

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Instituto de Ciencias Agrícolas
Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias



**SILICIO COMO ALTERNATIVA PARA MITIGAR EL
ESTRÉS SALINO EN PEPINO Y TOMATE**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTA

Pedro Iván López Cuén

DIRECTOR DR. EN C. Fidel Núñez Ramírez
CO-DIRECTOR DR. EN C. Pablo Elorza Martínez

La presente tesis “Silicio como alternativa para mitigar el estrés salino en pepino y tomate” realizada por el **M.C. Pedro Iván López Cuén**, dirigida por el Dr. en C. Fidel Núñez Ramírez , ha sido evaluada y aprobada por el Comité Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Comité Particular

Fidel Núñez R.

Dr. Fidel Núñez Ramírez
Director de Tesis

[Signature]
Dr. Pablo Elorza Martínez
Co-Director de Tesis

[Signature]
Dra. Cristina Ruiz Alvarado
Sinodal

[Signature]
Dr. Roberto Soto Ortiz
Sinodal

[Signature]
Dr. Onécimo Grimaldo Juárez
Sinodal

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Fidel Núñez Ramírez**, director de tesis por su confianza, conocimientos, paciencia y tiempo supo dirigirme con gran responsabilidad para la culminación del presente trabajo.

Al **Dr. Pablo Elorza Martínez**, Co-Director de tesis por su valiosa orientación para realizar exitosamente esta investigación.

A la **Dra. Cristina Ruíz Alvarado, Dr. Roberto Soto Ortíz, Dr. Onécimo Grimaldo Juárez**, asesores de Tesis por todo su apoyo, sugerencias, recomendaciones, conocimientos para hacer posible el desarrollo y conclusión de la tesis.

A la **Universidad Autónoma de Baja California**, por brindarme la oportunidad de realizar estudios de posgrado en uno de sus programas reconocidos por el CONACYT.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, por permitirme formar parte de su programa doctores jóvenes.

Al **CONACYT**, por el apoyo brindado a través de la expedición de la autorización de la beca de posgrado durante mi tiempo de estudio.

Al **Personal Académico, Administrativo, Servicios del ICA-UABC** muchas gracias por el apoyo brindado.

A **Oracio** del laboratorio de agua y suelos por su amistad, sugerencias y consejos en mi tiempo de estudio.

DEDICATORIA

A mis padres Magdalena Cuén Morales y Víctor Jesús López Quintero (†), quienes me han dado su apoyo incondicional en los mejores y peores momentos de mi vida, quienes sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme, a quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en persona de provecho son mi orgullo y gran motivación.

A mis hermanas Karla Fabiola, Evia Inés y Victoria Guadalupe López Cuén, por apoyarme con sus palabras de aliento a seguir culminando un logro más en mi preparación profesional.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE GENERAL	IV
LISTA DE CUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
CAPÍTULO 1	1
1.1 Introducción general	1
1.2 Salinidad-Sodicidad de los suelos	2
1.2.1 Origen de la salinidad de los suelos	3
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 Homeostasis	5
1.2.2 Estrés en plantas	5
1.2.3 Métodos para medir la salinidad	7
1.2.4 Efectos fisiológicos producidos por la salinidad sobre las plantas	8
1.2.5 Mecanismos de defensa de las plantas	9
1.2.6 Efecto del sodio y cloro en las plantas	10
1.3 HIPÓTESIS	11
1.4 OBJETIVOS	11
1.4.1 Objetivo general	11
1.4.2 Objetivos específicos	12
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA Y BIBLIOGRAFÍA CITADA	13
2.1 Introducción	13
2.2 Absorción y transporte de silicio en plantas	16
	iv

2.2.1 Los mecanismos de acción del Si en la tolerancia al estrés biótico y abiótico son:	16
2.2.2 Efecto del silicio en las plantas contra los insectos y las enfermedades	18
2.3 Situación actual de la producción del cultivo de pepino y tomate en Baja California, México y el Mundo	20
2.3.1 Introducción	20
2.3.2 El cultivo de tomate	20
2.3.3 Panorama mundial	20
2.3.4 Panorama nacional	23
2.3.5 Panorama estatal	26
2.4 Origen de la planta de tomate	27
2.4.1 Clasificación taxonómica de tomate	28
2.4.2 Importancia económica del cultivo de tomate	29
2.4.3 Morfología, de acuerdo a Cuellar <i>et al.</i> (2002)	29
2.4.4 Hábitos de crecimiento de tomate	29
2.4.5 Requerimientos climáticos y edáficos	30
2.5 Aspectos botánicos del cultivo de tomate, de acuerdo a Cuellar <i>et al.</i> (2002)	31
2.5.1 Tallo	31
2.5.2 Flor	31
2.5.3 Hoja	31
2.5.4 Raíz	31
2.5.5 Fruto	32
2.5.6 Semilla	32
2.6 Cultivo de pepino	32
2.6.1 Origen del pepino	32
2.6.2 Clasificación taxonómica de pepino, de acuerdo a Conabio 2003;	33
2.6.3 Panorama nacional	33

2.6.4 Panorama estatal, de acuerdo a SEDAGRO, 2016	35
2.6.5 Importancia del pepino	35
2.6.6 Descripción morfológica de acuerdo a Conabio 2003	36
2.7 Generalidades del cultivo	36
2.8 Bibliografía citada	38
CAPÍTULO 3. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	52
3.1. Artículo 1. Silicon as an Alternative to Counteract Induced Salinity with Standard Nutrient Solution in Cucumber	52
3.2 Respuesta fisiológica diurna del cultivo de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) a la aplicación de silicio bajo condiciones de salinidad	75
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES	97

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de suelos salinos o sódicos-alcalinos.....	7
Cuadro 2. Principales países productores de tomate, año agrícola 2016	20
Cuadro 3. Principales estados productores de tomate, año agrícola 2016	24
Cuadro 4. Principales estados productores de pepino, año agrícola 2016	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hifa del hongo según la presencia o no de silicio debajo de la cutícula de una hoja de monocotiledónea. Fuente Vladimir V. Matichenkov (2010)	19
Figura 2. Superficie cosechada de tomate de los principales productores en el mundo, año agrícola 2016 (Fuente FAO, 2018).....	22
Figura 3. Producción de tomate entre los principales países productores en el mundo, año agrícola 2016 (Fuente FAO, 2018).....	22
Figura 4. Países con mayor rendimiento de tomate por hectárea cosechada, año agrícola 2016.	23
Figura 5. Superficie cosechada de los principales estados productores de tomate rojo a nivel nacional, año agrícola 2016 (Fuente: SAGARPA, 2018).	25
Figura 6. Producción de tomate rojo de los principales estados a nivel nacional, año agrícola 2016 (Fuente: SAGARPA, 2018).....	25
Figura 7. Principales estados con mayor rendimiento de tomate rojo a nivel nacional, año agrícola 2016 (Fuente: SAGARPA, 2018).....	26

RESUMEN

La producción hortícola en áreas con problemas de salinidad provoca en las plantas alteraciones en los procesos fisiológicos, morfológicos y bioquímicos, una de las alternativas para mitigar este factor es el uso de silicio (Si). Por lo cual el objetivo de este trabajo fue evaluar la fertilización con Si sobre la tolerancia al estrés por salinidad en pepino y tomate hidropónico. El trabajo de investigación se condujo en dos etapas, en la primera etapa se estableció un diseño factorial completamente al azar en cultivares de pepino induciendo la salinidad con solución nutritiva estándar a 4 dS m^{-1} , en la segunda etapa se estableció un diseño de parcelas divididas distribuidas completamente al azar induciendo la salinidad con cloruro de sodio (NaCl) a 4 dS m^{-1} . Las concentraciones de Si fueron 0, 4 y 8 g L^{-1} . Se determinó la temperatura de la hoja, eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II (PSII), conductancia estomática (g_s), crecimiento y rendimiento de frutos. Los resultados obtenidos mostraron que la fertilización con Si disminuyó el daño por altas concentraciones de sales. Los niveles de la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II (PSII; F_v/F_m), fluorescencia mínima (F_o), fluorescencia máxima (F_m) y conductancia estomática (g_s) fueron mayor con Si comparados con plantas sin Si. Por lo tanto se concluye que la fertilización con Si mitigó el daño de estrés salino en el aparato fotosintético, incrementando la eficiencia fotosintética de la planta y una mejor asimilación de CO_2 .

Palabras clave: asimilación de CO_2 , estrés abiótico, fluorescencia, fotosíntesis, nutrición mineral

ABSTRACT

The horticultural production in areas with problems of salinity causes in the plants alterations in the physiological, morphological and biochemical processes, one of the alternatives to mitigate this factor is the use of silicon (Si). Therefore, the objective of this work was to evaluate the fertilization with Si on tolerance to stress by salinity in cucumber and tomato hydroponics. The research work was conducted in two stages, in the first stage a completely random factorial design was established in cucumber cultivars inducing salinity with standard nutrient solution at 4 dS m⁻¹, in the second a complete randomized split plot design, inducing salinity with sodium chloride (NaCl) at 4 dS m⁻¹. The concentrations of Si were 0, 4 and 8 g L⁻¹. The temperature of the leaf, maximum photochemical efficiency of photosystem II (PSII), stomatal conductance (g_s), growth and fruit yield were determined. The results obtained showed that fertilization with Si decreased the damage due to high concentrations of salts. The levels of maximum photochemical efficiency of photosystem II (PSII, Fv/Fm), minimum fluorescence (Fo), maximum fluorescence (Fm) and stomatal conductance (g_s) were higher with Si compared with plants without Si. Therefore, it is concluded that Si fertilization mitigated saline stress damage in the photosynthetic apparatus, increasing the photosynthetic efficiency of the plant and a better assimilation of CO₂.

Key words: Abiotic stress; CO₂ assimilation; Fluorescence; Photosynthesis; Plant nutrition

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción general

La salinidad de los suelos es uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en la actualidad y uno de los que genera mayor degradación del suelo a nivel mundial, de los 230 millones de hectáreas de tierras irrigadas, 45 millones (20%) son afectadas por sal. La tierra irrigada es sólo el 15% del total de tierra cultivada, pero debido a que esta tierra presenta al menos el doble de productividad que las tierras que sólo reciben agua de lluvia, producen un tercio del alimento mundial, aproximadamente el 7 % de superficie están seriamente afectadas por altas concentraciones de sales solubles (Munns y Tester, 2008).

Se estima unas 800 millones de hectáreas perjudicadas, de éstas alrededor de 400 millones de hectáreas son afectadas por la salinización y un número similar afectadas por sodificación lo que representa la tercera parte de las áreas cultivadas en el mundo (FAO, 2007).

Tan sólo en América Latina 31, 000,000 ha presentan este problema, destacando México, Perú, Colombia, Ecuador y Chile entre los más afectados.

En México se estima que un 3.2 % del territorio nacional (600,000 ha) tiene problemas de salinidad de suelos, principalmente en los estados de Sonora, Sinaloa, Baja California, Tamaulipas, San Luis Potosí, Chiapas, Nuevo León, Oaxaca, Veracruz y Zacatecas (SEMARNAT, 2009).

La República Mexicana cuenta con una superficie de 1 millón 958 mil 201 km² de los cuales el 60% se concentran en áreas de zonas áridas y semiáridas donde la evaporación es mayor que las precipitaciones, son afectadas por este factor, donde este proceso se acelera con el uso de aguas ricas en sales y un manejo inadecuado de los suelos, lo que ocasiona un daño continuo de estos suelos, disminuyendo la producción y calidad de las cosechas.

La salinidad es el principal estrés abiótico en las plantas, tiene efectos negativos en el crecimiento y desarrollo de cultivos agrícolas (Sengupta y Majumder, 2009; Yestisir y

Uygun, 2009; Gupta y Huang, 2014), actualmente esto representa un panorama complicado para la agricultura ya que la salinidad se está incrementando 1 al 2 % cada año. (Munns y Tester 2008, Plaut *et al.*, 2013, Rasool *et al.*, 2013, Rizwan *et al.*, 2015). La irrigación incrementa el problema de la salinización del suelo, principalmente cuando se usa agua de poca calidad y el drenaje es insuficiente, las prácticas agrícolas adecuadas pueden corregir el proceso mediante riegos con aguas de alta calidad, instalación de sistemas de drenaje, rectificación de la sodicidad del suelo mediante la adición de óxido o sulfato de calcio (Tester y Davenport, 2003).

1.2 Salinidad-Sodicidad de los suelos

El término salinidad se refiere a la presencia en el suelo de una elevada concentración de sales las cuales perjudican a las plantas por su efecto tóxico y aumento del potencial osmótico del suelo. La situación más frecuente de salinidad en los suelos es por NaCl pero los suelos salinos pueden presentar distintas combinaciones de sales, siendo comunes los cloruros, sulfatos y Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (Jenks y Hasegawa, 2005; Munns *et al.*, 2006).

En los suelos salinos las sales solubles exceden del 0,1 % del peso seco total, y pueden disminuir el crecimiento de las plantas cultivadas o silvestres (Rozema, 1996).

La acumulación de sal está relacionada principalmente a un clima seco, un proceso que ha venido incrementándose debido a la intensificación global de la desertificación, materiales parentales ricos en sal para la formación del suelo, drenaje insuficiente y agua subterránea o irrigación con agua salina (Almodares *et al.*, 2008).

La sodicidad o alcalinización se desarrolla cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio.

Los suelos sódicos son aquellos que se originan cuando el ión monovalente Na^+ desplaza otras bases del complejo de adsorción y se fija a esta estructura superficial, en un nivel de concurrencia que sobrepasa el 15 % entre los cationes intercambiables

(Szabolcs, 1994).

Las altas concentraciones de Na^+ en los suelos no sólo perjudican las plantas directamente, sino también degradan la estructura del suelo, disminuyendo la porosidad y la permeabilidad del agua, estos suelos se caracterizan por presentar propiedades físicas y químicas desfavorables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos que en ellos se desarrollan, necesitan prácticas especiales para su mejoramiento y manejo (Jenks y Hasegawa, 2005).

1.2.1 Origen de la salinidad de los suelos

Las causas de los tipos de sales en el suelo pueden ser de origen natural o antrópico.

Origen natural;

La disolución de las sales minerales presentes en las rocas principalmente de tipo sedimentarias, también pueden formarse estas sales por alteración de los minerales que conforman la roca madre.

Poca o nula precipitación y excesiva evaporación las sales disueltas en el agua pueden formar acumulaciones saladas.

Los suelos no muy profundos pueden además tomar una parte de sales del manto freático, que asciende por capilaridad.

La acumulación de sales de origen mineral en el lecho oceánico y aguas subterráneas (Tanji 2002).

Origen antrópico:

Es la salinización producida directamente por la acción del ser humano.

El uso excesivo de fertilizantes en zonas de actividad agrícola muy intensa, así como también mal drenaje agrícola.

Uso de agua de mala calidad para el riego cuando se riega con agua con elevada cantidad de sales.

La pérdida de la productividad de las tierras trae consigo problemas de salinidad.

Las regiones cercanas a las zonas industriales pueden sufrir el proceso de salinización.

1.2 Antecedentes

La salinidad disminuye la calidad de los suelos, limita el desarrollo de las plantas y en consecuencia reduce el potencial de rendimiento de los cultivos. Un suelo con problemas de salinidad también restringe los tipos de especies que pueden ser cultivadas en él. En algunos casos, puede conducir a la sodificación del suelo, con las consiguientes consecuencias negativas de degradación de estructura del suelo (Amini *et al.*, 2007).

La salinidad es un problema que puede llegar a ser tan grave hasta el punto del abandono de tierras. También induce graves problemas medioambientales como la salinización de aguas subterráneas y superficiales. (Smith y Smith, 2007).

Para el caso específico de cultivos, la salinidad provoca toxicidad por iones específicos, como el Cl^- , Na^+ y B, afectando la absorción de nutrientes y aguas por las plantas, con la consecuente alteración de su metabolismo. En cultivos sensibles afecta seriamente la germinación y emergencias, desarrollo de plántulas e incluso provocar la muerte de las mismas (Mahajan y Tuteja, 2005).

Cuando las plantas están bajo estrés salino tienden a reducir su capacidad de expansión foliar y se pierde turgencia, las células desarrolladas en un medio salino equilibran su potencial hídrico perdiendo agua, lo que produce la disminución del potencial osmótico y de turgencia, hasta la pérdida de la estructura celular por desorganización de membranas e inhibición de la actividad enzimática (Parida y Das, 2005).

Cuando el Na^+ se encuentra en alta concentración tiende a desplazar al Ca^{2+} de los sitios de enlace de la membrana celular de la raíz y altera su permeabilidad, lo que ocasiona la salida del K^+ de las células y favorece la entrada del Na^+ . El Cl^- , aun

cuando es un elemento esencial también puede causar toxicidad cuando su concentración en el tejido vegetal es excesiva. El estrés hídrico entonces, ocasiona daño celular ocasionado por una excesiva acumulación de iones en los tejidos vegetales (Munns y Tester, 2008; Kronzucker *et al.*, 2013).

Los suelos salinos se caracterizan por presentar altas concentraciones de sales solubles como cloruro de sodio (NaCl), sulfato de sodio (Na₂SO₄), cloruro de magnesio (MgCl₂), sulfato de magnesio (MgSO₄), cuando la conductividad eléctrica (CE) es igual o mayor a 4 dS m⁻¹ lo cual es equivalente a 40 mM NaCl (Tester y Davenport, 2003; Munns, 2005), lo cual que genera una presión osmótica de 0.2 MPa (Munns y Tester, 2008).

1.2.1 Homeostasis

La homeostasis es el estado fisiológico de la planta que se encuentra en equilibrio gracias a diferentes procesos de auto-regulación, cuando se rompe ese equilibrio en las células por cualquier factor, se tiene entonces una condición de estrés.

1.2.2 Estrés en plantas

Estrés es un factor externo que afecta negativamente a un organismo. Una planta que crece en condiciones óptimas se encuentra sin estrés, es decir todos los factores están en su punto óptimo (luz, nutrientes, agua, temperatura, oxígeno) (Morris *et al.*, 2013).

El estrés salino rompe la homeostasis iónica de las plantas al provocar un exceso tóxico de Na⁺ en el citoplasma y una deficiencia de iones como el K⁺ dada la similitud en las propiedades fisicoquímicas entre el Na⁺ y el K⁺, el Na⁺ inhibe muchas enzimas que requieren la unión de K⁺ como cofactor. El NaCl es la sal más soluble y más abundante (Flowers, 2004; Demiral, 2005). Concentraciones de Na⁺ superiores a 100 mM en el citoplasma inhiben procesos bioquímicos y fisiológicos (Munns y Tester, 2008). Las plantas accionan mecanismos para regular la acumulación de Na⁺ y así absorber nutrientes esenciales como K⁺ y NO₃⁻ comúnmente presentes en bajas concentraciones (Munns y Tester, 2008). Altas concentraciones de sales en el suelo

perturban la homeostasis en el potencial hídrico y en la distribución de iones tanto a nivel celular como en la planta. Desde el punto de vista agronómico la salinidad se expresa en términos de conductividad eléctrica (CE). La CE mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción de esta, por lo tanto, la CE mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo, su valor es más alto cuando más fácil se mueve dicha corriente a través del mismo suelo por una concentración más elevada de sales. Las unidades utilizadas para medir la CE son dS m^{-1} (deciSiemens por metro), esta medida es equivalente a la que anteriormente se utilizaba mmhos cm^{-1} (milimhos por centímetro).

Los suelos normales son aquellos que poseen una concentración de sales la cual no afecta el desarrollo de los cultivos. Los suelos salinos presentan muchas sales en solución (fase líquida), bajo contenido de Na^+ absorbido en las arcillas (fase sólida), esta flocculado y estructurado, por lo que, no presentan problemas de infiltración y permeabilidad, la cual es igual o mayor que en un suelo normal. En los suelos salinos, el lavado con un exceso de agua baja en sales, puede disminuir la concentración y/o acumulación de éstas en el suelo.

Por otro lado, los suelos sódicos o alcalinos tienen cantidades de Na^+ intercambiable muy altas (afectan a los cultivos) y con bajas concentraciones de sales solubles. El Na^+ es más activo que el Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo que provoca que las partículas del suelo (arcillas) se dispersen y se destruya la estructura del suelo. Por esto, los suelos sódicos presentan baja permeabilidad (infiltración lenta) y alta defloculación, que los hace difíciles de trabajar. Estos suelos presentan un pH entre 8.5 y 10, debido a la ausencia de H^+ y exceso de Na^+ en la solución del suelo. Por su parte, los suelos salino-sódico presentan un exceso de sales en la solución del suelo y un alto porcentaje de Na^+ intercambiable en los coloides del suelo. En estos suelos no es recomendable el lavado ya que puede derivar en la formación de suelos sódicos, generando problemas mayores.

1.2.3 Métodos para medir la salinidad

El laboratorio de salinidad de los EEUU (1954) definió los suelos salinos como aquellos que poseían una conductividad eléctrica (CE) en extracto saturado igual o mayor de 4 dS m⁻¹ (Munns, 2005). La salinidad del suelo se mide a través de dos métodos: 1) conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CE_e); 2) determinación directa de CE en extracto 1:2 es decir, por cada unidad de suelo se agregan dos de agua. Este método es práctico y sencillo.

Cuadro 1. Clasificación de suelos salinos o sódicos-alcalinos

Suelo	CE dS m ⁻¹	PSI %	pH	Ubicación de las sales en el suelo
Salino	> 4	< 15	7.0 - 8.5	Disueltas en la solución del suelo Costras blancas de sal en la superficie
Sódico alcalino	o < 4	> 15	8.5 - 10	Absorbidas en las arcillas (Na ⁺) Costras negras y quebradizas en la superficie
Salino-sódico	> 4	> 15	< 8.5	Absorbidas en coloides y en la solución del suelo Costras blancas y oscuras en la superficie
Normal	< 4	< 15	6.5 - 7.5	Adsorbidas en coloides y en la solución del suelo

CE: Conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación del suelo (Concentración de sales en la solución del suelo)

PSI: Porcentaje de sodio intercambiable (Porcentaje de sodio absorbido en los coloides del suelo).

