
Testigo	49.56 abc	81.40 a	350.49 ab	24.50 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

Los °Brix de frutos cosechados de las plantas tratadas con Si, Cl o Si:Cl, se incrementaron con respecto al testigo (Cuadro 3.3); sin embargo, el mayor incremento (9%) ocurrió en las plantas cultivadas con Cl en dosis de 20 mg L⁻¹, siguiéndole Cl y Si en dosis de 30 y 50 mg L⁻¹, respectivamente. Los °Brix promedio de frutos cosechados de las plantas cultivadas con combinaciones de Si-Cl en dosis de 30:30 mg L⁻¹, fueron estadísticamente iguales a los del testigo, aunque en valores absolutos tuvieron decrementos de 6%. Aparentemente lo anterior indica que las dosis Si y Cl, por si solos ocasionan efectos individuales superiores a los que induce con la combinación de ambos elementos. Contrariamente a lo que se observó en los °Brix, los promedios de pH variaron en los frutos de las plantas cultivadas con las diferentes dosis de Cl, Si o con las de

ambos nutrimentos a la vez, donde las plantas testigo incrementaron los niveles de pH.

Cuadro 3.3. °Brix y pH de frutos de tomate cultivado bajo condiciones de casa sombra.

Tratamiento (dosis)	°Brix	pH
20 mg L ⁻¹ de Si	3.65 abc	4.38 abc
30 mg L ⁻¹ de Si	3.73 ab	4.34 ab
50 mg L ⁻¹ de Si	3.78 ab	4.37 bc
20 mg L ⁻¹ de Cl	3.89 a	4.39 ab
30 mg L ⁻¹ de Cl	3.79 ab	4.41 ab
50 mg L ⁻¹ de Cl	3.60 abc	4.33 bc
20:20 mg L ⁻¹ de Si-Cl	3.53 bc	4.36 bc
30:30 mg L ⁻¹ de Si-Cl	3.35 c	4.28 c
Testigo	3.57 abc	4.47 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

3.4. DISCUSIÓN

El ligero incremento del verdor de las plántulas, la mayor altura, así como el incremento del peso de materia seca de raíz y de la parte aérea, son aspectos que indican la eficiencia fotosintética de aquéllas tratadas con silicio, ya que de otra manera hubieran ocurrido respuestas totalmente similares con respecto al testigo y, en consecuencia, también indican mejora en la calidad de plántulas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Valente *et al.* (2004), quienes han referido que los efectos directos del silicio se acompañan de varios efectos indirectos, que incluyen un aumento de la capacidad fotosintética, la reducción de las tasas transpiratorias, un mayor crecimiento de las plantas y mayor resistencia mecánica de las células.

Se puede inferir que el silicio aplicado en plántulas con la primera hoja verdadera ocasionó efectos que mejoran la calidad de las plántulas, pero cuando se aplicó en plántulas con cinco hojas verdaderas los efectos fueron contrarios. Esto coincide con lo encontrado por Viana (2005), quien señala que el silicio tiene acción benéfica en algunas plantas y en otras no.

Los resultados en el verdor difieren con los de Jianpeng *et al.* (2010), ya que ellos encontraron que Si incrementa significativamente los niveles de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides en hojas de pepino, a los 10 y 15 días de haber sido tratadas con dicho elemento. Diferencias que pueden ser debido a que se trata de diferente especie, como lo señala Viana (2005).

Con relación al Cl, Li *et al.* (2002) observaron que éste se acumula principalmente en los cloroplastos, y es esencial para la función fotosintética. Las plantas con deficiencia de cloro muestran síntomas de marchitez, clorosis, necrosis y una decoloración de bronce inusual, lo cual no se observó en las plantas utilizadas para esta investigación.

Por eso los resultados de esta investigación concordaron con los referidos por Chapagain *et al.* (2011), quienes mencionan que el Cl es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, que es requerido en pequeñas cantidades por todos los cultivos, y su rol es ayudar en la fotosíntesis, regular las funciones de enzimas, la regulación estomática, en el transporte de nutrientes en las plantas (Ca, Mg, K), incrementar la producción en cereales, aumentar la resistencia a las enfermedades, y con niveles adecuados del suministro, el Cl mejora los rendimientos y la calidad de muchos cultivos, como la cebolla y el algodón (Chen *et al.*, 2010).

Geilfus (2018) menciona que los efectos de fertilización con cloro o toxicidad dependen de la especie, es decir, si es sensible a Cl y del nivel de Cl en el entorno externo, ya que una concentración excesiva de Cl puede dañar las células de la hoja, ocasionando trastornos en la fotosíntesis. Esta coincidencia no sólo fue con las plantas tratadas con Si y Cl de manera individual, sino también con la

combinación de ambos. Gomez *et al.* (2006) mencionan que, mediante un manejo nutrimental, donde se agregue silicio, las plantas pueden incrementar hasta el doble de rendimiento con relación al testigo.

CAPÍTULO 4. RESPUESTAS DE PEPINO Y TOMATE CULTIVADOS CON SILICIO Y CLORO EN CASA SOMBRA

4.1. INTRODUCCIÓN

En México, la producción de hortalizas se ha incrementado significativamente durante los últimos años, siendo la producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) de gran importancia económica, pues tiene gran demanda en el mercado local e internacional, ya sea fresco o procesado (Arias, 2007). En 2015, la superficie sembrada con pepino en Sinaloa fue de 4,202 ha; la producción alcanzó 305,326 t y el rendimiento fue de 74.02 t ha⁻¹. El valor de la producción sumó \$1,684'871,000 pesos; tan sólo en el Valle de Culiacán se sembraron 3,058 ha, con una producción de 241,629 t, y rendimiento de 80.76 t ha⁻¹; con valor de la producción de \$1,411'303,000 pesos (SIAP, 2016). En la horticultura existe la tendencia de satisfacer la demanda local e internacional, lo cual conduce, en muchos casos, a un uso poco eficiente de los recursos naturales, entre ellos el agua y los nutrimentos (Preciado *et al.*, 2006).

Aunado a lo anterior, los nutrientes que se encuentran en el sistema suelo-planta pueden ser: a) esenciales: sin ellos la planta no vive; b) benéficos: con ellos aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio (clima, plagas, enfermedades, compuestos tóxicos del suelo, del agua o del aire), pero la planta puede vivir sin ellos; c) tóxicos: con ellos disminuye su crecimiento y producción, pudiendo llegar a provocar la muerte (por ejemplo, Al, Pb, Cr, Cd, Hg). Cabe aclarar que todo elemento es potencialmente tóxico en altas concentraciones. Se menciona que dentro de los elementos esenciales se encuentran los macronutrientes: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Por su parte, los micronutrientes incluyen hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu) y molibdeno (Mo) (Marschner, 1995). Por otra parte, hay indicios de que el silicio (Si) pudiera entrar en la lista de los micronutrientes, aunque sería más pertinente considerarlo como

benéfico o cuasi-esencial (Epstein, 1999), pues en algunos países lo usan como fertilizante para los cultivos, porque juega un papel importante en la protección de plantas contra el estrés biótico o abiótico (Raya y Aguirre, 2012).

El Si se ha utilizado para mejorar el crecimiento y rendimiento de plantas, particularmente bajo condiciones de estrés, así también con diferentes respuestas fisiológicas como son: mejoramiento en el balance de nutrientes, reducción de la toxicidad de minerales, incremento en las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales, y un aumento en la resistencia a otros diversos factores abióticos (sales, toxicidad de metales, desbalance nutricional, sequía, radiación, altas temperaturas, heladas, radiación UV, entre otros) y factores bióticos. Se ha demostrado que el Si tiene efectos benéficos en los cultivos, ya que al ser absorbido por la planta se transforma en cristales de Si, formando una barrera protectora que presenta una resistencia mecánica al ataque de enfermedades e insectos (Balakhnina y Borkowska, 2013).

Los efectos directos del Si se acompañan de varios efectos indirectos, como el aumento de la capacidad fotosintética, la reducción de las tasas transpiratorias, el mayor crecimiento de las plantas y el aumento de la resistencia mecánica de las células (Valente *et al.*, 2004). Los efectos benéficos de este elemento son importantes en el manejo de la fertilidad para el cultivo de *Avena sativa*, los cuales se observan en la mejor asimilación y transformación eficiente de nutrientes del suelo (incrementos en materia seca aérea, materia seca de raíz y altura) (Borda *et al.*, 2007). Al respecto, Furcal y Herrera (2013) investigaron el efecto que ocasiona el Si en la fertilidad del suelo, aplicado en dosis de 100 kg ha⁻¹ de SiO₂, junto con insecticidas en polvo, y observaron que en el suelo no hubo mayor concentración de Si; sin embargo, el zinc y cobre se incrementaron en el suelo; asimismo, el zinc y magnesio en las hojas de arroz, aunque estadísticamente estos incrementos no repercutieron en el rendimiento y calidad del grano.

Por otro lado, el Cl es un micronutriente esencial, sin embargo, en las plantas superiores éste no es aplicado en la nutrición (Marschner, 1998), ya que

generalmente puede ser suministrado a través de la lluvia, y las plantas deficientes en Cl son raramente observadas en la agricultura o en la naturaleza. Según Marschner (1995), el requerimiento mínimo de Cl, al ser un micronutriente esencial para las plantas superiores, es de 1.0 g kg^{-1} de peso seco de los cultivos. La deficiencia de dicho elemento provoca la reducción del crecimiento foliar y el marchitamiento, seguido de clorosis, bronceado y, finalmente, necrosis. Las raíces se atrofian y el desarrollo de las laterales se suprime. Las frutas disminuyen en número y tamaño. Las plantas menos sensibles son los frijoles (*Phaseolus* spp.), la calabaza (*Cucurbita pepo* L.), la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y el maíz (*Zea mays* L.). La concentración de Cl en el tejido, a la que se observan síntomas de deficiencia, oscila entre aproximadamente 0.1 y 7 mg g^{-1} de peso seco (Xu *et al.*, 2000).

