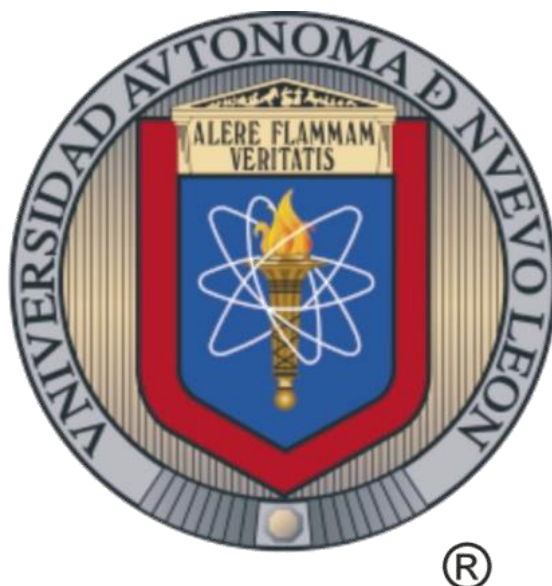


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



TESIS

EFFECTO DEL SILICIO EN PLANTAS SOMETIDAS A ESTRÉS SALINO

POR

M.P. FERNANDO DE JESÚS CARBALLO MÉNDEZ

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

ABRIL, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



TESIS

EFECTO DEL SILICIO EN PLANTAS SOMETIDAS A ESTRÉS SALINO

POR

M.P. FERNANDO DE JESÚS CARBALLO MÉNDEZ

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

GENERAL ESCOBEDO, NUEVO LEÓN, MÉXICO

ABRIL, 2019

EFFECTO DEL SILICIO EN PLANTAS SOMETIDAS A ESTRÉS SALINO

POR:

M.P. FERNANDO DE JESÚS CARBALLO MÉNDEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ORIENTACIÓN EN SUELO Y AGUA**

Aprobación de Tesis

Ph.D. Emilio Olivares Sáenz
Director

Ph.D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado
Asesor

Ph.D. Francisco Zavala García
Asesor

Dra. Manuela Bolívar Duarte
Asesor Externo

Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor Externo

Ph.D. Juan Antonio Vidales Contreras
Subdirector de Estudios de Posgrado

Subdirector de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA

A Dios, por darme el privilegio de vivir.

A Ustedes, que son todo para mí.

Fernando Francisco Carballo Rodríguez

Margarita Méndez García

Margarita María Carballo Méndez

María Guadalupe Carballo Méndez

María del Rocío Carballo Méndez

¡LOS AMO!

AGRADECIMIENTOS

A la **Facultad de Agronomía** de la **Universidad Autónoma de Nuevo León**, por darme la oportunidad de seguir preparándome académicamente.

Al **Consejo Nacional de Ciencia de Tecnología (CONACYT)** por haberme otorgado el financiamiento para la realización de este Doctorado.

A mi Director de Tesis, **Ph.D. Emilio Olivares Sáenz**, por su apoyo, dedicación, esfuerzo, interés, motivación, orientación, tiempo... no me equivoqué en elegirlo como mi Director de Tesis, sin duda, elegí al mejor.

De verdad, ¡MUCHAS GRACIAS!

A mis asesores **Ph.D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado, Ph.D. Francisco Zavala García, Dra. Manuela Bolívar Duarte y Dr. Adalberto Benavides Mendoza**, por su valiosa colaboración en esta investigación.

¡Muchas gracias por contribuir a mi formación académica!

A los integrantes del **Centro de Agricultura Protegida FA-UANL**, **M.C. Nora Estela García Treviño**, **M.C. Judith Arlette Villasana Rojas**, **Ing. Carlos Alberto Villareal Aguilar**, **Nora Imelda Meza Berlanga**, **Jesús Santos Ortíz Borjas**, **Maricela Facundo Bersosa**, **Liliana Irasema Morales García**, **Alán Jonatan Vásquez Sánchez** y **Heber Ignacio Martínez Chavarria**.

¡Muchas gracias por su amistad!

A mis compañeros de generación **Víctor Hugo Avendaño Abarca**, **Sanjuana Cecilia Galicia Campos**, **Dulce Concepción González Sandoval**, **Laura Glenys Polanco Florián**, **Heberto Antonio Rodas Gaitán** y **Pablo Alan Rodríguez Salinas**.

¡Muchas gracias por compartir esta etapa conmigo!

A la **Lic. Blanca Idolisa Contreras Cantú**, secretaria de la oficina de la Subdirección de Posgrado e Investigación de la FA-UANL, por siempre estar dispuesta a ayudar a los alumnos.

¡Ojalá hubiera más personas como Usted!

A todos los que directa e indirectamente contribuyeron para alcanzar esta meta.

Gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Salinidad	6
2.2 Mecanismos de las Plantas contra el Estrés Salino.....	9
2.3 Silicio (Si).....	10
2.4 Absorción, Transporte y Acumulación del Si.....	12
2.5 Efectos del Si en Plantas Sometidas a Estrés Salino	14
2.6 Mecanismos del Si en la Reducción del Estrés Salino	14
2.6.1 Regulación Osmótica	14
2.6.2 Balance Nutricional.....	15
2.6.3 Reducción de Daño Oxidativo	16
2.6.4 Modificación del Intercambio Gaseoso	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 Experimento 1.....	22
Efecto de sales, la CE y el Si en la germinación de <i>Moringa oleifera</i> Lam	22
3.1.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento.....	22
3.1.2 Diseño experimental y tratamientos.....	22
3.1.3 Variables evaluadas.....	23

3.1.4 Análisis estadístico.....	27
3.2 Experimento 2.....	28
Efecto de la CE en el crecimiento de plántulas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	28
3.2.1 Material vegetal y condiciones del experimento.....	28
3.2.2 Diseño experimental y tratamientos.....	28
3.2.3 Variables evaluadas.....	29
3.2.4 Análisis estadístico.....	30
Experimento 3.....	31
Efecto de la CE y el Si en el crecimiento de plántulas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	31
3.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento.....	31
3.3.2 Diseño experimental y tratamientos.....	31
3.3.3 Variables evaluadas.....	32
3.3.4 Análisis estadístico.....	33
Experimento 4.....	34
Efecto de la CE y el Si en el crecimiento de plántulas de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	34
3.4.1 Material vegetal y condiciones del experimento.....	34
3.4.2 Diseño experimental y tratamientos.....	34
3.4.3 Variables evaluadas.....	35
3.4.4 Análisis estadístico.....	36
3.5 Experimento 5.....	37

Efecto de la CE y el Si en la producción de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	37
3.5.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento.....	37
3.5.2 Diseño experimental y tratamientos.....	37
3.5.3 Variables evaluadas.....	38
3.5.4 Análisis estadístico.....	42
3.6 Experimento 6.....	43
Efecto de la CE y el Si en la producción de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	43
3.6.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento.....	43
3.5.2 Diseño experimental y tratamientos.....	43
3.6.3 Variables evaluadas.....	44
3.6.4 Análisis estadístico.....	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1 Experimento 1.....	47
4.1.1 Germinación, crecimiento, biomasa e índices de vigor	47
4.1.2 Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.....	51
4.2 Experimento 2.....	57
4.2.1 Emergencia.....	57
4.2.2 Crecimiento	59
4.2.3 Biomasa.....	59
4.2.4 Concentración mineral	62

4.2.5 Carbono	66
4.2.6 Proteína	69
4.3 Experimento 3.....	72
4.3.1 Emergencia.....	72
4.3.2 Crecimiento	74
4.3.3 Biomasa.....	75
4.3.4 Concentración mineral	77
4.4 Experimento 4.....	84
4.4.1 Emergencia.....	84
4.4.2 Crecimiento	86
4.4.3 Biomasa.....	87
4.4.4 Concentración Mineral.....	91
4.5 Experimento 5.....	97
4.5.1 Crecimiento y Unidades Spad.....	97
4.5.2 Biomasa.....	101
4.5.3 Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.....	103
4.5.4 Proteína	106
4.6 Experimento 6.....	109
4.6.1 Crecimiento y unidades Spad.....	109
4.6.2 Biomasa.....	109

4.6.3 Fotosíntesis.....	110
4.6.4 Rendimiento	111
4.6.5 Calidad de fruto.....	115
5. CONCLUSIONES	117
5.1 Experimento 1.....	117
5.2 Experimento 2.....	118
5.3 Experimento 3.....	119
5.4 Experimento 4.....	120
5.5 Experimento 5.....	121
5.6 Experimento 6.....	122
5.7 Conclusión general	123
6. BIBLIOGRAFÍA	124

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Efectos positivos de la aplicación de Si a plantas sometidas a estrés salino.....	17
Cuadro 2. Mecanismos del Si en la reducción de estrés salino en plantas.....	18
Cuadro 3. Efecto del tipo de sal, CE y Si en la germinación y crecimiento de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	49
Cuadro 4. Efecto del tipo de sal, CE y Si en la biomasa e índices de vigor de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	50
Cuadro 5. Efecto de la CE en la emergencia de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	73
Cuadro 6. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y biomasa de plántulas <i>Moringa oleifera</i> Lam.	76
Cuadro 7. Efecto de la CE y el Si de la solución nutritiva en la emergencia de <i>Solanum</i> <i>lycopersicum</i> L.	85
Cuadro 8. Efecto de la CE de la solución nutritiva en el crecimiento y biomasa de plántulas <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	88
Cuadro 9. Efecto de la CE de la solución nutritiva en la concentración de elementos esenciales en plántulas <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	92
Cuadro 10. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y Unidades Sapd de plantas de <i>Moringa</i> <i>oleifera</i> Lam, cosecha 1.	99
Cuadro 11. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y Unidades Sapd de plantas de <i>Moringa</i> <i>oleifera</i> Lam, cosecha 2.	100
Cuadro 12. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y unidades Spad de plantas de <i>Solanum</i> <i>lycopersicum</i> L.	112
Cuadro 13. Efecto de la CE y el Si en la calidad de frutos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción entre tipo de sal y CE en la concentración de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante DPPH y ABTS de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	52
Figura 2. Interacción entre la CE y el tipo de sal en la concentración de fenoles y flavonoides totales, y capacidad antioxidante DPPH y ABTS de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	54
Figura 3. Efecto del Si en la concentración de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante DPPH y ABTS de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	56
Figura 4. Efecto de la CE en la emergencia de plántulas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	58
Figura 5. Efecto de la CE en el crecimiento y biomasa de plántulas de <i>Moringa oleifera</i> Lam....	61
Figura 6. Efecto de la CE en la concentración mineral de hojas de plántulas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	64
Figura 7. Efecto de la CE en la concentración mineral de Na y las proporciones de K:Na, Ca:Na y Mg:Na, en hojas de plántulas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	65
Figura 8. Efecto de la CE en el porcentaje y contenido de carbono de plántula de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	68
Figura 9. Efecto de la CE en el porcentaje y contenido de proteína en plántula de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	71
Figura 10. Efectos de la CE y el Si o la interacción entre ambos factores, en la concentración de iones en la raíz de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	81
Figura 11. Efectos de la CE y el Si en la concentración de iones en el tallo de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	82
Figura 12. Efectos de la CE y el Si o la interacción entre ambos factores, en la concentración de iones en la hoja de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	83

Figura 13. Efectos de la interacción CE*Si, en el crecimiento de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	89
Figura 14. Efectos de la interacción CE*Si, en la biomasa de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	90
Figura 15. Efectos de la interacción CE*Si, en la concentración de macroelementos esenciales y sodio en hojas de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	94
Figura 16. Efectos de la interacción CE*Si, en la concentración de microelementos esenciales mineral en hojas de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	95
Figura 17. Efectos de la interacción CE*Si, en las proporciones de macronutrientes y sodio en hojas de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	96
Figura 18. Efecto de la CE y el Si en la biomasa de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	102
Figura 19. Efecto de la CE en la concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en hojas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	104
Figura 20. Efecto del Si en la concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en hojas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	105
Figura 21. Efecto de la CE, el Si y el estrato en el porcentaje y contenido de proteína en hojas de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	108
Figura 22. Efecto de la CE y el Si en la fotosíntesis de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	113
Figura 23. Efecto de la CE y el Si en el rendimiento de frutos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	114

RESUMEN

La salinidad es un problema de gran impacto, ya que afecta el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas. El Si es un elemento mineral que ha demostrado tener efectos positivos en diversos tipos de plantas, siendo las más beneficiadas aquéllas que están bajo algún tipo de estrés. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la salinidad (conductividad eléctrica, CE) y el silicio (Si) aplicado en la solución nutritiva en la germinación, emergencia, crecimiento, desarrollo, productividad y calidad de frutos de plantas de *Moringa oleifera* Lam. y *Solanum lycopersicum* L. La presente investigación se llevó a cabo en el Centro de Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En la investigación se desarrollaron seis experimentos. Los resultados mostraron que *Moringa oleifera* Lam. y *Solanum lycopersicum* L. fueron afectadas por el incremento de la salinidad en la solución nutritiva, lo que causó decremento de la germinación, emergencia, biomasa y calidad de fruto, además de ocasionar desbalances nutrimentales. El Si incrementó el crecimiento, biomasa, compuestos fenólicos, capacidad antioxidante, concentración mineral y rendimiento de las plantas, además de reducir la concentración de sodio en los tejidos. Los efectos del Si fueron mayormente observados cuando las plantas fueron sometidas a estrés salino. Por todo lo antes expuesto, el Si debe considerarse como una alternativa viable para reducir los efectos de la salinidad y con ello mejorar las condiciones de producción de diversas plantas.

Palabras clave: cloruro de sodio; *Moringa oleifera* Lam.; silicio; *Solanum lycopersicum* L.

ABSTRACT

Salinity is a problem of great impact, since it affects the growth and development of plants. Silicon is a mineral element that has proven to have positive effects on various types of plant, with special benefit on plants under some kind of stress. The objective of this research was to evaluate the effect of salinity (electric conductivity, EC) and silicon (Si) in the nutrient solution on germination, emergency, growth, development, productivity and quality of fruits of plants of *Moringa oleifera* Lam. and *Solanum lycopersicum* L. This investigation was held at “Centro de Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León”. Six experiments were developed in the research. Results showed that *Moringa oleifera* Lam. and *Solanum lycopersicum* L. were affected by the increase of salinity in the nutrient solution, which caused decreased germination, emergence, biomass, fruit quality, and nutrient desbalances. Silicon increased growth, dry matter, phenolic compounds, antioxidant capacity, mineral concentration and yield of plants, and reduced tissue sodium concentration. Silicon effects were principally observed on plants under saline stress. In conclusion, silicon must be considered as a good option to decrease salinity effects on plants.

Keywords: *Moringa oleifera* Lam.; silicon; *Solanum lycopersicum* L.; sodium chloride.

1. INTRODUCCIÓN

La salinidad es un problema que afecta a la humanidad desde el inicio de la agricultura. Existen registros históricos de migraciones provocadas por la salinización del suelo cultivable (Lamz y Gonzalez, 2013; Rasool *et al.*, 2013). Aproximadamente el 10 % de la superficie terrestre y el 20 % de las áreas disponibles para la actividad agrícola en el mundo son afectadas por la salinidad a diferentes niveles (Gupta y Huang, 2014; Lekakis y Antonopoulos, 2015; Khan *et al.*, 2016).

Niveles altos de salinidad en el suelo y/o agua son problemas que restringen el desarrollo sostenible de la agricultura a nivel mundial (Haghighi y Pessarakli, 2013; Soundararajan *et al.*, 2013; He *et al.*, 2016). Las zonas áridas y semiáridas, por sus condiciones climáticas, son afectadas en mayor grado (Nouman *et al.*, 2012; Connor *et al.*, 2012; Bose *et al.*, 2015). Las plantas sometidas a estrés salino sufren un deterioro en el crecimiento, desarrollo, producción y calidad de los frutos, ya que son afectadas en su comportamiento fisiológico y bioquímico (Baneh *et al.*, 2014; Bhuiyan *et al.*, 2017).

La aplicación de sustancias exógenas puede contribuir a mejorar las condiciones de las plantas en situaciones adversas (Li *et al.*, 2015; Sahebi *et al.*, 2015). El silicio (Si) tiene un efecto de mejoría en la respuesta de los cultivos sometidos a estrés, tanto biótico como abiótico, ya que protege a las plantas generando un aumento significativo en el crecimiento (biomasa) y producción (rendimiento), lo que sugiere un uso potencial en la agricultura (Meharg y Meharg, 2015; Cooke y Leishman, 2016; Debona *et al.*, 2017).

HIPÓTESIS

El silicio mejora el crecimiento y desarrollo de diversas especies de plantas sometidas a estrés, por lo tanto, la adición de Si mejorará la germinación, emergencia, crecimiento, desarrollo, productividad y calidad de plantas de *Moringa oleifera* Lam. y *Solanum lycopersicum* L. sometidas a estrés salino.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la (conductividad eléctrica, CE) y la aplicación de silicio (Si) en la germinación, emergencia, crecimiento, desarrollo, productividad y calidad de plantas de *Moringa oleifera* Lam. y *Solanum lycopersicum* L.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar el efecto de tipos de sales, CE y la aplicación de Si en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

Determinar la relación de la CE en la emergencia, en el crecimiento, biomasa, contenido nutrimental, carbono y proteína, así como estimar los niveles de salinidad permisibles para la producción de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

Evaluar el efecto de la CE y la aplicación de Si en la emergencia, crecimiento, biomasa y concentración nutrimental de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

Evaluar el efecto de la CE y la aplicación de Si en la emergencia, crecimiento, biomasa y concentración nutrimental de plántulas de *Solanum lycopersicum* L.

Evaluar el efecto de la CE y la aplicación de Si en el crecimiento, biomasa, compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y contenido de proteína en la producción de *Moringa oleifera* Lam.

Evaluar el efecto de la CE y la aplicación de Si en el crecimiento, biomasa, fotosíntesis, rendimiento y calidad de fruto en la producción de *Solanum lycopersicum* L.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Salinidad

El término salinidad se refiere a la presencia, en el suelo y/o agua, de una elevada concentración de sales que perjudican el crecimiento y desarrollo normal de las plantas. Existen dos orígenes de la salinidad, primaria (por causas naturales): erosión de las rocas, ascensión capilar de agua salobre, intrusión marina, sal de arena movida por el viento y suelos con dificultad de drenaje y secundarias (causada por actividades humanas): riego sin sistema de drenaje adecuado, uso excesivo de fertilizantes y productos químicos, eliminación de cubierta vegetal natural, inundaciones con aguas salinas, alto nivel freático y uso de mala calidad de agua subterránea para riego (Gabriel *et al.*, 2012; Hegazi, 2015).