1.2.4 Efectos fisiológicos producidos por la salinidad sobre las plantas

En algunas áreas dedicadas a la agricultura con riego, se han presentado problemas por salinidad de los suelos, esto es debido a que las sales presentes en el agua de riego tienden a acumularse en el perfil del suelo, lo que provoca su degradación y por ende disminución de su valor agrícola (Azcón y Talón, 2001).

La salinidad y el estrés hídrico son los mayores problemas que se enfrentan en la agricultura, donde se presenta una mayor presión osmótica que junto con la toxicidad por iones como el Na^+ y Cl^- , dan como resultado menores rendimientos en los cultivos, lo que se puede expresar en la baja rentabilidad económica de cultivos implementados en zonas desérticas (Donoso, 2003).

En consecuencia, disminuye la disponibilidad del agua en el medio radical, y con ello el crecimiento y desarrollo vegetal en condiciones salinas. Algunas plantas producen lo que se denomina ajuste osmótico para garantizar el flujo de agua desde el suelo hacia la planta. Esto ocurre para que la planta disminuya su potencial hídrico, haciéndolo menor que el potencial hídrico del suelo, y lo hace disminuyendo su potencial osmótico siendo uno de los componentes del potencial hídrico por la acumulación activa de solutos. Este ajuste osmótico y/o osmorregulación comprende la absorción y acumulación de iones procedentes del medio salinos normalmente (Zhu, 2001).

La presencia de una alta concentración de sales solubles en el suelo, principalmente iones Na^+ y Cl^- , afectan a las plantas por sus efectos tóxicos, provocando estrés osmótico, déficit hídrico, toxicidad iónica, desbalance nutrimental por la interferencia de estos iones tóxicos con los nutrientes esenciales como Ca^{2+} y K^+ llevan a la disminución del crecimiento celular, reducción de la evapotranspiración y reducción de la eficiencia fotosintética (Munns, 2002; Ali *et al.*, 2004; Munns *et al.*, 2006; Turhan y Eris, 2007). El estrés osmótico causa un aumento en el potencial osmótico del suelo, dificultando la absorción de agua por las plantas, lo cual genera una escasez de agua (estrés hídrico) que reduce la expansión celular en los extremos de la raíz y en las

hojas jóvenes, se produce una alteración en las relaciones hídricas de las células, ya que éstas responden a la falta de agua en el citosol necesaria para las reacciones metabólicas aportándola desde la vacuola causando también un cierre de estomas, disminuye la tasa de fijación de CO₂ afectando la fotosíntesis. Además, el desequilibrio iónico afecta el metabolismo de la planta (Turan y Tripathy, 2015).

Se ha reportado que la salinidad afecta la fotosíntesis (Chaves, 2009; Ashraf y Harris, 2013; Gupta y Huang, 2014), debido a la reducción del área foliar, el contenido de clorofila y la conductancia estomática, además de una disminución de la eficiencia del fotosistema II (Chinnusamy *et al.*, 2005; Hajiboland *et al.*, 2010).

A nivel celular, el exceso de sal causa la deposición de materiales a nivel de pared celular, disminuyendo su elasticidad. Esto no permite el crecimiento celular, afectando el área foliar (Ali *et.*, 2004; De Lucena *et.*, 2012), factor que regula la capacidad fotosintética de la planta y así alterando su capacidad metabólica. Los cambios en estos parámetros van a depender de la severidad y duración del estrés y de la especie de planta (Amirjani, 2010).

Durante la exposición inicial al estrés salino, las plantas experimentan el estrés hídrico, que reduce la expansión de las hojas. Durante un mayor tiempo de exposición a la salinidad, las plantas experimentan un estrés iónico, que puede llevar a una senescencia prematura de las hojas adultas. Se producen deficiencias minerales como del zinc y fósforo, y toxicidades como de hierro, aluminio, y ácidos orgánicos (Amirjani, 2010).

1.2.5 Mecanismos de defensa de las plantas

Los mecanismos de defensa para la tolerancia a la sal incluyen la osmoregulación, exclusión de sales, estabilización de membrana, antioxidantes y liberación de hormonas (Boriboonkaset *et.*, 2012). La respuesta al estrés salino en plantas enteras permite analizar procesos como la exclusión de iones en raíz, excreción de iones en brotes o retoños, y deposición de iones en tejidos viejos (Wu *et.*, 2005).

Las plantas al desarrollarse en hábitos salinos accionan mecanismos fisiológicos para regular el potencial osmótico de las células, especialmente para evitar la pérdida de agua y la entrada de iones tóxicos. Por otro lado, el incremento de solutos como la glicina betaína o la prolina ha sido relacionada con estrés hídrico, salino y otros estreses abióticos de la planta (Ashraf y Harris, 2004; Munns y Tester, 2008; Lu *et al.*, 2009) indicando un papel esencial en la tolerancia a estos estreses. La prolina se acumula bajo estrés salino en los tejidos tanto de hoja como de raíz (Ashraf, 2002) atribuyéndole un posible papel protector frente al potencial osmótico generado por la sal (Chen *et al.*, 2007). En condiciones de salinidad, las plantas sintetizan osmolitos tales como azúcares (sacarosa, glucosa, trehalosa), polioles (pinitol, mioinositol, ononitol, sorbitol, manitol, arabinitol) (Hare *et al.*, 1998; Yin *et al.*, 2013) aminoácidos (prolina, glicina betaína, glutamato, aspartato, colina, ácido 4-gamma aminobutírico) (Hasegawa *et al.*, 2000; Torabi *et al.*, 2015), para mantener el ajuste osmótico y la turgencia celular, evitar la deshidratación celular, estabilizar y proteger la estructura terciaria de proteínas y de membranas (Yu *et al.*, 2012).

1.2.6 Efecto del sodio y cloro en las plantas

En plantas la toxicidad por Na^+ se encuentra asociada a desordenes en la membrana celular, o bien por competencia con K^+ en sitios de unión a los sistemas de transporte de alta y baja afinidad, contribuyendo a disminuir el cociente K^+/Na^+ de la célula, por otra parte una alta concentración de Na^+ desplaza los iones de Ca^{2+} de los sitios de enlace en la membrana celular de la raíz, causando una alteración en la permeabilidad de la misma, lo que puede causar que el K^+ salga de las células, favoreciendo la entrada de Na^+ , también, la acumulación de Na^+ en la célula produce despolarización de la membrana plasmática, impidiéndose la entrada pasiva de K^+ a través de canales rectificadores de entrada a la vez que se favorece su salida por canales rectificadores de salida. (Dodd *et al.*, 2010).

Sin embargo para que el Na^+ salga del citosol se requiere energía utilizando antiportes Na^+/H^+ ubicados en la membrana plasmática y en el tonoplasto los cuales utilizan el

gradiente de protones que se generan por las bombas ATPasa-H de las membranas plasmática y del tonoplasto (Wang *et al.*, 2001).

Reportes indican que una alta concentración de Na⁺ inhibe la absorción de nutrientes por la interferencia con los transportadores iónicos en la membrana plasmática de la raíz, como los canales selectivos de K⁺, además inhibe el crecimiento radicular por el efecto osmótico del Na⁺ (Tester y Davenport, 2003). Por otro lado, En la actualidad hay pocos reportes que expliquen la entrada de Cl⁻ a nivel celular y su compartimentación en la vacuola. Además, el establecimiento de un potencial de membrana negativo ocurre cuando la célula se encuentra en homeostasis iónica, y genera una barrera termodinámica estable que permite el paso de este ion (Carrasco, 2004).

Otro mecanismo que explica el movimiento del Cl⁻ desde el citosol a la vacuola podría ser por medio de antiportes H⁺/anión ubicados en el tonoplasto, donde el Cl⁻ actuaría como contra-ión del H⁺. Sin embargo la compartimentación del Cl⁻ resulta de vital importancia para contrarrestar un exceso de NaCl (Carrasco, 2004).

1.3 HIPÓTESIS

El silicio podría mitigar el estrés salino en cultivares de pepino y tomate, lo cual se puede determinar si de él se aplican 0, 4, 8 g Si L⁻¹ en la solución nutritiva estándar en forma manual dirigida a la raíz de la planta, mejora la actividad la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II, conductancia estomática, altura de la planta, número de hojas y rendimiento de fruto.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Determinar el efecto de la fertilización con silicio usando diferentes dosis, en plantas de pepino y tomate cultivadas en hidroponía bajo estrés salino, a través de la evaluación de la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II, conductancia estomática, altura de la planta, número de hojas y rendimiento de fruto, mediante la aplicación de silicio

en forma manual dirigida a la raíz de la planta.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar la mejor dosis de silicio en plantas de pepino y tomate cultivadas en hidroponía bajo estrés salino, a través de la evaluación de la eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II, mediante la aplicación de silicio en forma manual dirigida a la raíz de la planta.
2. Determinar la mejor dosis de silicio en plantas de pepino y tomate cultivadas en hidroponía bajo estrés salino, a través de la evaluación de la conductancia estomática, mediante la aplicación de silicio en forma manual dirigida a la raíz de la planta.
3. Determinar la mejor dosis de silicio en plantas de pepino y tomate cultivadas en hidroponía bajo estrés salino, a través de la evaluación de altura de la planta, número de hojas y rendimiento de fruto, mediante la aplicación de silicio en forma manual dirigida a la raíz de la planta.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA Y BIBLIOGRAFÍA CITADA

2.1 Introducción

El Silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (28 %) después del oxígeno (47 %), sin embargo gran parte es inerte e insoluble como el cuarzo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en arena, los compuestos de Si constituyen del 50-70 % en la estructura del suelo (Gong *et al.*, 2006; Epstein, 2009). En la solución del suelo se encuentra en forma de ácido silícico a una concentración de 35 a 40 mg L^{-1} o 0.1 a 0.6 mM cantidades equivalentes a macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) a pesar de esto, no es considerado un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Epstein 1999; Ma y Yamaji 2008; Meena *et al.* 2014). Los fisiólogos vegetales lo clasifican como benéfico o útil ya que podría tener un papel importante en la actividad metabólica, fisiológica, estructural en las plantas expuestas a diferentes estreses abióticos y bióticos (Epstein, 1999). El Si tiene un efecto benéfico en las plantas, este elemento controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, incrementa la resistencia de la planta al estrés abiótico (temperatura, viento, alta concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, aluminio, etc.) y biótico (insectos, hongos, enfermedades) Epstein, 1999; Ma, 2004; Liang, *et al.*, 2007; Mateos-Naranjo, *et al.*, 2013; Mahbod *et al.*, 2015) en las gramíneas se deposita en la pared celular de la epidermis, pelos, brácteas, etc. También se deposita en el interior, como sucede en el xilema (Epstein, 1999; Kazunori y Ma, 2003). En 1840 fueron reportados los primeros experimentos de laboratorio, campo, invernadero demostrando efectos benéficos del Si en cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Takahashi, 1995).

El Si se encuentra en concentraciones entre el 0,1 y el 10% del peso seco de las plantas, en comparación, el Ca^{2+} está presente en concentraciones que van de 0,1 a

0,6% y el azufre de 0,1 a 1,5%. (Ma y Yamaji, 2008). El arroz acumula hasta 10% de silicio y en general las monocotiledóneas acumulan más Si que las dicotiledóneas, aunque estas diferencias pueden darse incluso a nivel de variedades, niveles del 4 a 7 % de la materia seca en arroz es Si, mientras que en otras gramíneas es de 1 a 2 % (Epstein, 1999; Ma *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2007; Ma y Yamaji, 2008; Epstein, 2009; Guntzer *et al.*, 2012). Las variaciones en la concentración del Si, también tienen efectos sobre diferentes procesos del suelo, el desarrollo de microorganismos y el crecimiento de plantas. Se ha observado que los silicatos disminuyen la toxicidad por hierro y manganeso en el cultivo de arroz (Meena *et al.*, 2014). El Si es depositado como sílice hidratada amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) interactuando con pectinas y calcio mejorando su rigidez y resistencia (Epstein, 1999; Ma, 2004; Ma y Yamaji, 2008).

El Si actúa como una barrera física y mecánica en las plantas, no solo se deposita en las paredes celulares, sino que también participa en las actividades metabólicas y fisiológicas cuando las plantas están en condiciones de estrés (Ma, 2004; Liang *et al.*, 2007). Si bien, el Si no se considera un elemento esencial para el crecimiento y metabolismo de las plantas, es benéfico en condiciones estresantes (Liang, *et al.*, 2007; Ma y Yamaji, 2008; Epstein, 2009; Kaur *et al.*, 2016). El dióxido de silicio (SiO_2) que se acumula bajo la cutícula de las hojas, tallos y raíces en forma de cristales de Si, es posible que provenga del proceso de la transpiración de las plantas, esa agua producto del proceso mencionado puede provenir del ácido silícico (H_4SiO_4), según la reacción $\text{Si}(\text{OH})_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2n \text{H}_2\text{O}$ (Ma y Yamaji, 2008).

Algunos autores han reportado tolerancia a la salinidad mediante la fertilización de Si en diferentes cultivos como arroz, trigo (*Triticum durum*), tomate, pepino, cebada (*Hordeum vulgare* L.) (Yeo *et al.*, 1999; Romero-Aranda *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2006).

La mayor parte de Si se deposita en las células epidérmicas de las raíces, hojas y tallos aminorando la absorción de Na^+ por las raíces, el Si disminuye la permeabilidad de las membranas celulares al Na^+ , resultando en un bajo nivel de Na^+ y alto nivel de K^+ en el

citosol (Gong *et al.*, 2006). La función del Si reduce la absorción de Na^+ disminuyendo la transpiración en arroz (Yeo *et al.*, 1999, Gong *et al.*, 2006), mejora el estado hídrico del tomate (Romero-Aranda *et al.*, 2006), incrementa la actividad enzimática antioxidante en pepino (Zhu *et al.*, 2004) y aumenta la actividad de la H^+ ATPasa de la membrana plasmática en la cebada (Liang *et al.* 2006). En algunos trabajos previos, autores han reportado bajo condiciones de estrés salino disminución en la absorción y transferencia de Na^+ y un aumento en la absorción de K^+ en plantas de alfalfa (*Medicago sativa L.*) (Wang y Han, 2007), haba (*Vicia faba L.*) (Shahzad *et al.*, 2013), trigo (*Triticum aestivum L.*) (Tuna *et al.*, 2008), y sorgo (*Sorghum bicolor L.*) (Yin *et al.*, 2013) tratadas con Si en comparación con plantas no tratadas. El Si puede ayudar a incrementar la resistencia en las plantas al estrés salino al reducir la absorción de iones de Na^+ a través de los intercambiadores de $\text{Na}^+ -\text{H}^+$ HvSOS1 y HvNHX1 en la membrana plasmática y tonoplasto, respectivamente) incrementando la absorción de iones de K^+ mediante simportadores como HvHAK1 (Rizwan *et al.*, 2015; Zhu y Gong, 2014). Existen varias hipótesis para este efecto: (a) mejora de la actividad fotosintética, (b) mejora de la selectividad K^+/Na^+ , (c), el aumento de la actividad enzimática y (d) incremento en la concentración de sustancias solubles en el xilema, resultando en una absorción limitada de Na^+ por las plantas (Matichenkov y Bocharnikova, 2001). La acumulación de Si en las plantas varía de forma considerable en las distintas especies. La distribución y acumulación de Si en plantas, clasificando como acumuladoras las pertenecientes a las familias Gramineae y Cyperaceae, con acumulación intermedia se ubican las Cucurbitales, Urticales y Commelinaceae, y las demás especies se clasifican como plantas con baja acumulación de Si, también obtuvieron contenidos en arroz, cucurbitáceas y tomate del 7,3% 2,3% y 0,2 % de Si en peso seco respectivamente (Mitani *et al.*, 2005). Estas concentraciones de Si absorbidos no pueden ser completamente explicados por la absorción pasiva (tal como la difusión o flujo de masa) porque en la capa del suelo de 20 cm, en promedio se encuentran a penas de 0,1 a 1,6 kg/ha de H_4SiO_4 . Takahashi *et al.* (1990) encontraron diferentes concentraciones en la acumulación de Si, debido a la capacidad de la raíz para absorber este elemento del

suelo. La composición de Si en el suelo generalmente está presente como SiO_2 y algunos aluminosilicatos. El cuarzo, junto con las formas cristalinas de silicatos (plagioclasa, ortoclasa y feldespatos), minerales secundarios o ricos en arcilla y silicio (caolín, vermiculita y esmectita) y sílice amorfa son los principales constituyentes de la mayoría de los suelos. Estas formas de Si son escasamente solubles y, por lo general, son biogeoquímicamente inertes (Epstein, 2009).

2.2 Absorción y transporte de silicio en plantas

La planta absorbe el Si del suelo en forma de ácido silícico, también llamado ortosilícico (H_4SiO_4). La absorción de Si en las plantas puede ser pasiva o activa, la absorción pasiva se lleva a cabo de manera similar al agua, en donde es transportado mediante el flujo de transpiración, en plantas como el arroz la asimilación de Si no es afectada por la transpiración, la absorción se lleva a cabo por dos transportadores; el primero se localiza en la membrana plasmática de las células corticales de la raíz (SIT1: transportador de Si), el cual transporta este elemento desde la solución externa hasta las células corticales de la raíz, el segundo transportador se localiza en la membrana plasmática de las células parenquimatosas del xilema (SIT2: transportador de Si), responsable de liberar el Si dentro del xilema (Ma *et al.*, 2004).

2.2.1 Los mecanismos de acción del Si en la tolerancia al estrés biótico y abiótico son:

- Cambios fisicoquímicos en la estructura y composición de la pared celular de las células que componen los tejidos de las plantas.
- Cambios anatómicos en los tejidos de las plantas como consecuencia de la modificación en la pared celular.
- Cambios bioquímicos estimulando los sistemas antioxidantes de las plantas y la producción de compuestos tóxicos para los organismos patógenos así como la señalización a través de las fitohormonas.

Una de las formas como la presencia de Si disminuye la toxicidad del hierro y

manganeso en las plantas es debido a que el Si permite que desde las hojas y tallos se incrementa la cantidad de oxígeno que impulsan las plantas hacia la raíz llegando al parénquima, oxidando la rizósfera, logrando que el Fe y Mn reducido se oxide, disminuyendo la absorción de estos por parte de las plantas (Wang *et al.*, 2015). Según Currie y Perry (2007) el arroz necesita disponer de Si que se encuentra mayormente en la epidermis del tallo, las hojas y las glumas, este elemento previamente ha sido absorbido del suelo, si faltara el Si asimilable se reduce la absorción y movilización de nitrógeno, fósforo y potasio.

De acuerdo a las explicaciones de Exley (2015), grandes cantidades de Si son absorbidas por los cultivos, dentro de estos los que extraen Si con mayor intensidad son las gramíneas, que tienen además una alta eficiencia fotosintética, por ejemplo, según Epstein (1999), en arroz la absorción de Si es el doble de la de nitrógeno. La caña de azúcar, puede producir más de 180 t ha⁻¹ de caña en suelos con pH mayor a 7.5 y un contenido de Si en el suelo mayor al 22 %. Mientras que en condiciones de suelo ácido con pH de menor a 6 y un contenido de Si de 16 %, la producción es de 60 a 80 t ha⁻¹. Como ejemplo de extracciones tenemos: caña de azúcar (300-700 kg ha⁻¹ de Si), arroz (150-300 kg ha⁻¹ de Si) y trigo (50-150 kg de Si ha⁻¹), también Gong *et al.* (2006) reportaron que una buena producción de arroz extrae del suelo entre 467 y 560 kg ha⁻¹ de Si, ocurriendo una alta producción y acumulación de SiO₂ en la epidermis de las hojas. Para lograr cantidad importante de Si asimilable por las plantas, debe aplicarse al suelo productos que al reaccionar con el agua forme ácido monosilícico (ácido silícico) que es débilmente adherido en el suelo. Éste a pesar de tener poca migración en el suelo, tiene el inconveniente que puede perderse por lixiviación. El anión silicato al tener afinidad con el anión fosfato, al aumentar la concentración de ácido monosilícico en la solución del suelo produce transformaciones que hacen que fosfatos no aprovechables por las plantas, se conviertan en fosfatos aprovechables (Matichenkov y Ammosova, 1996).

2.2.2 Efecto del silicio en las plantas contra los insectos y las enfermedades

Se ha reportado que el Si aumenta la resistencia contra muchas enfermedades de las plantas como cenicilla, mildiu, *Botrytis*, pudrición de raíz y ataques de insectos como *Spodoptera depravata* (Snyder *et al.*, 2007). El efecto del Si sobre la resistencia de las plantas a las plagas se atribuye tanto a la acumulación de Si en el tejido epidérmico y a la expresión de patogénesis inducida como respuesta de defensa del huésped (Currie y Perry, 2007). Wang y Galleta (1998) encontraron que la aplicación foliar de Si en fresa incrementa el contenido de clorofila en las hojas, los ácidos orgánicos en frutos y los niveles de glico y fosfolípidos, lo que contribuye a mantener la fluidez de la membrana, induciendo la expansión celular, ayudando así a mejorar el crecimiento general de las plantas. Pei *et al.* (2010) reportaron un incremento de prolina y glicina betaína en plantas de trigo en condiciones estresantes. El Si absorbido es depositado en la pared celular, debajo de la cutícula aumentando la rigidez de las células y pudiendo elevar el contenido de hemicelulosa y lignina de la pared celular, además de eso, algunos autores indican que el Si tiene protección sistémica contra hongos (Snyder *et al.*, 2007).