A nivel nacional, entre 2013 y 2016, la producción de tomate aumentó en 35%, al pasar de 2'052,000 t a 2'769,000 t. Lo anterior representa un aumento en el volumen nacional en cuatro años de alrededor de 717,000 t, las cuales son distribuidas en los mercados nacional e internacional. El tomate es un cultivo que se desarrolla en todas las entidades del país, las cinco principales son Sinaloa, San Luis Potosí, Baja California, Zacatecas y Michoacán, en conjunto, estos estados aportan el 52% del volumen nacional. Sinaloa es el principal productor con 551,000 t (SAGARPA, 2017).

El rendimiento y la calidad de los cultivos depende de varios factores, los internos de la planta que están determinados por el genotipo y otros que son de tipo externo, como las condiciones climáticas, las características del suelo, las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato, calidad del agua, factores nutrimentales, la técnica de producción y los factores bióticos (Salazar y Juárez, 2013). Respecto a nutrición, las plantas requieren de los nutrientes que se encuentran en el sistema suelo-planta que pueden ser: a) esenciales: sin ellos la planta no vive; b) benéficos: con ellos aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio, pero la planta puede vivir sin ellos; c) tóxicos: con ellos disminuye su crecimiento y

producción, pero también puede provocar la muerte. Cabe aclarar que todo elemento es potencialmente tóxico en altas concentraciones. Los elementos categorizados como tóxicos lo son inclusive a muy bajas concentraciones (Malavolta *et al.*, 1997). En las plantas superiores está bien establecido que existen 17 elementos minerales esenciales, aunque el níquel sólo lo es en un número limitado de plantas. También el sodio y el silicio, muy abundantes en la biosfera, se comportan como esenciales para algunas especies de plantas (Azcón y Talón, 2013).

El Silicio (Si) normalmente no es considerado como un elemento esencial en la nutrición de las plantas, sin embargo, diversos estudios han mostrado que puede influir en forma positiva en el crecimiento y rendimiento de las plantas (Balakhnina y Borkowska, 2013; Epstein, 2009; Mitani y Ma, 2005). Las altas concentraciones de Cl en el tejido pueden ser tóxicas para las plantas de cultivo, y pueden restringir la agricultura de las regiones salinas (Xu *et al.*, 1999), ya que las altas concentraciones de Cl producen quemaduras en las hojas, disminuyen la fotosíntesis e inhiben la absorción de nitratos (Aslam *et al.*, 1994; Martínez y Cerdá, 1989; Zekri y Parsons, 1992). Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue determinar el efecto que ocasionan el silicio y cloro o la aplicación de ambos elementos a la vez, así como cuál o cuáles son las dosis más eficaces en el crecimiento y rendimiento de los cultivos de pepino y tomate.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó durante el ciclo agrícola otoño/invierno 2016-2017, en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa, México, ubicada en las coordenadas 24° 37' 29" LN y 107° 26' 36" LO, con altitud de 38.5 msnm.

En invernadero se sembraron semillas de pepino del cultivar Paraiso F₁ en charolas de poliestireno con 242 cavidades rellenas con peat moss. Las plántulas se regaron con 1.0 g L⁻¹ de N, utilizando urea como fuente del nitrógeno. El trasplante se realizó el 11 de noviembre de 2016 bajo casa sombra con suelo

vertisol crómico. La separación entre plantas fue de 25 cm y las parcelas experimentales fueron de 3.5 m de largo, con separación de 1.6 m entre hileras de plantas manejadas con sistema de riego por goteo, y en dos ocasiones fertilizadas con 200 kg ha⁻¹ de N en el lado opuesto de donde se aplicaron las soluciones con Si o Cl; asimismo, con Micro-Min foliar (20-30-10) a los 30 y 50 días después del transplante y de cada corte, con un gasto de 200 L ha⁻¹ de agua. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y nueve tratamientos: 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Si, 20, 30 y 50 mg L⁻¹ de Cl, 20:20 y 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl, y un testigo fertilizado sólo con N y el fertilizante foliar.

Las dosis se diluyeron en 3.0 L de agua y estas soluciones se aplicaron sólo una vez en el fondo de un surco de 5.0 cm de profundidad, construido manualmente con un triángulo metálico a un lado de la hilera de plantas, cuando éstas tuvieron cinco hojas verdaderas, en tanto que las plantas testigo sólo recibieron 3.0 L de agua. Posteriormente todas las parcelas experimentales fueron manejadas con riego por goteo durante una hora, y la cinta del sistema de goteo se colocó sobre la superficie del suelo donde se aplicaron las soluciones. El verdor foliar se evaluó a los 13 días después de la aplicación (dda) de los tratamientos, en una muestra de 20 plantas seleccionadas al azar, donde se utilizó un medidor de clorofila (Spad-502, Minolta) en la parte media de una hoja madura de cada planta; al cabo de los mismos días se midió la altura de las plantas con una cinta flexible graduada, desde la base del tallo hasta la yema apical del mismo. Asimismo, el área foliar que se determinó con lo largo y ancho de la cuarta hoja verdadera, y se utilizó la fórmula = $0.851 \cdot L \cdot A$, propuesta por Blanco y Folegatti, (2003). Se cosechó tres veces por semana, se registraron los °Brix y el pH de los frutos, se midieron de acuerdo a la metodología propuesta por la AOAC (1998), para °Brix se colocaron tres gotas del extracto del fruto en un refractómetro digital (Sper Scientific), para pH se pesaron 10 g del fruto en una balanza analítica digital MELTTLER TOLEDO PR 802 (Switzerland), las cuales se mezclaron con 50 mL de agua destilada, previamente ajustada a un pH de 7, la mezcla se homogenizó en una licuadora comercial Osterizer modelo 85554 y posteriormente se filtró en una tela de organza: del filtrado se tomó una alícuota de 50 mL determinando el

pH con un medidor de TDS/conductividad/pH (Hanna Instruments™ HI98130), así como el rendimiento por hectárea con base al peso de frutos, los cuales deberían tener no menos de 3.2 cm de diámetro y 12.7 cm de longitud.

En la misma fecha antes mencionada se sembró semilla de tomate F₃ y también se transplantó en el mismo tipo de suelo que el pepino en casa sombra. La separación entre plantas fue de 25 cm y las parcelas experimentales constaron de surcos de 32 m de largo, con separación de 1.6 m entre surcos. El diseño experimental fue el mismo que se utilizó en pepino, con cuatro repeticiones y los mismos tratamientos. La fertilización nitrogenada del suelo y foliar, la dilución de dosis y aplicación de éstas, el tipo de riego, tamaño de la muestra y el manejo del testigo, se hicieron en la misma forma y etapa fenológica que en el pepino. Las variables de estudio fueron: verdor que se determinó con un medidor de clorofila (Spad 502, Minolta) en la parte media de dos folíolos de una hoja fisiológicamente madura y sin deterioro en cada planta. La altura de plantas de tomate se midió con una cinta flexible graduada, desde la base del tallo hasta la yema apical de la misma. El área foliar se evaluó en la séptima hoja verdadera a los 20 días después de la aplicación de silicio y se utilizó la fórmula $AF = 0.347 (L.W) - 10.7$ propuesta por Blanco y Folegatti (2003). Se cosechó tres veces por semana, se registraron los °Brix y el pH de los frutos, se midieron de acuerdo a la metodología propuesta por la AOAC (1998), para °Brix se colocaron tres gotas del extracto del fruto en un refractómetro digital (Sper Scientific), para pH se pesaron 10 g del fruto en una balanza analítica digital MELTTLER TOLEDO PR 802 (Switzerland), las cuales se mezclaron con 50 mL de agua destilada, previamente ajustada a un pH de 7, la mezcla se homogenizó en una licuadora comercial Osterizer modelo 85554 y posteriormente se filtró en una tela de organza: del filtrado se tomó una alícuota de 50 mL determinando el pH con un medidor de TDS/conductividad/pH (Hanna Instruments™ HI98130). La cosecha para determinar el rendimiento, se realizó cuando los frutos estuvieron en la madurez fisiológica Turning según la clasificación establecida por USDA (1992).

Los datos recabados se analizaron estadísticamente con el paquete estadístico SAS, versión 9.0, y se hizo comparación múltiple de medias con la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.05$).

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Cultivo de pepino

En el verdor de las hojas de pepino se detectaron diferencias estadísticas, de tal manera que donde se aplicaron Si y Cl en las dosis de 50 y 30 mg L⁻¹, se observaron incrementos de 23.8 y 22.4%, respectivamente, comparados con el verdor promedio de las plantas testigo (Cuadro 4.1). Con el resto de las dosis los promedios también superaron al testigo y los incrementos oscilaron de 11.2 a 21.4%, sin que el menor incremento fuera estadísticamente diferente del que expresaron las plantas cultivadas con 30 mg de Si, 20 ó 50 mg de Cl, 20:20 y 30:30 v/v de Si:Cl.

En la altura de plantas también se observaron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 4.1), aunque el mayor incremento (20%) se logró en las plantas que recibieron 50 mg de Si L⁻¹, pero sin diferencia estadística con respecto al testigo, a dicho incremento le siguieron los de 6.9, 10.0, 15.3, 14.1, 14.1%, que ocasionaron las dosis de 20, 30 y 50 mg de Cl, así como las de 20:20 y 30:30 de Si:Cl, respectivamente. En el área foliar ocurrieron las diferencias significativas entre los promedios que se indican en el mismo cuadro, de tal forma que las plantas tratadas con la dosis de 50 mg L⁻¹ de Si o Cl de agua tuvieron un incremento de 22 y 17.7%, en comparación con el promedio del testigo. No obstante que los promedios estimados en las plantas manejadas con 20 ó 30 mg de Cl y con las relaciones v/v de 20:20 ó 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl no fueron diferentes al promedio del testigo, sí tuvieron incrementos en comparación con éste, en un rango que varió de 8.1 a 17.7%.