Los principales cationes y aniones que componen las sales solubles que dan lugar a la salinidad son, cationes: sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), y aniones: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) y bicarbonato (HCO_3^-), siendo el Na^+ y el Cl^- los principales iones que causan el estrés salino en las plantas (Henschke, 2016).

Los efectos de la salinidad en las plantas dependerán de varios factores, principalmente del nivel de salinidad, tiempo de exposición, genotipo y estado de madurez de la planta (Krzyminska y Ulczycka-Walorska, 2015; Gengmao *et al.*, 2015).

La salinidad causa cuatro tipos de estreses, los cuales están relacionados:

a) Estrés hídrico. Esta condición modifica el proceso osmótico y la hidratación celular. Altas concentraciones de sal en la solución del medio de crecimiento limitan el agua disponible para la planta (Yin *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014). En la germinación, la absorción de agua durante la imbibición de la semilla, disminuye con el aumento del potencial osmótico externo, con lo que se reduce la tasa y velocidad de germinación (Ibrahim, 2016; Rasool *et al.*, 2013). Las células de las plantas sometidas a estrés salino sufren un encogimiento al inicio de esta condición, después retoman su forma original pero reducen su velocidad de elongación lo que resulta en una menor expansión y tamaño final. El crecimiento de las hojas es generalmente más sensible que el de las raíces (Lamz y Gonzalez, 2013; Esmaeili *et al.*, 2015).

b) Toxicidad específica. La excesiva concentración de sales en la solución del suelo puede causar una alta concentración de uno o algunos iones en el tejido vegetal, tales como Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , principalmente. Los órganos de las plantas en donde primero se ven los síntomas visibles de toxicidad iónica son las hojas viejas, debido a que los iones se acumulan en el borde de las hojas causando clorosis y necrosis. Lo anterior se debe a que tanto el Na^+ como el Cl^- , generalmente son absorbidos vía simpática y transportados por gradientes de concentración y flujo de transpiración (Chen *et al.*, 2014; Gupta y Huang, 2014).

c) Desbalance nutricional. En el proceso de absorción iónica, la alta concentración de algunos iones dificulta la absorción de algunos nutrimentos esenciales para la planta, debido a

que en la absorción activa interfieren con los transportadores de la membrana plasmática de la raíz, disminuyendo la absorción de K^+ , Mg^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{2+} , además la alta concentración iónica también dificulta la absorción pasiva, afectando la absorción de Ca^{2+} (Rasool *et al.*, 2013; Batool *et al.*, 2015). La competencia en el proceso de absorción de iones por las células de las raíces también es un factor que afecta la absorción de nutrientes esenciales. El Na^+ compite con la absorción de K^+ debido a que existe un mecanismo que no diferencia la absorción del Na^+ y del K^+ , por lo que el Na^+ puede inhibir la absorción de K^+ . De igual manera, un alto contenido de Cl^- compite con los NO_3^- y puede inhibir parcialmente su absorción (Kronzucker *et al.*, 2013; Lamz y Gonzalez 2013; Li *et al.*, 2015).

d) Otro efecto de la salinidad es el incremento de la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS del inglés reactive oxygen species). Una elevada presencia de sales provoca mayor producción de radicales superóxidos (O_2^-), radicales hidroxilo (OH^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que provocan reacciones fitotóxicas (Zavariyan *et al.*, 2015), degradación de proteínas, mutación de ADN y disminución de la actividad fotosintética (Haghighi y Pessaraki, 2013; Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2014), ya que disminuye la cantidad de pigmentos (Ashraf y Harris, 2013; Muneer *et al.*, 2014; Esmaeili *et al.*, 2015), daña el transporte celular de electrones, además causa la peroxidación lipídica e incluso provoca la muerte celular (Balakhnina y Borkowska, 2013; Kim *et al.*, 2014; Ibrahim, 2016).

Todo lo anterior causa un efecto negativo en la actividad fisiológica y bioquímica de la planta (Mišić *et al.*, 2012; Zhani *et al.*, 2012; Faried *et al.*, 2016; Ibrahim, 2016) lo que tiene como consecuencia un decremento en la germinación (Zhang *et al.*, 2012; Thiam *et al.*, 2013;

Khan *et al.*, 2015) y, disminución de crecimiento y desarrollo (Nouman *et al.*, 2012), lo que resulta en menores rendimientos y productividad de los cultivos (Connor *et al.*, 2012; Mohsen *et al.*, 2013) así como el deterioro de la calidad de los frutos (Shi *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2015; Boari *et al.*, 2016).

2.2 Mecanismos de las Plantas contra el Estrés Salino

La respuesta de las plantas al estrés salino depende del nivel de salinidad y del tipo de sal que lo esté provocando (Nouman *et al.*, 2012; Gupta y Huang 2014; Bose *et al.*, 2015).

La respuesta más temprana al estrés salino es una reducción en la tasa de expansión de la superficie de la hoja, seguido por el cierre estomático y por ende la depresión de la fotosíntesis y la transpiración (Shahzad *et al.*, 2013; Quintana-Blanco *et al.*, 2016; Meng y Fricke, 2017). Un ajuste osmótico ayuda a las plantas a retener el agua a pesar de mayor presión osmótica externa y, por lo tanto, para aliviar el estrés osmótico. Lo anterior se lleva a cabo mediante la síntesis de osmolitos orgánicos y su acumulación en el citosol (Yin *et al.*, 2013; Abbas *et al.*, 2015). La activación del sistema de defensa contra daño oxidativo es una parte clave en la tolerancia de la plantas a condiciones desfavorables. La generación de especies reactivas de oxígeno es limitada por un sistema antioxidante que incluye compuestos y enzimas, dentro de las que destacan superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), guaiacol peroxidasa (GPX), ascorbato peroxidasa (APX), entre otros (Zavariyan *et al.*, 2015; Zhu y Gong, 2014; Abbas *et al.*, 2015).

Otro mecanismo para contrarrestar el estrés salino es disminuir la toxicidad iónica por medio de la distribución de los iones dentro de la célula o la reducción de su absorción (Yin *et al.*, 2013). Entre los nutrientes minerales, el K^+ es muy dinámico y un importante contribuyente de la regulación osmótica y otras funciones metabólicas de la planta (Rizwan *et al.*, 2015). El contenido de K^+ en los tejidos de las plantas disminuye progresivamente con el aumento de la salinidad. Por lo tanto, el mantenimiento de un adecuado nivel de K^+ es esencial para la supervivencia de las plantas bajo estrés salino (Bybordi, 2014).

La capacidad del cultivo para reducir la absorción de Na^+ , manteniendo las concentraciones de K^+ en el citoplasma, a niveles requeridos para cumplir con las funciones de este elemento en la planta podría contribuir a incrementar el crecimiento de los cultivos (Bose *et al.*, 2015; Zhu y Gong, 2014; Kronzucker *et al.*, 2013).

2.3 Silicio (Si)

El Si es un componente importante del planeta tierra, siendo el octavo elemento más común de la naturaleza y el segundo en abundancia en la corteza terrestre, formando 370 minerales (Vasanthi *et al.*, 2014; Sahebi *et al.*, 2015; Imtiaz *et al.*, 2016). A pesar de su abundancia, el Si no puede ser absorbido directamente por las plantas debido a que no se encuentra disuelto en la solución del suelo (Haynes, 2014; Savvas y Ntatsi 2015). En los suelos, los minerales se someten química y físicamente a la intemperie, lo que resulta en la liberación de Si, el cual permanece en muy pequeñas cantidades en solución debido a que precipita con otros elementos, como el Al y en menor grado Fe y Mg, para forman minerales

arcillosos, los cuales son liberados hacia los arroyos y los océanos (Guntzer *et al.*, 2012; Pontigo *et al.*, 2015).

En la solución del suelo, el Si se encuentra como ácido silícico a una concentración entre 0.1 y 0.6 mM (3.5–40 mgL⁻¹) (Balakhnina y Borkowska, 2013; Jana y Jeong, 2014). El Si no es considerado un elemento esencial, sin embargo, tiene varias funciones importantes en la fisiología de numerosas especies de plantas, por lo que se le ha considerado como elemento benéfico (Tripathi *et al.*, 2014; Guntzer *et al.*, 2012; Iglesias *et al.*, 2015).

La aplicación de este elemento como fertilizante, ha beneficiado el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos de importancia económica, como *Brassica napus* L. (Bybordi, 2012), *Cucumis sativus* L. (Zhu *et al.*, 2015), *Gossypium hirsutum* L. (Mehrabanjoubani *et al.*, 2015), *Hordeum vulgare* L. (Balakhnina *et al.*, 2012), *Oryza sativa* L. (Shi *et al.*, 2013; Liang *et al.*, 2015a), *Saccharum officinarum* L. (Camargo *et al.*, 2014), *Solanum lycopersicum* L. (Haghighi y Pessarakli, 2013; Iglesias *et al.*, 2015; Boari *et al.*, 2016) *Triticum aestivum* L. (Mehrabanjoubani *et al.*, 2015) y *Zea mays* L. (Khan *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2016). Los efectos del Si en la planta, dependen de la especie y es más notable cuando se encuentra sometida a algún tipo de estrés (Cooke y Leishman, 2016; Coskun *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016).

Plantas sometidas a diferentes tipos de estrés han mostrado efectos positivos con la aplicación de Si. En los estreses abióticos donde se han encontrado efectos positivos del Si están los causados por sales (Mateos-Naranjo *et al.*, 2013; Bybordi, 2015), toxicidad por metales pesados (Rizwan *et al.*, 2012; Jia-wen *et al.*, 2013), desbalance de nutrientes

(Hernández-Apaolaza, 2014; Batool *et al.*, 2015), sequía (Hameed *et al.*, 2013; Khattab *et al.*, 2014; Habibi y Hajiboland, 2013), inundación (Balakhnina *et al.*, 2012), radiación (Malčovská *et al.*, 2014) y congelamiento (Duan *et al.*, 2013).

2.4 Absorción, Transporte y Acumulación del Si

Todas las plantas terrestres contienen Si, la cantidad varía dependiendo de la disponibilidad del mismo en la solución del suelo y de las características genotípicas específicas de la misma. De igual manera cada tejido de la planta podrá tener diferentes cantidades que van desde 0.1 hasta 10 % del peso seco. Las plantas que pueden acumular más de 4 % (base seca) de Si en el tejido vegetal se les clasifica como acumuladoras, las que acumulan en entre 2 y 4 % se les considera intermedias y las plantas que acumulan menos de 2 % de Si se consideran no acumuladoras (Vasanthi *et al.*, 2014; Guerriero *et al.*, 2016). De manera general, las plantas monocotiledóneas se consideran plantas acumuladoras, mientras que la mayoría de las especies de dicotiledóneas son no acumuladoras (Balakhnina y Borkowska, 2013; Pozo *et al.*, 2015). Lo anterior está estrechamente relacionado con la capacidad de la raíz para absorber dicho elemento, por lo anterior se clasifican en tres niveles de absorción: activa, en donde la cantidad de Si absorbido es mayor que la cantidad de Si que pudiera ser absorbido junto con el agua; pasiva, la absorción de Si en la misma cantidad que la que puede ser absorbida junto con el agua y de rechazo, menor absorción que la que pudiera ser absorbida junto con el agua (Vasanthi *et al.*, 2014; Pontigo *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2015b). El Si disponible en la solución del suelo para el uso de las plantas es bajo, por lo que, para incrementar la concentración es necesario proveer a las plantas de este elemento (Iglesias

et al. 2015). Además, al ser el Si un elemento inocuo para el hombre y para el ambiente, no causa problemas de salud o contaminación, como los que actualmente presentan algunos fertilizantes (Savvas y Ntatsi, 2015).

Las plantas absorben Si como ácido ortosilícico (H_4SiO_4) y es transportado en la planta a través de la corriente de transpiración (Muneer *et al.*, 2014; Savvas y Ntatsi, 2015; Tubana *et al.*, 2016). En los puntos finales de la corriente de transpiración, el Si se concentra debido a la pérdida de agua y, tan pronto como se supera el límite de solubilidad, se produce la polimerización y se convierte en sílice amorfo ($SiO_2 \cdot nH_2O$), que se deposita en las paredes celulares de las superficies epidérmicas de las hojas, tallos y frutos (Exley, 2015; Liang *et al.*, 2015b; Trembath-Reichert *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2015). En dichas paredes interactúa con pectinas y polifenoles mejorando la rigidez y la fuerza de dichos tejidos. La distribución de Si dentro de los órganos y tejidos es determinada principalmente por la tasa de transpiración del órgano o tejido (Haynes, 2014; Batool *et al.*, 2015; Tripathi *et al.*, 2015).

La absorción de Si por las células de la raíz es a través de transportadores, los cuales fueron reportados por primera vez en *Oryza sativa* L. Todos los transportadores identificados en la absorción de Si son de la familia de las acuaporinas y son homólogos a los del arroz (Grégoire *et al.*, 2012; Zhu y Gong, 2014; Ma y Yamaji, 2015). El tipo de canal transportador, Lsi1 (transporte pasivo), facilita el transporte pasivo de Si a través de la membrana plasmática entre la solución externa y las células de la raíz. El transportador de flujo de salida, Lsi2 (transporte activo), es el responsable del transporte de Si dentro de las células y hacia el xilema (Ma y Yamaji, 2015). El Si se importa en el simplasma de la endodermis por Lsi1

localizado generalmente en la parte distal de la endodermis y se exporta hacia el xilema por Lsi2 localizados en el lado proximal de la endodermis. La ubicación exacta de estos transportadores dependerá de la especie (Zhu y Gong, 2014; Sakurai *et al.*, 2015). La localización de Lsi1 y Lsi2 forma un sistema direccional de transporte eficiente para la absorción de Si. El transportador Lsi6 (homólogo de Lsi1) se localiza en las células parenquimáticas adyacentes a los vasos del xilema en las hojas, por medio del cual se distribuye al resto de la hoja (Deshmukh *et al.*, 2013; Liang *et al.*, 2015a).

2.5 Efectos del Si en Plantas Sometidas a Estrés Salino

El efecto del Si ha sido estudiado ampliamente en cultivos bajo estrés salino. La aplicación de este elemento puede ser una alternativa para la producción agrícola en suelos y aguas con problemas de salinidad (Zhu *et al.*, 2015). Los beneficios encontrados en estos estudios son diversos y se observan desde la germinación hasta la producción de frutos (Cuadro 1).

2.6 Mecanismos del Si en la Reducción del Estrés Salino

2.6.1 Regulación Osmótica

Los efectos benéficos del Si se atribuyen principalmente a la concentración de Si en diferentes tejidos, como raíces, hojas, tallos y frutos, la cual se presenta en forma de SiO₂. Esta acumulación de SiO₂ que actúa como una barrera física mejora la resistencia y la rigidez de los

tejidos (Ma y Yamaji, 2015; Pontigo *et al.*, 2015; Luyckx *et al.*, 2017). La aplicación de Si beneficia el aumento de diferentes osmolitos como la prolina, proteína soluble, azúcares y compuestos fenólicos, que ayudan a regular el ajuste osmótico. Un mayor contenido de Si en las hojas favorece el flujo de masas de solutos, ya que provoca valores potenciales osmóticos bajos, debido a una mayor capacidad de ajuste osmótico y mayor capacidad para la captación y retención de agua en los tejidos. El ajuste osmótico mediado por Si es un mecanismo que depende del genotipo.

2.6.2 Balance Nutricional

El Si mejora la tolerancia a la salinidad mediante la reducción de la translocación de iones de la raíz a las hojas, evitando una alta concentración de Na^+ y Cl^- en el tejido aéreo de la planta, además incrementa las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en raíz, tallo y hojas (Shi *et al.*, 2013; Adrees *et al.*, 2015; Khan *et al.*, 2015). El Na^+ es pasivamente absorbido por las plantas y el proceso de absorción es inhibido, en parte, por el efecto del Si sobre la tasa de transpiración (Muneer *et al.*, 2014). Además, la deposición de Si en las raíces promueve el desarrollo de estructuras suberizadas en la endodermis y exodermis de la raíz, formando una barrera para la transportación apoplástica del Na^+ (Rios *et al.*, 2017; Krishnamurthy *et al.*, 2011). El incremento en la cantidad de K^+ y Ca^{2+} en plantas fertilizadas con Si, sometidas a estrés salino, es un factor de tolerancia, pues dichos nutrientes le dan estabilidad a la membrana celular (Bybordi, 2014). La absorción y el transporte de K^+ es un proceso activo asociado con la bomba de hidrógeno ATP impulsada en las membranas plasmáticas. Un

posible efecto del Si en este proceso es la activación de la HC-ATPasa en las membranas, lo que estimula la absorción del K^+ por las plantas en estrés salino (Sahebi *et al.*, 2015).

2.6.3 Reducción de Daño Oxidativo

El Si compensa parcialmente el efecto negativo del estrés salino elevando la actividad de antioxidantes, como el superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX) y glutatión peroxidasa (GPX), que neutralizan las especies reactivas de oxígeno, además de reducir la peroxidación lipídica (Zhu y Gong, 2014; Zavariyan *et al.*, 2015; Luyckx *et al.*, 2017; Shahid *et al.*, 2015).

2.6.4 Modificación del Intercambio Gaseoso

El intercambio gaseoso es uno de los procesos más sensibles al estrés salino. Las respuestas positivas de la fotosíntesis al suministro de Si se deben a un papel protector del cloroplasto o a una mejora en las concentraciones de pigmentos relacionados con la absorción de la luz o a ambos mecanismos (Li *et al.*, 2015; Bybordi, 2012; Amirossadat *et al.*, 2012; Mateos-Naranjo *et al.*, 2013; Sivanesan y Park, 2014; Tripathi *et al.*, 2015) (Cuadro 2).

Cuadro 1. Efectos positivos de la aplicación de Si a plantas sometidas a estrés salino.