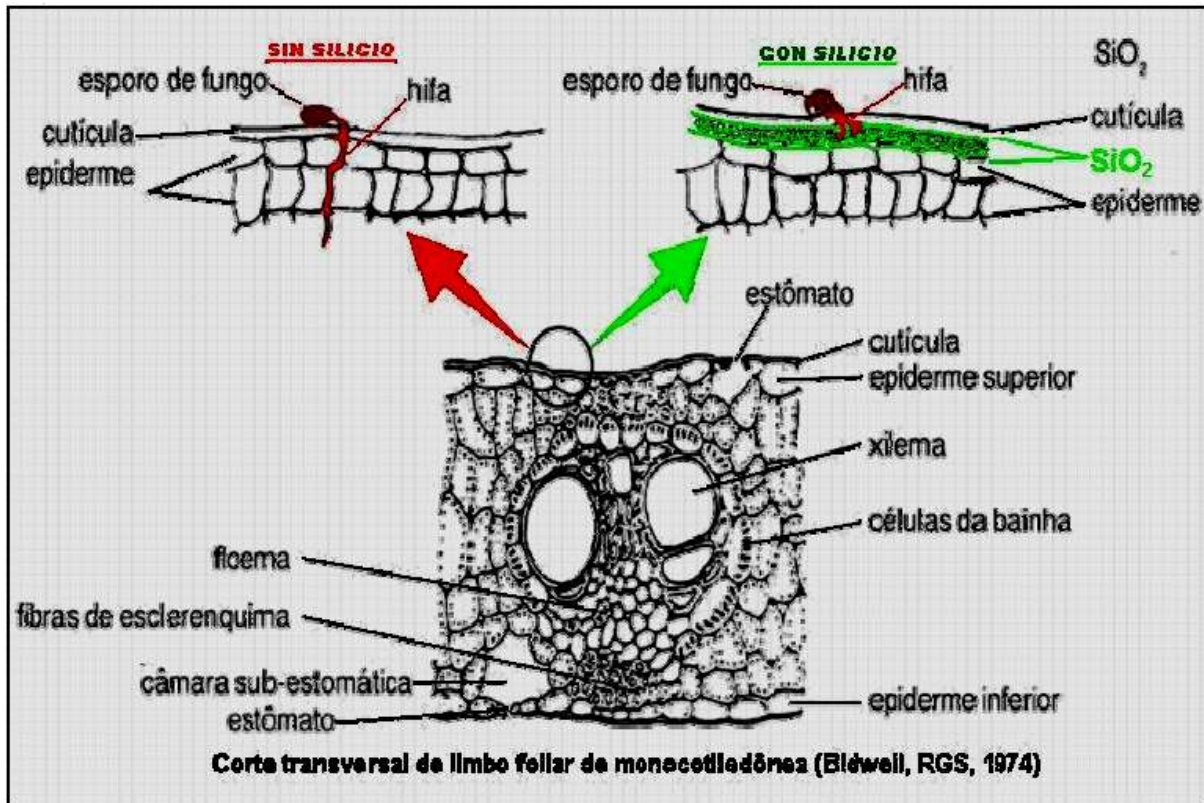


Figura 1. Hifa del hongo según la presencia o no de silicio debajo de la cutícula de una hoja de monocotiledónea. Fuente Vladimir V. Matichenkov (2010)

Por otro lado Liang *et al.* (2015) reportaron que la incidencia de las enfermedades es menor cuando el contenido de Si en el tejido vegetal es mayor. En el caso específico del arroz, se ha comprobado que el Si presenta una excelente resistencia contra enfermedades como *Rhizoctonia*, *Pyricularia*, *Helminthosporium*, *Sarocladium*, etc.

2.3 Situación actual de la producción del cultivo de pepino y tomate en Baja California, México y el Mundo

2.3.1 Introducción

En el mundo las hortalizas ocupan uno de los lugares más importantes en la dieta alimenticia del hombre. México se encuentra en los principales productores y exportadores. El 50 % de la de la superficie cultivada se encuentra en los estados de Sinaloa (22 %), Jalisco (15 %) y Baja California (12 %). Los principales cultivos que se producen son tomate rojo (70 %), pimiento (16 %) y pepino (10 %) (FAO, 2018).

2.3.2 El cultivo de tomate

2.3.3 Panorama mundial

Según la FAO 2018, la producción mundial de tomate para el año agrícola 2016, se estableció en 174 países, obteniéndose una producción de 177 042 359 toneladas (t), durante este año agrícola la superficie cosechada en el mundo fue de 4 782 753 hectáreas (ha^{-1}), China fue el país con mayor producción con 56 308 914 t con una contribución de 31.8 %, seguido por India con 18 399 000 t con una contribución del 10.4 %, E.U.A. con 13 038 410 t con una contribución de 7.36 %, Turquía 12 600 000 t con una contribución de 4.28 % contribuyendo en su conjunto con el 52 % de la producción total mundial. México participó con una producción de 4 047 171 t de las cuales 3 349 254 t corresponden a tomate rojo, obtenidas de una superficie de 51 299 ha^{-1} (cuadro 2, figura 2, 3).

Cuadro 2. Principales países productores de tomate, año agrícola 2016

Países	Área cosechada	Producción	Rendimiento
	ha^{-1}	T	t ha^{-1}
China	999 312	56 308 914	56.05
India	760 000	18 399 000	24.02

EUA	144 410	13 038 410	90.09
Turquía	188 270	12 600 000	69
Egipto	199 712	7 943 285	39
Italia	103 940	6 435 72	69
Irán	159 123	6 372 633	40
España	54 203	4 671 807	86
Brasil	63 980	4 167 629	65
México	93 376	4 047 171	43
Rusia	118 451	2 986 209	25
Uzbekistán	61 097	2 648 017	43
Nigeria	574 441	2 243 228	30
Ucrania	74 300	2 229 690	30
Portugal	20 854	1 693 860	28
Túnez	22 190	1 303 000	58
Argelia	22 556	1 280 570	56
Marruecos	15 239	1 231 248	80
Camerún	92 626	1 182 114	12
Grecia	18 042	1 044 346	57
Resto (154)	996 631	47 565 756	25
Total	4 782 753	177 042 359	10

Fuente: (FAO, 2018)

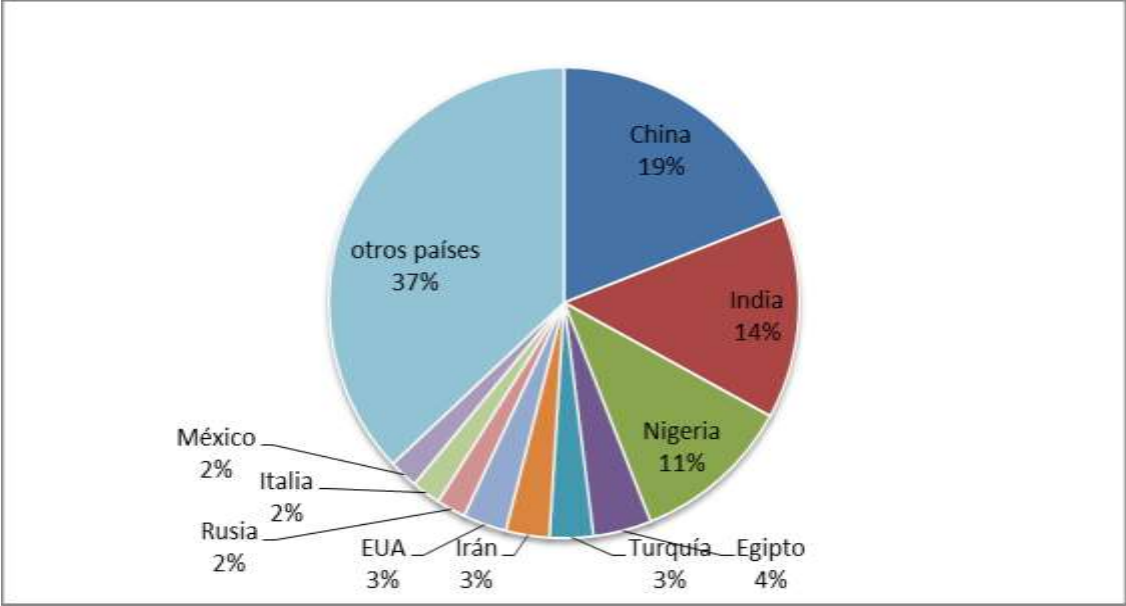


Figura 2. Superficie cosechada de tomate de los principales productores en el mundo, año agrícola 2016 (Fuente FAO, 2018).

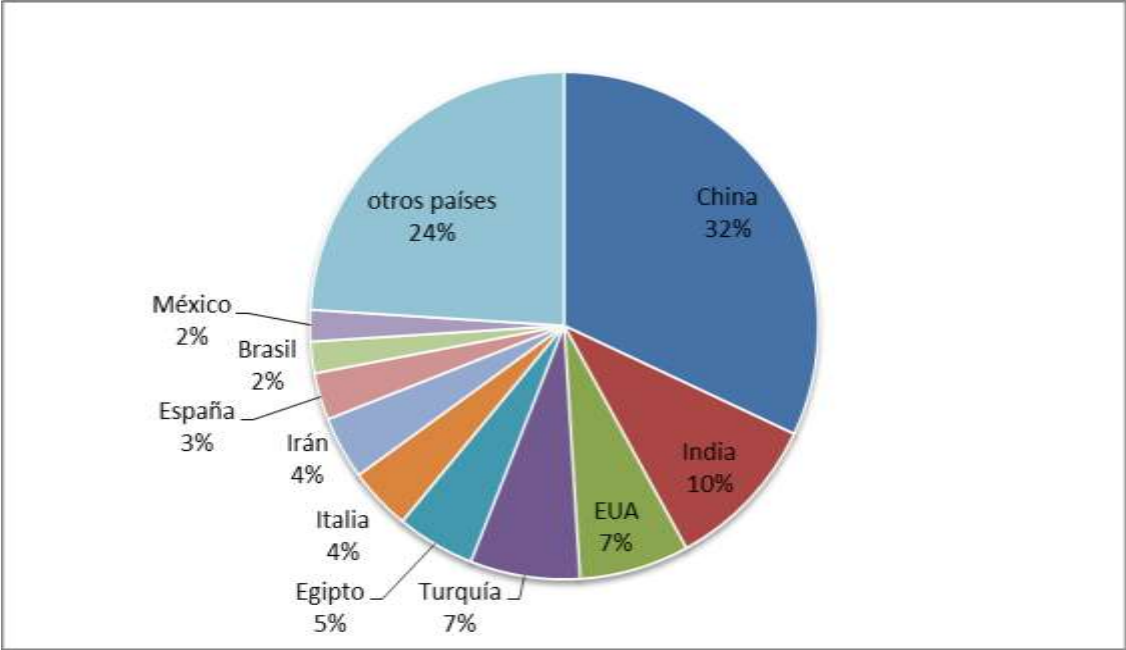


Figura 3. Producción de tomate entre los principales países productores en el mundo, año agrícola 2016 (Fuente FAO, 2018).

Según la FAO el rendimiento por hectárea cosechada Holanda reportó un rendimiento por ha de 507 t colocándose como el país con mayor producción en el mundo, seguido de Bélgica con 506 t, Reino Unido con 416 t, Finlandia 365 t, Suecia 365 t. México ocupa el lugar 55 con un rendimiento medio de 43 t.

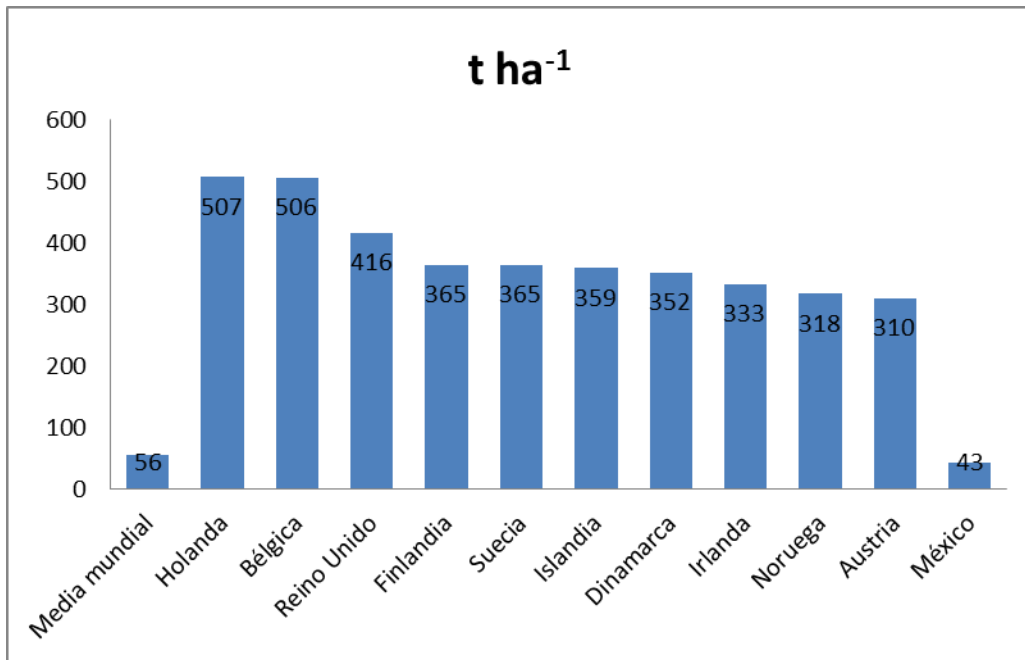


Figura 4. Países con mayor rendimiento de tomate por hectárea cosechada, año agrícola 2016.

2.3.4 Panorama nacional

La producción nacional para el año agrícola 2016 participaron los 32 estados de la República Mexicana obteniendo una producción de 3 349 254 t, con una superficie cosechada de 51 299 ha⁻¹ (SAGARPA, 2018).

Los principales estados productores son Sinaloa con 924 152 t contribuyendo con el 27.60 % San Luis Potosí con 306 621 t, Michoacán con 235 784 t, Baja California con 226 062 t, obteniendo el 50 % de la producción nacional (cuadro 3, figura 5, 6).

Cuadro 3. Principales estados productores de tomate, año agrícola 2016

Estado	Superficie cosechada	Producción	Rendimiento
	ha⁻¹	t	t ha⁻¹
Sinaloa	13 831.62	924 152.51	66.81
San Luis Potosí	2 676. 24	306 621.25	114.57
Michoacán	6 916.63	235 784.89	34.09
Baja California	2 817	226 062.10	80.25
Zacatecas	3 088.97	191 654.25	62.04
Jalisco	2 290.60	158 231.97	69.08
Baja california Sur	2 606.32	135 222.94	51.88
Sonora	1 905	128 037.54	67.2
Morelos	2 263	122 959. 07	54.33
Puebla	774	119 825.42	154.76
Coahuila	753.4	103 791.49	137.36
Resto (21)	11 357.35	696 810.79	61.35
Total	51 299. 14	3 349 254.22	65.28

Fuente: (SAGARPA, 2018)

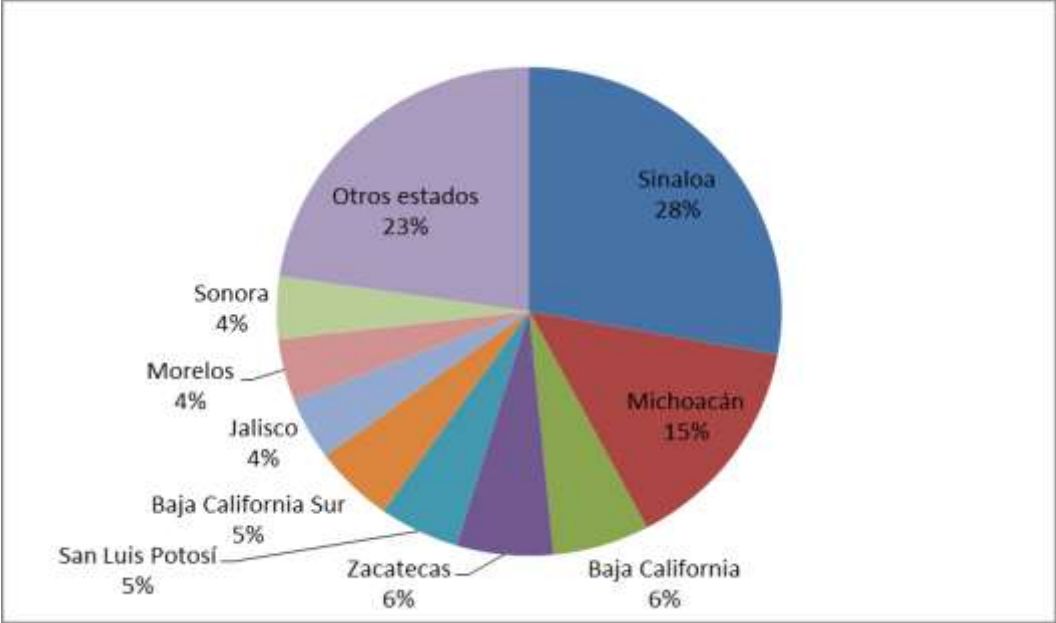


Figura 5. Superficie cosechada de los principales estados productores de tomate rojo a nivel nacional, año agrícola 2016 (Fuente: SAGARPA, 2018).

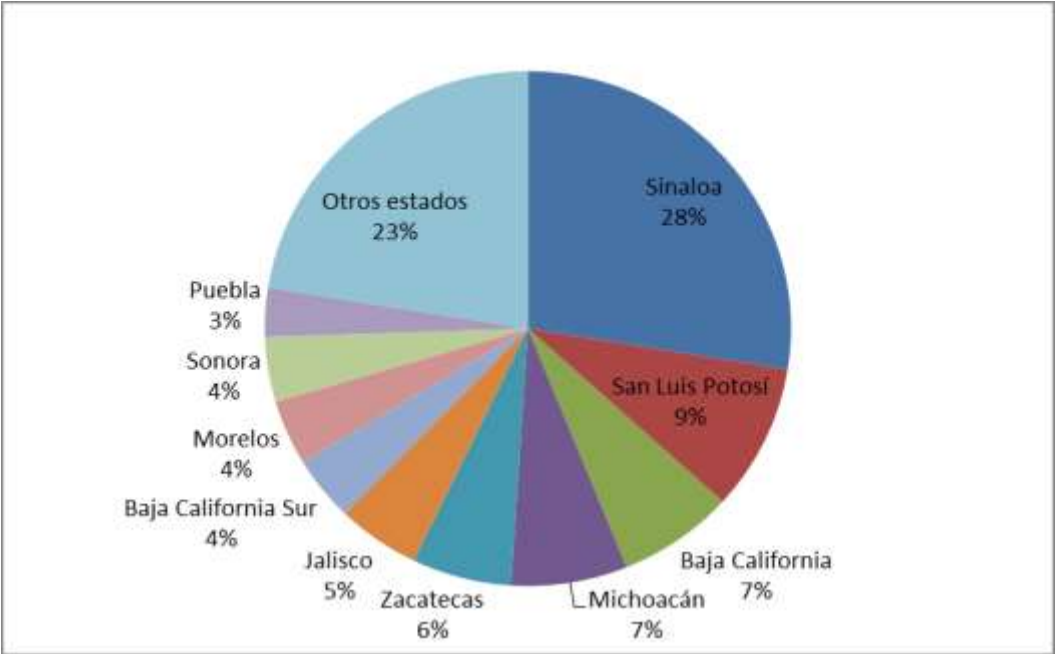


Figura 6. Producción de tomate rojo de los principales estados a nivel nacional, año agrícola 2016 (Fuente: SAGARPA, 2018).

Los estados con mayor rendimiento de tomate rojo son Querétaro con 239.76 t, seguido de Puebla con 154.76 t, Coahuila 137.66 t, Durango 127.66 t, Nuevo León 117.92 t, Baja California se encuentra en el cuarto lugar con un rendimiento de 80.25 t ha⁻¹ (Figura 6). La media nacional en cuanto a rendimiento fue de 72 t ha⁻¹ (Figura 7). Por el contrario, en cuanto al valor de la producción, Baja California está situado en segundo lugar nacional aportando 12% del valor total de la producción por debajo de Sinaloa que produce 20% y antes de San Luis Potosí que tiene una aportación de 9 %. El rendimiento de Baja California es de los más altos del país gracias a la tecnología utilizada en agricultura protegida.

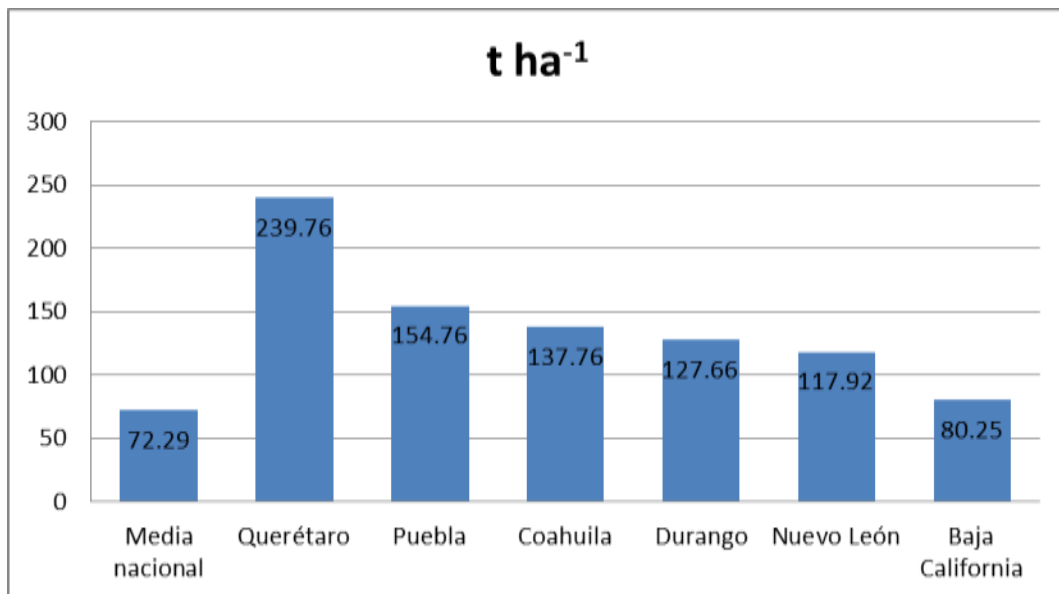


Figura 7. Principales estados con mayor rendimiento de tomate rojo a nivel nacional, año agrícola 2016 (Fuente: SAGARPA, 2018).