Cuadro 4.1. Verdor, altura y área foliar de plantas de pepino cultivadas con Si, Cl o Cl:Si en condiciones de casa sombra.

Tratamientos (dosis)	Verdor (Unidades Spad)	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)
20 mg L ⁻¹ de Si	45.77 b	33.55 c	22.80 d
30 mg L ⁻¹ de Si	49.56 ab	35.95 bc	25.65 bdc
50 mg L ⁻¹ de Si	50.94 a	45.50 a	30.25 a
20 mg L ⁻¹ de Cl	48.67 ab	41.70 ab	26.80 abc
30 mg L ⁻¹ de Cl	50.37 a	40.50 abc	27.15 abc
50 mg L ⁻¹ de Cl	49.36 ab	43.70 ab	29.20 ab
20:20 mg L ⁻¹ de Si:Cl	49.94 ab	43.25 ab	27.60 abc
30:30 mg L ⁻¹ de Si:Cl	49.19 b	43.25 ab	26.80 abc
Testigo	41.15 c	37.90 abc	24.80 dc

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

El rendimiento se expresó sin diferencias estadísticas (Cuadro 4.2) pero, con relación al testigo, las diferencias fueron de 8.38, 7.45, 3.88, 5.48, 5.27, 2.44 y 2.98 t ha⁻¹, mismas que representaron incrementos porcentuales de 53.4, 47.4, 24.7, 34.9, 33.6, 15.5 y 19.0, ocasionados por las dosis de 30 y 50 mg de Si, 20, 30 y 50 mg de Cl, 20:20 y 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl, respectivamente.

Los °Brix de los frutos cosechados de las plantas tratadas con Cl o con Cl más Si, se incrementaron con respecto al testigo (Cuadro 4.2). Sin embargo, el mayor incremento (11.7%) ocurrió en las plantas cultivadas con la relación 20:20 mg L⁻¹ de Cl:Si, siguiéndole las dosis de 50 mg L⁻¹ de Cl, la combinación 30:30 mg L⁻¹ de Cl:Si, y las de 20 y 30 mg L⁻¹ de Cl, ya que los °Brix promedio de los frutos cosechados de las plantas cultivadas solamente con Si, fueron estadísticamente iguales a los del testigo, aunque en valores absolutos tuvieron incrementos de 5.4 a 8.3%. Aparentemente lo anterior indica que el Cl ocasionó efectos individuales superiores a los que induce el Si; asimismo, que entre los dos se da una sinergia que hace que los °Brix se incrementen aún más, sobre todo con la relación más

baja de los dos elementos (20:20 mg L⁻¹). Contrariamente a lo que se observó en los °Brix, los promedios de pH no variaron en los frutos de las plantas cultivadas con las diferentes dosis de Cl, Si o con las de ambos nutrimentos a la vez.

Cuadro 4.2. Rendimiento, grados brix y pH de frutos de pepino cultivado con Cl, Si o Cl:Si en condiciones de casa sombra.

Tratamientos (dosis)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	°Brix	pH
20 mg L ⁻¹ de Si	14.06 a	2.60 cd	5.44 a
30 mg L ⁻¹ de Si	24.08 a	2.53 cd	5.44 a
50 mg L ⁻¹ de Si	23.15 a	2.53 cd	5.45 a
20 mg L ⁻¹ de Cl	19.58 a	2.64 cb	5.44 a
30 mg L ⁻¹ de Cl	21.18 a	2.64 cb	5.51 a
50 mg L ⁻¹ de Cl	20.97 a	2.84 ab	5.45 a
20:20 mg L ⁻¹ de Si:Cl	18.14 a	2.88 a	5.46 a
30:30 mg L ⁻¹ de Si:Cl	18.68 a	2.68 abc	5.44 a
Testigo	15.70 a	2.40 d	5.43 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

4.3.2. Cultivo de tomate

En el Cuadro 4.3 se puede notar que las plantas cultivadas en casa sombra tuvieron diferencias estadísticas significativas en el verdor de sus hojas, de tal manera que las plantas tratadas con 20 mg de Si, con 20 y 50 mg de Cl y con 30:30 mg de Si:Cl, incrementaron ligeramente el promedio de su verdor (0.6, 3.1, 1.4 y 2.5%, respectivamente), comparados con el promedio del testigo. En altura se observó el mismo tipo de diferencias, pero el mayor incremento ocurrió en las plantas testigo y en aquéllas cultivadas con 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl, con el resto de los tratamientos la altura disminuyó. En área foliar también ocurrieron diferencias significativas entre los promedios que se indican en el Cuadro 3, así que en las plantas tratadas con 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl se observó un incremento de 11.0% en comparación al testigo, con el resto de las dosis este carácter disminuyó de 4.1 a

38.8%. El rendimiento se expresó con el referido tipo de diferencias (Cuadro 4.3), pero con relación al testigo sólo las plantas tratadas con 50 mg L⁻¹ de Cl tuvieron un incremento de 2.6%, ya que con el resto de las dosis se tuvo menor rendimiento, mismo que osciló de 5.2 a 27.2%.

Cuadro 4.3. Verdor, crecimiento y rendimiento de tomate F₃ bajo condiciones de casa sombra.

Tratamientos (dosis)	Verdor (U. Spad)	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
20 mg L ⁻¹ de Si	49.85 abc	68.00 bcd	308.66 bc	23.21 a
30 mg L ⁻¹ de Si	47.19 c	73.47 b	335.95 ab	23.20 a
50 mg L ⁻¹ de Si	48.12 bc	53.87 e	214.61 d	17.84 b
20 mg L ⁻¹ de Cl	51.12 a	63.47 cd	282.12 bcd	23.22 a
30 mg L ⁻¹ de Cl	48.46 abc	71.83 b	300.18 bc	21.49 ab
50 mg L ⁻¹ de Cl	50.24 ab	70.03 bc	302.33 bc	25.14 a
20:20 mg L ⁻¹ de Si:Cl	48.37 abc	62.70 d	233.57 cd	21.75 ab
30:30 mg L ⁻¹ de Si:Cl	50.78 ab	80.13 a	390.57 a	21.75 ab
Testigo	49.56 abc	81.40 a	350.49 ab	24.50 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

Los °Brix en frutos cosechados de las plantas tratadas con Si, Cl o Si:Cl, se incrementaron con respecto al testigo (Cuadro 4.4). Sin embargo, el mayor incremento (9%) ocurrió en los frutos de plantas cultivadas con Cl en dosis de 20 mg L⁻¹, siguiéndole Cl y Si en dosis de 30 y 50 mg L⁻¹, respectivamente. Los promedios de °Brix en frutos de las plantas fertilizadas con combinaciones de Si:Cl en dosis de 20:20 y 30:30 mg L⁻¹, fueron estadísticamente iguales a los del testigo, aunque en valores absolutos tuvieron las respectivas disminuciones de 1.1 y 6.2%. Lo anterior indica que las dosis Si y Cl, por si solas ocasionan efectos superiores a los que se induce con la combinación de ambos elementos. Contrariamente a lo ocurrido con los °Brix, los promedios de pH variaron con las diferentes dosis de Si, Cl o con las de ambos nutrimentos a la vez, pero el pH en frutos de las plantas

testigo sólo superó estadísticamente al de aquéllos producidos por las plantas cultivadas con 50 mg de Si o Cl, así como con 20:20 y 30:30 mg de Si:Cl.

Cuadro 4.4. °Brix y pH de frutos de tomate cultivado bajo condiciones de casa sombra.

Tratamiento (dosis)	°Brix	pH
20 mg L ⁻¹ de Si	3.65 abc	4.38 abc
30 mg L ⁻¹ de Si	3.73 ab	4.34 ab
50 mg L ⁻¹ de Si	3.78 ab	4.37 bc
20 mg L ⁻¹ de Cl	3.89 a	4.39 ab
30 mg L ⁻¹ de Cl	3.79 ab	4.41 ab
50 mg L ⁻¹ de Cl	3.60 abc	4.33 bc
20:20 mg L ⁻¹ de Si-Cl	3.53 bc	4.36 bc
30:30 mg L ⁻¹ de Si-Cl	3.35 c	4.28 c
Testigo	3.57 abc	4.47 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan, P≤0.05).

4.4. DISCUSIÓN

La respuesta de altura de las plantas cultivadas con Si tiene relación con los de Borda *et al.* (2007), toda vez que ellos descubrieron que al aplicar, en presiembra, las dosis de 100 y 50 mg L⁻¹ de ácido monosilícico, en el cultivo de avena forrajera, la altura fue mayor hasta el momento de la cosecha, ya que observaron diferencias altamente significativas con respecto al testigo. Aunque tales diferencias las pudieron registrar a los 45 dds (etapa de macollamiento) donde aplicaron las dosis de 150, 120, 100 y 50 mg L⁻¹. Esto puede explicarse porque a partir de los 45 días se inicia la etapa reproductiva, que al final se manifiesta con la emisión de la espiga, siendo esta mayor o menor de acuerdo con la cantidad de

fotoasimilados, misma que depende en gran medida de la nutrición que se suministró al cultivo en su fase vegetativa. Por ello, las plantas a las cuales se les aplicó Si, expresaron mayor altura al momento de la cosecha, ya que este elemento tuvo un efecto benéfico sobre el balance nutricional, principalmente de elementos necesarios en las primeras etapas. Sánchez (1981) encontró resultados similares en la caña de azúcar, ya que ésta tuvo respuesta positiva en el aumento de tallos y número de hojas activas.