Parámetro	Efecto observado	Cultivo	Autor
Germinación	Aumento en: Porcentaje de germinación	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Haghighi <i>et al.</i> , 2012
		<i>Zea mays</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 2015
Crecimiento	Velocidad de germinación	<i>Zea mays</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 2015
		Aumento en: Longitud de planta	<i>Borago officinalis</i> L.
Crecimiento	Área foliar	<i>Cynodon dactylon</i> L. Pers	Esmaeili <i>et al.</i> , 2015
		<i>Lolium perenne</i> L.	Esmaeili <i>et al.</i> , 2015
		<i>Oryza sativa</i> L.	Shi <i>et al.</i> , 2013
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> , 2015
		<i>Zea mays</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
		<i>Abelmoschus esculentus</i> L.	Abbas <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Wang <i>et al.</i> , 2015
		<i>Oryza sativa</i> L.	Kim <i>et al.</i> , 2014
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Salvia splendens</i> Sellow ex Schult	Soundararajan <i>et al.</i> , 2013
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Munner <i>et al.</i> , 2014
		<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench	Yin <i>et al.</i> , 2013
			Liu <i>et al.</i> , 2015
			Chen <i>et al.</i> , 2014
			Shahzad <i>et al.</i> , 2013
Crecimiento	Raíz	<i>Vicia faba</i> L.	Qin <i>et al.</i> , 2016
		<i>Vitis vinifera</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
		<i>Zea mays</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 2015
		<i>Abelmoschus esculentus</i> L.	Abbas <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014
		<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Hussein y Abou-Baker, 2014
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Haghighi y Pessarakli 2013
		<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench	Yin <i>et al.</i> , 2013
		Calidad de frutos	Aumento de Firmeza
	Iglesias <i>et al.</i> , 2015		

Cuadro 2. Mecanismos del Si en la reducción de estrés salino en plantas.

Parámetro	Mecanismo reportado	Cultivo	Autor
Equilibrio Osmótico	Aumento de:	Azúcares	<i>Abelmoschus esculentus</i> L. Abbas <i>et al.</i> , 2015
			<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench Yin <i>et al.</i> , 2013
	Prolina		<i>Vitis vinifera</i> L. Qin <i>et al.</i> , 2016
			<i>Abelmoschus esculentus</i> L. Abbas <i>et al.</i> , 2015
Estatus Hídrico	Aumento contenido agua	<i>Borago officinalis</i> L. Torabi <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Cucumis sativus</i> L. Zhu <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Solanum lycopersicum</i> L. Li <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench Yin <i>et al.</i> , 2013	
Balance Nutricional	Disminución de la concentración de: Na ⁺	<i>Triticum aestivum</i> L. Liu <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Triticum aestivum</i> L. Bybordi, 2014	
		<i>Abelmoschus esculentus</i> L. Abbas <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Aloe Vera</i> L. Xu <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Cucumis sativus</i> L. Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014	
			Wang <i>et al.</i> , 2015
			Zhu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cynodon dactylon</i> L. Pers Esmaeili <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Festuca arundinacea</i> Schreb. Esmaeili <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Lolium perenne</i> L. Esmaeili <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Lonicera japonica</i> L. Gengmao <i>et al.</i> , 2015	
		<i>Oryza sativa</i> L. Shi <i>et al.</i> , 2013	
			Kim <i>et al.</i> , 2014
		<i>Pistacia vera</i> L. Habibi <i>et al.</i> , 2014	
<i>Solanum lycopersicum</i> L. Muneer <i>et al.</i> , 2014			
	Li <i>et al.</i> , 2015		
	<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench Yin <i>et al.</i> , 2013		
	<i>Triticum aestivum</i> L. Chen <i>et al.</i> , 2014		
	Azeem <i>et al.</i> , 2015		
	<i>Vicia faba</i> L. Shahzad <i>et al.</i> , 2013		
	<i>Vitis vinifera</i> L. Qin <i>et al.</i> , 2016		

		<i>Zea mays</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
			Khan <i>et al.</i> , 2015
	Cl ⁻	<i>Abelmoschus esculentus</i> L.	Abbas <i>et al.</i> , 2015
		<i>Aloe Vera</i> L.	Xu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Zhu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Oryza sativa</i> L.	Shi <i>et al.</i> , 2013
			Kim <i>et al.</i> , 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> , 2015
	Aumento de la concentración de:		
	K ⁺	<i>Aloe vera</i> L.	Xu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cynodon dactylon</i> L. Pers	Esmaeili <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014
			Wang <i>et al.</i> , 2015
		<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	Esmaeili <i>et al.</i> , 2015
		<i>Lolium perenne</i> L.	Esmaeili <i>et al.</i> , 2015
		<i>Lonicera japonica</i> L.	Gengmao <i>et al.</i> , 2015
		<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Hussein y Abou-Baker, 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> 2015
		<i>Triticum aestivum</i> L.	Chen <i>et al.</i> , 2014
			Azeem <i>et al.</i> , 2015
		<i>Zea mays</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
			Khan <i>et al.</i> , 2015
	Ca ⁺⁺	<i>Aloe vera</i> L.	Xu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014
		<i>Lonicera japonica</i> L.	Gengmao <i>et al.</i> , 2015
		<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Hussein y Abou-Baker, 2014
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> , 2015
		<i>Triticum aestivum</i> L.	Chen <i>et al.</i> , 2014
			Azeem <i>et al.</i> , 2015
		<i>Vicia faba</i> L.	Shahzad <i>et al.</i> , 2013
	Mg ⁺⁺	<i>Aloe vera</i> L.	Xu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Hussein y Abou-Baker, 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> , 2015
	Micronutrientes	<i>Zea mays</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
Actividad Antioxidante	Aumento de actividad de:		
	Catalasa (CAT)	<i>Ajuga multiflora</i> L.	Sivanesan y Jeong,

			2014
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014
		<i>Lonicera japonica</i> L.	Gengmao <i>et al.</i> , 2015
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Sorghum bicolor</i> L.	Yin <i>et al.</i> , 2013
		Moench	Liu <i>et al.</i> , 2015
	Ascorbato peroxidasa (APX)	<i>Ajuga multiflora</i> L.	Sivanesan y Jeong, 2014
		<i>Borago officinalis</i> L.	Torabi <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014
	Guaiacol peroxidase (GPX)	<i>Cucumis sativus</i> L.	Khoshgoftarmanesh <i>et al.</i> , 2014
	Superoxido dismutasa (SOD)	<i>Ajuga multiflora</i> L.	Sivanesan y Jeong, 2014
		<i>Borago officinalis</i> L.	Torabi <i>et al.</i> , 2015
		<i>Lonicera japonica</i> L.	Gengmao <i>et al.</i> , 2015
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Sorghum bicolor</i> L.	Yin <i>et al.</i> , 2013
		Moench	Liu <i>et al.</i> , 2015
Fotosíntesis	Aumento de: Fotosíntesis	<i>Abelmoschus esculentus</i> L.	Abbas <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Zhu <i>et al.</i> , 2015
			Wang <i>et al.</i> , 2015
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> , 2015
			Haghighi y Pessarakli, 2013
		<i>Sorghum bicolor</i> L.	Yin <i>et al.</i> , 2013
		Moench	Liu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Vitis vinifera</i> L.	Qin <i>et al.</i> , 2016
		<i>Triticum aestivum</i> L.	Bybordi, 2014
		<i>Zea mays</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
	Transpiración	<i>Abelmoschus esculentus</i> L.	Abbas <i>et al.</i> , 2015
		<i>Cucumis sativus</i> L.	Wang <i>et al.</i> , 2015
			Zhu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Pistacia vera</i> L.	Habibi <i>et al.</i> , 2014
		<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Li <i>et al.</i> , 2015
		<i>Sorghum bicolor</i> L.	Yin <i>et al.</i> , 2013
		Moench	Liu <i>et al.</i> , 2015
		<i>Vitis vinifera</i> L.	Qin <i>et al.</i> , 2016
		<i>Zea mays</i> L.	Batool <i>et al.</i> , 2015
	Conductancia	<i>Abelmoschus esculentus</i>	Abbas <i>et al.</i> , 2015

	estomática	L. <i>Cucumis sativus</i> L. <i>Lonicera japonica</i> L. <i>Pistacia vera</i> L. <i>Solanum lycopersicum</i> L. <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench <i>Vitis vinifera</i> L. <i>Zea mays</i> L.	Zhu <i>et al.</i> , 2015 Gengmao <i>et al.</i> , 2015 Habibi <i>et al.</i> , 2014 Li <i>et al.</i> , 2015 Yin <i>et al.</i> , 2013 Liu <i>et al.</i> , 2015 Qin <i>et al.</i> , 2016 Batoool <i>et al.</i> , 2015
Pigmentos	Aumento de: Clorofila	<i>Abelmoschus esculentus</i> L. <i>Cucumis sativus</i> L. <i>Oryza sativa</i> L. <i>Salvia splendens</i> Sellow ex Schult <i>Solanum lycopersicum</i> L. <i>Vitis vinifera</i> L. <i>Triticum aestivum</i> L. <i>Zea mays</i> L. <i>Abelmoschus esculentus</i> L. <i>Solanum lycopersicum</i> L.	Abbas <i>et al.</i> , 2015 Amirossadat <i>et al.</i> , 2012 Wang <i>et al.</i> , 2015 Kim <i>et al.</i> , 2014 Soundararajan <i>et al.</i> , 2013 Haghighi y Pessarakli, 2013 Li <i>et al.</i> , 2015 Qin <i>et al.</i> , 2016 Bybordi, 2014 Batoool <i>et al.</i> , 2015 Abbas <i>et al.</i> , 2015 Li <i>et al.</i> , 2015
	Carotenoides		

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Experimento 1

Efecto de sales, la CE y el Si en la germinación de *Moringa oleifera* Lam

3.1.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

Semillas de *Moringa oleifera* Lam., obtenidas del Centro de Agricultura Protegida FAUANL (CAP-FAUANL), fueron colocadas entre dos hojas de papel filtro saturado con tratamiento, después se enrollaron y colocaron en una bolsa de plástico sellada para evitar la pérdida de humedad. Las bolsas se colocaron en una cámara de germinación con temperatura constante a 25 °C, dicha temperatura es la óptima para la germinación de moringa (Alatar, 2011; Navarro *et al.*, 2015). Las semillas estuvieron sometidas a ciclos de 20 horas con régimen de luz/oscuridad de 12/8 y humedad relativa media constante (90 %).

3.1.2 Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental y de tratamientos fue completamente al azar, con arreglo factorial 3x2x2 + 2 testigos. El primer factor fue tipo de sal: cloruro de sodio (NaCl), cloruro de magnesio (MgCl₂) y cloruro de calcio (CaCl₂). El segundo factor fue conductividad eléctrica (CE): 3 y 6 dSm⁻¹, y el tercer factor fue silicio (Si): 0 y 50 mgL⁻¹, aplicado en forma de dióxido de Si (SiO₂). Los testigos fueron agua destilada (CE 0.02 dSm⁻¹) y agua destilada

más 50 ppm de Si (CE 0.04 dSm⁻¹). Cada tratamiento constó de cuatro repeticiones; la unidad experimental consistió de 20 semillas por repetición.

3.1.3 Variables evaluadas

La germinación de las semillas se llevó a cabo en el Laboratorio del Centro de Capacitación en Tecnología de Semillas (CCDTS) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. Mientras que el análisis de las variables se realizó en el Laboratorio de Química y Bioquímica de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en General Escobedo, Nuevo León, México.

Germinación

Germinación. Las semillas se consideraron como germinadas cuando la radícula tenía una longitud de 2 mm. Los resultados fueron expresados en porcentaje (%).

Índice de germinación. Este índice fue calculado dividiendo el número de semillas germinadas entre el número de días de conteo.

Plantas normales. Las plantas consideradas normalmente germinadas fueron las que presentaron un desarrollo uniforme en tamaño de radícula y plúmula. Estas plántulas fueron las que se consideraron para la toma de datos. Los resultados fueron expresados en porcentaje (%).

Crecimiento

Longitud de la plántula. La plántula se dividió en radícula y plúmula, a los cuales se les midió la longitud. Los resultados fueron expresados en centímetros (cm).

Biomasa

Peso seco de la plántula. El tejido vegetal (radícula y plúmula) se secó en estufa a 60°C durante 24 horas. El peso seco se determinó mediante una balanza analítica con precisión de 0,001 g. Los resultados fueron expresados en gramos (g).

Índices de Vigor

Índice de vigor-I (en base a la longitud de la plántula): Índice de vigor-I = Germinación (%) x Longitud de la plántula (cm).

Índice de vigor-II (en base al peso seco de las plántulas): Índice de vigor-II = Germinación (%) x Peso seco de las plántulas (g).

Los conteos para determinar el índice de velocidad de germinación se realizaron a los cuatro y siete días después de la siembra (dds). La evaluación de las variables se llevó a cabo a los 10 dds.

Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante

Extracción de compuestos fenólicos

Para la determinación de los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante se obtuvieron extractos mediante el procedimiento propuesto por López-Contreras *et al.* (2015), con ligeras modificaciones: 200 mg de muestra vegetal (plántula completa) seca a 50°C,

molida y con tamaño de partícula menor a 0.59 mm, fue homogenizada con 3 ml de metanol al 80 % y agitada durante 1 h a 220 rpm, posteriormente fue centrifugada a 4500 rpm durante 5 minutos; el sobrenadante fue recuperado y almacenado a -20°C.

Fenoles totales

El contenido total de fenoles fue determinado mediante la reacción de Folin–Ciocalteu. Para la determinación se consideraron 200 µL del extracto de compuestos fenólicos, el cual fue colocado en 2600 µL de agua destilada y oxidado con 200 µL de reactivo Folin-Ciocalteu y después de 5 min neutralizado con 2 µL de solución de Na₂CO₃ al 7 %. La solución se dejó reposar durante 90 min y finalmente se midió la absorbancia de las muestras a 750 nm. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalente de ácido gálico por gramo de muestra seca (mgEAG kg⁻¹ MS) usando una curva de calibración de ácido gálico a 0, 40, 80, 120, 160 y 200 mg L⁻¹.

Flavonoides totales

El contenido total de flavonoides se evaluó mediante la reacción del cloruro de aluminio. Para la determinación se utilizaron 200 µL del extracto, disueltos en 3500 µL de agua destilada, posteriormente se agregaron 150 µL de NaNO₂ al 5 %; después de 5 min se agregaron 150 µL de AlCl₃ al 10 % y 5 min más tarde se agregaron 1000 µL de NaOH 1 M. La solución se dejó reposar durante 15 minutos y finalmente la absorbancia de las muestras se midió a 510 nm. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalente de catequina por gramo de muestra seca (mgEC kg⁻¹ MS), usando una curva de calibración de catequina a 0, 40, 80, 120, 160 y 200 mg L⁻¹.

Capacidad Antioxidante

DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

La determinación de DPPH fue realizada utilizando una solución de trabajo con una absorbancia de 1 a 517 nm. El análisis fue llevado a cabo mezclando 50 μL de extracto de compuestos fenólicos con 1500 μL de la solución de trabajo DPPH, la mezcla se dejó reposar durante 30 minutos en la oscuridad y se leyó la absorbancia a 517 nm.

ABTS (ácido 3-etil-benzotiazolin-6-sulfónico)

La determinación de ABTS fue realizada utilizando una solución de trabajo obtenida de la mezcla de un mL de 7.4 mM ABTS y un mL de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$. Dicha mezcla se dejó reposar por 12 horas y fue ajustada a una absorbancia de 1 a 734 nm, diluyéndola con metanol al 80 %. El análisis fue llevado a cabo mezclando 50 μL de extracto con 1500 μL de solución de trabajo ABTS; la mezcla se dejó reposar durante 2 h en la oscuridad y se leyó a una absorbancia de 734 nm.

Los resultados de capacidad antioxidante DPPH y ABTS se expresaron como micromoles de Trolox equivalente por gramo de muestra seca ($\mu\text{molTE kg}^{-1}\text{MS}$), usando una curva de calibración de Trolox a 0, 100, 200, 300, 400 and 500 mg L^{-1} .

3.1.4 Análisis estadístico

Los tratamientos fueron evaluados con análisis de varianza y las variables fueron previamente analizadas con la prueba de Levene para homogeneidad de varianzas y con la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad. La transformación arco seno fue utilizada para los datos obtenidos en porcentaje. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM Corp., 2013), en las variables donde se encontró diferencia significativa, se realizó una comparación de medias por el método DMS ($p \leq 0.05$).

3.2 Experimento 2

Efecto de la CE en el crecimiento de plántulas de *Moringa oleifera* Lam

3.2.1 Material vegetal y condiciones del experimento

La investigación se llevó a cabo en el verano del 2016 en un invernadero del CAP-FAUANL. Semillas de *Moringa oleifera* Lam. de las variedades vaina corta y vaina larga fueron sembradas en charolas de propagación de polietileno de 50 cavidades, con un volumen de 120 ml por cavidad, utilizando como sustrato turba rudia. El riego se aplicó en frecuencia diaria, con un volumen de 10 ml por plántula, durante los primeros 10 días después de la siembra; en el período del día 11 al 20 se incrementó a 20 ml por plántula y del día 21 al 30 a 35 ml por plántula. Los promedios de temperatura mínima y máxima del invernadero fueron de 24° y 47°C, respectivamente; mientras la humedad relativa osciló entre 20 y 70 %.

3.2.2 Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue completamente al azar con dos repeticiones por tratamiento y por variedad. Los tratamientos surgieron de adicionar cloruro de sodio (NaCl) a la solución nutritiva Hoagland y Arnon (1950), diluida al 50 % (CE 1.03; pH: 6.0) hasta alcanzar las conductividades eléctricas (CE) de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 dSm⁻¹. La unidad experimental consistió de 16 semillas de las cuales 5 se consideraron como parcela útil.

3.2.3 Variables evaluadas

Emergencia

El porcentaje y uniformidad de emergencia fueron contabilizadas diariamente durante 15 días después de la siembra (dds), a la misma hora, utilizando la metodología de ISTA (2016); mientras que el porcentaje de supervivencia fue evaluado a los 30 dds, y se obtuvo dividiendo el número de plántulas sobrevivientes entre el número de semillas emergidas.

Crecimiento

La altura de plántula, diámetro de tallo, longitud de raíz, número de hojas y área foliar fueron evaluados a los 30 dds. En las variables de crecimiento se utilizó flexómetro, vernier y el software ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>).

Biomasa

Las plántulas cosechadas se lavaron con agua desionizada para remover contaminantes de la superficie del tejido, y se separaron en raíz, tallo y hojas; dichos tejidos se colocaron en bolsas de papel y puestos en una estufa de convección forzada a una temperatura de 60° C durante 48 h, para la determinación de materia seca de raíz, tallo y hoja.

Concentración mineral

Las muestras utilizadas para determinar biomasa fueron molidas y tamizadas con una malla de 0.5 mm. Un gramo de cada muestra fue incinerado en una mufla a una temperatura de 450 a 500 °C por 6 h y digerido con HCl 1 N, para posteriormente realizar los análisis de

potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu) y sodio (Na), por medio de espectroscopía de absorción atómica (UNICAM Solar®, modelo 9626).