2.3.5 Panorama estatal

Prácticamente la producción de tomate rojo se da en el municipio de Ensenada, ya que de las 226 mil 063 toneladas que se producen en Baja California, 99.8% se obtuvieron de este municipio, el resto está repartido en los municipios de Mexicali, Playas de

Rosarito y Tijuana. De 2007 a 2016, la producción tuvo un incremento de 15.1% al pasar de 196 mil 388 toneladas en 2007 a 226 mil 063 toneladas en 2016. En los últimos 10 años, el volumen de producción más alto se dio en 2016, mientras que el más bajo se dio en 2014. En 2016, la producción por habitante del Estado fue de 64 kilogramos (SEDAGRO, 2016).

2.4 Origen de la planta de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum*) o su denominación anterior (*Lycopersicum esculentum*) aún es ampliamente utilizada, conocido comúnmente como tomate, tomatara o jitomate es una especie de planta herbácea del género *Solanum* de la familia Solanaceae.

La planta es cultivada en el mundo entero para su consumo tanto fresco como procesado de diferentes modos (salsa, puré, zumo, deshidratado, enlatado). Es una planta herbácea anual cuyo hábito de crecimiento puede ser determinado o indeterminado.

Estimaciones de la FAO indican que el tomate es la hortaliza más cultivada e importante en el mundo, siendo el consumo fresco e industria los dos principales destinos de producción, alcanzando en el año 2013; 4,7 millones de hectáreas (ha) y una producción de 164 millones de toneladas (t) (FAOSTAT, 2018).

El tomate es originario de América del sur, entre las regiones de Chile, Ecuador y Colombia, pero su domesticación se inició en el sur de México y norte de Guatemala (Blanca *et al.*, 2012). Las formas silvestres de “tomate cereza”, *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*, originarias de Perú, migraron a través del Ecuador, Colombia, Panamá y América Central hasta llegar a México hace unos 2 500 años, donde fue domesticado por el hombre; en la lengua náhuatl de México era llamado *tomatl*, que se refiere a “plantas portadoras de flores” que sin lugar a dudas dio origen a su nombre actual. El tomate alcanzó un estado avanzado de domesticación en México antes de ser llevado a Europa y Asia (Sims, 1980). La introducción del tomate al

continente europeo ocurrió probablemente por España, entre 1523, año de la conquista de México y 1524, cuando aparecieron las primeras descripciones publicadas por el italiano Pier Andrea Mattioli. En el siglo XVI e inicios del siglo XVII, el tomate fue cultivado en los jardines de Europa (Italia, Inglaterra, España y Francia) como ornamental, por la belleza y color de sus frutos.

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es la hortaliza de mayor importancia a nivel nacional e internacional, debido a su amplio consumo, al área cosechada y al valor económico de la producción. Durante los últimos años, esta hortaliza ha incrementado su producción anual principalmente por el aumento en el rendimiento y en menor proporción por el incremento de la superficie cultivada.

Actualmente existe una controversia sobre el nombre científico que le corresponde al tomate. Desde el año 1881, Philip Millar lo ubicó en el género *Lycopersicon* y lo denominó *Lycopersicon esculentum*, que ha sido el nombre más ampliamente usado desde entonces. Sin embargo, en 1753 Carlos Linneo, científico, naturalista y botánico – quien sentó las bases de la taxonomía moderna–, ya había colocado el tomate en el género *Solanum* asignándole el nombre científico de *Solanum lycopersicum* L. Hoy en día, la evidencia genética (e.g., Peralta & Spooner, 2001) muestra que Linneo estaba en lo correcto al ubicar el tomate en el género *Solanum*. Esto ha aumentado la controversia y se espera que por algún tiempo, mientras se determina el genoma del tomate, ambos nombres se sigan encontrando en la literatura.

2.4.1 Clasificación taxonómica de tomate

Reino: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Orden: Solanales
Familia: Solanaceae

Género *Solanum*

Especie: *Lycopersicum*

2.4.2 Importancia económica del cultivo de tomate

El tomate es de uno de los cultivos hortícolas más importantes del mundo (FAOSTAT, 2012), consumido no solo como hortaliza fresca sino también como producto procesado como pasta, tomates pelados enteros, jugos, salsas y sopas (Foolad, 2007). El consumo de tomate se debe a su alto valor nutricional y su importancia para una dieta equilibrada. Es una fuente importante de nutrientes como licopeno, β -caroteno y vitamina C, los cuales tienen un impacto positivo en la salud humana y su producción al igual que su consumo se va incrementando a medida que la población en el mundo aumenta (Bergougnoux, 2014).

2.4.3 Morfología, de acuerdo a Cuellar *et al.* (2002)

El tomate es una planta perenne de porte arbustivo que se cultiva como anual, puede desarrollarse de forma rastrera, semi-erecta o erecta y su crecimiento es determinado o indeterminado. Cuando las plantas alcanzan en el semillero una altura de 10 a 12 cm. y su tallo tiene más de 0.5 cm. de diámetro se considera que ya están listas para el trasplante, esto ocurre aproximadamente entre los 22 -27 días después de la siembra. Al momento del trasplante, el suelo deberá tener la humedad necesaria para que la planta no se deshidrate y pueda recuperarse más fácilmente.

2.4.4 Hábitos de crecimiento de tomate

2.4.4.1 Crecimiento determinado

Son plantas arbustivas, con un tamaño de planta definido, donde en cada extremo del crecimiento aparece una yema floral, tienen períodos restringidos de floración y cuajado. El tamaño de la planta varía según el cultivar, ya que podemos encontrar plantas compactas, medianas y largas, en donde para las dos últimas clasificaciones

necesitamos poner tutores. La mayoría de cultivares de tomate de pasta o cocina sembrados en el país entran en esta clasificación.

2.4.4.2 Crecimiento indeterminado

Son plantas donde su crecimiento vegetativo es continuo, pudiendo llegar su tallo principal hasta unos 12 m de largo o más, si es manejado a un solo eje de crecimiento, las inflorescencias aparecen lateralmente en el tallo. Florecen y cuajan uniformemente. Se eliminan los brotes laterales y el tallo generalmente se enreda entorno a un hilo de soporte. Podemos encontrar cultivares de cocina y ensalada. Este tipo de crecimiento es el preferido para cultivarse en invernaderos.

2.4.5 Requerimientos climáticos y edáficos

2.4.5.1 Luminosidad o Radiación

La luz solar es esencial para el crecimiento de la planta. El crecimiento es producido por el proceso de la fotosíntesis. El tomate es un cultivo que no lo afecta el fotoperiodo o largo del día, sus necesidades de luz oscilan entre las 8 y 16 horas luz al día.

2.4.5.2 Temperatura

Los rangos para un desarrollo óptimo del cultivo oscilan entre los 28 - 30 ° C durante el día y 15 - 18 ° C durante la noche. Temperaturas de más de 35 ° C y menos de 10 ° C durante la floración provocan caída de flor y limitan el cuajado del fruto aunque existen materiales genéticos que cuajan a altas temperaturas.

2.4.5.3 Humedad Relativa

La humedad relativa óptima para el cultivo de tomate oscila entre 65 - 70 %; dentro de este rango se favorece el desarrollo normal de la polinización, garantizando así una buena producción.

2.4.5.4 Suelo

El suelo provee cuatro necesidades básicas de las plantas: agua, nutrientes, oxígeno y soporte. Los suelos aptos para cultivar tomate son los de media a mucha fertilidad, profundos y bien drenados, pudiendo ser franco-arenosos, arcillo-arenosos y orgánicos.

El pH del suelo tiene que estar dentro de un rango de 5.9 - 6.5, para tener el mejor aprovechamiento de los fertilizantes que se apliquen.

2.5 Aspectos botánicos del cultivo de tomate, de acuerdo a Cuellar *et al.* (2002)

2.5.1 Tallo

Consta de un eje con un grosor que oscila entre 2-4 cm de su base, sobre el cual se van desarrollando hojas, tallos secundarios e inflorescencia. Su estructura consta de epidermis de la que parten hacia el exterior de los pelos glandulares, cuyas células más externas son fotosintéticas y las más internas son colenquimáticas, cilindro vascular y tejido medular. En la parte distal se encuentra el meristemo apical, donde se inician los nuevos primordios foliares y florales.

2.5.2 Flor

Está formada por un pedúnculo corto, el cáliz es gamosépalo, es decir con los sépalos pegados entre si y la corona gamopétala. El androceo tiene 5 o más estambres adheridos a la corola, con las antenas que forman un tubo. El gineceo presenta de 2 a 30 carpelos que al desarrollarse darán lugar a los lóculos por celdas del fruto.

2.5.3 Hoja

Es compuesta con foliolos peciolados, lobulados y con borde dentado de 7 a 9 recubiertos de pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternativa sobre el tallo. El mesófilo o tejido parenquimático está recubierto por una epidermis superior o inferior, ambas sin cloroplastos. La epidermis inferior presenta un gran número de estomas, dentro del parénquima, la zona superior o zona en empalizada, es rica en cloroplastos. Los haces vasculares son prominentes, sobre todo en el envés con un nervio principal.

2.5.4 Raíz

El sistema radicular está formado por la raíz principal, raíces secundarias y raíces adventicias. Generalmente se extiende superficialmente sobre un diámetro de 1.5 m y

una profundidad de 0.5 m; sin embargo, el 70 % de las raíces se localiza a menos de 0.20 m de la superficie.

2.5.5 Fruto

Es una baya biplurilocular o plurilocular que puede alcanzar un peso de 100 a 600 g. Está compuesto pericarpio, el tejido placentario y las semillas. El fruto puede recolectarse separándolo por la zona de abscisión del pedicelo, como ocurre en las variedades industriales, en las que es indeseable de presencia de parte del pecíolo, o bien puede separarse por la zona peduncular de unión al fruto.

2.5.6 Semilla

La semilla es pequeña, con dimensiones de 5 x 4 x 2 mm, éstas pueden ser de forma globular, ovalada, achatada, semi-redonda, alongada, plana, arriñonada. La semilla está compuesta por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal, la cual está cubierta de pelos. Las semillas dentro del lóculo en sus últimas etapas de desarrollo aparecen inmersas en una sustancia gelatinosa.

2.6 Cultivo de pepino

2.6.1 Origen del pepino

El pepino (*Cucumis sativus L*) es originario de las regiones tropicales del sur de Asia, siendo cultivado en la India desde hace más de 3 000 años (Agro negocios, 2004). De la India se extiende a Grecia y de ahí a Roma y posteriormente se introdujo en China. El cultivo de pepino fue introducido por los romanos en otras partes de Europa; aparecen registros de este cultivo en Francia en el siglo IX, en Inglaterra en el siglo XIV y en Norteamérica a mediados del siglo XVI, ya que Cristóbal Colón llevó semillas a América (Bolaños, 2001). Los tipos más comunes de pepino son: americano, europeo, del este medio, holandés y oriental (López *et al.*, 2011).

2.6.2 Clasificación taxonómica de pepino, de acuerdo a Conabio 2003;

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Violales

Familia: Cucurbitáceas

Género: *Cucumis*

Especie: *sativus*

2.6.3 Panorama nacional

Según SAGARPA (2018) en el 2016 en México se sembraron alrededor de 17 961 ha⁻¹, participando 29 estados cultivaron pepino, de los cuales, Baja California se encuentra en el séptimo lugar en superficie sembrada con una participación de 4%, siendo el estado de Sinaloa el primer lugar en esta variable con 28%, Michoacán el segundo con 21%, seguido de Morelos y Sonora y Guanajuato que reportaron 8%, 7% y 5%, respectivamente. En cuanto al valor de la producción, Baja California alcanzó el tercer lugar del país aportando 9% del total nacional, mientras que Sinaloa ocupa el primero con una participación de 43% y Sonora el segundo con 15 %. (Cuadro 4).

Cuadro 4. Principales estados productores de pepino, año agrícola 2016

Estado	Superficie Sembrada ha	Superficie cosechada ha	Producción t	Rendimiento t ha⁻¹
Aguascalientes	143	143	6 346	44.4

Baja California	750	750	43 397	57.8
Baja california Sur	125	125	5 550	44.5
Campeche	36	36	232	6.4
Chiapas	36	36	544	15.1
Chihuahua	91	91	3 439	37.7
Coahuila	51	51	4 522	89.2
Colima	432	432	12 015	27.8
Durango	21	21	1 608	76.6
Guanajuato	971	971	33 595	34.6
Guerrero	97	97	1 408	14.5
Hidalgo	130	130	2 686	20.7
Jalisco	809	790	17 487	22.1
Michoacán	3 820	3 820	80 374	21
Morelos	1 383	1 383	28 659	20.7
Est. de México	327	327	7 106	21.7
Nayarit	307	275	5 281	19.2
Oaxaca	68	68	746	11
Puebla	365	365	7 028	19.3
Querétaro	13	13	2 779	217.1
Quintana Roo	30	30	307	10.3
San Luis Potosí	179	179	15 728	87.9

Sinaloa	5 064	5 064	359 910	71.1
Sonora	1 179	1 177	113 970	96.8
Tabasco	16	16	155	9.7
Tamaulipas	27	27	759	28
Veracruz	357	357	7 785	21.8
Yucatán	657	653	28 156	43.1
Zacatecas	480	426	26 229	61.1
Total	17 961	17 850	817 800	45.8

Fuente: (SAGARPA, 2018)

2.6.4 Panorama estatal, de acuerdo a SEDAGRO, 2016

En cuanto a rendimientos por hectárea, Baja California reporta 57.8 t ha⁻¹, rendimiento que ubica a la entidad como la séptima más alta del país. La producción de pepino en Baja California es una de las actividades agrícolas más importantes por el valor económico que genera, ubicando a la actividad en el noveno lugar de los cultivos que más valor de producción aporta al valor agrícola estatal con 2.2 % y el cuarto lugar de las hortalizas. Durante este mismo año, en el municipio de Ensenada se sembraron el 100% de la superficie de este cultivo. Entre 2003 y 2016, la superficie dedicada a la producción de esta hortaliza se ha disminuido 4.9% por año.

2.6.5 Importancia del pepino

El pepino es una hortaliza que presenta un amplio interés industrial por la facilidad al procesamiento mínimo. Esta hortaliza se utiliza mucho en la elaboración de ensaladas y es conocido como uno de los vegetales de menor valor energético, siendo su contenido en fibras y vitaminas C, A, y tiamina, bajo con respecto a la media de otras hortalizas (Cortes *et al.*, 2011).

2.6.6 Descripción morfológica de acuerdo a Conabio 2003

2.6.6.1 El sistema radicular

Es muy desarrollado, dada la gran productividad de esta planta y consta de raíz principal, que se ramifica rápidamente para dar raíces secundarias superficiales muy finas, alargadas y de color blanco. El pepino posee la facultad de emitir raíces adventicias por encima del cuello.

2.6.6.2 Tallo

Es de crecimiento rápido, blandos, anguloso y algo espinoso, de porte rastrero y trepador. De cada nudo parte una hoja y un zarcillo. En la axila de cada hoja se emite un brote lateral y una o varias flores.

2.6.6.3 Hoja

Son ásperas, con 5 lóbulos dentados y previstos de zarcillos foliares de largo pecíolo.

2.6.6.4 Flor

Son monoicas con flores unisexuales en la misma planta; las masculinas aparecen en las axilas de las ramas secundarias por grupo de cinco, las femeninas, también en las axilas de las mismas ramas, aparecen después de las masculinas.

2.6.6.5 Fruto

Se considera una baya falsa (pepónide) con el epicarpio duro áspero o liso, dependiendo de la variedad, que vira desde un color verde claro, pasando por un verde oscuro hasta alcanzar un color amarillento cuando está totalmente maduro, aunque su recolección se realiza antes de su madurez fisiológica. La pulpa es acuosa, de color blanquecino, con semillas en su interior repartidas a lo largo del fruto. Dichas semillas se presentan en cantidad variable y son ovales, algo aplastadas y de color blanco-amarillento y éstas se conservan durante ocho a diez años con facultades germinativas.

2.7 Generalidades del cultivo

El pepino es una planta herbácea, anual, rastrera o trepadora. El fruto es un pepónide

de forma más o menos cilíndrica y alargada, de sección circular, de peso y tamaño variable, de color verde claro al principio para luego tomar color verde más oscuro y amarillento en su madurez fisiológica, que no tiene valor comercial. El número de frutos por nudo oscila entre 1 y 3 dependiendo de la variedad cultivada y tipo de pepino. Los frutos maduran de los 55 a 60 días después del trasplante (Reche, 2011). Esta hortaliza es de rápido crecimiento, con un alto índice de acumulación de biomasa y con un sistema radical poco profundo; por lo que para lograr altos rendimientos es necesario utilizar sistemas de producción protegidos (Suniaga *et al.*, 2008).

El cultivo de pepino requiere un clima templado cálido con temperaturas diurnas óptimas de 20 a 25 ° C; temperaturas nocturnas por debajo de 12 ° C afectan la producción y desarrollo del cultivo. La humedad relativa óptima durante el día es de 60-70 % y en la noche de 70-90 % (Barraza, 2012). Este cultivo requiere de altas cantidades de agua, sobre todo cuando está en la etapa de producción, ya que con la falta de humedad los pepinos que se producen son pequeños y presentan deformaciones (Sirohi *et al.*, 2005).

2.8 Bibliografía citada

- Abbas, T., Balal, R.M.; Shahid, M.A.; Pervez, M.A.; Ayyub, C.M.; Aqueel, M.A. 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiol Plant.*, 37: 6–21.
- Agarie, S.; Hanaoka, N.; Ueno, O.; Miyazaki, A.; Kubota, F.; Agata, W., Kaufman, P.B. 1998. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa L.*), monitored by electrolyte leakage. *Plant. Prod. Sci.* 1, 96–103.
- Ahmed, C.B.; B.B. Rouina, S.; Sensoy, M.; Boukhris, F.B.; Abdallah. 2009. changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and experimental botany*, 67: 345-352.
- Al-Aghabary, K., Zhu Z and Shi, Q. 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and anti-oxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *J Plant Nutr.* 27:2101-2115.
- Ali, Y., Aslam, S., Ashraf, M.Y. and Tahir, G.R. 2004. Effect of salinity on chlorophyll concentration, leaf area, yield and yield components of rice genotypes grown under saline environment. *International Journal of Environmental Science & Technology* 1: 221 - 225.
- Almodares, A.; Hadi, M.R.; Dosti, B. 2008. The effects of salt stress on growth parameters and carbohydrates content in sweet sorghum. *Research Journal of Environmental Sciences* 2: 298 – 304.
- Amirjani, M.R. 2010. Effect of NaCl on some physiological parameters of rice. *Journal Biological chemistry* 3: 06 - 16.
- Amini, F., Ehsanpour, A.A., Hoang Q.T., Shin, J.S. 2007. Protein pattern changes in tomato under in vitro salt stress. *Rusian Journal of Plant Phisiology* 54: 464-472.

- Ashraf, M. 2002. Salt Tolerance of Cotton: Some New Advances. *Critical Reviews in Plant Sciences* 21: 1-30.
- Ashraf, M. y Harris, P. J. C. 2004. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plants Science* 166:3-16.
- Ashraf, M. and P.J.C. Harris, 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* 51: 163–190.
- Ashraf, M.; Rahmatullah, M.; Afzal, R.; Ahmed, F.; Mujeeb, A.; Sarwar, L. Ali. 2010. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) *Plant Soil*, 326: 381-391.
- Azcón J. y M. Talón. 2001. *Fundamentos de la Fisiología Vegetal*. Edicions Universitat de Barcelona. 522 pp.
- Barraza, A. F. V. 2012. Acumulación de materia seca del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. *Temas agrarios* 1:18 – 29.
- Bergougnoux, V. 2014. The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnology advances* 32 :170-189.
- Blanca J., Cañizares J., Cordero L., Pascual L., Diez M.J., Nuez F. 2012. Variation revealed by snp genotyping and morphology provides insight into the origin of the tomato. *ploS one* 7:481-498.
- Boriboonkaset, T.; Theerawitaya, C.; Pichakum, A.; Cha-um, S.; Takabe, T.; Kirdmanee, C. 2012. Expression levels of some starch metabolism related genes in flag leaf of two contrasting rice genotypes exposed to salt stress. *Australian Journal of Crop Science* 6: 1579 – 1586.
- Brugnoli, E. and Lauteri, M. 1991. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt-tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C₃ non-

halophytes. *Plant Physiol.*, 95: 628–635.

Carrasco, L.V. 2004. Salinidad: homeostasis ionica y acuaporinas. *IDESIA* 22: 61-68.

Cuellar, J., Cooman, A. y Arjona, H. 2002. «Incremento de la productividad del cultivo de tomate bajo invernadero mejorando la polinizacion». *Agronomía Colombiana*, 18, pp. 7-13.

Currie, H. A., Perry, C. C., 2007. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Ann. Bot.* 100: 1383–1389.

Chaves, M.M., Flexas, J., Pinheiro, C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany* 103: 551-560.

Chen, M.Q., Wei, H.B., Cao, J.W., Liu, R.J., Wang, Y.L., Zheng, C.Y. 2007. Expression of bacillus subtilis proBA genes and reduction of feedback inhibition of proline synthesis increases proline production and confers osmotolerance in transgenic Arabidopsis. *J. Biochem. Mol. Biol.* 40:396-403.

Chen, W.; Yao, X.; Cai, K.; Chen, J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biol Trace Elem Res.*, 142: 67–76.

Chinnusamy, V., A. Jagendorf y J. Zhuan. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*. 45:437-448.

CONABIO. 2003. Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM) Proyecto GEF-CIBIOGEM de Bioseguridad. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/doctos/consulta_SIOVM.html Consultado el día 22 de octubre 2018.

De Lucena, C.C.; De Siqueira, D.L.; Prieto Martinez, H.E.; Cecon, P.R. 2012. Salt stress change chlorophyll fluorescence in mango. *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal – SP. 34: 1245 - 1255.