El incremento del verdor, altura y área foliar de las plantas de pepino confirma lo reportado por Marshner (1995) y Philip y Martin (2001), acerca de que Cl es un micronutriente esencial, pero con un mínimo requerimiento para muchos cultivos. Además, los incrementos en el rendimiento de pepino cultivado con Cl son resultados que tienen relación con los de Chen *et al.* (2010), quienes refieren que los fertilizantes clorados pueden aumentar el rendimiento de las plantas y puede mejorar la calidad de la fibra en el algodón. Asimismo, con los de Diaz *et al.* (2004), ya que ellos informaron que al aplicar 253 kg ha⁻¹ de KCl en trigo (*Triticum aestivum* L.), el rendimiento de grano se incrementó 7% sobre el testigo sin aplicación de Cl.

Con el Si y Cl en relaciones de 20:20 y 30:30 mg L⁻¹, los resultados indicaron que el rendimiento también se puede incrementar, aunque en menor proporción que cuando se aplican de manera individual, sin que el Cl cause toxicidad en los tejidos, como lo señalan Jacoby (1999), Al-Karaki (2000) y Zhu (2001). Además, con estas dosis también se puede inferir que no se aplicaron altas concentraciones de Cl, ya que de otra manera se habrían presentado plantas con toxicidad y se hubiera restringido el cultivo de las mismas, como lo señalan Xu *et al.* (2000) al reportar que, en altas concentraciones en los tejidos, el Cl puede restringir la agricultura, sobre todo en suelos salinos.

El incremento del verdor, altura y área foliar, de las plantas de pepino, son aspectos que indican la eficiencia fotosintética de aquéllas tratadas con Si, ya que de otra manera hubieran ocurrido respuestas totalmente similares con respecto al

testigo, y tienen concordancia con lo reportado por Valente *et al.* (2004), quienes han referido que los efectos directos del silicio se acompañan de varios efectos indirectos, que incluyen un aumento de la capacidad fotosintética y un mayor crecimiento de las plantas.

Con relación al Cl, Li *et al.* (2002) observaron que éste se acumula principalmente en los cloroplastos, y es esencial para la función fotosintética. Las plantas con deficiencia de cloro muestran síntomas de marchitez, clorosis, necrosis y una decoloración de bronce inusual. Esto también coincide con lo encontrado por Viana (2005), quien señala que el silicio tiene acción benéfica en algunas plantas. Asimismo, con los de Jianpeng *et al.* (2010), ya que ellos encontraron que Si incrementa significativamente los niveles de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides en hojas de pepino, a los 10 y 15 días de haber sido tratadas con dicho elemento. Estos resultados concuerdan con los referidos por Chapagain *et al.* (2011), quienes mencionan que el Cl es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, que es requerido en pequeñas cantidades por todos los cultivos, y su rol es ayudar en la fotosíntesis, regular las funciones de enzimas, la regulación estomática por pérdida de agua, transportar nutrientes en las plantas (Ca, Mg y K), incrementar la producción en cereales, aumentar la resistencia a las enfermedades.

Con niveles adecuados de suministro, el Cl mejora los rendimientos y la calidad de muchos cultivos, como lo mencionan Chen *et al.* (2010) en cebolla y algodón. Geilfus (2018) menciona que los efectos benéficos o perjudiciales que ocasiona el Cl dependen de la sensibilidad de la especie y del nivel de éste en el entorno externo, ya que una elevada concentración de Cl puede dañar las células de la hoja y, en consecuencia, ocasionar problemas en la fotosíntesis. Además, Gomez *et al.* (2006) mencionan que, mediante un manejo nutrimental donde se agregue silicio, las plantas pueden incrementar hasta el doble de rendimiento con relación al testigo. Esta coincidencia no sólo fue en las plantas tratadas con Si y Cl por sí solos, sino también con la combinación de ambos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Las dosis 30 y 50 mg de Si y las de 20, 30 y 50 mg de Cl, por sí solas fueron más eficaces que las relaciones v/v de 20:20 y 30:30 mg L⁻¹ de Si:Cl para inducir crecimiento de plantas y rendimiento de pepino cultivado en casa sombra. Sin embargo, las dosis más adecuadas para incrementar el rendimiento fueron las de 30 y 50 mg, tanto de Si como de Cl. En tanto que con respecto a los °Brix, la dosis más alta de Cl y las dos relaciones v/v ocasionaron mejor respuesta en pepino.

Silicio y Cloro en dosis de 20, 30 y 50 mg L⁻¹, aplicados en riego por decantación al sustrato cuando las plántulas presentaron la primera hoja verdadera, fueron eficaces para incrementar verdor, altura y materia seca de raíces y, en consecuencia, también mejoró la calidad de plántulas de tomate F₃. No obstante, cuando se aplicó a través del riego por goteo en plantas con cinco hojas verdaderas, los efectos fueron menores y contrarios a los que se observaron en las plantas testigo. Si y Cl en dosis de 20 mg L⁻¹ fueron eficaces para incrementar ligeramente el verdor y disminuir altura, sin embargo, Cl por sí sólo en dosis de 50 mg L⁻¹ fue eficaz para aumentar el verdor, disminuir altura e incrementar rendimiento. En cambio, con respecto a los °Brix en los frutos, las tres dosis (20, 30 y 50 mg L⁻¹) de Si y Cl ocasionaron incrementos de dicho carácter.

CAPÍTULO 6. LITERATURA CITADA

- Al-Karaki, G. N. 2000. Growth, water use efficiency, and sodium and potassium acquisition by tomato cultivars grown under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 23:1-8.
- Arias, S. 2007. Manual de producción, producción de pepino. USAID-RED Proyecto de Diversificación Económica Rural. Disponible en: <https://es.slideshare.net/williesanto/manual-para-produccion-de-pepino>. (Consulta 07 de noviembre de 2018).
- Aslam, S. M. 1999. Nutrient uptake by plants under stress condition. In: Handbook of plant and crop stress. Pessarakli, M. (ed). Second edition Marcel Dekker Incorporated, New York, USA. pp: 285-313.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1998. Official methods of analysis. 16th (Ed.). William, S. (Ed). Published by the Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. USA. CD-Rom.
- Azcón, B. J y Talón, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Edicions Universitat de Barcelona. pp 99-112.
- Azcón, B. J y Talón, M. 2013. Fundamentos de la Fisiología vegetal. 2da edición. McGRAW-HILL - INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. L. 103 p.
- Balakhnina, T. and Borkowska, A. 2013. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. *Int. Agrophys.* 27:225-232. Doi: 10.2478/v10247-012-0089-4
- Barber, D. A. and Shone, M. G. T. 1966. The absorption of silica from aqueous solutions by plants. *Journal of Experimental Botany* 17:569–578.

- Biel, K., Matichenkov, V. and Fomina, I. 2008. Protective role of silicon in living system. Functional foods for chronic diseases. Ed. D. Martirosian, D&A Inc. Richardson, TX. pp. 208-231.
- Biolley, J. P., Jay, M. and Viricel, M. R. 1994b. Pigmentation patterns of modern rose mutants throw light on the flavonoid pathway in *Rosa 3 hybrida*. *Phytochemistry* 36: 1189–1196.
- Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimovic, V. and Nikolic, M. 2014. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. *Plant Physiol. Biochem.* 74:205-211. DOI: 10.1016/j.plaphy.2013.11.015
- Blanco, F. F. and Folegatti, M. V. 2003. New method for estimating the leaf área index of cucumber and tomato plants. *Horticultural Brasileira, Brasilia* 21 (4): 666-669. <http://dx.Doi.org/10.1590/S0102-05362003000400019>
- Bogdan, K. and Schenk, M. K. 2008. Arsenic in rice (*Oryza sativa* L.) related to dynamics of arsenic and silicic acid in paddy soils. *Environ. Sci. Technol.* 42:7885–7890.
- Borda, O. A., Barón, F. H. y Gómez, M. I. 2007. El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana* 25(2):73-279.
- Caicedo, M. L. M. y Chavarriaga, M. W. 2007. Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agron.* 15(1):27–37.
- Chain, F., Cote´-Beaulieu, C., Belzile, F., Menzies, J. G. and Belanger, R. R. 2009. A comprehensive transcriptomic analysis of the effect of silicon on wheat plants under control and pathogen stress conditions. *Mol. Plant Microbe Interact.* 22:1323–1330.

- Chapagain, B. P., Wiesman, Z., Zaccari, M., Imas, P. and Magen, H. 2003. Potassium chloride enhances fruit appearance and improves quality of fertigated greenhouse tomato as compared to potassium nitrate. *Journal of Plant Nutrition* 26:643-658.
- Chapagain, B. P., Wiesman, Z., Zaccari, M., Imas, P. and Magen, H. 2011. Potassium chloride enhances fruit appearance and improves quality of fertigated greenhouse tomato as compared to potassium nitrate. *Revista Volumen*:643-658. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/PLN-120017671> (Consultado: 13 de mayo de 2017).
- Chen, W., He, Z. L., Yang, X. E., Mishra, S. and Stoffella, P. J. 2010. Chlorine nutrition of higher plants: progress and perspectives. *Journal of Plant Nutrition* 33(7):943-952. DOI: 10.1080/01904160903242417
- Chepurinov, V. A., Mann, D. G., Von, D. P., Vanormelingen, P., Gillard, J., Inze, Sabbe, D. and Vyerman K. W. 2008. In search of new tractable diatoms for experimental biology. *BioEssays* 30:692-702.
- Cherif, M., Benhamou, N., Menzies, J. G. and Bélanger, R.R., 1992. Silicon induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 41: 411–425.
- Cocker, K. M., Evans, D. E. and Hodson, M. J. 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: solution chemistry or an in planta mechanism. *Physiol. Plantarum* 104:608–614.
- Currie, H. A. and Perry, C. C. 2007. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of Botany* 100 (7): 1383-1389. DOI: 10.1093/aob/mcm247.
- Diaz, Z. M., Duarte, G. A. and Barraco M. 2004. Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy Pampas Region. *Revista Volumen*:páginas.