Proteína y carbono

El porcentaje de nitrógeno y carbono fueron determinados utilizando el método de combustión (Etheridge *et al.*, 1998) en el equipo Truspec CHN de LECO. El porcentaje de proteína se estimó mediante la multiplicación del factor 6.25 por el porcentaje de nitrógeno. Los contenidos de proteína y carbono fueron obtenidos multiplicando el porcentaje por la materia seca y dividiendo entre 100.

3.2.4 Análisis estadístico

En las variables expresadas en porcentaje se realizó una transformación de arcoseno y para las variables donde se realizó conteo, los datos se transformaron mediante raíz cuadrada. Con los datos transformados se realizaron análisis de varianza y regresión utilizando el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM Corp., 2013).

Experimento 3

Efecto de la CE y el Si en el crecimiento de plántulas de *Moringa oleifera* Lam

3.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento

El ensayo se llevó a cabo durante el verano de 2016 en un invernadero del CAP-FAUANL, México. Semillas de *Moringa oleifera* Lam. fueron sembradas en bandejas de propagación de poliestireno, utilizando turba como sustrato. El riego se aplicó en un régimen de frecuencia diaria, con un volumen de 100 ml por bandeja, durante los primeros 10 días después de la siembra; en el período del día 11 al 20, el volumen se incrementó a 200 ml por bandeja y del día 21 a 30 el volumen se incrementó a 300 ml por bandeja.

3.3.2 Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar, con un arreglo factorial de tratamiento ($3 * 3$) y tres repeticiones con 35 plántulas en cada unidad experimental. Los tratamientos estuvieron formados por la combinación de tres niveles de salinidad (CE de 2.5, 6.0 y 9.5 dSm^{-1}), ajustados con cloruro de sodio (NaCl) y tres niveles de Si (0, 50 y 100 mgL^{-1}), aplicado mediante silicato de potasio (K_2SiO_3). Todas las plántulas fueron irrigadas con una solución nutritiva (N: 105, P: 21, K: 236, Ca: 100, Mg: 50, S: 75, Fe: 1, Mn: 0.5, B: 0.2, Zn: 0.2, Cu: 0.05 y Mo: 0.05 mgL^{-1} , pH 5.5-6).

3.3.3 Variables evaluadas

Emergencia

El porcentaje de emergencia y uniformidad de emergencia fueron contabilizados a la misma hora, diariamente durante 15 días después de la siembra (dds), utilizando la metodología de ISTA (2016); mientras que el porcentaje de supervivencia fue evaluado a los 30 dds, y se obtuvo dividiendo el número de plántulas sobrevivientes entre el número de semillas emergidas.

Crecimiento

Las variables para describir el crecimiento de la planta fueron: altura de plántula, diámetro de tallo, longitud de raíz, número de hojas y área foliar, las cuales fueron evaluadas a los 30 dds. En las variables de crecimiento se utilizó flexómetro, vernier y el software ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>).

Biomasa

Las plántulas cosechadas se lavaron con agua desionizada para remover contaminantes de la superficie del tejido, y se separaron en raíz, tallo y hojas; dichos tejidos se colocaron en bolsas de papel y puestos en una estufa de convección forzada a una temperatura de 60° C durante 48 h, para determinar materia seca de raíz, tallo y hoja.

Concentración mineral

Las muestras utilizadas para determinar biomasa fueron molidas y tamizadas con una malla de 0.5 mm. Un gramo de cada muestra fue incinerado en una mufla a una temperatura de 450 a 500 °C por 6 h y digerido con HCl 1 N, para posteriormente realizar los análisis de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu) y sodio (Na), por medio de espectroscopía de absorción atómica (UNICAM Solar®, modelo 9626).

3.3.4 Análisis estadístico

En las variables expresadas en porcentaje se realizó una transformación de arco-seno y para las variables donde se realizó conteo, los datos se transformaron mediante raíz cuadrada. Con los datos transformados y las variables con distribución normal se realizaron análisis de varianza utilizando el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM Corp, 2013). En las variables de emergencia, crecimiento, biomasa y concentración de minerales, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) o polinomios ortogonales, cuando se observaron diferencias significativas en el análisis de varianza.

Experimento 4

Efecto de la CE y el Si en el crecimiento de plántulas de *Solanum lycopersicum* L

3.4.1 Material vegetal y condiciones del experimento

El ensayo se llevó a cabo durante el otoño de 2016, en un invernadero del CAP-FAUANL. La especie vegetal utilizada fue *Solanum lycopersicum* L. tipo saladette, variedad Cuauhtémoc F1. Las semillas fueron sembradas en charolas de propagación de poliuretano de 50 cavidades con volumen de 120 ml/cavidad, rellenas de turba. El riego se aplicó con una frecuencia diaria, con un volumen de 300 ml por charola, durante los primeros 10 días después de la siembra; en el período del día 11 al 20 se incrementó a 500 ml por charola y del día 21 al 30 a 700 ml por charola.

3.4.2 Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con arreglo factorial 3*3 con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió de 16 plántulas de las cuales cinco se consideraron como material útil para análisis. Los tratamientos evaluados fueron nueve soluciones nutritivas formadas con la combinación de una solución nutritiva base (N:105, P:21, K:236, Ca:30, Mg:3, S:3, Fe:1, Mn:0.5, B:0.2, Zn:0.2, Cu: 0.05 y Mo:0.05 mgL⁻¹, pH 5.5-6), tres niveles de CE (1.5, 4.0 y 6.5 dSm⁻¹), ajustados con cloruro de sodio (NaCl) y tres niveles de Si (0, 50 y 100 mgL⁻¹), aplicados mediante silicato de potasio (K₂SiO₃).

3.4.3 Variables evaluadas

Emergencia

El porcentaje de emergencia y uniformidad de emergencia fueron contabilizados diariamente durante 15 días después de la siembra (dds), a la misma hora, utilizando la metodología de ISTA (2016); mientras que el porcentaje de supervivencia fue evaluado a los 30 dds, y se obtuvo dividiendo el número de plántulas sobrevivientes entre el número de semillas emergidas.

Crecimiento

La altura de plántula, diámetro de tallo, longitud de raíz, número de hojas y área foliar fueron evaluados a los 30 dds. En las variables de crecimiento se utilizó flexómetro, vernier y el software ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>).

Biomasa

Las plántulas cosechadas se lavaron con agua desionizada para remover contaminantes de la superficie del tejido, y se separaron en raíz, tallo y hojas; dichos tejidos se colocaron en bolsas de papel y puestos en una estufa de convección forzada a una temperatura de 60° C durante 48 h, para determinar materia seca de raíz, tallo y hoja.

Concentración mineral

Las muestras de hoja utilizadas para determinar biomasa fueron molidas y tamizadas con una malla de 0.5 mm. Un g de cada muestra fue incinerado en una mufla a una

temperatura de 450 a 500 °C por 6 h y digerido con HCl 1 N, para posteriormente realizar los análisis de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu) y sodio (Na), por medio de espectroscopía de absorción atómica (UNICAM Solar®, modelo 9626).

3.4.4 Análisis estadístico

En las variables expresadas en porcentaje se realizó una transformación de arco-seno y para las variables donde se realizó conteo, los datos se transformaron mediante raíz cuadrada. Con los datos transformados se realizaron análisis de varianza utilizando el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM Corp, 2013). En las variables de emergencia, crecimiento, biomasa y concentración de minerales, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) o polinomios ortogonales.

3.5 Experimento 5

Efecto de la CE y el Si en la producción de *Moringa oleifera* Lam

3.5.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

El ensayo se llevó a cabo durante el verano del 2017. Plántulas de *Moringa oleifera* Lam. variedad vaina larga de aproximadamente 20 cm de altura, producidas en el CAP-FAUANL, fueron trasplantadas a macetas de polietileno de color negro en el interior y blanco en el exterior, de un volumen de 10 L rellenas de pumicita. Cada maceta contenía dos plantas. Dichas macetas fueron colocadas en un invernadero del CAP-FAUANL, y regadas diariamente con 14 impulsos de riego con duración de un minuto cada impulso, con un gasto total de 2.24 L por día y por maceta.

3.5.2 Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue completamente al azar, con arreglo factorial, 3x2x2+3 testigos. Los tratamientos utilizados surgieron de la combinación la solución nutritiva Hoagland y Arnon (1950) con los siguientes tres factores. El primer factor fue la CE: 3, 6 y 9 dSm^{-1} , dichos niveles se lograron mediante la adición de NaCl. El segundo factor fue la concentración de Si: 60 y 120 mgL^{-1} , mientras que el tercer factor fueron las fuentes de fertilizantes, silicato de potasio (K_2SiO_3) y dióxido de Si (SiO_2). Los testigos fueron los tres niveles de CE sin Si. Cada tratamiento fue evaluado en tres repeticiones. Los tratamientos

fueron evaluados en dos cosechas, la primera a las seis semanas del trasplanta y la segunda a las seis semanas después de la primera cosecha.

3.5.3 Variables evaluadas

Crecimiento

Longitud de tallo. Se midió la ganancia semanal en la longitud del tallo mediante la metodología sugerida por Muñoz (2009). Los resultados fueron expresados en centímetros (cm).

Número de hojas. Se consideraron como hojas funcionales las hojas completamente extendidas.

Largo y ancho de hoja. Para determinar el largo y ancho de hoja, se eligió la hoja más recientemente madura (hoja número cinco de ápice a base). Los resultados fueron expresados en centímetros (cm).

Unidades Spad

La medición de unidades Spad se realizó tres veces en tres hojas distintas (las hojas número cuatro, cinco y seis, de ápice a base de la planta). Para lo anterior se utilizó un medidor de clorofila SPAD 502 Plus, marca Minolta. Los resultados fueron expresados en unidades Spad.

Las mediciones de crecimiento y unidades Spad se realizaron semanalmente durante un periodo de seis semanas (primera cosecha) y cinco semanas (segunda cosecha), de dichas mediciones se obtuvo un promedio con el que se realizó el análisis estadístico.

Biomasa

Peso seco de planta. La materia fresca de tallo y hojas de la primera cosecha, así como la materia fresca de raíz, tallo y hojas de la segunda cosecha fueron secadas en estufa a 60°C durante 24 horas. El peso seco se determinó mediante una balanza analítica con precisión de 0,001 g. Los resultados fueron expresados en gramos (g).

Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante

Extracción de compuestos fenólicos

Para la determinación de los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante se obtuvieron extractos mediante el procedimiento propuesto por López-Contreras *et al.* (2015), con ligeras modificaciones: 200 mg de muestra vegetal seca a 50°C, molida y con tamaño de partícula menor a 0.59 mm, fue homogenizada con 3 ml de metanol al 80 % y agitada durante 1 h a 220 rpm, posteriormente fue centrifugada a 4500 rpm durante 5 min; el sobrenadante fue recuperado y almacenado a -20 °C.

Fenoles totales

El contenido total de fenoles fue determinado mediante la reacción de Folin–Ciocalteu. Para la determinación se consideraron 200 µL del extracto, el cual fue colocado en 2600 µL de agua destilada y oxidado con 200 µL de reactivo Folin-Ciocalteu y después de 5 min neutralizado con 2 µL de solución de Na₂CO₃ al 7 %. La solución se dejó reposar durante 90 min y finalmente se midió la absorbancia de las muestras a 750 nm. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalente de ácido gálico por gramo de muestra seca

(mgEAG kg⁻¹ MS) usando una curva de calibración de ácido gálico a 0, 40, 80, 120, 160 y 200 mg L⁻¹.

Flavonoides totales

El contenido total de flavonoides se evaluó mediante la reacción del cloruro de aluminio. Para la determinación se utilizaron 200 µL del extracto, los cuales fueron disueltos en 3500 µL de agua destilada, posteriormente se agregaron 150 µL de NaNO₂ al 5 %; después de 5 min se agregaron 150 µL de AlCl₃ al 10 % y 5 min más tarde se agregaron 1000 µL de NaOH 1 M. La solución se dejó reposar durante 15 minutos y finalmente la absorbancia de las muestras se midió a 510 nm. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalente de catequina por gramo de muestra seca (mgEC kg⁻¹ MS), usando una curva de calibración de catequina a 0, 40, 80, 120, 160 y 200 mg L⁻¹.

Capacidad Antioxidante

DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

La determinación de DPPH fue realizada utilizando una solución de trabajo con una absorbancia de 1 a 517 nm. El análisis fue llevado a cabo mezclando 50 µL de extracto de compuestos fenólicos con 1500 µL de la solución de trabajo DPPH, la mezcla se dejó reposar durante 30 minutos en la oscuridad y se leyó la absorbancia a 517 nm.

ABTS (ácido 3-etil-benzotiazolin-6-sulfónico)

La determinación de ABTS fue realizada utilizando una solución de trabajo obtenida de la mezcla de un mL de 7.4 mM ABTS y un mL de $K_2S_2O_8$. Dicha mezcla se dejó reposar por 12 horas y fue ajustada a una absorbancia de 1 a 734 nm, diluyéndola con metanol al 80 %. El análisis fue llevado a cabo mezclando 50 μ L de extracto con 1500 μ L de solución de trabajo ABTS; la mezcla se dejó reposar durante 2 h en la oscuridad y se leyó a una absorbancia de 734 nm.

Los resultados de capacidad antioxidante DPPH y ABTS se expresaron como micromoles de Trolox equivalente por gramo de muestra seca (μ molTE kg^{-1} MS), usando una curva de calibración de Trolox a 0, 100, 200, 300, 400 and 500 $mg L^{-1}$.

La determinación de compuestos fenólicos y actividad antioxidante se realizó en las tres primeras hojas del estrato superior.

Proteína

El porcentaje de nitrógeno fue determinado utilizando el método por combustión (Etheridge *et al.*, 1998) en el equipo Truspec CHN de LECO. El porcentaje de proteína se estimó mediante la multiplicación del factor 6.25 por el porcentaje de nitrógeno. Los contenidos de proteína y carbono fueron obtenidos multiplicando el porcentaje por la materia seca y dividiendo entre 100.

En la determinación de proteína en hoja, la planta se dividió en tres estratos: alto (tres primeras hojas, completamente extendidas, ubicadas del punto de crecimiento hacia la base);

medio (tres hojas siguientes, después de las del estrato superior); bajo (resto de hojas hasta la base de la planta).

3.5.4 Análisis estadístico

Los tratamientos fueron evaluados con análisis de varianza y las variables fueron previamente analizadas con la prueba de Levene para homogeneidad de varianzas y con la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM Corp, 2013), en las variables donde se encontró diferencia significativa, se realizó una comparación de medias por el método DMS ($p \leq 0.05$).

3.6 Experimento 6

Efecto de la CE y el Si en la producción de *Solanum lycopersicum* L.

3.6.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

El ensayo se llevó a cabo durante el invierno del 2016 y primavera 2017. Plántulas de *Solanum lycopersicum* L. tipo saladette variedad El Cid de aproximadamente 40 cm de altura, producidas en el CAP-FAUANL, fueron trasplantadas a macetas de polietileno de color negro en el interior y blanco en el exterior, de un volumen de 10 L rellenas de fibra de coco. Cada maceta contenía dos plantas. Dichas macetas fueron colocadas en un invernadero del CAP-FAUANL y regadas diariamente con ocho impulsos de riego con duración de entre uno y dos minutos cada impulso, con un gasto total de 2.5 L por día y por maceta.

3.5.2 Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue completamente al azar, con arreglo factorial 3x3. Los tratamientos utilizados surgieron de la combinación la solución nutritiva sugerida por Castellanos (2009), con los siguientes dos factores. El primer factor fue CE: 2.0, 5.0 y 8.0 dSm^{-1} , dichos niveles se lograron mediante la adición de NaCl. El segundo factor fue la concentración de Si, 0, 60 y 120 mgL^{-1} , utilizando silicato de potasio (K_2SiO_3). Cada tratamiento constó de cinco repeticiones.

3.6.3 Variables evaluadas

Crecimiento

Longitud de tallo y diámetro de tallo. Los incrementos en longitud y diámetro de tallo se midieron semanalmente mediante la metodología sugerida por Muñoz (2009). Los resultados fueron expresados en centímetros (cm) y milímetros (mm), respectivamente.

Área foliar. Para determinar el área foliar se midió el largo y ancho de hoja más recientemente madura (hoja número cinco de ápice a base). Dichos valores fueron utilizados para incluirlos en la ecuación (1) propuesta por Astegiano (2001), para calcular el área foliar de hojas de tomate. Los resultados fueron expresados en centímetros cuadrados (cm²).

$$(Ecuación 1) AF = 0.34 * (L * A) - 9.31$$

AF= área foliar (cm²)

L: largo de hoja (cm)

A: ancho de hoja (cm)

Unidades Spad

La medición de unidades Spad se realizó tres veces en tres hojas distintas (las hojas número cuatro, cinco y seis, de ápice a basa de la planta). Para lo anterior se utilizó un medidor de clorofila SPAD 502 Plus, marca Minolta. Los resultados fueron expresados en unidades Spad.

Las mediciones de crecimiento y unidades Spad se realizaron semanalmente durante las primeras trece semanas después del trasplante, de dichas mediciones se obtuvo un promedio con el que se realizó el análisis estadístico.

Biomasa

Peso seco de planta. La materia fresca de tallo y hojas fue secada en estufa a 60°C durante 24 horas. El peso seco se determinó mediante una balanza analítica con precisión de 0,001 g. Los resultados fueron expresados en gramos (g).

Fotosíntesis

Las variables de fotosíntesis se midieron semanalmente en cinco ocasiones en un periodo de 35 días (Ene17 – Mar17).

La medición de la Fotosíntesis o Tasa de Asimilación Neta de CO₂ (Pn) reportada como $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$; Conductancia Estomática (Gs), reportada como $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$; Concentración Interna de CO₂ (Ci), reportada como $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$; y Transpiración (Tr), reportada como $\text{umol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, se llevaron a cabo con un equipo portátil para medir fotosíntesis LI-6400® (LI-COR, Ne., USA). Para la evaluación de dichas variables, se mantuvieron constantes los parámetros Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y la concentración de CO₂ (400 $\mu\text{mol de CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$). Las mediciones se tomaron en la quinta hoja desde el ápice de crecimiento hacia la base de la planta, de tres plantas tomadas completamente al azar.