- Demiral, A. 2005. Comparative response of two olive (*olea europaea L.*) cultivars to salinity. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 29: 267-274.
- Dodd, K., Guppy, C., Lockwood, P., Rochester, I. 2010. The effect of sodicity on cotton: plant response to solutions containing high sodium concentration. Plant. Soil. 330:239-249.
- Donoso, P. 2003. Evaluación y selección de clones de Camote (*Ipomoea batatas*), bajo estrés de salinidad y toxicidad de boro en los Valles de Azapa y Lluta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Tarapacá. Arica. Chile. 20 pp.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. Proc. Natl. Acad. Sci. 91, 11–17.
- Epstein, E. 1999. Silicon, Annual review of plant physiology and plant molecular biology 50: 641–64.
- Epstein, E. 2009. Silicon: its manifold role in plants. Annals of Applied Biology 155: 155–160.
- Exley, C. 2015. A possible mechanism of biological silicification in plants. Front. Plant Sci. 6: 853.
- FAO, 2007. Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils. FAO land and Plant Nutrition Management Services. Rome, Italy. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>.
- FAOSTAT. 2016. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Consultado el día 22 de octubre 2018. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- Flexas J, and Medrano, H. 2002. Drought-inhibition of photosynthesis in C-3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. Ann Bot Lond. 89:183–189.
- Flowers, T. J. 2004. Improving crop salt tolerance. J. Exp. Bot. 55: 307-319.

- Fooland M.R. 2007. Genome mapping and molecular breeding of tomato International Journal of Plant Genomics 9:1-53.
- Gao, X., Zou, C. and Wang, L. 2006. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. J Plant. Nutr. 29:1637–1647.
- Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. and Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. Plant Science, 2: 313–321.
- Gong, H.J., Randall, D.P. and Flowers, T.J. 2006. Silicon deposition in the root reduce uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedling by reducing bypass flow. Plant, Cell & Environment, 29:1970–1979.
- Guía técnica del cultivo de pepino. 2003. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. CENTA. <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Pepino%202003.pdf>. Consultado del día 22 de octubre 2018.
- Gupta, B. and Huang, B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. Int. J. Genom. 5: 314-322.
- Hajiboland, R., Aliasgharzadeh, A., Laiegh, S.F. and Poschenrieder, C. 2010. Colonization with Arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. Plant and Soil, 331: 313–327.
- Hare, P.D., Cress, W.A. and Van, Staden, J. 1998. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. Plant, Cell and Environment 21: 535 – 553.
- Hasegawa, P.M., Bressan, R.A., Zhu, J.K., Bohnert, H.J. 2000. Plant cellular and molecular response to high salinity. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 51: 463-499.
- Hattori, T, S., Inanaga, H., Araki, P., An, S., Morita, M., Luxova, A. and Lux. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. Physiologia Plantarum, 123: 459–466.

- Horie, T, I., Karahara, M. and Katsuhara. 2012. Salinity tolerance mechanisms in glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice Science*, 5: 11-24.
- INFOAGRO. 2011. El cultivo del tomate. <http://www.infoagro.com/hortalizas/tomate3.htm> consultado el día 22 de octubre 2018.
- INTAGRI. 2003. Producción de pepino en invernadero. Costa Rica. 5 pp. <https://www.intagri.com>. Consultado el día 22 de octubre 2018.
- Jamil, M., Urrehman, S., Lee, KJ., Kim, JM., Kim, H., Rha, E.S. 2007. Salinity reduced growth PS2 photochemistry and chlorophyll content in radish. *Sci. Agric. Piracicaba Braz.* 64:111-118.
- Jenks, M. A. y Hasegawa, P. M. *Plant Abiotic Stress*. India. Blackwell Publishing Ltd, 2005, p. 270.
- Kazunori, T. and Ma, J.F. 2003. Characterization of silicon uptake by rice roots. *New Phytologist*, 158: 431–436.
- Kaur, S.; Kaur, N.; Siddique, K.H.M.; Nayyar, H. 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62: 905–920.
- Kazunori, T. and J.F. Ma, 2003. Characterization of silicon uptake by rice roots. *New Phytologist*, 158: 431–436.
- Khan, W.U.D.; Aziz, T.; Hussain, I.; Ramzani, P.M.A.; Reichenauer, T.G. 2016. Silicon: A beneficial nutrient for maize crop to enhance photochemical efficiency of photosystem II under salt stress. *Arch. Agron Soil Sci.* 65 875-892.
- Kronzucker, H.J., Coskun, D., Schulze, L.M., Wong, J.R., Britto, D.T., 2013. Sodium as nutrient and toxicant. *Plant Soil* 369: 1–23.
- Li, H., Zhu, Y., Hu, Y., Han, W., Gong, H. 2015. Beneficial effects of silicon in alleviating

- salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiol Plant.*, 37: 1-9.
- Liang, Y., Zhang, W., Chen, Q., Liu, Y., Ding, R. 2006. Effects of exogenous silicon (Si) on H⁺ ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare L.*). *Environmental and Experimental Botany*, 57: 212–219.
- Liang, Y., W. Sun, Y.G. Zhu, P. Christie, 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147: 422-428.
- López, E. J., Rodríguez, J.C., Huez, L. M. A., Garza, O. S., Jiménez, L. J., Leyva, E.E.I. 2011. Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus L.*) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda. *IDESIA (Chile)*. 29: 21-27.
- Lu, K.X., Cao, B. H., Feng, H.P., He, Y. y Jiang, D.A. 2009. Photosynthetic response of salt-tolerant and sensitive soybean varieties. *Photosynthetica* 47: 381-387.
- Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50: 11-18.
- Ma, J.F. and Yamaji, N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Science*, 65: 3049-3057.
- Mahajan, S., Tuteja, N., 2005. Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Arch. Biochem Biophys* 444: 139–158.
- Mahbod, S.; Hanafi, M.M.; Akmar, A.S.N.; Rafii, M.Y.; Azizi, P.; Tengoua, F.F.; Azwa, J.N.M.; and Shabanimofrad, M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International*, 2: 396-010.
- Manual del cultivo de tomate 2008. Programa de diversificación hortícola. <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01CH517t.pdf>. Consultado el día 22 de octubre 2018.

- Manual de producción de pepino bajo invernadero Héctor Casilimas 2012. Carlos R. Bojaca, Oscar Monsalve. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. pp.208-228.
- Mateos-Naranjo, E., L. Andrades-Moreno, and A.J. Davy, 2013. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63: 115–121.
- Matichenkov, V.V. Ammosova, M.Y. 1996. Effect of amorphous silica on soil properties of a sod-podzolic soil. *Euras. Soil Sci.* 28:87–99.
- Matichenkov, V.V. Bocharnikova, E.A. 2001. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. *In*: L.E. Datnoff, G.H. Snyder, H. Korndorfer, eds. *Silicon in Agriculture*. Amsterdam: Elsevier. pp. 209–219.
- Maxwell K, Johnson G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *J Exp Bot.*51:659-668.
- Mehta, P.; V. Kraslavsky, S.; Bharti, S.I.; Allakhverdiev, A.; Jajoo. 2010. Analysis of salt-stress induced changes in photosystem II heterogeneity by prompt fluorescence and delayed fluorescence in wheat (*Triticum vulgare*) leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2: 308-313.
- Meena, V., Dotaniya, M., Coumar, V., Rajendiran, S., Kundu, S., Rao, A.S., 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proc. Natl. Acad. Sci., India Sect. B: Biol. Sci.* 84: 505–518.
- Mitani, N; Feng Ma, J. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56: 1255-1261.
- Morris, J. P., S. Thatje & C. Hauton. 2013. The use of stress-70 proteins in physiology: a re-appraisal. *Molecular Ecology* 22: 1494-1502.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *PlanCell Environ* 28:239-250.

- Munns, R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* 167: 645-663.
- Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651-681.
- Munns, R., R. James y A. Läuchli. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany* 57:1025-1043.
- Naumann, J.C.; Bissett, S.N.; Young, D.R.; Edwards, J.; Anderson, J.E. 2010. Diurnal patterns of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and PRI to evaluate water stress in the invasive species, *Elaeagnusum bellata*. *Trees Journal*, 24: 237–245.
- Ogaya, R., Penuelas, J., Asensio, D., Llusia, J. 2011. Chlorophyll fluorescence responses to temperature and water availability in two co-dominant Mediterranean shrub and tree species in a long-term field experiment simulating climate change. *Environ Exp Bot.* 73:89–93.
- Ouzounidou, G., Giannakoula, A., Ilias I., Zamanidis, P. 2016. Alleviation of drought and salinity stresses on growth, physiology, biochemistry and quality of two (*Cucumis sativus L.*) cultivars by Si application. *Braz. J. Bot.*, 39: 531-539.
- Parida, A., Das, A. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60: 324-349.
- Parvaiz, A. and Satyawati, S. 2008. Salt stress and phytochemical physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays L.*). *International Journal of Plant Biology*, 40: 1041–1052.
- Parveen, N. and Ashraf, M. 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays L.*) cultivars grown hydroponically. *Pak. J. Bot.*, 42: 1675–1684.
- Pilon, C.; Soratto, R.P.; Moreno, L.A. 2013. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants.

Crop Sci. 53, 1605–1614.

Plaut Z, Edelstein M and Ben-Hur M. 2013. Overcoming salinity barriers to crop production using traditional methods. *Critical Reviews in Plant Sciences* 32: 250-291.

Rahimi, R.; A. Mohammakhani, V.; Roohi, N.; Armand, 2012. Effects of salt stress and silicon nutrition on chlorophyll content, yield and yield components in fennel *Foeniculum vulgare Mill.* *Intl J. Agri and Crop Sci.*, 21: 1591-1595.

Rasool, S., Hameed, A., Azooz, M., Siddiqi, T., Ahmad, P., 2013. Salt Stress: Causes, Types and Responses of Plants, *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*. Springer, pp. 1–24.

Reche, M.J. 2011. Cultivo del pepino en invernadero. pp.50. consultado el día 22 de noviembre de 2018.

Rivero, R.M., Mestre, T.C., Mittler R., Rubio F., Garcia-Sánchez, F. and Martinez, V. 2014. The combined effect of salinity and heat reveals a specific physiological, biochemical and molecular response in tomato plants. *Plant, Cell and Environment*, 37:1059-1073.

Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S.A., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 15416–15431.

Romero-Aranda, M.R., Jurado, O. and Cuartero, J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, 163: 847-855.

SAGARPA, 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado el día 22 de octubre 2018. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do

- Santos, C.V. 2004. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. *Scientia Horticulturae*. 103:93-99.
- Savvas, D., Giotis, D., Chatzieustratiou, E., Bakea, M. and Patakioutas, G. 2009. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environ. Exp. Bot.* 65, 11–17.
- SEDAGRO, 2016. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable de Baja California. Consultado el día 22 de octubre 2018. http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/pepino.php
- Sengupta S, Majumder A L. 2009. Insight into the salt tolerance factors of a wild halophytic rice, *Porteresia coarctata*: a physiological and proteomic approach. *Planta* 229: 911-929.
- Schnabel, G., Strittmatter, G. and Noga, G. 1998. Changes in photosynthetic electron transport in potato cultivars with different field resistance after infection with *Phytophthora infestans*. *J Phytopathol* 146:205–210.
- Shahid, M.A.; Pervez, M.A.; Balal, R.M.; Ahmad, R.; Ayyub, C.M.; Abbas, T.; Akhtar, N. 2011. Salt stress effects on some morphological and physiological characteristics of okra (*Abelmoschus esculentus* L.). *Soil environment*, 1: 66-73.
- Shahzad, M., Zörb, C., Geilfus, C.M., Mühling, K., 2013. Apoplastic Na⁺ in *Vicia faba* leaves rises after short-term salt stress and is remedied by silicon. *J. Agron. Crop Sci.* 199: 161–170.
- Shi, Y., Zhang, Y., Han, W., Feng, R., Hu, Y., Guo, H., Gong, Y. 2016. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, 7: 196-211.
- Sims W. L. 1980. History of tomato production around the world. *Acta Horticulturae*. 100: 211-215.
- Sirohi, P.S., Munshi, A. D., Kumar, G. and Behera, T. K. 2005. Cucurbits. *In: Dhillon*

- B.S., R. K. Tyagi, S. Saxena and G.J. Ranghawa (eds). Plant genetic resources: horticultural crops. Narosa publishing house. India. 12: 34-58.
- Snyder, G.H., Matichenkov, V.V. Datnoff, L.E. 2007. Silicon. Handbook of Plant Nutrition. Barker, A.V. and Pilbeam, D.J. (eds.). Taylor & Francis Group. CRC Press. Boca Raton, FLA. pp. 121-144.
- Suniaga, Q. J., Rodríguez, A., Rázuri, R.L., Romero, E., Montilla, E. 2008. Fertilización, mediante fertirriego, durante diferentes etapas del ciclo de cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L.) en condiciones de bosque seco premontano. Agricultura Andina. 15:56-65.
- Szabolcs, I. 1994. Salt affected soils as the ecosystem for halophytes. En: V.R. Squires, *et al.* (Editors): Halophytes as a resource for livestock and for rehabilitation of degraded lands. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 19-24.
- Tang, X., Mu, X., Shao, H., Wang, H., Brestic, M. 2015. Global plant-responding mechanisms to salt stress: Physiological and molecular levels and implications in biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35: 425–437.
- Tanji, K.K. 2002. Salinity in the soil environment. In: Salinity: environment-plants molecules. Ed: Lauchli A. Luttge, U. Klumer Academic Publishers. Dordrecht. NL, pp. 21-52.
- Takahashi, E. 1995. Uptake mode and physiological functions of silica. *Japan J. Soil Sci. Plant Nutr.* 49:357–360.
- Takahashi, E., Ma, F; Miyake Y. 1990. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Agricultural and food chemistry* 2: 99-122.
- Tester, M. and R. Davenport. 2003. Na⁺ tolerance and Na transport in higher plants. *Annals of Botany*. 91: 503-527.
- Torabi, F., Majd, A., Enteshari, S., 2015. The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil Sci. Plant Nutr.* 61: 788–798.

- Turhan, E. y A. Eris. 2007. Growth and stomatal behavior of two strawberry cultivars under long-term salinity stress. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 31:55-61.
- Turan, S., Tripathy, B. C. 2015. Salt-stress induced modulation of chlorophyll biosynthesis during de-etiolation of rice seedlings. *Physiologia Plantarum*. 153: 477– 491.
- Wang, B., Lüttge, U., Ratajczak, R. 2001. Effects of salt treatment and osmotic stress on V-ATPase and V-PPase in leaves of the halophyte *Suaeda salsa*. *Journal of Experimental Botany* 52: 2335-2365.
- Wang, X.S. and Han, J.G., 2007. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53: 278–285.
- Wang, S., Liu, P., Chen, D., Yin, L., Li, H. and Deng, X. 2015. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in Plant Science*, 6: 759- 769.
- Wu, J., Seliskar, D. M., Gallagher, J. I. 2005. The response of plasma membrane lipid composition in callus of the halophyte *Spartina patens* (*Poaceae*) to salinity stress. *American Journal of Botany* 92: 852 – 858.
- Xu, C.X., Ma, Y.P., Liu, Y.L. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany*, 98: 26–36.
- Yeo, A.R., Flowers, S.A., Rao, G., Welfare, K., Senanayake, N., Flowers, T.J. 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpiration bypass flow. *Plant Cell & Environmental*, 22: 559–565.
- Yeo, A.R., S.A. Flowers, G. Rao, K. Welfare, N. Senanayake, and T.J. Flowers, 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this

is accounted for by a reduction in the transpiration bypass flow. *Plant Cell & Environment*, 22: 559–565.

Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., Oka, M., 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol. Plant.* 35: 3099–3107.

Yu, S., W. Wang & B. Wang. 2012. Recent progress of salinity tolerance research in plants. *Russian Journal of Genetics* 48: 497-505.

Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., Oka, M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol. Plant.* 35: 3099–3107.

Zhu, Jian-Kang. 2001. Plant salt tolerance. *TRENDS in Plant Science* 6: 234-242.

Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q., Yu, J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*, 167: 527–533.

Zobayed, S. M. A., Afreen, F., Kozai, T. 2005. Temperature stress can alter the photosynthetic efficiency and secondary metabolite concentrations in St. John's Wort. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43: 977-984.

CAPÍTULO 3. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

3.1. Artículo 1. Silicon as an Alternative to Counteract Induced Salinity with Standard Nutrient Solution in Cucumber

Pedro Iván López-Cuén^{1,3}, Cristina Ruiz-Alvarado¹, Santillano-Cázares Jesús¹, María Isabel Escobosa-Gracia¹, Daniel González-Mendoza¹, Jesús Del Rosario Ruelas Islas², Pablo Preciado-Rangel⁴, Fidel Núñez-Ramírez^{1*}

¹*Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n CP. 21705, Ejido Nuevo León, Baja California, México.*

²*Facultad de Agricultura Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 Av. Japaraqui S/N, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México.*

³*Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Km.17.5, Carretera Culiacán-El Dorado, Culiacán Sinaloa, México.*

⁴*Instituto Tecnológico de Torreón (ITT), Carretera Torreón-San Pedro Km 7.5, Ejido Ana, Torreón, Coahuila, México.*

*For correspondence: fidel.nunez@uabc.edu.mx

Abstract

Silicon (Si) has beneficial effects on plant tolerance to several biotic and abiotic stressing factors. The aim of the study was to determine the effect of Si nutrition on growth, yield, photochemical efficiency, and stomatal conductance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under induced salinity. Treatments were arranged in a completely randomized factorial design, with three replicates. Three different Si concentrations were used (0, 4, and 8 g L⁻¹) with two cucumber cultivars (Gvs and Alpha Garden); during the experiment, measurements of the variables were taken at noonday and during the day considering two salinity levels (2.5 and 4.0 dS m⁻¹). There was no interaction between the main factors ($P > 0.05$) (S * C). The main factors by themselves did not have a significant effect ($P > 0.05$) for the following variables: leaf temperature, maximum photochemical efficiency of PSII (Fv/Fm), minimal fluorescence (Fo), maximum fluorescence (Fm), stomatal conductance (g_s), height, number of leaves, and yield. The values of Fv/Fm and g_s slightly decreased at noon in all treatments when temperature of greenhouse raised. On the other hand, g_s decreased almost three times when the crop was subject to salinity stress. It was concluded that Si, under the evaluated conditions, did not influence on cucumber yield, growth or physiology, under the tested salinity conditions.

Key words: Abiotic stress; CO₂ assimilation; Fluorescence; Photosynthesis; Plant nutrition

Introduction

Salinity is the main abiotic factor which limits crop production in arid and semiarid regions worldwide. Around 7% of land surface is affected by annual increases of salt concentrations from 1 to 2% (Munns and Tester, 2008; Plaut *et al.*, 2013; Rizwan *et al.*, 2015). Salt stress affects the plant in two different ways: increasing osmotic stress and ionic toxicity (Munns and Tester, 2008; Parvaiz and Satyawati, 2008; Horie *et al.*, 2012). Likewise, high concentration of toxic ions such as Na^+ and Cl^- affects physiological and enzymatic processes; it forms an ionic imbalance in plant cell causing disturbance in metabolism and it also decreases uptake of essential ions as K^+ and Ca^{2+} (Hajiboland *et al.*, 2010).

Photosynthesis is one of the essential plant processes that is negatively affected by salinity because it affects the stomata opening and closure, and causes a decrease in intercellular CO_2 concentration (Mehta *et al.*, 2010; Ashraf and Harris, 2013; Gupta and Huang, 2014). At the same time, it reduces green pigments and foliar area (Brugnoli and Lauteri, 1991; Gong *et al.*, 2005). An immediate response of plants when exposed to high salt concentration is stomatal closure (Tang *et al.*, 2015). The stomata closure implies a reduction in CO_2 fixation under fluorescence conditions that can produce an overexcitement of the PSII reaction centers (Ahmed *et al.*, 2009; Ashraf and Harris, 2013). Likewise, the PSII complex and reaction centers are affected when plants are exposed to high salt concentrations, (Naumann *et al.*, 2010). Thus, the study of plant abiotic stressing factors such as salinity, drought, high/low temperatures in plant photosynthetic efficiency is related to chlorophyll fluorescence measurement (chl) (Zobayed *et al.*, 2005) as well as the gaseous exchange in leaves (Shahid *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2015).

Silicon is the second most abundant element in soil after oxygen, representing 31% of the land surface (Gong *et al.*, 2006; Epstein, 2009). In soil solution, this element is found in form of silicic acid (H_4SiO_4), with concentrations ranging from 0.1 through 0.6 mM (Epstein, 1999; Ma and Yamaji, 2006). Silicic acid is taken and transported through

the xylem of plants (Epstein, 1999; Kazunori and Ma, 2003). Later, it is deposited in cell walls as amorphous silicon ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), interacting with pectins and calcium, improving cell wall hardness and resistance (Epstein, 1999; Ma, 2004; Ma and Yamaji, 2008).

Plants contain Si in concentrations that vary from 0.1 and 10% of dry weight (Ma and Yamaji, 2008), acting as a physical and mechanical barrier. Besides, Si not only is deposited in cell walls but also participates in metabolic and physiological activities when plants are subject to stress (Ma, 2004; Liang *et al.*, 2007). It has been concluded that even though Si is not considered as an essential element for growth and metabolism, it is beneficial under stress conditions (Liang *et al.*, 2007; Ma and Yamaji, 2008; Epstein, 2009; Kaur *et al.*, 2016).

The vast majority of Si is deposited in epidermal cells of roots, leaves and stems by slowing down Na^+ uptake by roots, it also diminishes permeability of cell membranes to Na^+ resulting in low Na^+ level and high K^+ level in cytosol (Gong *et al.*, 2006; Milne *et al.*, 2012). The function of Si reduces Na^+ uptake decreasing transpiration in rice plants (*Oryza sativa*) (Yeo *et al.*, 1999; Gong *et al.*, 2006), improves water status in tomato (*Solanum lycopersicum*) (Romero-Aranda *et al.*, 2006), increases antioxidant enzymatic activity in cucumber (Zhu *et al.*, 2004) and enhance ATPase activity of plasma cell in barley plants (*Hordeum vulgare* L.) (Liang *et al.* 2006).