- Dietzel, M., 2000. Dissolution of silicates and stability of polysilicic acid. *Geochim. Cosmochim. Acta* 19:3275-3281.
- Dragisic, M. J., Mojovic, M., Maksimovic, V., R€omheld, V. and Nikolic, M. 2012. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. *J. Exp. Bot.* 63:2411-2420. DOI: 10.1093/jxb/err359.
- Epstein, E and Bloom, A. 2005. Mineral nutrition of plants, principles and perspectives. Second edition. *Sinauer Associates, Sunderland.* 400 p.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50(1):641-664. DOI: 10.1146/annurev. arplant.50.1.641.
- Epstein, E. 2009. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology* 55: 155-160. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x.
- Fauteux, F., Remus-Borel, W., Menzies, J. G. and Belanger, R. R. 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiol Lett* 249: 1–6.
- Fawe, A., Abou-Zaid, M., Menzies, J. G. and Belanger, R. R. 1998. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Phytopathology* 88: 396–401.
- Freeman, K. W. and Girma, K. 2006. Response of winter wheat to chloride fertilization in sandy loam soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37: 1947–1955.
- Furcal, B. P. and Herrera, B. A. 2013. Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. *Agronomía Mesoamericana* 24:365-378.

- Geilfus, C. M. 2018. Review on the significance of chlorine for crop yield and quality. *Plant Sci.* 44:122–144. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.02.014>.
- Ghareeb, H., Bozso, Z., Ott, G. P., Repenning, C., Stahl, F. and Wydra, K. 2011. Transcriptome of silicon-induced resistance against *Ralstonia solanacearum* in the silicon non-accumulator tomato implicates priming effect. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 75:83–89
- Gomes, F. B., Moraes, J. C., Santos, C. D. and Goussain, M. M. 2005. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Scientia Agricola* 62(6):547-551. DOI: 10.1590/S0103-90162005000600006.
- Gómez, C. R., Rodríguez, M. M., Cárdenas, S. E., Sandoval, V. y Colinas, L. M. 2006. Fertilización foliar con silicio como alternativa contra la marchitez causada por *Fusarium oxysporum* (Sheld) en tomate de cáscara. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12(1):69-75.
- Gonzalo, M. J., Lucena, J. J. and Hernandez-Apaolaza, L. 2013. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. *Plant Physiol. Biochem.* 70:455-461. DOI: 10.1016/j.plaphy.2013.06.007
- Grachev, M. A., Annenkov, V. V. and Likhoshway, Y. V. 2008. Silicon nanotechnologies of pigmented heterokonts. *BioEssays.* 30:328-337.
- Gu, H. H., Zhan, S. S., Wang, S. Z., Tang, Y.T., Chaney, R.L. Fang, X.H., Cai, X. D. and Qiu R. L. 2012. Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Plant Soil* 350:193-204.
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxova, M. and Lux, A., 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiol. Plant* 123:459-466.

- Helsper, J. P. F. G., De Vos, C. H. R., Maas, F. M., Jonker, H. H., Van Den, B. H. C., Jordi, W., Pot, C. S., Keizer, L. C. P. and Schapendonk, A. H. C. M. 2003. Response of selected antioxidants and pigments in tissues of *Rosa hybrida* and *Fuchsia hybrida* to supplemental UV-A exposure. *Physiol. Plant* 117: 171–178.
- Hernández, G. R. 2002. Nutrición mineral de las plantas. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes-Mérida, Venezuela. Disponible en www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/. (Consultado 11 de diciembre de 2008).
- Hernandez-Apaolaza, L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? *Planta* 240:447-458.
- Hodson, M. and Evans D. 1995. Aluminum/silicon interactions in higher plants. *Expl. Bot.* 46(2):161-171.
- Huber, D. M. and Watson R. D. 1974. Nitrogen form and plant disease. *Annual Review of Phytopathology* 12:139–165.
- Iwasaki, K., Maier, P., Fecht, M. and Horst, W. J. 2002. Effects of silicon supply on apoplastic manganese concentrations in leaves and their relation to manganese tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Plant Soil* 238:281–288.
- Jacoby, B. 1999. Mechanisms involved in salt tolerance by plants. In: Handbook of Plant and Crop Stress. M. Pessarakli (ed). Second edition Marcel Dekker Incorporated, New York, NY. pp: 97-123.
- Jarvis, S. C. 1987. The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. *Plant and Soil* 97:429–438.
- Jianpeng, F., Qinghua, S., Xiufeng, W., Min, W., Fengjuan, J. and Huinu, X. 2010. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and

nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. *Scientia Horticulturae* 123(4):521-530. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.10.013>

Jones, L. H. P. and Handreck, K. A. 1967. Silica in soils plants and animals. *Advances in Agronomy* 19:107–149.

Jugdaohsingh, R., Tucker, K. L., Qiao, N., Cupples, L. A., Kiel, D. P. and Powell, J. J. 2004. Dietary silicon intake is positively associated with bone mineral density in men and premenopausal women of the Framingham Off-spring Cohort. *J. Bone Mineral Res.* 13:297-307.

Kauss, H., Seehaus, K., Franke, R., Gilbert, S., Dietrich, R. A. and Kroger, N. 2003. Silica deposition by a strongly cationic proline rich protein from systemically resistant cucumber plants. *Plant J.* 33:87–95.

Li, J., Leisner, S. M. and Frantz, J., 2008. Alleviation of copper toxicity in *Arabidopsis thaliana* by silicon addition to hydroponic solutions. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 133:670-677.

Li, T. X., Wang, C. Q., Ma, G. R., Zhang, X. Z. and Zhang, R. S. 2002. Research progress of chloridecontaining fertilizer. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* 15:86–91.

Liang, Y. C., Chen, Q., Liu, Q., Zhang, W. H. and Ding, R. X. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology* 160:1157–1164.

Liang, Y. C., Ma, T. S., Li, F. J. and Feng, Y. J. 1994. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:2285-2297.

- Liang, Y., Si, J. and Römheld, V. 2005a. Silicon uptake and transport in an active process in *Cucumis sativus*. *New Phytol.* 167(3):797-804. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01463.
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G. and Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environ. Pollut.* 147(2):422-428. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.06.008
- Liang, Y., Wong, J. W. C. and Wei, L. 2005b. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere* 58:475–483.
- Loaiza, C. 2003. Fisiología vegetal. Ed. Universidad de Caldas, Manizales. pp. 8-15.
- López, G. J. y Segovia, C. 1996. La fertilización. En: Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos. López-Gálvez, J y Naredo, J. M. (eds). Fundación Argentaria-Visor Distribuciones, Madrid, pp. 95-110.
- Ma, J. F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50:11-18.
- Ma, J. F. and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.* 11:392–397.
- Ma, J. F., Goto, S., Tamai, K. and Ichii, M. 2001a. Role of root hair and lateral roots in silicon uptake by rice. *Plant Physiology* 127:1773–1780.
- Ma, J. F., Miyake, Y. and Takahashi, B. E. 2001b. Silicon as a beneficial element for crop plants. *Studies in Plant Science* 2:17-39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9).

- Ma, J. F., Sasaki, M. and Matsumoto, H. 1997. Al-induced inhibition of root elongation in corn, *Zea mays* L. is overcome by Si addition. *Plant Soil* 188:171–176.
- Ma, J. F., Yamaji, N., Mitani, N., Xu, X. Y., Su, Y. H., McGrath, S. P. and Zhao, F. J. 2008. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 105:9931–9935.
- Malavolta, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 638 p.
- Malavolta, E., Vitti, G. C. and Oliveira, S. A. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. 319 p.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. London: Academic Press. 889 p.
- Marschner, H. 1998. Mineral nutrition of higher plants. 2nd Ed. Academic Press. San Diego, CA. 889 p.
- Martínez, V. and Cerdá, A. 1989. Nitrate reductase activity in tomato and cucumber leaves as influenced by NaCl and N source. *Journal of Plant Nutrition* 12: 1335-1350.
- Matichenkov, V. V. and Bocharnikova, E. A. 2001. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: Datnoff, L. E., Snyder, G. H., Korndorfer, G. H. (Eds.). Silicon in agriculture. *Elsevier Science B.V.* pp. 209-219.
- Matichenkov, V. V., Ammosova, Y. M. and Bocharnikova, E. A. 2001. Influence of silicon fertilizers on plants and soil. *Agrochemistry* 12:30–38.

- McNaughton, S. J. and Tarrants, J. L. 1983. Grass leaf silicification: natural selection for an inducible defense against herbivores. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 80:790-791.
- Medina, A. 1999. Manejo de la nutrición en el rosal después de la cosecha de San Valentin. En: Mantenimiento de plantas de rosa, curso de actualización profesional. Lee, R. (ed.). Centro de Investigaciones y asesorías agroindustriales. Universidad de Bogotá p. 31-48.
- Mitani, N. and Ma, J. F. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56:1255-1261. Doi: 10.1093/jxb/eri121
- Navarro, B. S. y Navarro, G. G. 2000. Química agrícola. Ed. Mundi-Prensa. Barcelona, España. 487 p.
- Neumann, D. and Zur, N. U. 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry* 56(7):685–692.
- Oliveira, L. A., Korndörfer, G. H y Pereira, A. C. 2007. Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31(4):685–690.
- Pavlovic, J., Samardzic, J., Masimovic, V., Timotijevic, G., Stevic, N., Laursen, K. H., Hansen, T. H., Husted, S., Schjoerring, J. K., Liang, Y. and Nikolic, M. 2013. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytol.* 198:1096-1107. DOI: 10.1111/nph.12213.
- Philip, J. W. and Martin, R. R. 2001. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review. *Annals of Botany* 88:967-988.
- Pontigo, S., Ribera, A., Gianfreda, L. and Luz-Mora, M. 2015. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. *Planta* 242:23-37.