Rendimiento

Las variables de rendimiento se evaluaron durante un periodo de 98 días (Dic16 – Abr17) se realizaron 17 cosechas. En cada una de las cosechas se realizó el conteo de número de frutos por planta, peso unitario de fruto (g), diámetro ecuatorial (cm), diámetro polar (cm) y rendimiento por planta (g planta^{-1}).

Calidad de fruto

La calidad de frutos fue evaluada en los frutos de cuatro cosechas realizadas en el periodo medio de cosecha (30Ene17 – 24Feb17). Las variables evaluadas fueron firmeza (Newton, N), Grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$), pH, Acidez titulable (AT, %) e índice de madurez ($\text{IM} = ^{\circ}\text{Brix} / \% \text{AT}$).

3.6.4 Análisis estadístico

Los tratamientos fueron evaluados con análisis de varianza y las variables fueron previamente analizadas con la prueba de Levene para homogeneidad de varianzas y con la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 22.0 (IBM Corp, 2013), en las variables donde se encontró diferencia significativa, se realizó una comparación de medias por el método Tukey ($p \leq 0.05$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Experimento 1

4.1.1 Germinación, crecimiento, biomasa e índices de vigor

El tipo de sal tuvo influencia en la germinación, crecimiento, biomasa e índices de vigor de plántulas de moringa. El CaCl_2 fue la sal que más afectó la germinación, observando una disminución del 7 % comparada con la germinación obtenida con el NaCl. Sin embargo, el NaCl fue la sal que más afectó a las plántulas, pues disminuyó el porcentaje de plantas normales en 14 %, el crecimiento en general en 13 %, biomasa en 15 % e índices de vigor en 12 % (Cuadros 3 y 4). En general, el crecimiento de plántula, producción de biomasa y vigor fueron reducidos por las sales en el siguiente orden: $\text{NaCl} > \text{MgCl}_2 > \text{CaCl}_2$. Otros autores han encontrado efectos positivos de la aplicación de CaCl_2 en el proceso de germinación y crecimiento de la plántula (Salahshoor y Kazemi, 2016; Kong *et al.*, 2015). Singh *et al.* (2017), mencionaron que el Ca^{2+} promovió el crecimiento gravitrópico del eje inicial durante la germinación de la semilla de *Vigna radiata* L., por lo que las plántulas tuvieron mejor crecimiento. Además, se ha demostrado que la aplicación de Ca^{2+} mediante CaCl_2 , en *Arabidopsis thaliana*, contribuyó a disminuir el efecto negativo del ácido abscísico (ABA), beneficiando la germinación (Kong *et al.*, 2015). Yin *et al.* (2015) encontraron que la aplicación de CaCl_2 tuvo un efecto protector en la germinación de *Glycine max* L. bajo estrés salino, ya que aumentó la actividad de enzimas antioxidantes que conduce a una menor acumulación de ROS, además, aumentó la producción de metabolitos secundarios lo que evita

el daño celular y reduce la presión osmótica causada por la sal. Dichos autores señalaron que los resultados anteriores están asociados con el efecto del CaCl_2 sobre la redistribución de las proteínas almacenadas, así como a la regulación del procesamiento de las proteínas en el retículo endoplásmico y enriquecimiento de la señal del proceso de transducción, ya que además de que facilita la vía energética y el transporte, promueve la biosíntesis de las proteínas e inhibe la proteólisis.

Los resultados de los niveles de salinidad mostraron que las CE de 0 y 3 dSm^{-1} fueron estadísticamente iguales y superiores a 6 dSm^{-1} en todas las variables de germinación, crecimiento y biomasa. Las variables más afectadas fueron: plántulas normales, longitud de plúmula, peso seco de radícula e índice de vigor-II, las cuales se redujeron en 25, 21, 31 y 23 %, respectivamente (Cuadros 3 y 4). Los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por Alatar (2011), quien encontró que *Moringa peregrina* Forssk. sufrió un decremento en la germinación cuando la solución utilizada fue ajustada a 6.25 dSm^{-1} con NaCl; sin embargo, otros autores (Elhag y Abdalla, 2012) han encontrado reducciones significativas del crecimiento y producción de biomasa de plántulas de moringa establecidas en suelo con una CE de 3.63 dSm^{-1} . Los resultados obtenidos en la presente investigación no mostraron ningún daño a las plántulas a CE menores o iguales a 3 dS m^{-1} .

Los resultados no mostraron interacción entre el Si y la CE. El Si incrementó la cantidad de plántulas normales (11 %), el crecimiento (7 %), el peso seco (9 %), e índices de vigor (7 %) (Cuadros 2 y 3). Los resultados obtenidos coinciden con Bybordi (2014) quien encontró que plántulas de *Triticum aestivum* L. tratadas con 2 mmol L^{-1} de Si, aumentaron el peso en 16 %, 12 % y 32 % en soluciones de 0 mmol L^{-1} , 20 mmol L^{-1} , y 100 mmol L^{-1} de NaCl, respectivamente, comparadas con plantas sin aplicación de Si.

Cuadro 3. Efecto del tipo de sal, CE y Si en la germinación y crecimiento de *Moringa oleifera* Lam.

	G	IVG	PN	LR	LP
	%			cm	cm
Sal					
NaCl	84.35±1.7 a	5.26±0.1 ab	45.85±2.0 b	6.86±0.2 b	6.01±0.2 c
MgCl ₂	82.04±1.7 ab	5.31±0.1 a	52.06±2.0 ab	6.72±0.2 b	6.45±0.2 b
CaCl ₂	77.85±1.7 b	5.04±0.1 b	53.56±2.0 a	7.68±0.2 a	6.81±0.2 a
<i>p</i>	0.036	0.017	0.020	0.009	0.041
CE					
dSm ⁻¹					
0	85.15 ±2.4 a	5.54±0.1 a	55.04±1.7 a	7.33±0.2 a	6.92±0.2 a
3	84.39±1.4 ab	5.44±0.1 a	55.51±0.1 a	7.60±0.1 a	7.15±0.1 a
6	78.44±1.4 b	5.02±0.1 b	45.47±0.1 b	6.56±0.1 b	5.69±0.1 b
<i>p</i>	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000
Si					
mgL ⁻¹					
0	82.15±1.3	5.19±0.04 b	48.33±0.9 b	6.88±0.1 b	6.31±0.1 b
50	81.76±1.3	5.35±0.04 a	53.99±0.9 a	7.35±0.1 a	6.66±0.1 a
<i>p</i>	ns	0.044	0.000	0.010	0.005

G: porcentaje de germinación; IVG: índice de velocidad de germinación; PN: plantas normales; LR: longitud de radícula; LH: longitud de plúmula.

Los valores representan las medias ± error estándar. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. *p*: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

Cuadro 4. Efecto del tipo de sal, CE y Si en la biomasa e índices de vigor de *Moringa oleifera* Lam.

	PSR	PSP	IV- I	IV- II
Sal				
NaCl	10.23±0.3	22.87±1.2 b	1263.40±42.8	3.25±0.2 b
MgCl ₂	10.65±0.3	24.35±1.1 b	1279.32±42.8	3.39±0.2 b
CaCl ₂	10.16±0.3	28.94±1.2 a	1383.80±42.8	3.69±0.2 a
<i>p</i>	ns	0.002	ns	Ns
CE				
dSm ⁻¹				
0	12.66±0.4 a	25.86±0.8 a	1409.60±35.8 a	3.78±0.1 a
3	12.08±0.2 a	28.51±0.5 b	1447.69±19.1 a	3.98±0.1 a
6	8.42±0.2 b	21.80±0.5 c	1169.99±19.1 b	2.87±0.1 b
<i>p</i>	0.000	0.000	0.012	0.000
Si				
mgL ⁻¹				
0	10.62±0.2	23.42±0.5 b	1294.20±18.1 b	3.31±0.1 b
50	10.57±0.2	27.09±0.4 a	1352.26±17.7 a	3.64±0.1 ^a
<i>p</i>	ns	0.000	0.035	0.001

PSR: peso seco de radícula; PSH: peso seco de plúmula; IV-I: índice de vigor I; IV-II: índice de vigor II.

Los valores representan las medias ± error estándar. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. *p*: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

4.1.2 Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante

La interacción entre los tipos de sal y la CE fue significativa ($p \leq 0.01$) para todas las variables de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante. El aumento de CE de 3 a 6 dSm^{-1} mediante la aplicación de NaCl aumentó la concentración de fenoles totales, capacidad antioxidante DPPH y ABTS. El incremento de CE mediante MgCl_2 , redujo los fenoles totales, pero aumentó ABTS. Contrario a lo anterior, el aumento de CE mediante CaCl_2 , redujo todas las variables, siendo los flavonoides los más afectados, con una reducción del 23 %. En una CE 3 dSm^{-1} no hubo diferencia significativa entre los tipos de para fenoles totales y flavonoides totales, mientras que la mayor capacidad antioxidante DPPH y ABTS se presentó en el CaCl_2 . A una CE de 6 dSm^{-1} la presencia de NaCl provocó mayores concentraciones de fenoles totales y flavonoides totales. La mayor capacidad antioxidante DPPH se presentó en el NaCl y CaCl_2 , mientras que para ABTS el orden fue el siguiente: $\text{MgCl}_2 > \text{NaCl} > \text{CaCl}_2$ (Figura 1).

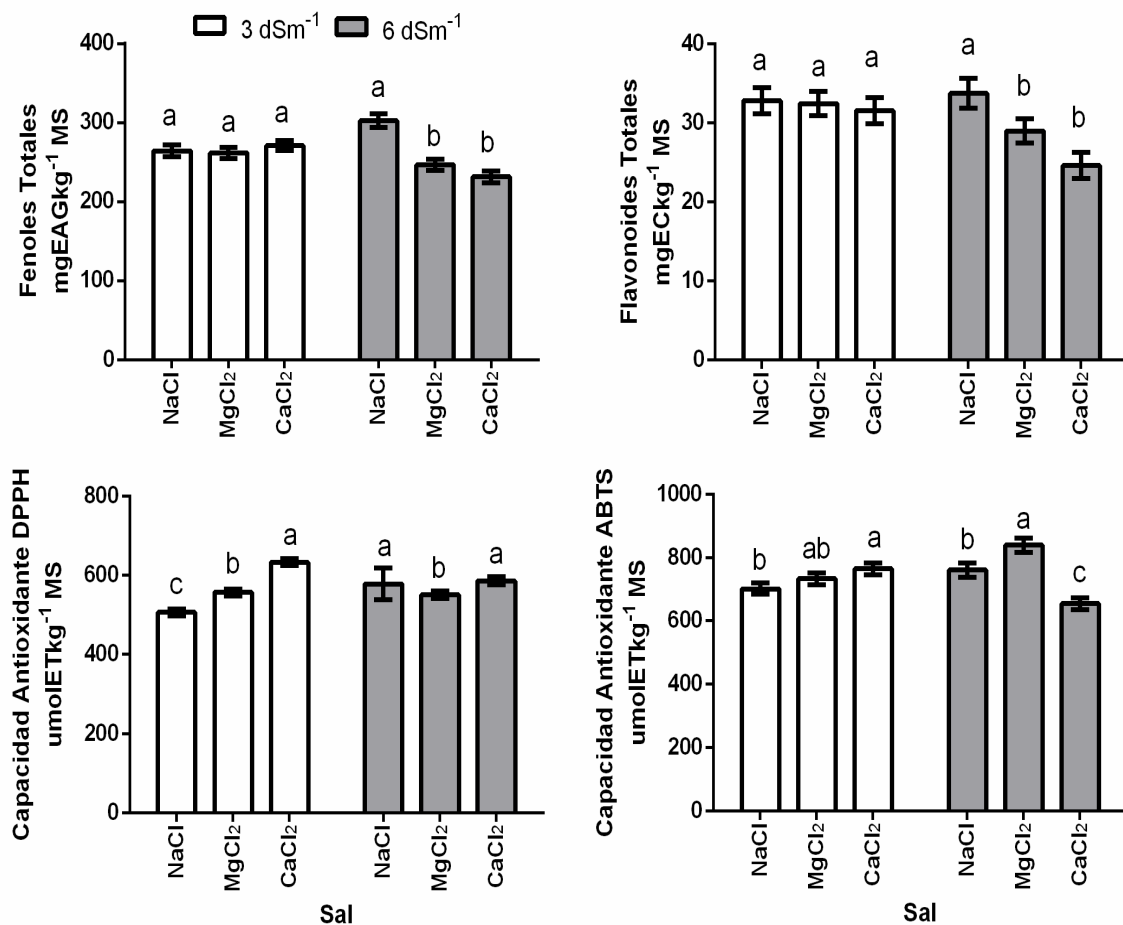


Figura 1. Interacción entre tipo de sal y CE en la concentración de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante DPPH y ABTS de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Literales diferentes en las columnas del mismo nivel de CE, denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$)

En la interacción entre el tipo de sal y CE, para NaCl un cambio de CE de 3 a 6 dSm⁻¹ mantuvo la cantidad de flavonoides y aumento de fenoles, DPPH y ABTS. Para MgCl₂, un aumento de CE de 3 a 6 dS m⁻¹ redujo los fenoles, pero aumentó el ABTS en un 14 %. Contrariamente a lo anterior, un aumento en CE por CaCl₂ redujo los valores de todas las variables, siendo los flavonoides los más afectados, con una reducción del 23 % (Figura 2).

La mayoría de los compuestos fenólicos son generados mediante la vía fenilpropanoide, la cual es estimulada por diversos tipos de estrés, entre ellos la salinidad. Como consecuencia del estímulo provocado por la presencia de sales, las plantas inducen hormonas, como el ácido jasmónico, que a su vez induce enzimas como la fenilalanina amonio liasa (PAL), la cual produce acumulación de compuestos fenólicos (Giorgi *et al.*, 2009). En el presente estudio se encontró que el NaCl fue la sal más tóxica para la planta, además un incremento de esta sal incrementó los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, mostrando con esto que el estrés salino también causa el incremento de estos compuestos.

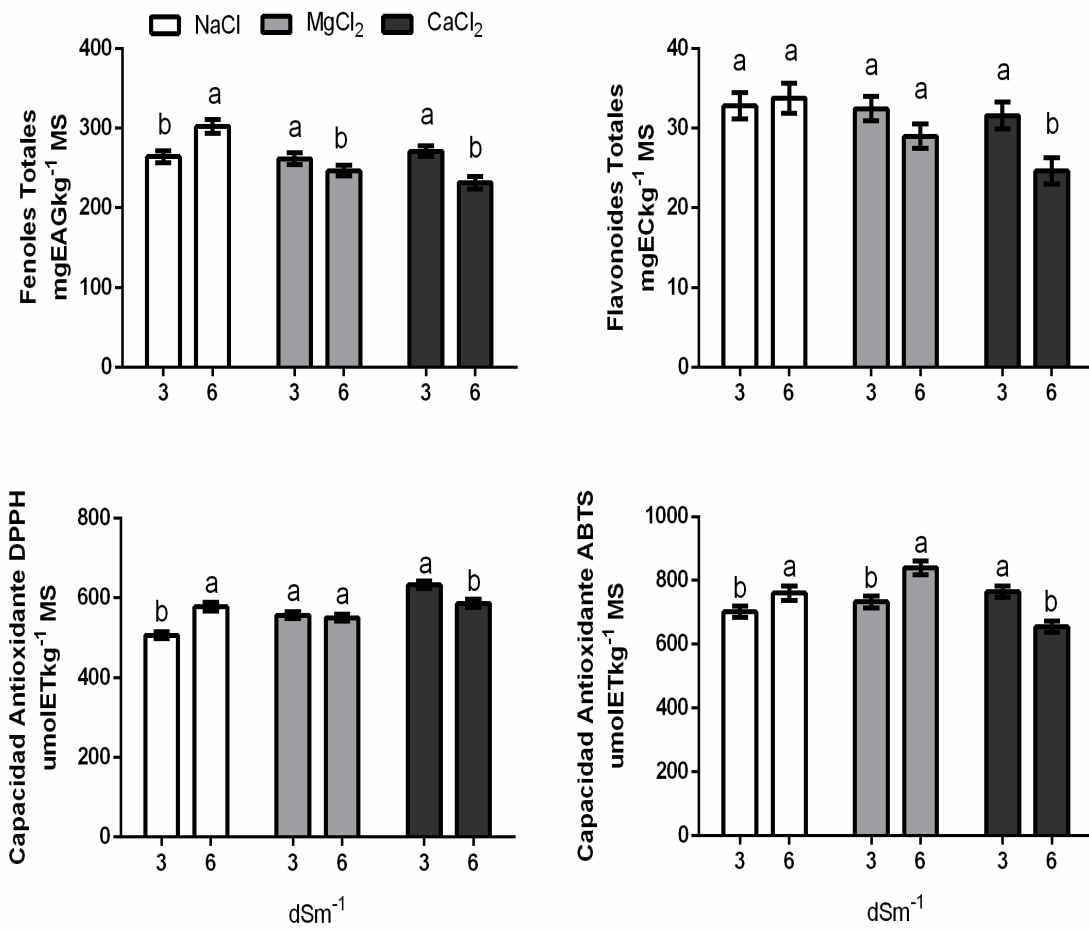


Figura 2. Interacción entre la CE y el tipo de sal en la concentración de fenoles y flavonoides totales, y capacidad antioxidante DPPH y ABTS de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Literales diferentes en las columnas del mismo tipo de sal, denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$)

La aplicación de Si incrementó significativamente ($p \leq 0.01$) los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante. Los fenoles totales se incrementaron en 9 %, los flavonoides totales en 30 %, la capacidad antioxidante DPPH en 10 % y ABTS en 15 %, independientemente de la concentración salina y el tipo de sal (Figura 3). Los resultados anteriores mostraron que el Si tuvo efectos benéficos sobre las plántulas, independientemente del tipo de sal y nivel de salinidad. Pavlovic *et al.* (2013), reportaron un incremento de compuestos fenólicos (catequinas y ácido gálico) en raíces de plantas de *Cucumis sativus* L. sometidas a estrés por deficiencia de Fe y suplementadas con 1.5 mM de Si. Estos mismos autores evaluaron los cambios en la expresión relativa de dos genes involucrados en biosíntesis de compuestos fenólicos; dichos genes fueron SK (shikimato quinasa), que participa en la vía del ácido shikímico y PAL (fenilalanina amonio liasa), que interviene en la vía fenilpropanoide. La presencia de Si incrementó los niveles de expresión de SK y PAL en los primeros 3 días del inicio del estrés, lo que condujo a un incremento gradual de catequinas y ácido gálico.