Some authors have reported salt tolerance through Si fertilization in several crops as rice, wheat (*Triticum durum*), tomato, and barley. Hattori *et al.* (2005) found a higher photosynthetic rate, transpiration, stomatal conductance, greater size of stomata in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) plants treated with Si under saline stress, when compared to the untreated plants. Similar results were also found in maize cultivars (*Zea mays* L.) (Parveen and Ashraf, 2010) and okra plants (*Abmoschus esculentus* L.) (Abbas *et al.*, 2015). In addition, Chen *et al.* (2011) reported an increase in PSII photochemical efficiency, photosynthetic and transpiration rate in Si fertilized rice plants grown under saline stress. Furthermore, Wang *et al.* (2015) found a higher photosynthetic and transpiration rate, leaf water content and root hydraulic conductance

of Si cucumber treated plants. Similar results were reported by Shi *et al.* (2016) in tomato plants. All these researchers concluded that Si applied to crops reduce Na⁺ content and an increase in leaf K⁺ concentration. It is proposed that the former effects occurred because Si decreased Na⁺ uptake by influencing the activity of H⁺ ATPase (adenosine-triphosphatase) in the root plasma membrane (Xu *et al.*, 2015).

The negative effect of salinity in crops can be modified when there are conditions of high temperature and relative humidity in which crops are being grown (Shibuya *et al.*, 2017).

Temperature can cause physiological, biochemical and molecular changes in plant metabolism. Rivero *et al.* (2014) reported that tomato grown under stress conditions of high temperature and salinity (35 °C + 120 mM NaCl) maintained a high K⁺ concentration in plant tissues and consequently a low Na⁺/K ratio with a better cell water status and photosynthesis, compared to plants subject to individual salinity stress. The literature refers the Si is capable of mitigating stress caused by increment of Na⁺ in soil saturation extract or nutrient solution (Ashraf *et al.*, 2010; Rahimi *et al.*, 2012; Ouzounidou *et al.*, 2016). Therefore, the objective of the study was to determine the effect of Si nutrition on yield, growth, and physiology of cucumber under salinity conditions and under contrasting relative humidity and temperature conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted at the experimental site of the Universidad Autónoma de Baja California during the winter season of 2017. A greenhouse without control of temperature and heating system was used. The planting date of the cucumber cultivars Beit Alpha was on January 25 using polystyrene trays. The transplanting was on February 16th, placing two plants per 9 l pots. Sand was used as substrate and nutrient solution was applied through a pressurized irrigation system. The standard nutrient solution employed was that recommended by Gómez and Sánchez (2003). Nutrient concentration was as follows: N 224, P 47, K 281, Ca 212, Mg 65, Fe 2, Mn 0.55, Zn

0.33, Cu 0.05, B 0.28 and Mo 0.05 mg L⁻¹.

At the time of transplanting, the nutrient solution with electric conductivity of 2.0 dS m⁻¹ was used to gradually increase salinity in all plants until reaching a concentration of 4.0 dS m⁻¹. Irrigation drainage was adjusted to 30% whereas pH of nutrient solution was maintained between 5.5 and 6.0. Modification of salinity in nutrient solution and environmental conditions management inside the greenhouse started two weeks after transplanting. The increment in salinity was performed by increasing macro and micronutrient concentration. Relative humidity inside the greenhouse was achieved by wetting the floor at 10:00 and 14:00 hours. Temperature and relative humidity was monitored by using a digital thermohigrometer CEM DT-172 (Twin Light Instruments, Monterrey, México). Salinity concentrations, temperature and relative humidity conditions are presented in Table 1.

A completely randomized factorial design was performed where Si nutrition as factor one (0, 4, 8 g L⁻¹ of SiO₂; Diatomix, Bio Agrinor[®], Zapopan, Jalisco México); and the cultivars were the factor two (GVS and Alpha Garden, Seeds USA). The number of replicates were three, while the main plot was of 12 plants. Si was applied at the base of plant root and the application was done daily at 12:00 hours.

The response variables were leaf temperature, maximum photochemical efficiency of the PSII (Fv/Fm), minimum fluorescence (Fo), maximum fluorescence (Fm), stomatal conductance (g_s), plant growth and yield of fruit. Measurement of variables was performed in every environmental condition (table 1) and by two different forms. The first, was done with the purpose of identifying the behavior of plant during the day while the second by taking data at noon only.

Leaf temperature

Leaf temperature was determined with an infrared digital thermometer (DANtronics model P045440, México). These measurements were performed on three plants in each treatment at 30 cm away from the leaf. Also the fourth and fifth leaf from apex

downwards was used as reference.

Fv/Fm, Fo, Fm

Photosynthetic efficiency was determined with a Chlorophyll Fluorometer OS-30p (OPTI-SCIENCE, USA) using an actinic light intensity of 2100 μmol , intensity photon $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for a period of two seconds. Those measurements were done at 11:00 on three plants per treatment taking the fourth or fifth leaf from apex downward. Before determination, all leaves were acclimated in darkness with light exclusion tweezers for 30 seconds just to make sure that all reaction centers were open (González *et al.* 2008).

Stomatal conductance (g_s)

Stomatal conductance was determined with a Leaf Porometer® (SC-1 Pullman WA, USA). Measurements were conducted on the fourth or fifth leaf of three plants per treatment.

Growth and fruit yield

Plant height and number of leaves was measured with a flexible tape in three plants per treatment starting at 43 days after transplanting (DAT). Number of leaves in the plant were counted in three plants per plot every week. Fruit harvest started 48 DAT. A total of five harvests were performed and yield was measured in fresh weight (g) and number of fruit per area (m^2).

Statistical analysis

All data were subject to analysis of variance procedure (MINITAB, 2017). Mean differences were separated using Tukey least significance difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

Results

Leaf temperature and photosynthetic efficiency at noon

Since no significant differences were found ($P > 0.05$) in the variables measured between the different environments of relative humidity and temperature (Table 1), all data was grouped only by salinity levels. Table 2 shows the leaf temperature, F_v/F_m , F_o , F_m and g_s in two cucumber cultivars and Si rates under high and low salinity level. No any significant ($P > 0.05$) interaction between the main factors (S*C) was found.

Leaf temperature values in low and high salinity were in the order of 30 and 31 °C. Meanwhile, photochemical efficiency (F_v/F_m) of cucumber plants under low salinity condition (2.5 dS m⁻¹) was maintained between 0.784 and 0.786; whereas the values in high salinity (4.0 dS m⁻¹) were slightly lower (0.777 and 0.781).

Minimum fluorescence (F_o) of cucumber plants under low salinity level were 328.68 and 338.75; while the values in high salinity level were slightly lower, the range of these was 321.06 and 327.36. On the other hand, F_m of cucumber plants under low salinity was held between 1452.73 and 1563.36; while recorded values under high salinity level were 1491.31 and 1537.28.

Stomatal conductance (g_s) of plants grown under low salinity ranged from 1039.94 to 1032.72 mmol m⁻² s⁻¹, in contrast to the values recorded in high salinity which were approximately twice less than under low salinity, ranging from 472.46 to 509.04 mmol m⁻² s⁻¹.

Photosynthetic efficiency during the day

Figure 1 shows the F_v/F_m , F_o , F_m diurnal performance, and stomatal conductance of the cucumber crop subject to two salinity levels and three Si rates. There was no significant response ($P > 0.05$) to Si application in none of the measurements.

Photosynthetic efficiency parameters showed the same dynamics during the day in both

salinity levels (Figure 1). The higher F_v/F_m , F_o y F_m values were recorded early in the morning and at the sunset. Besides, stomatal conductance under low salinity showed a higher gas exchange rate when compared to plants grown under high salinity. Si application did not significantly ($P > 0.05$) enhance stomatal conductance in plants under any of both salinity treatments.

Plant growth

Figure 2 shows the plant growth expressed as height (A) and number of leaves by the effect of three Si rates. There were no significant differences ($P > 0.05$) in plant height or number of leaves in none of the date evaluated. At the end of the experiment (62 DAT), all plants reached an average height of 225 cm while the average number of leaves was 25.

Fruit yield

Table 3 shows the yield and number of fruit obtained in five harvests. It was also found a non significant effect ($P > 0.05$) in the interaction of S*C. Rates of Si did not affect the yield nor the number of fruit in none of the five harvests; however, Alpha garden cultivar significantly ($P < 0.05$) overcame the yield of Gvs cultivar. At the end of study, total yield and total number of fruit in Gvs cultivar were statistically ($P < 0.05$) higher than those of Alpha Garden cultivar. Values of yield, number of fruit and weight of fruit were 29.42 and 20.83 kg m², 283 and 212 fruits m², 141.9 and 144.4 g fruit⁻¹, for Gvs and Alpha Garden, respectively (Figure 3).

Discussion

Si is considered a non essential element. Literature reports beneficial effects in plants when applied under stress conditions (Epstein 1999, Ma 2004, Liang *et al.* 2007, Mateos-Naranjo *et al.* 2013, Mahbod *et al.* 2015). Furthermore, there are reports which findings indicate that Si fertilization can be useful to mitigate salt stress (NaCl) in different crops such as rice (Yeo *et al.* 1999, Ma 2004), wheat (Gong *et al.* 2005), sorghum (Hattori *et al.* 2005), barley (Liang *et al.* 2006) and maize (Parveen y Ashraf 2010). Also, Khan (2018) reported that salinity mitigation by Si is mainly attributed to a decrease of Na⁺ concentration in buds and roots from the crops. The presence of Na⁺ y Cl⁻ salts in soil and plant causes an osmotic stress and ionic toxicity (Munns y Tester 2008). In this study the salinity increase in nutrient solution, was made by increasing macro and micronutrient concentration but not by increasing Na⁺. This is probably one of the reasons that could explain a lack of response of Si application to any of the response variables in this study.

It is well known that Fv/Fm is linked with leaf photosynthetic efficiency (Shangguan *et al.* 2000). Consequently, it is used to determine the damage in the photosynthetic apparatus caused by stress. In the same manner, Maghsoudi *et al.* (2015) reported a decrease of Fv/Fm under salt stress condition. They relate the effect with a lower efficiency in energy transfer from the antennas and/or inhibition in the activity of the PSII reaction center. Despite that an electrical conductivity of 4 dS m⁻¹ is considered high for cucumber crop (Wan *et al.*, 2010), in this study Fv/Fm, Fo y Fm were stable at noon. This variable only showed slight variations between noon and sunset, in which the values recorded were slightly higher at noon. This indicates that photosynthetic apparatus was not affected in any moment. These results differs from those of Cao *et al.* (2015) who reports that such situations could be caused when chlorophyll degradation does not increase and/or electron transfer rate inside the tissue is drastically reduced. Some others like Al-Aghabary *et al.* (2004), and Hattori *et al.* (2005) found that Si fertilization in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) and sorghum

(*Sorghum bicolor*) increased stomatal conductance, rate of CO₂ assimilation and transpiration rate, as compared to Si untreated plants. However, our results show that application of Si did not mitigate the decrease in stomatal conductance under salinity conditions. The values obtained in plants grown at 4.0 dS m⁻¹ resulted in almost half from the plants grown at 2.5 dS m⁻¹. This suggests that under the actual experimental conditions of this study, Si did not protect PSII from excess energy caused by salinity (Al-Aghabary *et al.*, 2004; Hattori *et al.*, 2005). Therefore, crop growth or yield were not affected by Si application under salinity stress. Our findings contrasting with those found by Zamani *et al.* (2017). They established that Si could alleviate salinity effects on *Cicer arietinum* production through increasing of plant growth and development.

It can be concluded that most studies conducted with Si are conducted with the purpose of mitigating stress conditions caused by Na⁺ salinity. More research is needed to evaluate the effect of salinity induced by using nutritive standard solutions, which do not include Na⁺.

References

- Abbas, T., R.M. Balal, M.A. Shahid, M.A. Pervez, C.M. Ayyub, M.A. Aqueel, 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiol Plant.*, 37: 6–21.
- Ahmed, C.B., B.B. Rouina, S. Sensoy, M. Boukhris, F.B. Abdallah, 2009. Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 67: 345-352.
- Al-Aghabary, K., Z. Zhu, Q. Shi, 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and anti-oxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Plant Nutrition*, 27: 2101-2115.
- Ashraf, M. and P.J.C. Harris, 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51: 163–190.
- Ashraf, M., Rahmatullah, M. Afzal, R. Ahmed, F. Mujeeb, A. Sarwar, L. Ali, 2010. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant Soil*, 326: 381-391.
- Brugnoli, E. and M. Lauteri, 1991. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt-tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C₃ non-halophytes. *Plant Physiol.*, 95: 628–635.
- Cao, B., M. Qiang, Q. Zhao, L. Wang, and K. Xu, 2015. Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Horticulturae*, 194: 53–62.

- Chen, W., X. Yao, K. Cai, and J. Chen, 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biol. Trace Elem. Res.*, 142: 67–76.
- Epstein, E., 1999. Silicon, Annual review of plant physiology and plant molecular biology 50: 641–64.
- Epstein, E., 2009. Silicon: its manifold role in plants. *Annals of Applied Biology*, 155: 155–160.
- Gong, H.J., D.P. Randall, and T.J. Flowers, 2006. Silicon deposition in the root reduce uptake in rice (*Oryza sativa L.*) seedling by reducing bypass flow. *Plant, Cell & Environment*, 29:1970–1979.
- Gong, H., X. Zhu, K. Chen, S. Wang, and C. Zhang, 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 2: 313–321.
- González M., V. Perales, and A. Salcedo, 2008. La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Rev. Educación Bioquímica*. 27:4:119-129.
- Gómez H.T., and F.D. Sánchez, 2003. Soluciones nutritivas diluidas para la producción de jitomate a un racimo. *Terra Latinoamericana* 21(1):57-63.
- Gupta, B. and B. Huang, 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*.
- Hajiboland, R., A. Aliasgharzadeh, S.F. Laiegh, and C. Poschenrieder, 2010. Colonization with Arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum L.*) plants. *Plant and Soil*, 331: 313–327.
- Hattori, T.S. Inanaga, H. Araki, P. An, S. Morita, M. Luxová, and A. Lux, 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 123: 459–466.
- Horie, T.I. Karahara, and M. Katsuhara, 2012. Salinity tolerance mechanisms in

- glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice Science*, 5: 11-24.
- Kaur, S., N. Kaur, K.H.M. Siddique, and H. Nayyar, 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62: 905–920.
- Kazunori, T. and J.F. Ma, 2003. Characterization of silicon uptake by rice roots. *New Phytologist*, 158: 431–436.
- Khan W.U.D., T. Aziz, M.A. Maqsood, M. Farooq, Y. Abdullah, P.M.A. Ramzani, and H.M. Bilal, 2018. Silicon nutrition mitigates salinity stress in maize by modulating ion accumulation, photosynthesis, and antioxidants. *Photosynthetica*, 56: 1047–1058.
- Li, H., Y. Zhu, Y. Hu, W. Han, and H. Gong, 2015. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiol Plant.*, 37: 1-9.
- Liang, Y., W. Zhang, Q. Chen, Y. Liu, and R. Ding, 2006. Effects of exogenous silicon (Si) on H⁺ ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 57: 212–219.
- Liang, Y., W. Sun, Y.G. Zhu, and P. Christie, 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147: 422-428.
- Ma, J.F., 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50: 11-18.
- Ma, J.F. and N. Yamaji, 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Science*, 65: 3049-3057.
- Maghsoudi, K., E. Yahya, and A. Muhammad, 2015. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water

- stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. *Turk. J. of Bot.*, 39: 1407-11.
- Mahbod, S., M.M. Hanafi, A.S.N. Akmar, M.Y. Rafii, P. Azizi, F.F. Tengoua, J.N.M. Azwa, and M. Shabanimofrad, 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *Bio. Med. Research International*, 2: 396-010.
- Mateos-Naranjo, E., L. Andrades-Moreno, and A.J. Davy, 2013. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63: 115–121.
- Mehta, P., V. Kraslavsky, S. Bharti, S.I. Allakhverdiev, and A. Jajoo, 2010. Analysis of salt-stress induced changes in photosystem II heterogeneity by prompt fluorescence and delayed fluorescence in wheat (*Triticum vulgare*) leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2: 308-313.
- Milne, C.J., C.P. Laubscher, P.A. Ndakidemi, J.L. Marnewick and F. Rautenbach, 2012. Salinity induced changes in oxidative stress and antioxidant status as affected by applications of silicon in lettuce (*Lactuca sativa*). *Int. J. Agric. Biol.*, 14: 763–768
- Munns, R. and M. Tester, 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651-681.
- Naumann, J.C., S.N. Bissett, D.R. Young, J. Edwards, and J.E. Anderson, 2010. Diurnal patterns of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and PRI to evaluate water stress in the invasive species, *Elaeagnusum bellata*. *Trees Journal*, 24: 237–245.
- Ouzounidou, G., A. Giannakoula, I. Ilias, and P. Zamanidis, 2016. Alleviation of drought and salinity stresses on growth, physiology, biochemistry and quality of two (*Cucumis sativus* L.) cultivars by Si application. *Braz. J. Bot.*, 39: 531-539.
- Parvaiz, A. and S. Satyawati 2008. Salt stress and phytochemical physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant Biology*, 40: 1041–1052.
- Parveen, N. and M. Ashraf, 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt

- stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays L.*) cultivars grown hydroponically. *Pak. J.Bot.*, 42: 1675–1684.
- Plaut, Z., M. Edelstein and M. Ben-Hur, 2013. Overcoming salinity barriers to crop production using traditional methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32: 250-291.
- Rahimi, R., A. Mohammakhani, V. Roohi, and N. Armand, 2012. Effects of salt stress and silicon nutrition on chlorophyll content, yield and yield components in fennel *Foeniculum vulgare Mill.* *Intl J. Agri and Crop Sci.*, 21: 1591-1595.
- Rivero, R.M., T.C. Mestre, R. Mittler, F. Rubio, F. Garcia-Sánchez, and V. Martinez, 2014. The combined effect of salinity and heat reveals a specific physiological, biochemical and molecular response in tomato plants. *Plant, Cell and Environment*, 37:1059-1073.
- Rizwan, M., S. Ali, M. Ibrahim, M. Farid, M. Adrees, S.A. Bharwana, M. Zia-ur-Rehman, M.F. Qayyum, and F. Abbas, 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: A review. *Environ Sci and Pollut Res.*, 22: 15416–15431.
- Romero-Aranda, M.R., O. Jurado, and J. Cuartero, 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, 163: 847-855.
- Shahid, M.A., M.A. Pervez, R.M. Balal, R. Ahmad, C.M. Ayyub, and T. Abbas, N. Akhtar, 2011. Salt stress effects on some morphological and physiological characteristics of okra (*Abelmoschus esculentus L.*). *Soil environment*, 1: 66-73.
- Shangguan, Z.P., M.A. Shao, and J. Dyckmans, 2000. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat. *Journal of Plant Physiology*, 156: 46–51.
- Shi, Y., Y. Zhang, W. Han, R. Feng, Y. Hu, J. Guo, and H. Gong, 2016. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum*

- lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, 7: 196-211.
- Shibuya, T., K. Kano, R. Endo and Y. Kitaya, 2017. Effects of the interaction between vapor-pressure deficit and salinity on growth and photosynthesis of *Cucumis sativus* seedlings under different CO₂ concentrations. *Photosynthetica*, 1-8.
- Tang, X., X. Mu, H. Shao, H. Wang, and M. Brestic, 2015. Global plant-responding mechanisms to salt stress: Physiological and molecular levels and implications in biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35: 425–437.
- Wan, S., Y. Kang, D. Wang, and S. Liu, 2010. Effect of saline water on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and water use under drip irrigation in North China. *Agricultural Water Management*, 98: 105-113.
- Wang, S., P. Liu, D. Chen, L. Yin, H. Li and X. Deng, 2015. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in Plant Science*, 6: 759- 769.
- Xu, C.X., Y.P. Ma, and Y.L. Liu, 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany*, 98: 26–36.
- Yeo, A.R., S.A. Flowers, G. Rao, K. Welfare, N. Senanayake, and T.J. Flowers, 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpiration bypass flow. *Plant Cell & Environment*, 22: 559–565.
- Zamani, G.R., J. Shaabani and A. Izanloo, 2017. Silicon effects on the growth and yield of chickpea under salinity stress. *Int. J. Agric. Biol.*, 19: 1475–1482
- Zhu, Z., G. Wei, J. Li, Q. Qian, and J. Yu, 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*, 167: 527–533.
- Zobayed, S.M.A., F. Afreen, and T. Kozai, 2005. Temperature stress can alter the photosynthetic efficiency and secondary metabolite concentrations in St. John's Wort.

Table 1. Environmental conditions during the experiment.

Environmental conditions	Temperature (°C)	Relative humidity (RH %)	Salinity (dS m ⁻¹)
Low temperature, high relative humidity and low salinity	35	43	2.5
High temperature, high relative humidity and low salinity	38	26	2.5
Low temperature, high relative humidity and high salinity	34	44	4.0
High temperature, low relative humidity and high salinity	37	28	4.0

Table 2. Leaf temperature, maximum photochemical efficiency of the PSII (Fv/Fm), minimal fluorescence (Fo), maximum fluorescence (Fm) and stomatal conductance (g_s) in two cultivars of cucumber and Si application under low (2.5 dS m⁻¹) and high salinity conditions (4 dS m⁻¹).