- Powell, J. J., McNaughton, S. A., Jugdaohsingh, R., Anderson, S. H. C., Dear, J., Khot, F., Mowatt, L., Gleason, K. L., Sykes, M., Thompson, R. P. H., Bolton-Smith, C. and Hodson, M. J. 2005. A provisional database for the silicon content of foods in the United Kingdom. *Br. J. Nutr.* 94:804-812.
- Prabagar, S., Hodson, M. J. and Evans, D. E. 2011. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Environ. Exp. Bot.* 70: 266-276.
- Preciado, P., Favela, C. E. y Benavides, M. A. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. 85 p.
- Primavesi, A. 1984. Manejo ecológico del suelo: la agricultura en regiones tropicales. 5 ed. Buenos Aires: Ataneo.
- Pulz, A. L., Crusciol, C., Costa, A., Lemos, L. B. y Soratto, R. P. 2008. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. *Rev. Bras. Cienc Solo.* 32(4):1651-1659.
- Quero, E. 2008. Silicio en la producción de chile. La biosilicificación proceso biológico fundamental en la productividad vegetal (en línea). Disponible en http://loquequero.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=1. Consultado 29 septiembre de 2008.
- Randle, W. M. 2004. Chloride requirements in onion: clarifying a widespread misunderstanding. *Better Crops* 88:10–11.
- Raya, P. J. C. y Aguirre, M. C. 2012. El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica* 43:42-46.
- Rémus-Borel, W., Menzies, J. G. and Belanger, R. R. 2005. Silicon induces antifungal compounds in powdery mildew-infected wheat. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 66:108–115.

- Rodrigues, F. A., McNally, D. J., Datnoff, L. E., Jones, J. B., Labbe, C., Benhamou, N., Menzies, J. G. and Belanger, R. R. 2004. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. *Phytopathology* 94:177–18.
- Rogalla, H. and Römheld, V. 2002. Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Environ.* 25:549–555.
- SAGARPA. 2017. Aumenta 35 por ciento producción de jitomate “Hecho en México”. <https://www.horticultivos.com/cultivos/tomate/la-produccion-tomate-mexico-estados-unidos>. (Consultado: junio de 2018).
- Salazar, J. F. I. y Juárez, L. P. 2013. Requerimiento macronutricional en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.). *Revista Bio Ciencias* 2(2):27-34. Doi: 10.15741/rev bio.02.02.04.
- Sánchez, P. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José de Costa Rica. 235 p.
- SAS. Institute. 1995. SAS User’s Guide, Básicos, Versión 5 Edition. SAS Institute Inc., Cary, N.C 1181-1191 p.
- Savant, N. K., Snyder, G. H. and Korndorfer, G. H. 1997. Silicon management and sustainable rice production. *Advance Agronomy* 58:151–199.
- Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q. and Yu, J. 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry* 66(13):1551–1559.
- Shi, X. H., Zhang, C. C., Wang, H. and Zhang, F. S. 2005. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. *Plant Soil* 272:53–60.

- SIAP. 2016. Servicio de Información... Disponible: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp. (consulta, diciembre de 2016).
- Sommer, M., Kaczorek, C., Kuzyakov, Y. and Breuer, J., 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes e a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169:310-329.
- Stickley, C. E., John, K. S., Koc, N., Jordan, R. W., Passchier, S., Pearce, R. B. and Kearns, L. E. 2009. Evidence for middle Eocene Artic Sea ice from diatoms and ice rafted debris. *Nature* 460: 376-380.
- Taiz, L. y Zieger, E. 2005. Fisiología vegetal. 5a ed., edit. Artmed. 954 p.
- USDA. 1992. United States standars for grades of fresh tomatoes. Agricultural Service. Washington, D. C. p 6.
- Valente, A., Morais, R., Couto, C. and Correia, J. H. 2004. Modeling simulation and testing of a silicon soil moisture sensor based on the dual-probe heat-pulse method. *Sensors and Actuators* 115:434-439.
- Viana, J. E. 2005. Importancia del silicio en la nutrición vegetal. Agromil. Tolima, Colombia. <http://www.silicioagromil.com>. (Consultado: septiembre de 2016).
- Vieira, C. P. K., Araújo, N. W. C. y da Silva, A. J. 2008. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(6):849-853. DOI: 10.1002/ jpln.200800147.
- Wang, Y. X., Stass, A. and Horst, W. J. 2004. Apoplastic binding of aluminum is involved in silicon-induced amelioration of aluminum toxicity in maize. *Plant Physiol.* 136:3762–3770.
- Welch, R. M. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Science* 14(1):49-82.

- Xu, G., Magen, H., Tarchitzky, J. and Kafkafi, V. 2000. Advances in chloride nutrition. *Advances in Agronomy* 68:96-150.
- Zekri, M. and Parsons, L. R. 1992. Salinity tolerance of citrus rootstocks. Effects of salt on root and leaf mineral concentrations. *Plant Soil* 147:171-181.
- Zhu, J. K. 2001. Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci.* 6(2):66-71.
- Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q. and Yu, J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci.* 167:527–533.

ANEXO I

ARTÍCULO PUBLICADO EN AGRICULTURAL SCIENCES, 2018(9): 264-271

TÍTULO

**Paclobutrazol applied on cotyledonal leaves and quality of cucumber,
squash, melon and watermelon seedlings**

Paclobutrazol applied on cotyledonal leaves and quality of cucumber, squash, melon and watermelon seedlings

Luz Llarely Cázarez Flores, Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz, Leopoldo Partida Ruvalcaba*, Tomás Díaz Valdés, Felipe Ayala Tafoya, Norma Delia Zazueta Torres, Moisés Gilberto Yáñez Juárez

Faculty of Agronomy of the Autonomous University of Sinaloa, México. Email: *parpolo@yahoo.com.mx

ABSTRACT

The research was done to determine the effects of paclobutrazol (PBZ) through the dose of $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, on the quality of seedlings determined by the content of chlorophyll, height, leaf area, dry matter of roots and of the aerial part of cucumber, squash, melon and watermelon. Sowing of all species was the October 21, 2013 in polystyrene trays with 200 cavities filled with peat moss. Treatments were the doses of 150 mg of $\text{PBZ}\cdot\text{L}^{-1}$ water and the control (distilled water). The solution with PBZ and the distilled water were applied only once with manual atomizer on cotyledonal leaves by mean of 25 shots made approximately with the same force, having put physical barriers between experimental units. In the four species (cucumber, squash, melon and watermelon) the PBZ increased the chlorophyll content in 26.0, 14.9, 19.4 and 26.5%, respectively, compared to the control; height decreased in 24.0, 34.7, 16.3 and 23.4%; leaf area decreased in 40.1, 0.5, 30.4 and 16.2%; the dry matter of roots increased in 20.0, 62.5, 85.7 and 19.7%, whereas in cucumber the dry matter of the aerial part increased 12.3%, in squash decreased 5.3%, and in melon and watermelon increased in the respective 22.9 and 3.3%, so that the 150 mg dose of PBZ can be used to produce seedlings with higher quality for transplant.

Key words: Cucurbitaceae, growth, dose of pbz, dry weight of roots, content of chlorophyll.

INTRODUCTION

Among the most cultivated cucurbits in Mexico are cucumber (*Cucumis sativus* L.), squash (*Cucurbita pepo* L.), melon (*Cucumis melo* L.) and watermelon [*Citrullus lanatus* (Thumb.) Matsum. & Nakai]. With the first two species, in Sinaloa were sown 3,442.8 and 3,303.6 ha, respectively, during the Autumn-Winter and Spring-Summer periods of the theagricultural cycle 2012-2013, in where the average yields respective were obtained of 11.3 and 48.0 t·ha⁻¹; while with the last two species, during the same periods and the same cycle, 15 and 2,784.5 ha, respectively, were planted to obtain the average yields respective of 0 and 11.7 t·ha⁻¹ [1].

Pallardy [2] reported that the use of growth regulators is an alternative means to modify shoot growth and biomass accumulation. The responses that produce in plants that receive growth regulators are diverse: there is alteration of compounds in the buds, redistribution of photosynthesis products destined to the growth of the cup towards defense compounds, growth of the radical system and storage of energy [3]. Actually there are several technologies used as growth retardants, including paclobutrazol (PBZ), which is characterized by delaying cell division and elongation in tissues of the actively growing outbreak, without causing stem malformations or the leaves [4]. With said substance has been achieved to reduce shoot elongation, leaf expansion and stem diameter growth in many tree species [5], since it is an active inhibitor of gibberellic acid biosynthesis , retard the division and elongation cell, and consequently, growth in stem length of plants [6]. The retardant is absorbed passively through the leaves, stems and roots, translocating by the xylem until points of growth, where by inhibition of the action of gibberellin reduces cell division in the subapical part [7].

It has also been reported that between growth regulators is the paclobutrazol (PBZ), an inhibitor of gibberellins that is applied as solution to the soil where the roots of the trees are located, which once absorbed and translocated to the cup,

this causes a reduction of the growth in length and diameter of new shoots [8] [9] [10] [11] [12] [13].