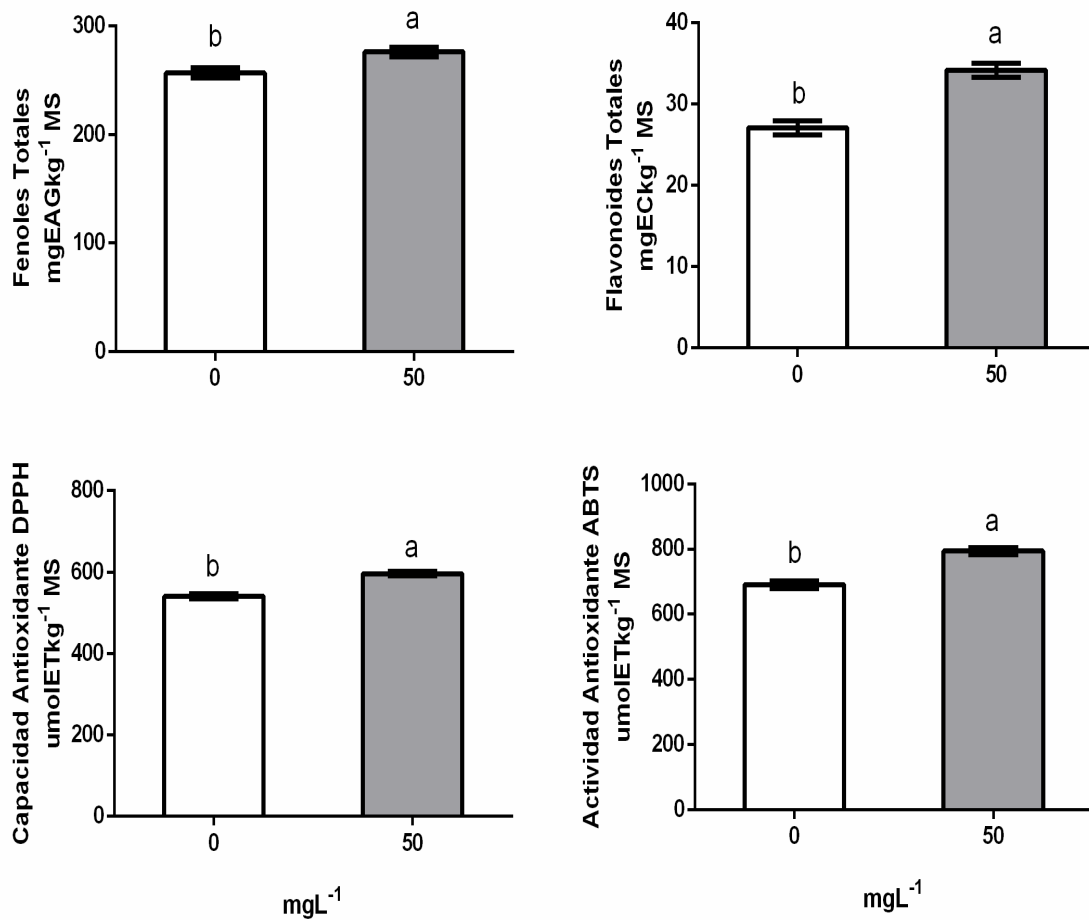


Figura 3. Efecto del Si en la concentración de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante DPPH y ABTS de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$)

4.2 Experimento 2

Los análisis de varianza no mostraron diferencias significativas entre las variedades, ni en la interacción entre variedad y CE en las variables estudiadas. Las CE fueron estadísticamente diferentes en prácticamente todas las variables.

4.2.1 Emergencia

El análisis de regresión mostró un efecto cúbico en el porcentaje de emergencia (Figura 4A) y supervivencia de plántulas (4B). El porcentaje de emergencia disminuyó significativamente a partir de 8 dSm^{-1} , mientras que la supervivencia de plántulas disminuyó significativamente a partir de 7 dSm^{-1} . La uniformidad de plántulas mostró un efecto cuadrático, mostrando un decremento en la uniformidad a partir de 4 dSm^{-1} (Figura 4C). En general, la emergencia se vio afectada en CE mayores a $7-8 \text{ dSm}^{-1}$. Los resultados antes mencionados coinciden con los reportados por Elhag y Abdalla (2012), quienes evaluaron el crecimiento de esta misma especie regadas con soluciones de 2, 4, 8 y 16 dSm^{-1} ; dichos autores encontraron que las plántulas sufrieron un decremento en el porcentaje de emergencia a partir de 8 dSm^{-1} , los días de emergencia aumentaron con una CE de 4 dSm^{-1} , mientras que la uniformidad disminuyó a una CE de 4 dSm^{-1} (CE de la solución del suelo).

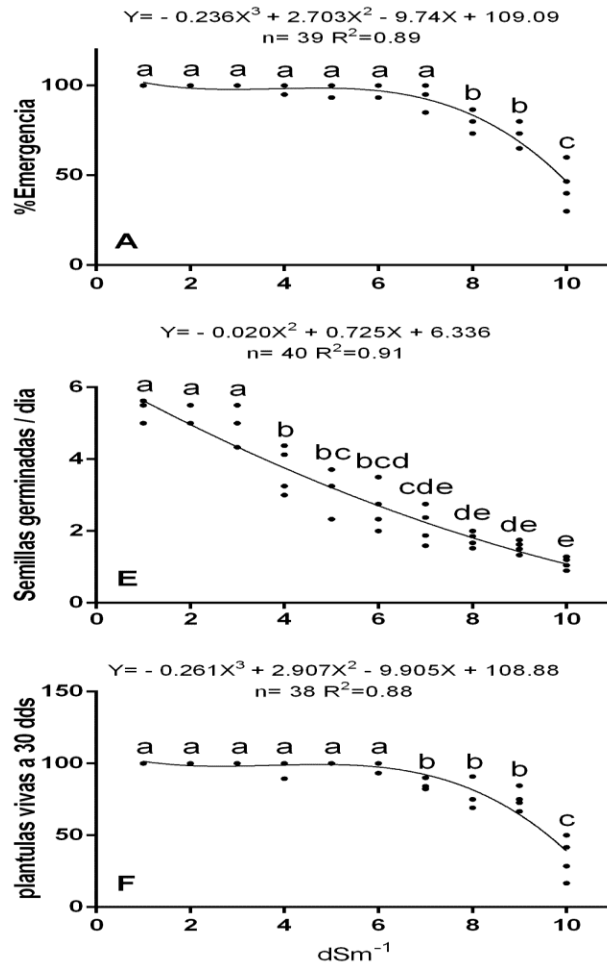


Figura 4. Efecto de la CE en la emergencia de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

4A: emergencia; 4B: uniformidad; 4C: supervivencia. Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$)

4.2.2 Crecimiento

Dentro de las variables de crecimiento, la altura de la planta y el número de hojas fueron afectadas por la salinidad de la solución, encontrando una tendencia lineal, con pendientes decrecientes en 2.68 cm y 0.74 hojas, respectivamente, por cada unidad de aumento de la CE (Figura 5A y 5D). El diámetro de tallo y el área foliar mostraron un efecto cuadrático (Figura 5B y 5E), encontrando que a medida que se incrementó la CE disminuyó el diámetro del tallo y el área foliar, con una mayor caída en los niveles bajos de CE y menor decremento en los niveles altos de CE; el diámetro de tallo disminuyó significativamente a partir de 3 dSm⁻¹, mientras que el área foliar se redujo a partir de 2 dSm⁻¹. La longitud de raíz mostró un efecto cúbico (Figura 5C), disminuyendo a partir de 6 dSm⁻¹. El estrés por salinidad trae como consecuencia la disminución de la parte aérea de la planta, lo cual es consecuencia de la abscisión foliar provocada por la producción de etileno; dicho mecanismo ayuda a reducir la pérdida de agua por la transpiración (Acosta *et al.*, 2017); de igual manera también provoca una reducción en la tasa fotosintética, con lo cual se compromete el crecimiento y la producción de biomasa de las plantas, siendo la reducción del área foliar el parámetro más afectado (Da silva *et al.*, 2008).

4.2.3 Biomasa

La producción de biomasa mostró un efecto cuadrático en los tres órganos (Figura 5F, 5G y 5H). El peso seco de raíz y tallo mostraron un decremento a partir de 2 dSm⁻¹; mientras que la materia seca de hoja sufrió un decremento a partir de 3 dSm⁻¹. En la presente

investigación la producción de biomasa se afectó por el estrés salino, reflejado en una menor altura de la planta, número de hojas y área foliar (Figura 5). A diferencia de nuestros resultados, Nouman *et al.* (2012), reportaron que la altura de plántulas de moringa cultivadas en CE de 1.8, 4 y 8 dSm⁻¹ no presentaron diferencias significativas en su altura, mientras que el número de hojas y peso seco de raíz mostraron un decremento significativo en salinidades de 8 y 12 dSm⁻¹, respectivamente.

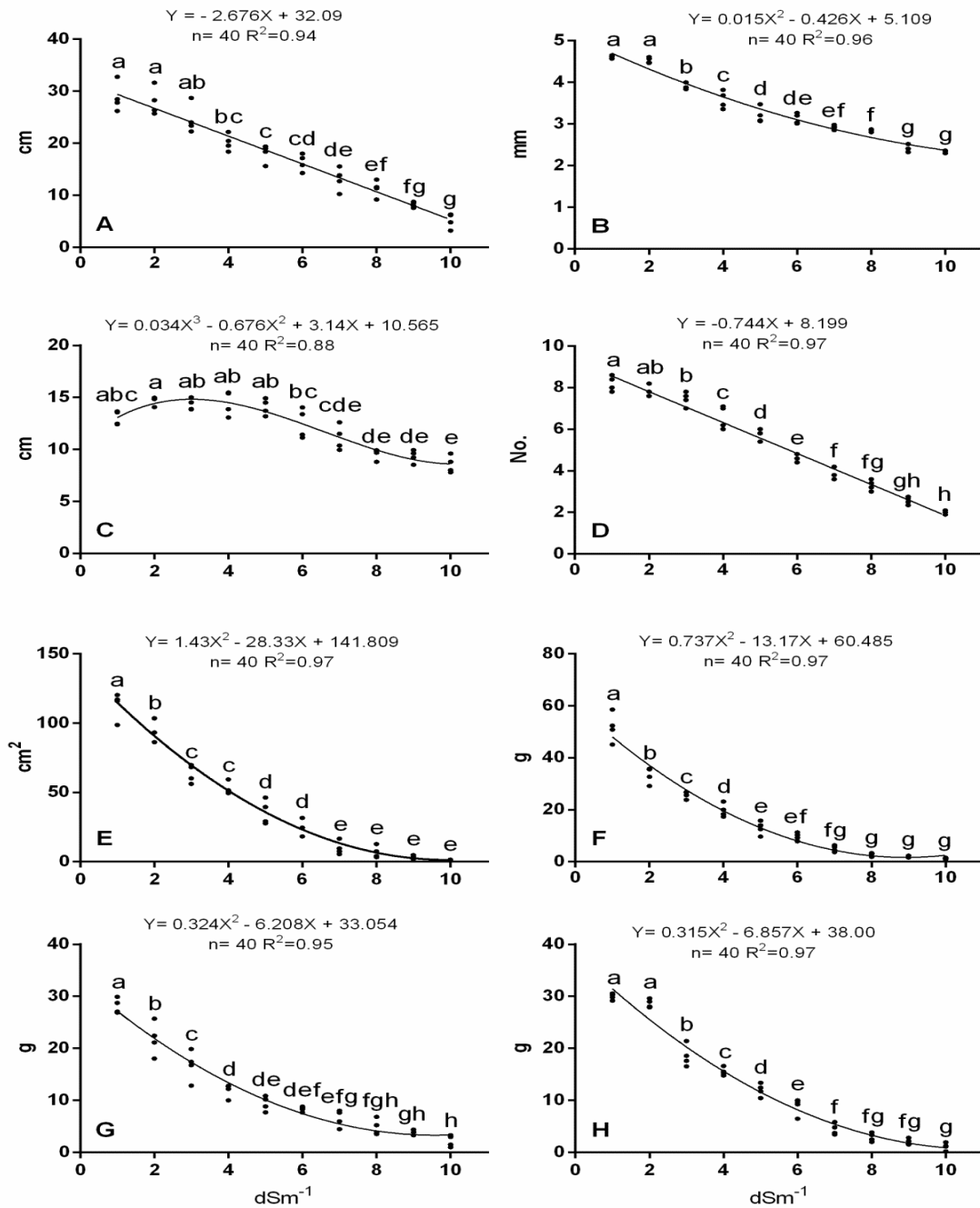


Figura 5. Efecto de la CE en el crecimiento y biomasa de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

A: altura de planta; B: diámetro de tallo; C: longitud de raíz; D: número de hojas; E: área foliar; F: peso seco de raíz; G: peso seco de tallo; H: peso seco de hoja. Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$).

4.2.4 Concentración mineral

Respecto al efecto de la CE en la concentración de nutrimentos en hojas, los macroelementos esenciales, N y Ca, sufrieron un efecto cúbico (Figura 6A y 6C), mientras que la relación entre CE y K fue cuadrática (Figura 7B) y lineal en Mg (Figura 6D).

Dentro de los micronutrimentos esenciales el Fe mostró un efecto cúbico (Figura 6E), el Mn y Zn tuvieron un efecto cuadrático (Figura 6F y 6G), mientras que el Cu mostró un efecto lineal (Figura 6H). La concentración de Na se presentó de manera lineal, aumentando en 127 % por cada unidad de cambio en CE (Figura 8A). Las proporciones K:Na, Ca:Na y Mg:Na, sufrieron disminuciones de manera cúbica, presentándose mayor reducción de las proporciones entre 1 y 3 dSm^{-1} (Figura 7B, 7C y 7D).

El efecto de la salinidad en la concentración de minerales en las hojas de las plantas suele modificarse por la presencia de sales en el suelo o medio de crecimiento. En esta investigación, el incremento de la CE, mediante NaCl, modificó las concentraciones de elementos esenciales, como el K, el cual fue incrementado parcialmente, mientras que redujo las concentraciones de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu. Aunque el aumento de la CE de la solución nutritiva aumentó parcialmente la concentración foliar de K en las CE medias, en las CE altas las concentraciones de este elemento fueron estadísticamente iguales a las condiciones iniciales. El resultado antes mencionado es similar a lo reportado en *Spondias tuberosa* Arr. Cam (Da silva *et al.*, 2008) y *Vitis vinifera* L. (Baneh *et al.*, 2014), donde el aumento en la presencia de NaCl en la solución nutritiva no modificó el contenido foliar de K. El incremento de la CE de la solución nutritiva ha provocado disminución de las concentraciones foliares, principalmente de Ca, Mg y Mn en diversos cultivos como lo son *Ocimum basilicum* L.

(Scagel *et al.*, 2017; 2019) y *Brassica oleracea* L. (Sahin *et al.*, 2018). El incremento en la concentración foliar de Na era un resultado esperado, pues el incremento de la CE de la solución nutritiva se realizó mediante el uso de NaCl. Como consecuencia de lo antes mencionado, las proporciones de K, Ca y Mg respecto al Na, se redujeron mayormente en los niveles bajos de CE. Tendencias similares a los resultados antes mencionados, fueron reportadas en *Morus alba* L. (Lu *et al.*, 2017) y *Zinnia elegans* Jacq. y *Tagetes erecta* L. (Escalona *et al.*, 2014), quienes reportaron que conforme aumentó la CE, se presentó una disminución en las proporciones de los nutrimentos antes mencionados, siendo en las CE más bajas, las mayores reducciones en las proporciones. Kronzucker *et al.* (2013) y Tang *et al.* (2018) señalan que la reducción en la proporción de K, Ca y Mg contra el Na, obedece a que el Na causa una despolarización, seguida de una desintegración de la membrana plasmática lo que provoca un desplazamiento de dichos minerales. Dicho desplazamiento induce una deficiencia de K, la cual inhibe procesos enzimáticos en el citoplasma y compromete el crecimiento de la planta (Tester and Davenport, 2003). Por lo tanto, la interacción entre la concentración relativa de K y Na se ha considerado un factor clave para determinar la tolerancia a la sal en las plantas (Munns and Tester, 2008; Negrão *et al.*, 2017).

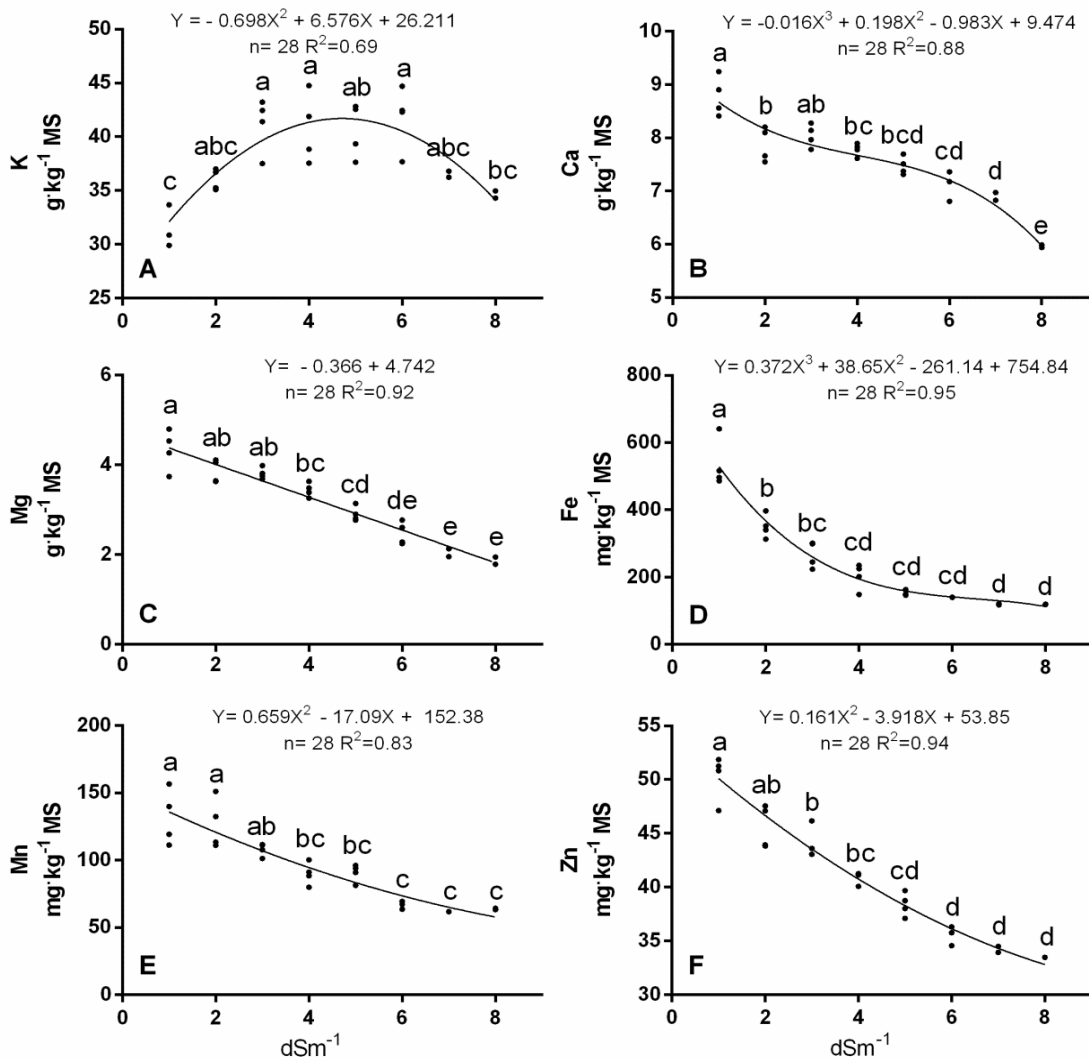


Figura 6. Efecto de la CE en la concentración mineral de hojas de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$).