Treatment	Environmental conditions 35-38 °C, 26-43% RH and 2.5 dS m ⁻¹				
Si rates (g L ⁻¹ ; S)	Leaf temperature (°C)	Fv/Fm	Fo	Fm	g _s (mmol m ⁻² s ⁻¹)
0	30.78	0.784	328.68	1542.74	1088.45
4	31.06	0.785	333.82	1515.93	1039.94

8	30.84	0.786	338.75	1563.36	1123.07
Probability	0.827	0.453	0.119	0.572	0.136
Cultivar (C)					
Gvs	30.89	0.785	329.27	1558.12	1032.72
Alpha Garden	30.93	0.786	334.57	1452.73	1057.03
Probability	0.683	0.339	0.067	0.126	0.142
Interaction					
S*C Probability	0.740	0.391	0.745	0.656	0.152
Environmental conditions 34-37 °C, 28-44% RH and 4.0 dS m ⁻¹					
Si rates (g L ⁻¹)	Leaf temperature (°C)	Fv/Fm	Fo	Fm	g _s (mmol m ⁻² s ⁻¹)
0	30.86	0.777	327.36	1491.31	478.72
4	31.02	0.781	322.19	1481.02	494.02
8	30.78	0.778	330.38	1511.48	509.04
Probability	0.876	0.424	0.137	0.411	0.158
Cultivar (C)					
Gvs	30.75	0.780	332.67	1537.28	472.46
Alpha Garden	30.81	0.779	321.06	1492.61	501.32
Probability	0.711	0.313	0.179	0.624	0.187
Interaction					
S*C Probability	0.688	0.366	0.770	0.622	0.114

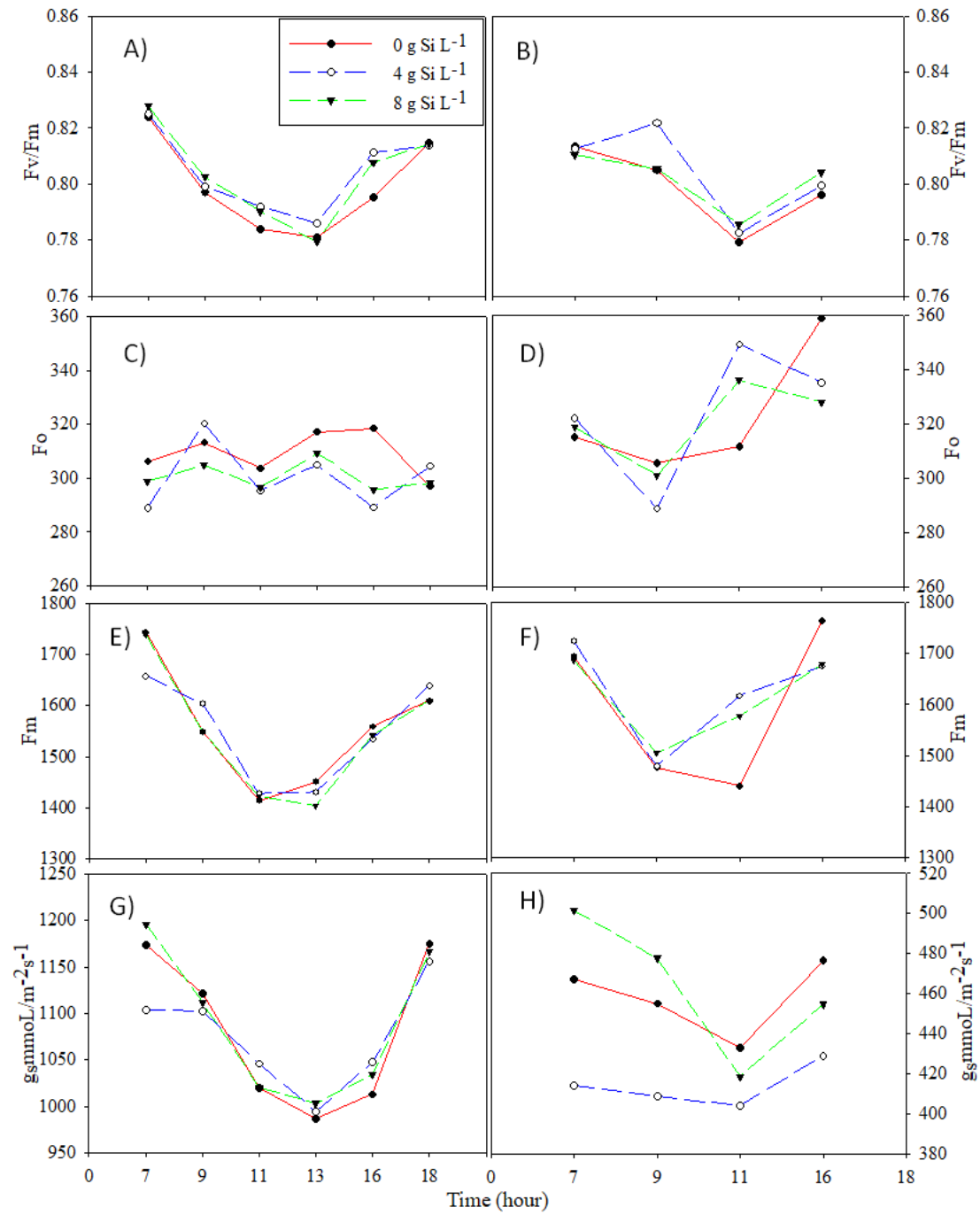


Figure 1. Diurnal variation of Fv/Fm, Fo, Fm, gs in cucumber cultivated under two salinity levels (A, C, E, G: 2.5 dS m⁻¹; B, D, F, H: 4.0 dS m⁻¹) and three Si rates.

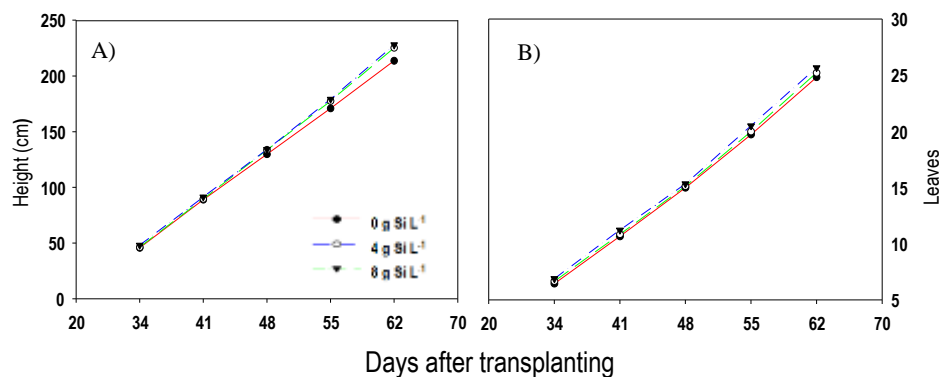


Figure 2. Height (A) and leaves number (B) in cucumber by effect of three rates of Si.

Table 3. Yield and fruit number in cucumber by harvest number by effect of Si.

Treatment	Yield (kg m ²)				
	1st harvest	2nd harvest	3rd harvest	4th harvest	5th harvest
Si rates (g L ⁻¹ ; S)					
0	1.36	3.69	5.41	7.79	10.47
4	1.39	3.71	5.66	7.49	10.69
8	1.41	3.75	5.56	7.56	10.80
Probability	0.538	0.406	0.611	0.136	0.552
Cultivar (C)					
Gvs	1.38	3.79	5.79	7.65	10.79
Alpha Garden	0.87	1.65	3.61	5.85	8.83
Probability	0.044	0.030	0.023	0.041	0.047
Interaction					

S*C Probability	0.581	0.321	0.416	0.754	0.185
Fruit number (kg m ²)					
Si rates (g L ⁻¹)	1st harvest	2nd harvest	3rd harvest	4th harvest	5th harvest
0	18	28	31	37	46
4	26	15	49	39	39
8	18	16	44	45	44
Probability	0.463	0.718	0.636	0.477	0.348
Cultivar (C)					
Gvs	37	35	68	70	73
Alpha Garden	25	24	56	51	56
Probability	0.104	0.069	0.116	0.050	0.082
Interaction					
S*C Probability	0.236	0.149	0.229	0.117	0.191

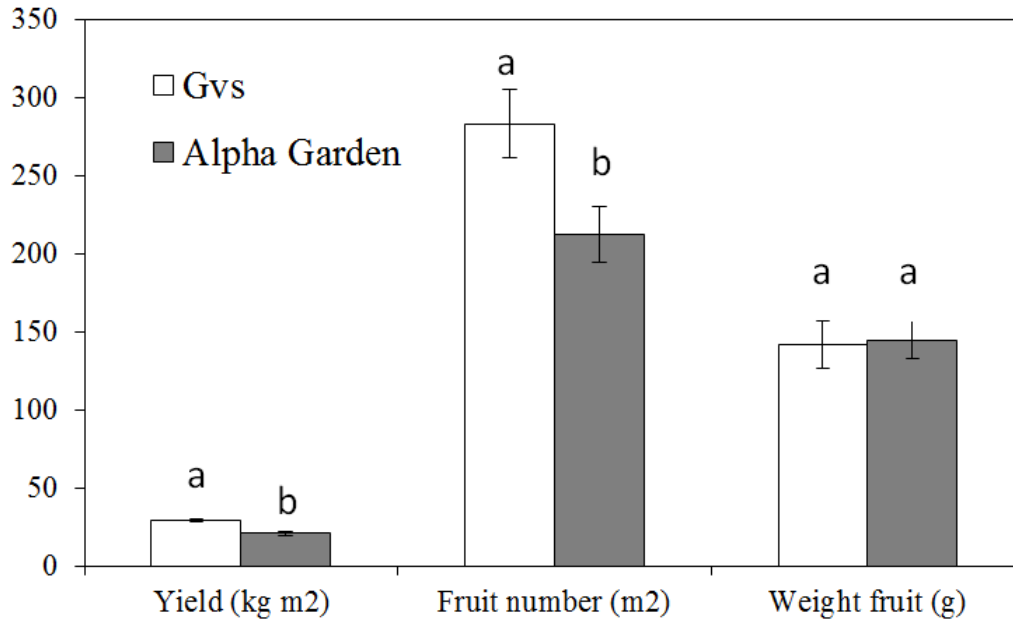


Figure 3: Total yield (kg m²), fruit number (m²) and weight fruit (g) in two cultivars of cucumber.

3.2 Respuesta fisiológica diurna del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de silicio bajo condiciones de salinidad

Pedro Iván López-Cuén^{1,2}

Daniel González-Mendoza²

Onésimo Grimaldo-Juárez²

María Isabel Escobosa-García²

Fidel Núñez-Ramírez^{2§}

Roberto Soto-Ortíz²

Cristina Ruiz-Alvarado²

¹Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Carretera Culiacán-El Dorado Km 17.5, Culiacán, Sinaloa, México. C.P. 80000. (lopezcuen13@hotmail.com).

²Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n Ejido Nuevo León, Baja California, México. C.P. 21705. (daniasaf@gmail.com; onecimo.grimaldo@uabc.edu.mx; isabel.escobosa@uabc.edu.mx; fidel.nunez@uabc.edu.mx; mariacristina@uabc.edu.mx; roberto_soto@uabc.edu.mx).

§Autor para correspondencia: fidel.nunez@uabc.edu.mx

Resumen

Actualmente la salinidad (S) es una problemática en la productividad agrícola, perturbando los procesos fisiológicos y morfológicos en las plantas, una alternativa es el uso de silicio (Si). El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la nutrición con Si sobre la temperatura de las hojas, la eficiencia fotoquímica y conductancia estomática en tomate en el cultivar Amalia tipo saladette cultivado en invernadero bajo condiciones de estrés salino. El experimento se realizó durante el ciclo primavera-verano 2017 en el Valle de Mexicali, Baja California, México. Se utilizó un diseño de parcelas divididas distribuidas al azar, la parcela grande fue el factor uno en la cual la salinidad inducida fue con cloruro de sodio (NaCl) o solución nutritiva estándar (SNS) y la parcela chica el factor dos fueron tres concentraciones de Si (0, 4, 8 g L⁻¹). Los resultados mostraron un efecto significativo en la interacción entre Si × S en la eficiencia fotoquímica y conductancia estomática, contrario a la temperatura de la hoja la cual no mostró efecto significativo ($P > 0.05$). Se concluyó que la fertilización con Si mitigó el daño de estrés salino en el aparato fotosintético, incrementando la eficiencia fotosintética de la planta y una mejor asimilación de CO₂.

Palabras clave: estrés abiótico, fluorescencia, fotosíntesis, nutrición mineral.

Introducción

La salinidad del suelo es el principal factor abiótico limitante en la productividad de los cultivos agrícolas especialmente en las regiones áridas y semiáridas debido a las bajas precipitaciones, altas temperaturas y alta evapotranspiración, además de las malas prácticas de manejo de suelo y agua (Munns y Tester, 2008). Alrededor del 20% del área total cultivable se ve afectada por este factor con un incremento del 1 a 2% anual por altas concentraciones de sales (Munns y Tester, 2008; Plaut *et al.*, 2013; Rizwan *et al.*, 2015). La salinidad afecta el crecimiento de la planta al asociarse con bajo potencial osmótico de la solución del suelo (estrés hídrico), estrés iónico y desequilibrio nutricional (Munns y Tester, 2008; Parvaiz y Satyawati, 2008; Horie *et al.*, 2012). Altas concentraciones de iones tóxicos como Na^+ y Cl^- forman un desequilibrio iónico en la célula de la planta, afectan los procesos fisiológicos y enzimáticos ocasionando alteraciones en el metabolismo y disminuyen la absorción de iones esenciales como K^+ y Ca^{2+} (Hajiboland *et al.*, 2010).

El estrés salino afecta principalmente el proceso de la fotosíntesis perjudicando el aparato fotosintético. No solo afecta la apertura y cierre de estomas, sino que también disminuye la asimilación de CO_2 (Mehta *et al.*, 2010; Ashraf y Harris, 2013; Gupta y Huang, 2014). Además, daña los pigmentos fotosintéticos incluidos la clorofila y los carotenoides, y el área foliar (Brugnoli y Lauteri, 1991; Gong *et al.*, 2005). Por otro lado, una respuesta inmediata de la planta cuando está expuesta a elevadas concentraciones de salinidad es el cierre estomático (Tang *et al.*, 2015).

Si bien, el cierre estomático implica una reducción de la fijación de CO_2 , bajo condiciones de fluorescencia puede producir sobreexcitación de los centros de reacción del PSII (Ahmed *et al.*, 2009; Ashraf y Harris, 2013). Así mismo, cuando las plantas están afectadas por altas concentraciones de salinidad, deterioran el complejo y los centros de reacción del PSII (Naumann *et al.*, 2010). De tal manera que estudiar el impacto de estrés abiótico como la salinidad, sequía, bajas y/o altas temperaturas en la eficiencia fotosintética de la planta, es a través de la medición de la fluorescencia de la clorofila (chl) (Zobayed *et al.*, 2005) y el intercambio gaseoso en las hojas (Shahid *et*

al., 2011; Li *et al.*, 2015).

La fluorescencia de la clorofila es una medida no destructiva, de manejo sencillo y respuesta inmediata. Este método proporciona información sobre la identidad de varios pigmentos, su estructura y las reacciones de transferencias de electrones específicas del fotosistema II (PSII) (Ashraf y Harris, 2013).

Hattori *et al.* (2005) encontraron una mayor tasa fotosintética, transpiración, conductancia estomática, mayor tamaño de estomas en plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) cultivadas bajo condiciones de estrés salino cuando fueron tratadas con Si, en comparación a plantas que no recibieron Si. Resultados similares se encontraron en cultivares de maíz (*Zea mays*) (Parveen y Ashraf, 2010) y en plantas de okra (*Abmoschus esculentus*) (Abbas *et al.*, 2015).

Por otro lado, Chen *et al.* (2011) reportaron un incremento en la eficiencia fotoquímica del PSII, tasa fotosintética y tasa de transpiración en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) fertilizadas con Si en condiciones de estrés salino. Por su parte, Wang *et al.* (2015) encontraron una mayor tasa fotosintética y transpiración, contenido de agua en las hojas y conductancia hidráulica de la raíz en plantas de pepino fertilizadas con Si en condiciones de salinidad. Resultados semejantes han sido reportados por Shi *et al.* (2016) en plantas de tomate. Todos estos investigadores concluyeron que el Si aplicado a los cultivos, indujo una disminución de Na^+ y un incremento en la concentración de K^+ en las hojas. Lo anterior sucedió debido a que el Si disminuyó la absorción de Na^+ al inducir la actividad de la membrana H^+ ATPasa de la membrana plasmática de la raíz (Xu *et al.*, 2015).

El Si es el segundo elemento mineral más abundante en el suelo después del oxígeno y forma el 31 % de la corteza terrestre (Gong *et al.*, 2006; Epstein, 2009). En la solución del suelo se encuentra en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) en concentraciones que van 0.1 a 0.6 mM (Epstein, 1999; Ma y Yamaji, 2008). El H_4SiO_4 es absorbido por las plantas y se transporta en la planta a través del xilema (Epstein, 1999; Kazunori y Ma, 2003). Posteriormente se deposita en la pared celular como sílice amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) interactuando con pectinas y calcio mejorando su rigidez y

resistencia (Epstein, 1999; Ma, 2004; Ma y Yamaji, 2008).

Las plantas contienen Si en concentraciones de 0.1 a 10 % peso seco (Ma y Yamaji, 2008). El Si actúa como una barrera física y mecánica en las plantas. No solo se deposita en las paredes celulares, sino que también participa en las actividades metabólicas y fisiológicas cuando las plantas están en condiciones de estrés (Ma, 2004; Liang *et al.*, 2007). Aunque, el Si no se considera un elemento esencial para el crecimiento y metabolismo de las plantas, es benéfico en condiciones estresantes (Liang *et al.*, 2007; Ma y Yamaji, 2008; Epstein, 2009; Kaur *et al.*, 2016). Algunos autores han reportado tolerancia a la salinidad mediante la fertilización de Si en diferentes cultivos como arroz, trigo (*Triticum durum*), tomate, pepino, cebada (*Hordeum vulgare* L.).

La mayor parte de Si se deposita en las células epidérmicas de las raíces, hojas y tallos aminorando la absorción de Na^+ por las raíces, el Si disminuye la permeabilidad de las membranas celulares al Na^+ , resultando en un bajo nivel de Na^+ y alto nivel de K^+ en el citosol (Gong *et al.*, 2006). La función del Si reduce la absorción de Na^+ disminuyendo la transpiración en arroz (Yeo *et al.*, 1999; Gong *et al.*, 2006), mejora el estado hídrico del tomate (Romero-Aranda *et al.*, 2006), incrementa la actividad enzimática antioxidante en pepino (Zhu *et al.*, 2004) y aumenta la actividad de la H^+ ATPasa de la membrana plasmática en la cebada (Liang *et al.*, 2006). El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la nutrición con Si en tomate cultivado bajo condiciones de estrés salino inducido con NaCl, sobre la temperatura de las hojas, la eficiencia fotoquímica y la conductancia estomática.

Materiales y métodos

Establecimiento del experimento y condiciones ambientales

El experimento se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California ubicado en el Ejido Nuevo León,

Mexicali en el periodo comprendido de marzo a junio de 2017. Se utilizó un invernadero de cubierta con techo de policarbonato de baja tecnología, sin control de temperatura y sin calefacción. Se utilizó el cultivar de tomate Amalia tipo saladette. El trasplante se realizó el día 31 de marzo utilizando dos plantas por macetas de 9.0 L. El sustrato empleado fue arena y la aplicación de la solución nutritiva fue a través de riego presurizado tipo espaguete.

Diseño experimental

Para la distribución de los tratamientos se utilizó un diseño de parcelas divididas, distribuidas completamente al azar con cinco repeticiones. Se establecieron 20 parcelas experimentales con 12 plantas por parcela útil. La parcela grande fue el factor uno (12 plantas) con dos condiciones de salinidad a valor de 4 dS m^{-1} denominadas SNS y solución salina inducida con NaCl. La parcela chica el factor dos (4 plantas) fue la nutrición con Si (0, 4, 8 g L^{-1} de SiO_2 ; Diatomix, Bio Agrinor[®], Zapopan, Jalisco México).

Manejo de los tratamientos

La SNS utilizada fue la recomendada por Gómez y Sánchez (2003) y en ella se manejaron las siguientes concentraciones de nutrientes N 224, P 47, K 281, Ca 212, Mg 65, Fe 2, Mn 0.55, Zn 0.33, Cu 0.05, B 0.28 y Mo 0.05 mg L^{-1} . Al momento del trasplante a todas las parcelas se les aplicó una SNS diluida en agua hasta alcanzar a una conductividad eléctrica de 2.0 dS m^{-1} . Posteriormente a los 15 días después del trasplante se inició la aplicación de los tratamientos. Para el factor uno, en las parcelas del tratamiento SNS, se realizó un incremento gradual por dos días en la concentración de los macro y micronutrientes hasta alcanzar un valor de salinidad de 4.0 dS m^{-1} . Lo mismo sucedió en el tratamiento salinidad con NaCl. El incremento en la salinidad de la solución se logró al agregar además de la SNS a una conductividad eléctrica de 2.0 dS m^{-1} , la cantidad de $\approx 2.6 \text{ g L}^{-1}$ de NaCl y alcanzar el valor de 4 dS m^{-1} . Por otro lado, las dosis de Si se aplicaron diariamente en forma manual a las 12:00 del mediodía.

El drenaje de los riegos se ajustó a 30%, mientras que el pH de la solución nutritiva se mantuvo entre 5.5-6.0 unidades. Durante el tiempo que duró el experimento, la humedad relativa del invernadero se consiguió mojando el piso con agua corriente a las 10:00 y 14:00 horas. La temperatura máxima dentro del invernadero a las 15 horas del día alcanzó los 45 °C y la humedad relativa a esa misma hora fue de 14.5%, y fueron monitoreadas usando un termohigrómetro digital CEM DT-172 (Twin Light Instruments, Monterrey, México) colocado a 20 cm justo por encima de las plantas (Figura 1).