With several research job, the effectiveness of PBZ to increase roots growth has been demonstrated [14]; increase the number, length and diameter of roots in cucumber, when the seeds are soaked in solution with 40 mg of PBZ L⁻¹ of water, but the hypocotyl length is reduced [15]. In seedlings of bell pepper and eggplant, the dose of 150 mg·L⁻¹ increased the fresh and dry matter of roots and dry matter of the aerial part [16].

In dose of 1.0 mg·L⁻¹ applied to the soil or 25 mg·L⁻¹ in foliar application, the PBZ has caused decrease in plant height, is it increase the stem diameter and roots development, improved the photosynthetic activity and the balance of water and with it the quality of plants for transplant, and is accelerate the formation and harvest of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivar 'Precador', without leaving residues of PBZ in the fruits [17].

With the reduction in plant growth that cause the PBZ, is increases the storage of carbohydrates (reserve substances of plants) and also is increases the production of chlorophyll and with this the of carbohydrates [18]; However, in the tree called white poplar (*Populus alba* L.), specie that in urban environments is use with ornamental purpose, the PBZ (0.4 and 0.8 g per plant with severe pruning), it significantly affected the growth of trunk, leaves and the ratio of total sugars / reducers, although the effect was lost in the next growth stage, perhaps because chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) values were decreased, the PBZ did not improve plant vitality [19]. Contrary at this last, several authors have reported that PBZ increases the vitality of plants, understood this as the ability to tolerate stresses of biotic or abiotic origin [20] [18] [21]. In oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.), the PBZ increases leaf greenness and total chlorophyll content [22], equal that in maize and wheat [23].

In field production systems, the cucumber is managed in direct sowing, but in greenhouse conditions, to advance the harvest and take advantage of market

windows, evade rodents and more efficiently use the high-cost hybrid seed, it is frequent produce seedlings for transplant [24], which must be vigorous to ensure a good establishment and high production. The vigor is evaluated with the stem diameter, root growth, leaf area and dry matter in *Solanum lycopersicon* Mill. [25] [24]. For transplant are important the morphological measurements of seedlings, such as root length and height of seedlings, to ensure high presence of plants in the field or greenhouse [26].

The objective of the research was to determine the effects that produce the paclobutrazol through the $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dose in the seedling quality, determined by the chlorophyll content, height, leaf area, dry matter of roots and of the aerial part of cucumber, squash, melon and watermelon.

MATERIALS AND METHODS

The present study was carried out in the greenhouse of the Faculty of Agronomy of the Autonomous University of Sinaloa, Mexico, located between the geographical coordinates $24^{\circ} 37' 29''$ LN and $107^{\circ} 26' 36''$ LO, km 17.5 of the road Culiacan-Eldorado, during the period autumn-winter of the agricultural cycle 2013-2014, where was used cucumber of the cultivar 'Alcázar', squash cultivar 'Adelita', melon cultivar 'Saturn' and watermelon of the cultivar 'Jubilee', Sowing was done on October 21, 2013, in polystyrene trays with 200 cavities filled with peat moss (Sogemix-VTM, Quebec, Canada). Seedlings were irrigated with the necessary frequency, with $1.0 \text{ g of N}\cdot\text{L}^{-1}$ of water, using urea as a source of nutrition.

The experimental design was randomized complete blocks with four replicates, where each experimental unit consisted of 20 plants selected at random. Treatments were the 150 mg dose of PBZ L^{-1} water (that in other investigations was the most appropriate in the effects caused) and distilled water (control). The dose of PBZ and distilled water were applied on October 30, 2013, only once through 25 shots with a hand spray on the cotyledonal leaves of the seedlings. Eight days after application (daa) of PBZ, the chlorophyll content was evaluated with a Spad-502 chlorophyll estimator (Minolta Co., Ltd. Japan), the evaluation was

performed in the middle of 20 selected cotyledonal leaves random; the height was measured at 12 daa, from the base of the stem until the apical bud of the plant. The leaf area was evaluated in the first true leaf at 20 daa, and was calculated agree with the formula proposed by [27]. At 46 daa the roots and aerial part of the seedlings were dried in a stove at 72 °C for 48 h until constant weight, to then determine the dry weight on a precision scale. Statistical analyzes were performed using the MINITAB statistical package 16, through analysis of variance and comparison of means with the Tukey test ($P \leq 0.05$).

RESULTS

In the chlorophyll content of cucumber leaves significant differences were detected (Tukey, 0.05), such that in those plants treated with PBZ an increase of 26% was observed with respect to the control (Table 1), while height decreased in 24% and leaf area 40.1%, compared to the respective control averages. In dry matter of the roots and aerial part, the PBZ was effective to induce greater accumulation, 20% more in roots and 12.3% more in the aerial part.

Table 1. Influence of paclobutrazol (PBZ) in the content of chlorophyll, height, leaf area and dry matter of roots and aerial part of cucumber seedlings.

Treatments	Chlorophyll (Spad units)	Height (cm)	Leaf area (cm ²)	Dry matter of roots (g)	Dry matter of aerial part (g)
Control (water)	33.1 b	11.7 a	16.2 a	0.10 b	0.57 b
PBZ (150 mg·L ⁻¹)	41.7 a	8.9 b	9.7 b	0.12 a	0.64 a

Different letters in the same column indicate significant differences, Tukey ($P \leq 0.05$).

In squash (Table 2), the content of chlorophyll and dry matter of roots increased 14.9 and 62.5%, respectively; the height decreased 34.7%, but the leaf area and

dry weight of the aerial part were statistically equal, with respect to the averages that were obtained in the control.

Table 2. Influence of the paclobutrazol (PBZ) in the content of chlorophyll, height, leaf area and dry matter of roots and aerial part of squash seedlings.

Treatments	Chlorophyll (Spad units)	Height (cm)	Leaf area (cm ²)	Dry matter of raíces (g)	Dry matter of aerial part (g)
Control (water)	43.0 b	15.0 b	16.7 a	0.08 b	1.21 a
PBZ (150 mg·L ⁻¹)	49.4 a	9.8 a	16.6 a	0.13 a	1.15 a

Different letters in the same column indicate significant differences, Tukey (P≤0.05).

In Table 3 it can be observed that the chlorophyll content of the melon leaves had their greatest expression in the seedlings treated with PBZ, since in relation with the control increased 19.4%; but the same seedlings had 16.3% less height and 30.4% less leaf area. However, the dry matter of roots it increased on 85.7%, and although the dry matter of the aerial part was expressed without statistical differences, said biomass increased by 22.9%, in comparison to the average of dry matter of the control seedlings.

Table 3. Influence of the paclobutrazol (PBZ) in the content of chlorophyll, height, leaf area, dry matter of roots and aerial part of melon seedlings.

Treatments	Chlorophyll (Spad units)	Height (cm)	Leaf area (cm ²)	Dry matter of roots (g)	Dry matter of aerial part (g)
Control (water)	32.0 b	13.5 a	7.9 a	0.07 b	0.61 a
PBZ (150 mg·L ⁻¹)	38.2 a	11.3 b	5.5 b	0.13 a	0.75 a

Means with different literal in the same column are statistically different, Tukey (P≤ 0.05).

In watermelon seedlings, the PBZ caused a 26.5% increase in the chlorophyll content in comparison with controls seedling (Table 4); also caused that the height and leaf area to decrease 23.4 and 16.2%, respectively; however, the dry matter of the roots increased 19.7% and of the aerial part 3.3%.

Table 4. Influence of the paclobutrazol (PBZ) in the content of chlorophyll, height, leaf area, dry matter of roots and aerial part of watermelon seedlings.

Treatments	Chlorophyll (Spad units)	Height (cm)	Leaf area (cm ²)	Dry matter of roots (g)	Dry matter of aerial part (g)
Control (wate)	27.9 b	12.4 a	11.7 a	0.1525 b	0.7525 a
PBZ (150 mg·L ⁻¹)	35.3 a	9.5 b	9.8 b	0.1825 a	0.7775 a

Means with different literal in the same column are statistically different, Tukey (P≤ 0.05).

DISCUSSION

The increase of leaf chlorophyll content in the four species (cucumber, squash, melon and watermelon), coincides with the reported by Percival and Albalushi [18], since they also found more chlorophyll in plants treated with PBZ; is also related to what [17] reported in how much to that with the PBZ is induced improvement in the photosynthetic activity of tomato seedlings, since the increase the chlorophyll in the seedlings the photosynthetic process also increased; also have relation with the results of Partida *et al.* [23], since they observed more chlorophyll in plants of maize, wheat (cultivars 'Río Colorado', 'Baviacora' and 'Romoga F-96'), and bell pepper cultivar. 'Taranto' but disagrees with the results reported by Martínez *et al.* [19], since they observed decreased of values of chlorophyll fluorescence (Fv/Fm).

The estimated decreases in seedling height coincide with the results of Keever *et al.* [8], Burch *et al.* [5]. Singh [9], George and Nissen [10], Williams *et al.* [11], Bai *et al.* [12] and Grochowska *et al.* [13], since these authors have reported that the PBZ, once absorbed and translocated to the canopy of the plants, causes

reduction of the growth in length of new shoots. Likewise, with the results published by Giovanazzo *et al.* [28], as these authors observed that PBZ reduced the size of tomatoes seedlings of the cultivars 'Franciset', 'Pavia' and 'Montego' tomatoes by 45%, of equal form with the of Velázquez *et al.* [29], who found that in tomato plants of the cultivar 'Rio Grande' the PBZ retarded growth when foliarly applied at doses of 100, 150 or 200 mg·L⁻¹ in plants of two to four true leaves. The results that Balamani and Poovaiah [30] obtained in potato also have relation with those of this investigation, since they reported that at using PBZ the height of plants decreased; likewise, with the results of Flores *et al.* [31], which they observed decreased height of potato plants, after applying 150 mg·L⁻¹ of PBZ, when the plants had 30 days old after the emergency.