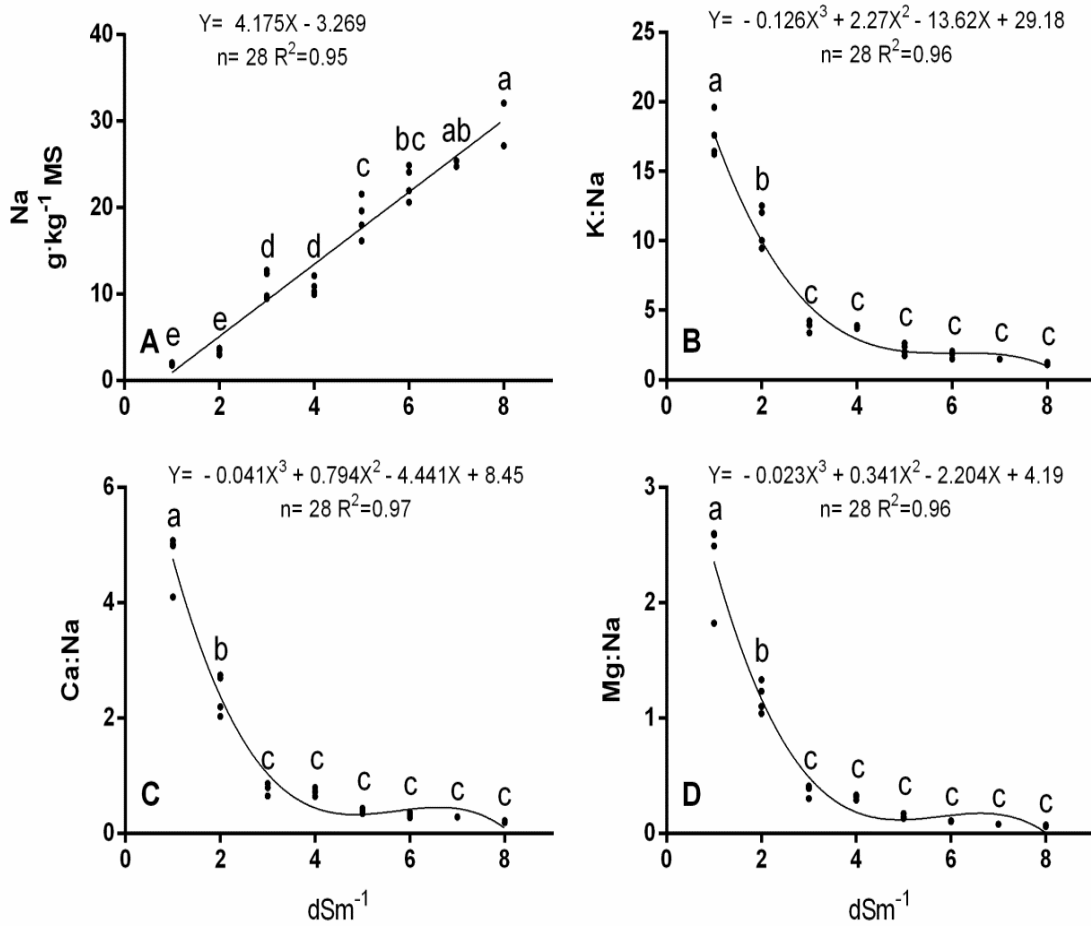


Figura 7. Efecto de la CE en la concentración mineral de Na y las proporciones de K:Na, Ca:Na y Mg:Na, en hojas de plántulas de *Moringa oleifera* Lam.

Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$).

4.2.5 Carbono

La interacción entre CE*órgano resultó significativa para el porcentaje de carbono. La relación entre la CE y el porcentaje de carbono (PC) fue lineal en todos los órganos. La raíz fue el órgano que mostró menor decremento en PC al incrementar la salinidad, por cada unidad de CE incrementada, el PC se redujo en 0.76 % (Figura 8A), la reducción de PC para el tallo fue de 0.92 % (Figura 8C); y para la hoja de 1.18 %. (Figura 8E). Por lo que la salinidad afectó a los órganos de la planta en el siguiente orden; raíz < tallo < hoja.

La relación entre la CE y el contenido de carbono (CC) en los órganos se presentó de manera cuadrática. El incremento de la CE de 1 a 8 dSm⁻¹ provocó un decremento en el CC, siendo la raíz el tejido más afectado, con una reducción del 95 % (Figura 8B); mientras que el tallo mostró una reducción del 86 % (Figura 9D). Para el caso del CC en hoja, el efecto mostrado fue cuadrático, sin embargo, las CE de 1 y 2 dSm⁻¹ fueron estadísticamente iguales. El incremento de CE de 2 a 8 dSm⁻¹ causó un decremento del 90 % (Figura 8F). En los tres órganos, la disminución del CC fue mayor en los niveles bajos de CE reduciéndose dicha disminución al incrementarse la CE.

El porcentaje y contenido de carbono varía entre los tipos, edades y órganos del árbol, además de las condiciones ambientales (Thomas y Martin, 2012). En el presente estudio el porcentaje y contenido de carbono disminuyeron al incrementarse la CE, este resultado puede ser consecuencia de la afectación al intercambio gaseoso en las hojas, lo que causa un

decremento en la asimilación de carbono y al estrés causado por la salinidad en el metabolismo de la planta (Azuma *et al.*, 2010; Tarchoune *et al.*, 2012).

Las plantas sometidas a estrés salino muestran valores bajos de carbono, en comparación con plantas en condiciones normales. Dicho fenómeno está relacionado con la reducción de la presión parcial de CO₂ debido a la reducción de la conductancia estomática (Dadkhah, 2013). Aunado a lo anterior, las plantas sometidas a estrés salino pueden detener por completo la fotosíntesis, pero no la respiración, causando con esto un decremento en el contenido de carbono (Flexas *et al.*, 2006).

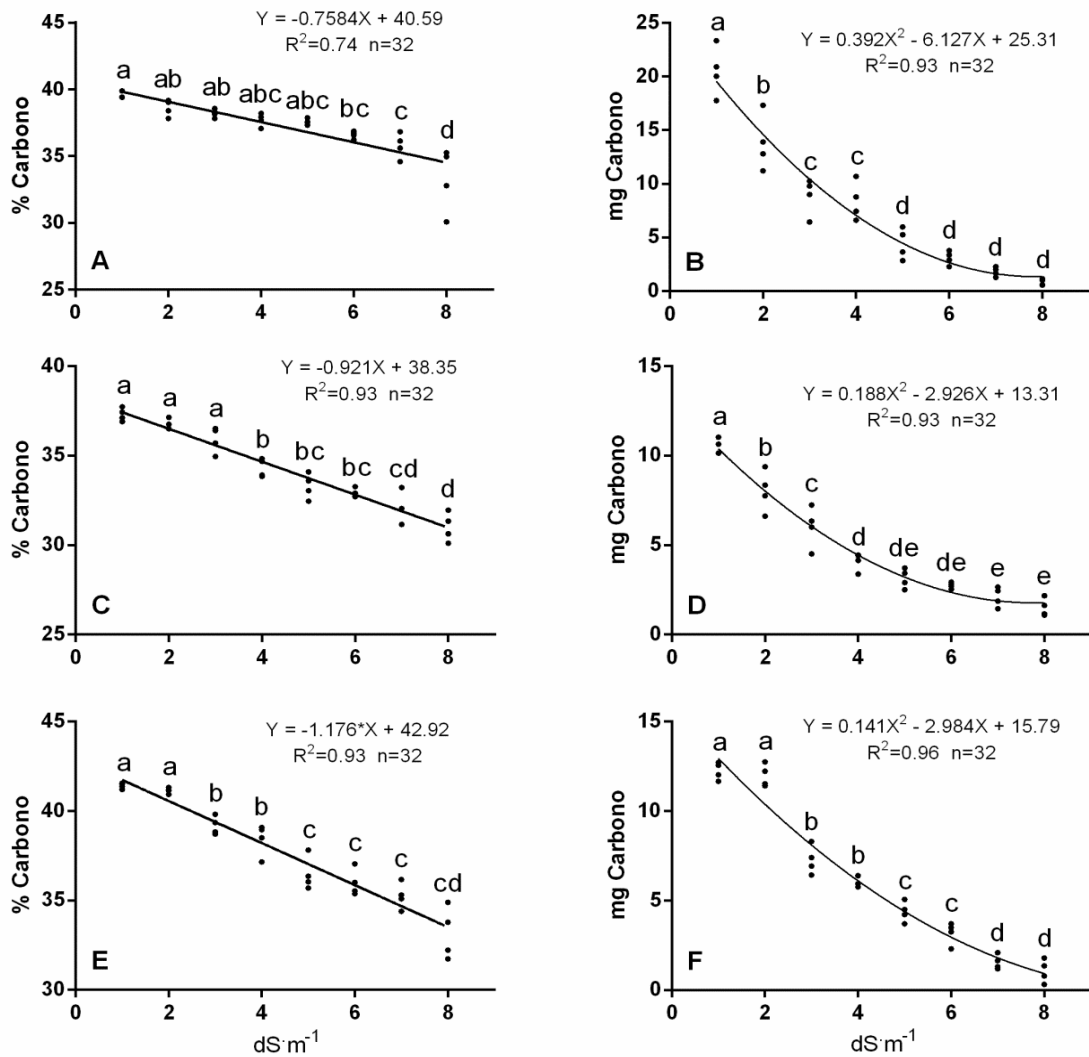


Figura 8. Efecto de la CE en el porcentaje y contenido de carbono de plántula de *Moringa oleifera* Lam.

A: raíz, B: tallo y C: hoja. Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$).

4.2.6 Proteína

El porcentaje de proteína (PP) mostró efectos significativos en la interacción de CE*órgano. El PP en raíz mostró una relación lineal con la CE, encontrando que por cada dSm^{-1} que se incrementó la CE, el PP se incrementa en 1.72 % (Figura 9A). Para el tallo también se encontró una relación lineal entre el PP y la CE, encontrando que por cada unidad de cambio en CE el PP se incrementó en 4.13 % (Figura 9C). En la hoja el PP mostró un efecto cúbico (Figura 9E).

Para el contenido de proteína (CP) el análisis estadístico mostró efecto significativo de la interacción entre CE*órgano. Para raíz se encontró una tendencia lineal ($p=0.000$) con decrementos en el CP de 3.94 mg por planta al incrementarse una unidad de CE (Figura 9B). Para el tallo también se encontró una tendencia lineal con decrementos de CP de 4.5 mg por unidad de cambio de CE (Figura 9D). Para hoja la tendencia también fue lineal con cambio de -11.11 mg por unidad de CE (Figura 9F). En los tres órganos no se encontraron diferencias significativas en el CP en las conductividades de 1 y 2 dSm^{-1} .

El porcentaje y contenido de proteína en plantas sometidas a estrés salino puede variar respecto al tipo de sal, nivel de salinidad, tiempo de exposición y tipo de planta, además del órgano en cuestión. El porcentaje de proteína se incrementó en todos los órganos de la planta al incrementarse la CE. Algunos autores han reportado el incremento del porcentaje de proteína cuando se ha incrementado la salinidad en la solución nutritiva, como fue el caso de *Cichorium spinosum* L. (Petropoulos *et al.*, 2017), *Paulownia fortunei* (Seemann y Hemsley) (Ayala-Astorga y Alcaraz-Meléndez, 2010) y *Broussonetia papyrifera* L. (Zhang *et al.*, 2013). Sin embargo, nuestros resultados difieren de lo reportado por Castillo-Lopez *et al.* (2017),

quienes encontraron diferente porcentaje de proteína en hoja de las mismas variedades analizadas en este experimento. Dichas plantas fueron producidas sin estrés alguno. Datos similares fueron reportados por Nouman *et al.* (2012), quienes encontraron una disminución en el porcentaje de proteína en plántulas de *Moringa oleifera* Lam. cuando la solución nutritiva pasó de 4 a 8 dSm⁻¹. La salinidad reduce la presencia de proteínas involucradas en la fotosíntesis, sin embargo, aumenta la presencia de proteínas relacionadas a procesos fisiológicos importantes, como la estabilización de la membrana, la homeostasis iónica y la transducción de señales. Algunas de las proteínas que incrementan su abundancia son las que participan en biosíntesis de solutos compatibles, como la glutamina sintasa (GS), crucial para la biosíntesis de prolina; dicho compuesto induce tolerancia a la salinidad ya que posee una importante actividad antioxidante, osmoprotectora y estabilizadora de la membrana celular, por lo cual una elevada presencia de prolina contribuye a un cierto nivel de tolerancia de la planta hacia la salinidad (Kosová *et al.*, 2011; Nouman *et al.*, 2018).

El contenido de proteína, en los tres órganos, disminuyó conforme aumentó la CE. El incremento de la CE provocó una disminución en el contenido de proteína en la plántula de moringa, principalmente en las hojas. Este resultado es contrario al obtenido con el porcentaje de proteína, debido a que en el contenido de proteína influye el peso seco de la planta, el cual disminuyó considerablemente al incrementarse la CE. La mayor reducción de proteína en hoja se explica mediante el proceso fisiológico que ocurre en la senescencia foliar, el cual es uno de los primeros procesos provocados por la salinidad, lo que causa una disminución considerable del peso seco de las hojas, lo que causa una disminución en el contenido de proteína. Además, la senescencia foliar causa removilización de nutrimentos a otros órganos de la planta, como el N (Allu *et al.*, 2014; Araujo *et al.*, 2011).

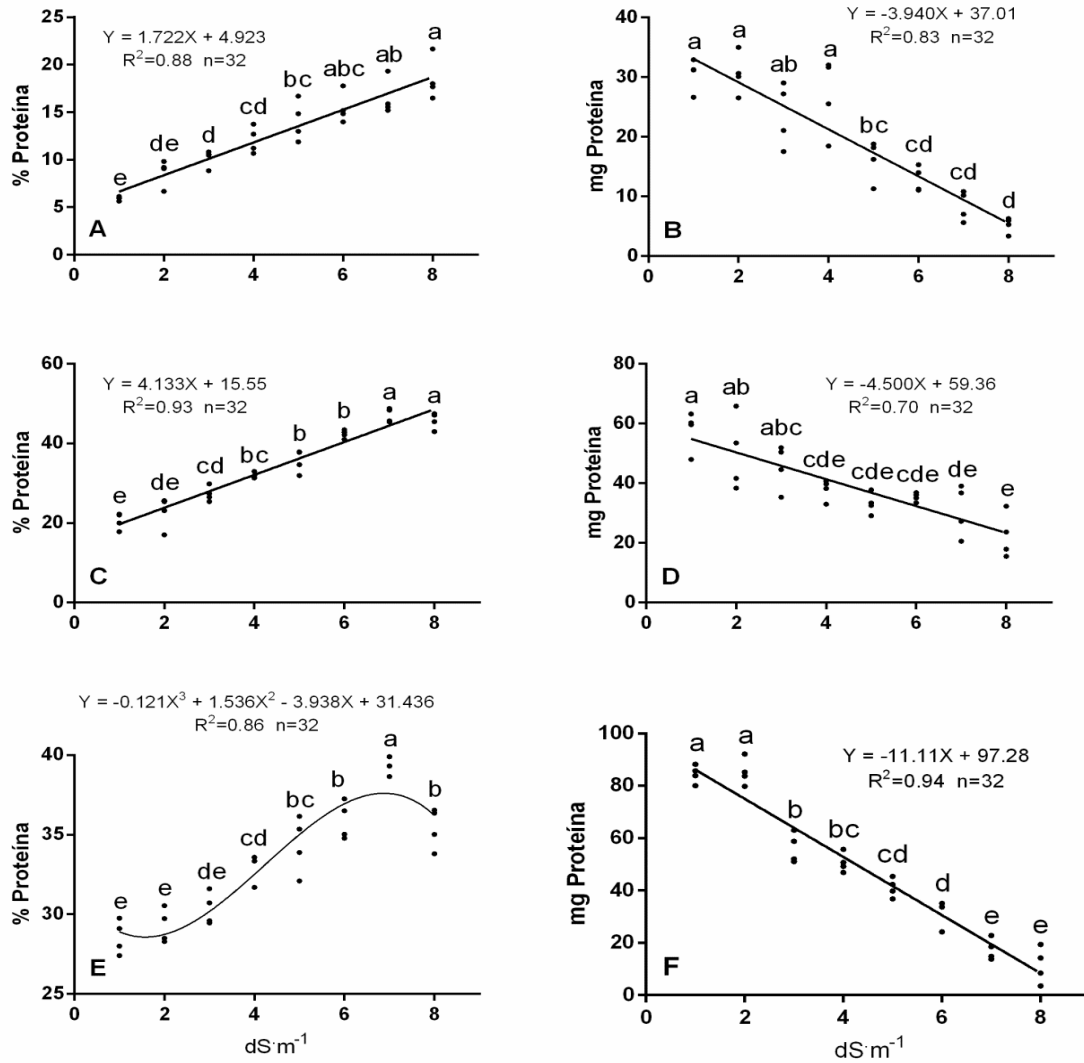


Figura 9. Efecto de la CE en el porcentaje y contenido de proteína en plántula de *Moringa oleifera* Lam.