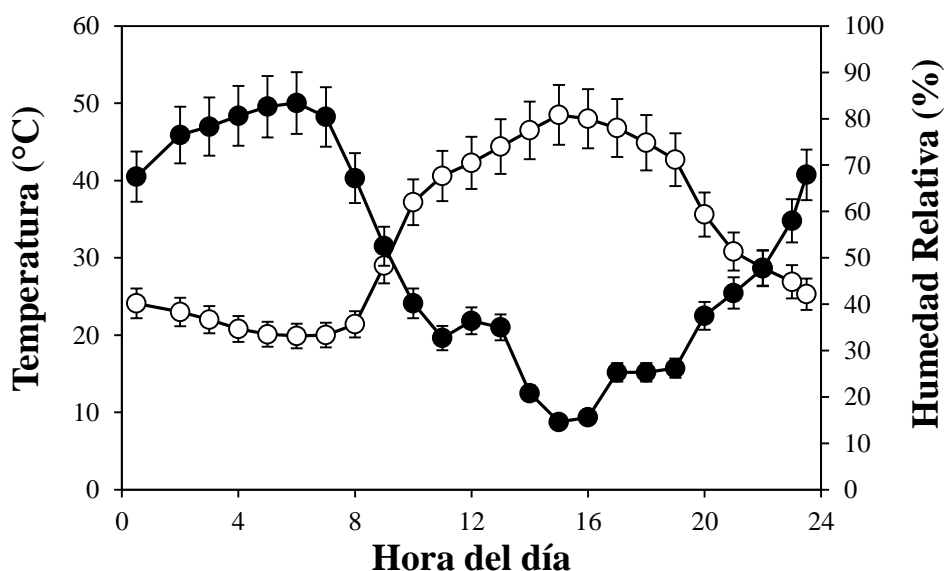


Figura. Condiciones ambientales dentro del invernadero (○= Temperatura (°C);●= Humedad relativa).

Variables evaluadas

Las variables fisiológicas evaluadas fueron temperatura foliar, eficiencia fotoquímica y conductancia estomática. Las mediciones se realizaron a las 9, 11, 13, 15 y 17 horas del día a los 34 días después del trasplante. Para todas las variables se utilizó como referencia la cuarta o quinta hoja contabilizada del ápice hacia abajo. Todas las mediciones se realizaron sobre tres plantas por tratamiento.

Temperatura foliar

La temperatura foliar se determinó con un termómetro digital infrarrojo de pistola láser (DAN-tronics modelo P045440, México). Las mediciones se realizaron a una distancia de 20 centímetros entre el sensor y la hoja.

Eficiencia fotoquímica

La eficiencia fotoquímica máxima del PSII (F_v/F_m), fluorescencia mínima (F_o) y fluorescencia máxima (F_m) se determinó con un fluorómetro portátil (Chlorophyll Fluorometer OS-30p, OPTI-SCIENCE, USA) usando una intensidad de luz actínica de $2100 \mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de intensidad por un periodo de 2 segundos. Previo a la determinación, las hojas fueron aclimatadas por 30 minutos de oscuridad con pinzas de exclusión de luz para asegurar que todos los centros de reacción estuvieran abiertos (González *et al.*, 2008).

Conductancia estomática (g_s)

La conductancia estomática se determinó con un porómetro de hoja modelo SC-1 Decagon Devices, Inc. (SC-1 Leaf Porometer®, Pullman WA, USA).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante el programa estadístico MINITAB 17. Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba Tukey ($P \leq 0.05$).

Resultados y discusión

Temperatura de la hoja

No se identificó una respuesta en la temperatura de las hojas del cultivo de tomate por la interacción Si × S ($P > 0.05$). Así mismo, la adición de Si tampoco mostró algún efecto significativo sobre la temperatura de las hojas en todos los tratamientos ($P > 0.05$). Sin embargo, los tratamientos de salinidad sí mostraron respuesta al incremento de temperatura de las hojas ($P < 0.05$). A las 9:00 h del día, la aplicación de NaCl, incrementó en más de 2 °C la temperatura de la hoja que las plantas tratadas con salinidad inducida por SNS, mientras que a las 13:00 y 17:00 h en efecto se invirtió. En este sentido, la salinidad inducida por la SNS incrementó en 3 y 0.4 °C la temperatura de la hoja respectivamente.

El incremento de temperatura foliar en el tratamiento SNS indicaría que el cultivo no alcanzó a refrescarse por medio de la transpiración (Shahenshah e Isoda, 2010). Lo mismo sucede cuando el cultivo es sometido a estrés hídrico por falta de agua en el sustrato o por un escaso sistema radicular (Sánchez-Blanco *et al.*, 2014).

Eficiencia fotoquímica máxima del PSII (Fv/Fm)

El Cuadro 2 muestra los resultados de eficiencia fotoquímica máxima del PSII (Fv/Fm) por efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad. La interacción Si × S fue significativa alrededor del mediodía, desde las 11:00 a las 15:00 h ($P \leq 0.004$). A ese mismo horario, la aplicación de Si tuvo efecto significativo sobre la Fv/Fm de las hojas de las plantas de tomate ($P \leq 0.005$). Por otra parte, durante todo el día, la salinidad causada por la SNS afectó significativamente la Fv/Fm ($P \leq 0.001$) en comparación con la salinidad provocada por NaCl.

La reducción en los valores de Fv/Fm en las plantas sometidas a salinidad con NaCl, indicaría una reducción en la eficiencia fotoquímica del PSII y una perturbación o daños en el aparato fotosintético causado por la salinidad específica del NaCl y no por la provocada por la SNS (Jiménez-Suanca *et al.*, 2015). Por otro lado, los valores menores de Fv/Fm se encontraron a dosis mayores de Si. Estos resultados concuerdan

con aquellos reportados por Cao *et al.* (2015), quienes al aplicar Si a plántulas de tomate sometidas a estrés salino, encontraron que conforme el tiempo avanzaba, los valores de Fv/Fm resultaban menores que aquellos obtenidos en plantas sin adición de Si.

Fluorescencia mínima (Fo)

El Cuadro 3, muestra el efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad sobre la Fo en hojas de tomate hidropónico. Se encontró un efecto significativo en la interacción Si interactivo entre Si x S en la mayor parte del día ($P < 0.001$). Así mismo, conforme se incrementó la dosis de Si, los valores de Fo se incrementaron la mayor parte del día. Para el caso del factor salinidad, temprano y por la tarde del día, el tratamiento NaCl, incrementó en alrededor de un 10% los valores de Fo. El aumento de la Fo en las plantas con NaCl, pudo haber sido causado por algún daño ocurrido en los centros de reacción del PSII o debido a una posible reducción en la capacidad de transferencia de excitación de las antenas a los centros de reacción (Baker, 2008; Ogaya *et al.*, 2011). Khan *et al.* (2016) mencionan que un aumento en Fo ha demostrado ser un síntoma de daño en el centro de reacción del PSII, lo que resulta en una reducción de la luz absorbida y un aumento posterior en la luz emitida no utilizada. Datos contradictorios son los reportados por Maghsoudi *et al.* (2015) quienes estudiaron la Fo sobre la aplicación de Si en trigo sometido a estrés hídrico. Ellos explican que el estrés provocado por la falta de agua disminuyó los valores de Fo. En nuestro experimento se presentó la tendencia contraria.

Fluorescencia máxima (Fm)

El Cuadro 4 muestra los valores de la Fm encontrados al aplicar Si y dos formas de salinidad. Se identificó interacción significativa ($P < 0.003$) a los factores Si x S en horario de las 9:00 y 15:00 h del día. Lo mismo sucedió con el factor Si. Por otra parte, el efecto de la salinidad sobre la Fm fue mayor en el tratamiento SNS la mayor parte del día ($P < 0.001$). Este incremento en los valores de Fm, es un reflejo de la reducción

de "cierre" de los centros de reacción del PSII (González *et al.*, 2008), lo que a su vez implica una mayor activación de las reacciones fotoquímicas (Jiménez-Suanca *et al.*, 2015). Lo anterior refuerza la hipótesis de que el daño por salinidad presentado en los cultivos es resultado de la utilización del NaCl más que por una solución nutritiva balanceada.

Conductancia estomática (g_s)

El Cuadro 5 muestra el efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad sobre la g_s en hojas de tomate hidropónico. Solamente al final del día se encontró una interacción Si \times S a la g_s ($P < 0.037$). El Si por sí solo, disminuyó significativamente ($P < 0.002$) la g_s solamente a las 9:00 h del día. Mientras que la salinidad provocada por la adición de NaCl, incrementó la g_s en temprano por la mañana y por la tarde en alrededor de $120 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Contrario a nuestro estudio, Savvas *et al.* (2009) encontraron que la fertilización con Si promovió un incremento en la g_s en plantas de calabacín (*Cucurbita pepo* L. cv. 'Rival') cuando fueron sometidas a una salinidad de 6.2 dS m^{-1} , con NaCl. Por su parte Romero-Aranda *et al.*, (2006) no encontraron diferencias en la g_s de plántulas de tomate cuando aplicaron diferentes combinaciones de NaCl y Si en soluciones nutritivas Hoagland a la aplicación de Si. Sin embargo, cuando las plantas cultivadas bajo salinidad (NaCl) fueron tratadas con Si, el contenido de agua en ellas incrementó en un 40%.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad (SNS y NaCl) sobre la temperatura de la hoja de tomate hidropónico.

Factor	9:00 h	11:00 h	13:00 h	15:00 h	17:00 h
Temperatura (°C)					
Silicio (Si)					
0	31.80	34.76	38.38	36.74	35.79
4	31.59	34.85	38.30	36.72	35.67
8	31.33	34.91	38.35	36.64	35.70
Probabilidad	0.720	0.938	0.718	0.954	0.537
Salinidad (S)					
SNS 4.0 dS m ⁻¹	30.43	34.62	39.84	36.82	35.92
NaCl 4.0 dS m ⁻¹	32.71	35.06	36.85	36.58	35.51
Probabilidad	<0.001	0.212	<0.001	0.414	<0.001
Si × S Probabilidad	0.790	0.775	0.594	0.963	0.950

Cuadro 2. Efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad (SNS y NaCl) sobre la eficiencia fotoquímica máxima del PSII (Fv/Fm) en hojas de tomate hidropónico.

Factor	9:00 h	11:00 h	13:00 h	15:00 h	17:00 h
Fv/Fm					
Silicio (Si)					
0	0.750	0.741	0.672	0.749	0.734
4	0.742	0.714	0.713	0.726	0.729
8	0.741	0.683	0.624	0.695	0.727
Probabilidad	0.364	< 0.001	0.002	0.005	0.615
Salinidad (S)					
SNS 4.0 dS m ⁻¹	0.821	0.797	0.745	0.795	0.815

NaCl 4.0 dS m ⁻¹	0.667	0.628	0.595	0.652	0.646
Probabilidad	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Si x S Probabilidad	0.146	< 0.001	< 0.001	< 0.004	0.134

Cuadro 3. Efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad (SNS y NaCl) sobre la fluorescencia mínima (Fo) en hojas de tomate hidropónico.

Factor	9:00 h	11:00 h	13:00 h	15:00 h	17:00 h
	Fo				
Silicio (Si)					
0	252.7	248.1	267.6	225.7	208.0
4	264.2	255.1	257.5	229.5	202.0
8	342.4	364.9	336.5	226.0	236.6
Probabilidad	< 0.001	< 0.001	0.003	0.913	0.007
Salinidad (S)					
SNS 4.0 dS m ⁻¹	263.5	252.7	272.0	225.2	205.0
NaCl 4.0 dS m ⁻¹	309.3	326.0	302.3	229.0	226.1
Probabilidad	0.019	0.004	0.094	0.651	0.020
Si x S Probabilidad	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.409	< 0.001

Cuadro 4. Efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad (SNS y NaCl) sobre la fluorescencia máxima (Fm) en hojas de tomate hidropónico.

Factor	9:00 h	11:00 h	13:00 h	15:00 h	17:00 h
	Fm				
Silicio (Si)					
0	1335.9	1155.3	1057.4	1010.1	1089.0
4	1298.7	1099.8	966.7	914.1	1037.9
8	1440.8	1172.8	956.2	1043.6	1067.5
Probabilidad	0.016	0.278	0.083	0.003	0.687
Salinidad (S)					
SNS 4.0 dS m ⁻¹	1472.3	1257.6	1099.3	1122.5	1114.4
NaCl 4.0 dS m ⁻¹	1244.7	1027.7	1087.3	856.0	1015.2
Probabilidad	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.053
Si × S Probabilidad	0.007	0.392	0.088	0.003	0.221

Cuadro 5. Efecto de la aplicación de Si y dos formas de salinidad (SNS y NaCl) sobre la conductancia estomática en hojas de tomate hidropónico.

Factor	9:00 h	11:00 h	13:00 h	15:00 h	17:00 h
	(mmol m ⁻² s ⁻¹)				
Silicio (Si)					
0	810.2	915.2	953.0	873.4	796.8
4	794.7	912.0	967.9	948.2	703.4
8	640.5	833.3	991.6	887.1	732.4
Probabilidad	0.002	0.500	0.617	0.307	0.237
Salinidad (S)					
SNS 4.0 dS m ⁻¹	679.9	828.5	966.7	864.3	681.1
NaCl 4.0 dS m ⁻¹	817.0	945.2	975.0	941.5	807.4
Probabilidad	0.002	0.081	0.798	0.076	0.010
Si × S Probabilidad	0.712	0.539	0.793	0.070	0.037

Conclusiones

- Los resultados presentados mostraron que bajo condiciones de estrés salino, el suministro de Si podría mejorar el crecimiento de las plantas y aumentar el rendimiento cuántico máximo de PSII y conductancia estomática.
- Los efectos benéficos de la fertilización de Si sobre la fluorescencia de la clorofila y los pigmentos fotosintéticos manifiestan una mayor tolerancia a la salinidad en las plantas de tomate.
- La fluorescencia es una técnica empleada para obtener información relacionada con la influencia de algún tipo de estrés sobre el estado fisiológico del aparato fotosintético de las plantas, indicando daño o alteración.
- El Si podría ser una alternativa para mejorar la tolerancia a salinidad regiones áridas o semiáridas o en tierras agrícolas con problemas de sales específicamente iones tóxicos como Na, Cl.

Literatura citada

- Abbas, T.; Balal, R.M.; Shahid, M.A.; Pervez, M.A.; Ayyub, C.M.; Aqueel, M.A. 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiol Plant.*, 37: 6–21.
- Ahmed, C.B.; B.B. Rouina, S.; Sensoy, M.; Boukhris, F.B.; Abdallah. 2009. Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *environmental and experimental botany*, 67: 345-352.
- Ashraf, M. and Harris, P.J.C. 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51: 163–190.
- Baker, N.R. 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Ann. Rev. Plant Biol.* 59, 89-113. Doi: 10.1146/annurev.arplant
- Brugnoli, E. and Lauteri, M. 1991. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt-tolerant (*Gossypium hirsutum L.*) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris L.*) C₃ non-halophytes. *Plant Physiol.*, 95: 628–635.
- Chen, W.; Yao, X.; Cai, K.; Chen, J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biol Trace Elem Res.*, 142: 67–76.
- Cao, B.; Ma, Q.; Zhao, Q.; Wang, L.; Xu, Q. 2015. Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Horticulturae*, 194: 53-62.
- Epstein, E. 1999. Silicon, *Annual review of plant physiology and plant molecular biology* 50: 641–64.
- Epstein, E. 2009. Silicon: its manifold role in plants. *Annals of Applied Biology*, 155:

155–160.

- Gómez, H.T.; Sánchez, F.D. 2003. Soluciones nutritivas diluidas para la producción de jitomate a un racimo. *Terra Latinoamericana*, 21(1):57-63.
- Gong, H.J.; Randall, D.P.; Flowers, T.J. 2006. Silicon deposition in the root reduce uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedling by reducing bypass flow. *Plant, Cell & Environment*, 29:1970–1979.
- Gong, H.; Zhu, X.; Chen, K.; Wang, S.; Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 2: 313–321.
- González M.S.; Perales, H.V.; Salcedo, A.O.M. 2008. La fluorescencia de la clorofila a como una herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica*, 27(4): 119-129
- Gupta, B. and Huang, B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*. (2014) ID 701596, 1-18 <http://dx.doi.org/10.1155/2014/701596>
- Hajiboland, R.; Aliasgharzadeh, A.; Laiegh, S.F.; Poschenrieder, C. 2010. Colonization with Arbuscular mycorrhizal fungi improve salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Plant and Soil*, 331: 313–327.
- Hattori, T.S.; Inanaga, H.; Araki, P.; An, S.; Morita, M.; Luxova, A.; Lux. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 123: 459–466.
- Horie, T. I.; Karahara, M.; Katsuhara. 2012. Salinity tolerance mechanisms in glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice Science*, 5: 11-24.
- Jiménez-Suancha, S.C.; Alvarado, S.O.H; Balaguera-López, H.E. 2015. Fluorescencia como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9: 149-160.

- Kazunori, T. and Ma, J.F. 2003. Characterization of silicon uptake by rice roots. *New Phytologist*, 158: 431–436.
- Kaur, S.; Kaur, N.; Siddique, K.H.M.; Nayyar, H. 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62: 905–920.
- Khan, W.U.D.; Aziz, T.; Hussain, I.; Ramzani, P.M.A.; Reichenauer, T.G. 2016. Silicon: A beneficial nutrient for maize crop to enhance photochemical efficiency of photosystem II under salt stress. *Arch. Agron Soil Sci.* doi.org/10.1080/03650340.2016.1233322.
- Li, H.; Zhu, Y.; Hu, Y.; Han, W.; Gong, H. 2015. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiol Plant.*, 37: 1-9.
- Liang, Y.; Zhang, W.; Chen, Q.; Liu, Y.; Ding, R. 2006. Effects of exogenous silicon (Si) on H⁺ ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare L.*). *Environmental and Experimental Botany*, 57: 212–219.
- Liang, Y.; Sun, T.; Zhu, W.Y.G.; Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147: 422-428.
- Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50: 11-18.
- Ma, J.F. and Yamaji, N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Science*, 65: 3049-3057.
- Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Ashraf, M. 2015. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. *Turkish Journal of Botany*. 36: 625-

- Mehta, P.; V. Kraslavsky, S.; Bharti, S.I.; Allakhverdiev, A.; Jajoo. 2010. Analysis of salt-stress induced changes in photosystem II heterogeneity by prompt fluorescence and delayed fluorescence in wheat (*Triticum vulgare*) leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2: 308-313.
- Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651-681.
- Naumann, J.C.; Bissett, S.N.; Young, D.R.; Edwards, J.; Anderson, J.E. 2010. Diurnal patterns of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and PRI to evaluate water stress in the invasive species, *Elaeagnus bellata*. *Trees Journal*, 24: 237–245.
- Ogaya, R.; Penuelas, J.; Asensio, D.; Llusia, J. 2011. Chlorophyll fluorescence responses to temperature and water availability in two co-dominant Mediterranean shrub and tree species in a long-term field experiment simulating climate change. *Environ Exp Bot.* 73:89–93.
- Parveen, N. and Ashraf, M. 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. *Pak. J.Bot.*, 42: 1675–1684.
- Plaut, Z.; Edelstein, M. and Ben-Hur, M. 2013. Overcoming salinity barriers to crop production using traditional methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32: 250-291.
- Parvaiz, A. and Satyawati, S. 2008. Salt stress and phytochemical physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant Biology*, 40: 1041–1052.
- Rizwan, M.; Ali, S.M.; Ibrahim, M.; Farid, M.; Adrees, S.A.; Bharwana, M.; Zia-ur-Rehman, M.F.; Qayyum, F. Abbas. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: A review. *Environ Sci and Pollut*

Res., 22: 15416–15431.

- Romero-Aranda, M.R.; Jurado, O.; Cuartero, J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, 163: 847-855.
- Sánchez-Blanco, M.J.; Álvarez, S.; Ortuño, M.F.; Ruiz-Sánchez, M.C. 2014. Root System Response to Drought and Salinity: Root Distribution and Water Transport. In: Morte A, Varma A, editors. *Root Engineering, Soil Biology*. Heidelberg: Springer; 40: 325–352
- Savvas, D.; Giotis, D.; Chatzieustratiou, E.; Bakea, M.; Patakioutas, G. 2009. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environ. Exp. Bot.* 65, 11–17.
- Shahenshah e Isoda, A. 2010. Effects of water stress on leaf temperature and chlorophyll fluorescence parameters in cotton and peanut. *Plant Production Science*. 13:(3) 269-278 DOI: 10.1626/pps.13.269
- Shahid, M.A.; Pervez, M.A.; Balal, R.M.; Ahmad, R.; Ayyub, C.M.; Abbas, T.; Akhtar, N. 2011. Salt stress effects on some morphological and physiological characteristics of okra (*Abelmoschus esculentus* L.). *Soil environment*, 1: 66-73.
- Shi, Y.; Zhang, Y.; Han, W.; Feng, R.; Hu, Y.; Guo, H.; Gong. 2016. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, 7: 196-211.
- Tang, X.; Mu, X.; Shao, H.; Wang, H.; Brestic, M. 2015. Global plant-responding mechanisms to salt stress: Physiological and molecular levels and implications in biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35: 425–437.
- Wang, S.; Liu, P.; Chen, D.; Yin, L.; Li, H. and Deng, X. 2015. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in Plant Science*, 6: 759- 769.

- Xu, C.X.; Ma, Y.P.; Liu, Y.L. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany*, 98: 26–36.
- Yeo, A.R.; Flowers, S.A.; Rao, G.; Welfare, K.; Senanayake, N.; Flowers, T.J. 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa L.*) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpiration bypass flow. *Plant Cell & Environment*, 22: 559–565.
- Zhu, Z.; Wei, G.; Li, J.; Qian, Q.; Yu, J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt stressed cucumber (*Cucumis sativus L.*). *Plant Science*, 167: 527–533.
- Zobayed, S.M.A.; Afreen, F.; Kozai, T. 2005. Temperature stress can alter the photosynthetic efficiency and secondary metabolite concentrations in St. John's Wort. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43: 977-984.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

-El daño ocasionado en plantas de pepino por estrés salino es ocasionada con Na^+ y no por salinidad inducida por solución nutritiva estándar.

-La fertilización con Si mitiga el estrés salino en plantas de tomate evidenciando ser un elemento benéfico para las plantas en condiciones estresantes, mejorando su crecimiento.

-El estrés salino altera la fisiología, la bioquímica, procesos esenciales en la planta como la fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración se ven dañados severamente.

-El Si podría ser una alternativa para regiones áridas o semiáridas o en tierras agrícolas con problemas de sales específicamente iones tóxicos como Na, Cl.