The decreases of the leaf size here exposed coincide with those of Burch *et al.* [5], since they found that the PBZ, in addition to reducing shoot elongation, reduced leaf expansion in many tree species. The estimated results on dry matter of roots and of the aerial part have relation with those of Partida *et al.* [16], since in pepper seedlings they found that the PBZ at doses of 100, 150 or 250 mg·L⁻¹ increased the length of the roots, with 100, 150, 200, 250, 300 or 350 mg·L⁻¹ increased the dry matter of them, while the dry matter of the aerial part only increased with the dose of 150 mg·L⁻¹; in eggplant also they found that with 100, 300 or 350 mg·L⁻¹, the PBZ increased the dry weight of roots and of the aerial part.

In the dry matter aspect of roots, the results also have relation with the of Watson [14], since this author refers that the PBZ increased the growth of roots; likewise, with the Berova and Zlatev [17], who observed that with 1.0 mg·L⁻¹ of water applied to the soil, or with 25 mg·L⁻¹ in foliar application, the PBZ increased the development of roots in tomato seedlings. However, the results of this research differ from reported by Wood [32], through which is reported that the PBZ reduced the root growth in pecan trees [*Carya illinoensis* (Wangenh) C. Koch], which perhaps it was because of the difference in species and the dose applied.

As reported by Wien [24], these results can be used to advance harvest, take advantage of market windows, evade rodents and more efficient use of hybrid seed, when producing seedlings for transplant with the vigor that give plant height, stem diameter and the growth of roots, since according to Leskovar [26], the length of roots and height of seedlings allow to ensure high presence of plants in the field or greenhouse.

CONCLUSIONS

The dose of $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of PBZ caused a decrease in height of cucumber, squash, melon and watermelon seedlings, and was effective to increase the chlorophyll content in its leaves and dry matter of roots; in only three of the species the leaf area decreased and the dry matter of the aerial part increased, since in squash did not diminish the leaf area and neither was it increased the dry matter of the aerial part, in such a form that the dose of $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of PBZ can be used to apply in the cotyledonal leaf stage and produce seedlings with higher quality and probability of success for establishment in the production systems.

REFERENCES

- [1] SIAP. 2013. Cierre de la producción agrícola por cultivo. www.siap.gob.mx (Retrieved on September 08, 2014).
- [2] Pallardy, S. G. 2008. Physiology of Woody Plants. 3rd. ed. Academic Press. USA, 464 p.
- [3] Lilly, S. J. 2001. Arborists' certification study guide. International Society of Arboriculture, Champaign, IL. 222 p.
- [4] Rojas, G. M. y Rovalo M. 1985. Fisiología Vegetal Aplicada. Ed. McGraw-Hill. D. F. 302 p.

- [5] Burch, P. L., Wells R. H. and Kline W. N. 1996. Red maple and silver maple growth evaluated 10 years after application of paclobutrazol tree growth regulator. *Journal of Arboriculture* 22(2): 61-66.
- [6] Tadao, A. Kin M. Y., Nagata N., Yamagishi K., Takatsuto S., Fujioka S., Murofushi N., Yamaguchi I. and Yoshida S. 2000. Characterization of brassinazole, a triazole-type brassinosteroid biosynthesis inhibitor. *Plant Physiol.* 123: 93-99.
- [7] Early, J. D and Martín G. C. 1988. Translocation and breakdown of ¹⁴C-labelled paclobutrazol in Nemaguard peach seedlings. *HortScience* 23(1): 196-200.
- [8] Keever, G. J., Foster W. J. and Stephenson J. C. 1990. Paclobutrazol inhibits growth of woody landscape plants. *Journal of Environmental Horticulture* 8(1): 41-47.
- [9] Singh, Z. 2000. Effects of (2RS, 3RS) paclobutrazol on tree vigour, flowering, fruit set and yield in mango. *Acta Horticulturae* 525: 459-462.
- [10] George, A. P. and Nissen R. J. 2002. Control of tree size and vigor in custard apple (*Annona* spp. hybrid) cv. African Pride in subtropical Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42(4): 503-512.
- [11] Williams, D. R., Potts B. M. and Smethurst P. J. 2003. Promotion of flowering in *Eucalyptus nitens* by paclobutrazol was enhanced by nitrogen fertilizer. *Canadian Journal of Forest Research* 33(1): 74-81.
- [12] Bai, S., Chaney W. and Qi Y. 2004. Response of cambial and shoot growth in trees treated with paclobutrazol. *Journal of Arboriculture* 30(3): 137-145.
- [13] Grochowska, M. J., Hodun M. and Mika A. 2004. Improving productivity of four fruit species by growth regulators applied once in ultra-low doses to the collar. *The Journal of Horticulture & Science Biotechnology* 79(2): 252-259.

- [14] Watson, G.W.1996.Tree root system enhancement with paclobutrazol. Journal of arboriculture 22 (5): 211-217.
- [15] Ali, A. R. 2009. Improving germination performance and chilling tolerance in cucumber seedlings with paclobutrazol. Internacional Journal of Vegetable Science, 15 (2): 173–184 p.
- [16] Partida, R. L., Velázquez A. T. de J., Díaz V. T., Ayala T. F y Acosta V. B. 2007. Paclobutrazol and root and shoot growth in bell pepper and eggplant seedlings. Revista Fitotecnia Mexicana 30(10): 145-150.
- [17] Berova, M. and Zlatev Z. 2000. Physiological response and yield of paclobutrazol treated tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Plant Growth Regulation 30(2): 117-123.
- [18] Percival, G. C. and Albalushi A. M. S. 2007. Paclobutrazol-induced drought tolerance in containerized English and ever-green oak. Arboriculture & Urban Forestry 33(6): 397-409.
- [19] Martínez, T. T., Plascencia E. F. O. y Cetina A. V. M. 2013. Growth and vitality of *Populus alba* L. with topping and treated with paclobutrazol. Revista Chapingo Serie Horticultura 19(3): 381-388.
- [20] Navarro, A., Sánchez B. M. J. and Bañón S. 2007. Influence of paclobutrazol on water consumption and plant performance of *Arbutus unedo* seedlings. Scientia Horticulturae 111(2): 133-139.
- [21] Sharma, D. K., Dubey A. K., Srivastav M., Singh A. K., Sairam R. K., Pandey R. N., Dahuja A. and Kaur C. 2011. Effect of putrescine and paclobutrazol on growth, physiochemical parameters, and nutrient acquisition of saltsensitive citrus rootstock Karna khatta (*Citrus karna* Raf.) under NaCl stress. Journal of Plant Growth Regulation 30(3): 301-311.

- [22] Nizam, K. and Te-chato S. 2009. Optimizing of root induction in oil palm plantlets for acclimatization by some potent plant growth regulators (PGRs). *J. of Agric. Techn.* 5(2): 371-383.
- [23] Partida, R. L., Velázquez A. T. de J., Díaz V. T., Ayala T. F. y Acosta V. B. 2012. Paclobutrazol para Incrementar la Producción de Hortalizas y Cereales. Ed. Académica Española, Saabrücken, Alemania, 81 p.
- [24] Wien, H. C. 1999. Trasplanting. pp. 37-68. In: H. C. Wien (ed). *The physiology of vegetable crops*. CABI Publishing. Department of Fruit and Vegetable Science, Cornell University. Ithaca, NY, USA.
- [25] Sánchez, del C. F., Ortiz C. J., Mendoza C. C., González H. V. y Colinas L. M. T. 1999. Morphological traits associated with a tomato ideotype for a nonrestrictive environment. *Agrociencia* 33(1): 21-29.
- [26] Leskovar, D. I. 2001. Producción y Ecofisiología del Trasplante Hortícola. Texas A & University, USA. 24 p. http://www.uaaan.mx/postgrado/images/files/hort_simposio1/Curso.pdf. Retrieved on September 23, 2017.
- [27] Blanco, F. y M. Folegatti 2003. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Horticultura Brasileira* 21(4): 666-669.
- [28] Giovinazzo, R. Souza, M. V y Hartz, T., K. 2001. Paclobutrazol responses with processing tomato in France. *Acta Hort.* 542: 355-358.
- [29] Velázquez, A. T. de J., L. Partida R., B. Acosta V. y F. Ayala T. 2008. Production of tomato and pepper plant applying paclobutrazol on foliage. *Universidad y Ciencia*, 24(1): 21-28.
- [30] Balamani, V. and Poovaiah B. W. 1985. Retardation of shoot growth and promotion of tuber growth of potato plants by paclobutrazol. *American Journal of Potato Research* 62(7): 363-369.

- [31] Flores, L. R., F. Sánchez C., J. E. Rodríguez P., R. Mora A., M. T. Colinas L. y H. Lozoya S. 2011. Paclobutrazol, uniconazole and cycocel in potato seed-tuber production in hydroponic culture. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(2): 173-182.
- [32] Wood, B. W. 1988. Paclobutrazol suppresses vegetative growth of large pecan trees. *HortScience* 23: 341-343.

ANEXO II

**CITA DEL ARTÍCULO: PACLOBUTRAZOL APPLIED ON COTYLEDONAL
LEAVES AND QUALITY OF CUCUMBER, SQUASH, MELON AND
WATERMELON SEEDLINGS**

CITADO EN: SCIENCE AND AGROTECHNOLOGY, 43:e020319, 2019

**CITADO EN: EMIRATES JOURNAL OF FOOD AND AGRICULTURE, 2020.
32(4): 255-262**