A: raíz, B: tallo y C: hoja. Literales diferentes en las columnas denotan diferencias estadísticas significativas (DMS, $p < 0.05$).

4.3 Experimento 3

4.3.1 Emergencia

La salinidad tuvo un efecto negativo en la mayoría de las variables de emergencia. El porcentaje de emergencia disminuyó a medida que la CE aumentó con un efecto lineal-cuadrático; el porcentaje de emergencia disminuyó 2.9 % y 70.4 % cuando la CE cambió de 2.5 a 6.0, y de 6.0 a 9.5 dSm⁻¹, respectivamente. La uniformidad y la supervivencia también tuvieron efectos lineales y cuadráticos, con tendencias similares al porcentaje de emergencia, la disminución de estas variables fue menor en el nivel de salinidad más bajo que en los niveles más altos, con una supervivencia de 0.0 en la CE de 9.5 dSm⁻¹. Los niveles de aplicación de Si mostraron un efecto lineal para la supervivencia, encontrando que a medida que el Si aumentaba, la supervivencia aumentaba (Cuadro 5).

La salinidad redujo la emergencia de semillas de *Moringa oleifera* Lam. Nuestros resultados concuerdan con Alatar (2011), quien encontró que el porcentaje de germinación de *Moringa peregrina* Forssk. disminuyó significativamente cuando se trató con una solución nutritiva con una CE de 6 dSm⁻¹. Elhag y Hussein (2012), también encontraron que la uniformidad de emergencia de *Moringa oleifera* Lam. disminuyó cuando se utilizó una solución con 4 dSm⁻¹, mientras que la velocidad de emergencia y de emergencia se redujeron en un 50 % utilizando soluciones con 8 y 16 dSm⁻¹, respectivamente. A diferencia de otros autores como Biju *et al.*, (2017) que informaron que 2 mM de Si aumentaron la germinación y emergencia de *Lens culinaris* Medik, bajo condiciones de crecimiento óptimas y de estrés por sequía, en este experimento Si solo aumentó la supervivencia.

Cuadro 5. Efecto de la CE en la emergencia de *Moringa oleifera* Lam.

	E	U	S
	%		%
EC (dSm⁻¹)			
2.5	90.79	5.44	85.48
6.0	87.94	5.09	49.92
9.5	17.46	0.97	00.00
±EE	2.37	0.41	2.47
<i>Lineal</i>	0.000	0.000	0.000
<i>Cuadrático</i>	0.000	0.002	0.029
Si (mgL⁻¹)			
0	64.76	3.30	39.17
50	66.98	3.89	47.88
100	64.44	0.31	48.34
±EE	2.37	0.41	2.47
<i>Lineal</i>	ns	ns	0.022
<i>Cuadrático</i>	ns	ns	ns

G: germinación; U: uniformidad de germinación; S: supervivencia de plántulas. Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. EE: error estándar. ns: diferencia no significativa.

4.3.2 Crecimiento

La salinidad reduce el crecimiento y la biomasa. La CE de 6.0 dSm^{-1} redujo el 49 % de la altura de la planta, el 7 % del diámetro del tallo, el 47 % del número de hojas, el 81 % del área de las hojas, el 66 % del peso seco de la raíz, el 55 % del peso seco del tallo y el 77 % del peso seco de las hojas (Cuadro 6). Por otro lado, la aplicación de Si tuvo un efecto positivo en el crecimiento de las hojas. El Si tuvo efectos lineales y cuadráticos en el número de hojas, aumentando un 23 % cuando la concentración de Si en la solución nutritiva cambió de 0 a 50 mgL^{-1} y un aumento adicional de Si (50 a 100 mgL^{-1}) redujo el número de hojas 3 %. La aplicación de Si tuvo un efecto lineal para el área de las hojas, aumentando 43 % cuando la concentración de Si cambió de 0 a 50 y 21 % cuando se cambió de 50 a 100 mgL^{-1} . Los resultados antes mostrados concuerdan con Nouman *et al.*, (2012), quienes informaron que 8 dSm^{-1} redujeron la longitud de la raíz y el número de hojas y 12 dSm^{-1} redujeron la altura de la planta en plántulas de 30 días. De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, el Si es un elemento beneficioso para las plantas de moringa, ya que aumenta el crecimiento de la parte aérea de la planta y la biomasa. El efecto beneficioso del Si sobre el crecimiento y la biomasa vegetal se ha encontrado en otras especies, como *Gossypium hirsutum* L., *Brassica napus* L., *Triticum aestivum* L. y *Oryza sativa* L. (Mehrabanjoubani *et al.*, 2015; Pati *et al.*, 2016). Li *et al.*, (2015) encontraron que la aplicación de Si, en plantas sometidas a estrés salino, regula la expresión de las acuaporinas, lo que contribuye al aumento de la conductividad hidráulica de la raíz y mejora la absorción de agua. Si también aumenta la conductividad hidráulica del vástago, lo que beneficia el suministro de agua a las hojas, aumentando el estado hídrico de la parte aérea, beneficiando el crecimiento de hojas y brotes.

4.3.3 Biomasa

El peso seco de la raíz aumentó 9 % y 37 % cuando las concentraciones de Si aumentaron de 0 a 50 y 50 a 100 mgL⁻¹, respectivamente. El peso seco del tallo tuvo un efecto lineal positivo de Si; el peso del tallo seco aumentó 7 % y 15 % cuando la concentración de Si cambió de 0 a 50 y de 50 a 100 mgL⁻¹, respectivamente. El peso de las hojas secas tuvo un efecto lineal y cuadrático, aumentando un 35 % cuando la concentración de Si cambió de 0 a 50 y el peso de las hojas secas se redujo un 3 % cuando la concentración de Si cambió de 50 a 100 mgL⁻¹ (Cuadro 6).

La respuesta más temprana en el estrés por salinidad es una reducción en la tasa de expansión de la hoja, seguida por el cierre del estoma y la depresión de la fotosíntesis y la transpiración (Meng y Fricke, 2017). Por lo tanto, la producción de biomasa se ve comprometida. Este hecho está de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, así como los reportados por Elhag y Hussein (2012), quienes encontraron una reducción significativa en el peso seco de *Moringa oleifera* Lam. sujeto a una CE de 4 dSm⁻¹.

Cuadro 6. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y biomasa de plántulas *Moringa oleifera* Lam.

	AP	DT	LR	NH	AF	PSR	PST	PSH
	cm	mm	cm		cm²	Mg		
CE								
(dSm ⁻¹)								
2.5	17.89 a	3.13 a	7.00	6.38 a	36.30 a	79.50 a	91.43 a	105.41 a
6.0	9.06 b	2.94 b	6.53	3.44 b	6.80 b	27.10 b	41.33 b	23.89 b
±EE	0.42	0.04	0.18	0.17	1.03	1.03	1.59	1.91
<i>P</i>	0.000	0.009	ns	0.000	0.000	2.08	0.000	0.000
Si								
(mgL ⁻¹)								
0	12.71	2.97	6.56	4.26	15.50	45.00	60.39	53.17
50	13.84	3.01	6.90	5.30	22.20	49.10	64.52	71.57
100	13.87	3.13	6.84	5.23	26.90	65.80	74.23	69.20
±EE	0.51	0.05	0.22	0.21	1.26	2.55	1.95	2.34
Lineal	ns	ns	ns	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000
Cuadrático	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.004

AP: altura de planta; DT: diámetro de tallo; LR: longitud de raíz; NH: número de hojas; AF: área foliar; PSR: peso seco de raíz; PST: peso seco de tallo; PSH: peso seco de hoja.

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; *p*: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

4.3.4 Concentración mineral

Raíz

La salinidad tuvo efecto sobre la concentración mineral de la raíz. Los nutrientes K y Mg disminuyeron 29 % y 24 %, respectivamente, a medida que la salinidad aumentó de 2.5 a 6.0 dSm⁻¹. Los micronutrientes Zn, Cu y Mn aumentaron 94 %, 35 % y 30 %, respectivamente, a medida que la salinidad aumentó de 2.5 a 6.0 dSm⁻¹. El Ca no fue afectado por la salinidad. El Si no tuvo efecto sobre la concentración de minerales, excepto para el Ca. Los análisis estadísticos mostraron un efecto lineal y cuadrático del Si sobre la concentración de Ca, con la concentración más alta de Ca observada a 50 mgL⁻¹. El análisis de varianza mostró interacción entre CE y Si para Na y Fe. Para el Na, el Si no tuvo efecto sobre la concentración de Na a baja salinidad, sin embargo, a alta salinidad (6.0 dSm⁻¹), el Na disminuyó un 12 % ya que el Si aumentó de 0 a 50, y aumentó un 2.0 % cuando el Si aumentó de 50 a 100 mgL⁻¹. Para la concentración de Fe en la raíz, a una concentración baja de CE, el efecto del Si fue cuadrático, aumentando un 6 % cuando el Si aumentó de 0 a 50 y disminuyendo un 17 % de 50 a 100 mgL⁻¹. La concentración de Fe a alta salinidad fue lineal, aumentando 0.50 mgkg⁻¹ Fe de peso seco (Figura 10).

Tallo

La salinidad tuvo efecto sobre las concentraciones en el tallo de Ca, Mg y Na. Los elementos Ca y Mg se redujeron en 12 % y 15 %, respectivamente. Mientras que el Na aumentó debido a la salinidad en un 108 %. El Si no tuvo efecto en la concentración mineral del tallo (Figura 11).

Hoja

Concentración mineral de las hojas: el análisis estadístico mostró una interacción de CE*Si para la concentración de K en hojas. En la salinidad de 2.5 dSm^{-1} , la concentración de K no tuvo diferencias estadísticas entre los niveles de Si. Mientras que a 6.0 dSm^{-1} , la concentración de K se redujo debido a la salinidad, sin embargo, cuando se aplicó Si (50 mgL^{-1}), el estrés de salinidad no afectó la concentración de K. La concentración de Ca se vio afectada por la salinidad, sin embargo, el Si (50 mgL^{-1}) alivió el estrés de la salinidad. La concentración de Mg se vio afectada por la salinidad y el Si, pero no se encontró interacción. La concentración de Mg disminuyó debido a la salinidad en 47% y aumentó debido a la aplicación de Si en 43% con 50 mgL^{-1} y 24% con 100 mgL^{-1} . La concentración de Na aumentó a medida que aumentó la salinidad. La presencia de Si redujo la concentración de Na en todos los niveles de salinidad, con un promedio del 11% (Figura 12). La salinidad tuvo efecto en la concentración de Zn en las hojas, con concentraciones más altas observadas en salinidad alta. La concentración de Zn no se vio afectada por el Si. El Si tuvo efecto en la concentración de Mn en hojas, con una concentración mayor a 50 mgL^{-1} . La concentración de Mn no se vio afectada por la salinidad. Los nutrientes Cu y Fe mostraron interacción entre CE*Si. La concentración de Cu aumentó a medida que aumentó la concentración de Si, sin embargo, para 2.5 dSm^{-1} , la concentración máxima se obtuvo a 50 mgL^{-1} , mientras que para 6.0 dSm^{-1} la concentración máxima de Cu se obtuvo a 100 mgL^{-1} . La concentración de Fe aumentó con 50 mgL^{-1} de aplicación de Si, pero la concentración de Fe fue mayor a 6.0 dSm^{-1} (Figura 12).

Los resultados de esta investigación concuerdan con Nouman *et al.*, (2012) quienes encontraron que, a un nivel de salinidad de 8 dSm⁻¹, las concentraciones de K, Ca y Mg se redujeron; mientras que a 4 dSm⁻¹ la concentración de Na se incrementó en hojas y raíces de moringa. Coskun *et al.* (2013) y Kronzucker *et al.* (2013), explicaron el aumento de la concentración de Na y la disminución de las concentraciones de K, Ca y Mg en plantas con una solución nutritiva alta en sales de Na. Dichos autores mencionan que el Na puede inhibir directamente el funcionamiento de los transportadores de K, además de causar una despolarización de la membrana plasmática y agregaron que la desintegración de la membrana plasmática se produce debido al shock iónico y osmótico, lo que provoca un desplazamiento de Ca, K y agua. Los resultados mostraron que un incremento en la CE causó incrementos de Zn, Mn y Cu en la raíz y en las concentraciones de Zn y Cu en la hoja. Estos resultados también se han encontrado en otras especies como *Lactuca sativa* L. (Neocleous *et al.*, 2014) y *Andrographis paniculata* Nees (Talei *et al.*, 2012); sin embargo, Pérez-López *et al.*, (2014) informaron que, en *Hordeum vulgare* L., las concentraciones de Fe, Zn y Cu disminuyeron, cuando la CE aumentó. Estos resultados muestran que la salinidad tiene diferentes efectos en las concentraciones de Fe, Mn, Zn y Cu en diferentes especies. Los resultados de esta investigación mostraron que la aplicación de Si a la moringa aumentó las concentraciones de Ca, K, Mg, Cu, Mn y Fe en las hojas y disminuyó las concentraciones de Na en las hojas. Estos resultados también se han encontrado en otras especies. Shahzad *et al.* (2013) y Xu *et al.* (2015), encontraron, en *Vicia faba* L. y *Aloe vera* L., respectivamente, mayor K, Ca y Mg y menor concentración de hojas de Na cuando se agregó Si a la solución nutritiva. Las menores concentraciones de Na se han explicado debido al efecto del Si en el apoplasto de la célula como una barrera física que contribuye a la reducción de la absorción de Na (Luyckx *et al.*,

2017; Rios *et al.*, 2017). Este efecto también se ha explicado al aumentar el contenido de solutos orgánicos de raíz, causados por el Si, que limita la absorción de Na y aumenta la absorción de K, Ca y Mg, lo que mejora la estabilidad de la membrana celular (Li *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2015). Los datos anteriores concuerdan con Gottardi *et al.* (2012), quienes informaron un aumento en las concentraciones de Cu y Zn en las plantas de *Valerianella locusta* L. cuando se agregó Si a la solución nutritiva; Mehrabanjoubani *et al.*, (2015) encontraron resultados similares para Zn en *Brassica napus* L. y *Triticum aestivum* L. y Fe para *Brassica napus* L., *Gossypium hirsutum* L. y *Triticum aestivum* L. Resultados presentados por Pavlovic *et al.*, (2013) indican que el Si alivió la deficiencia de Fe en *Cucumis sativus* L. cultivada en suelos calcáreos, que tienen poco Si disponible; la presencia de Si aumentó la concentración de Fe en el apoplasto de la raíz y mejoró su movilización, debido a la mediación en la biosíntesis de compuestos quelantes de Fe.

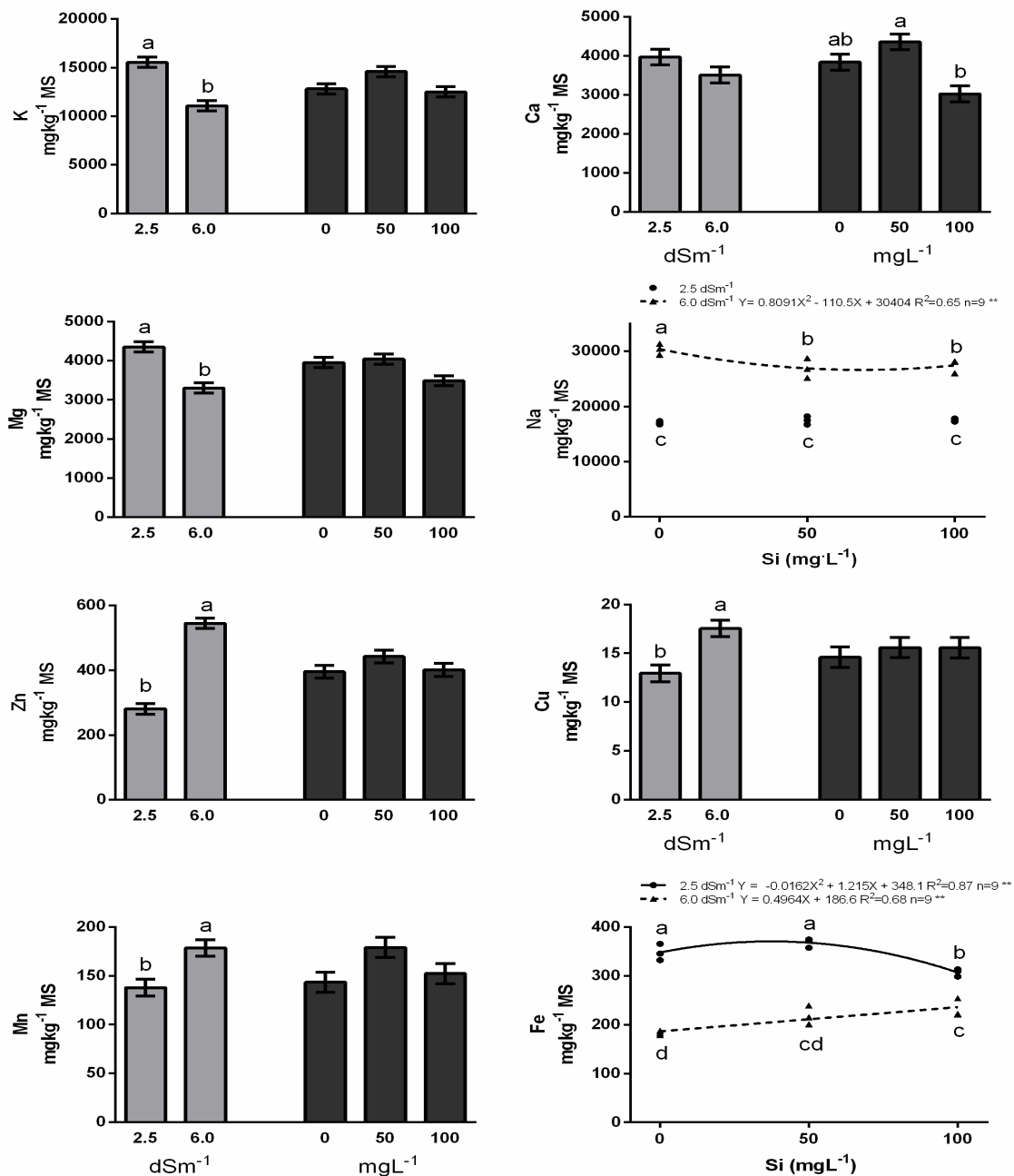


Figura 10. Efectos de la CE y el Si o la interacción entre ambos factores, en la concentración de iones en la raíz de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $** p \leq 0.01$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

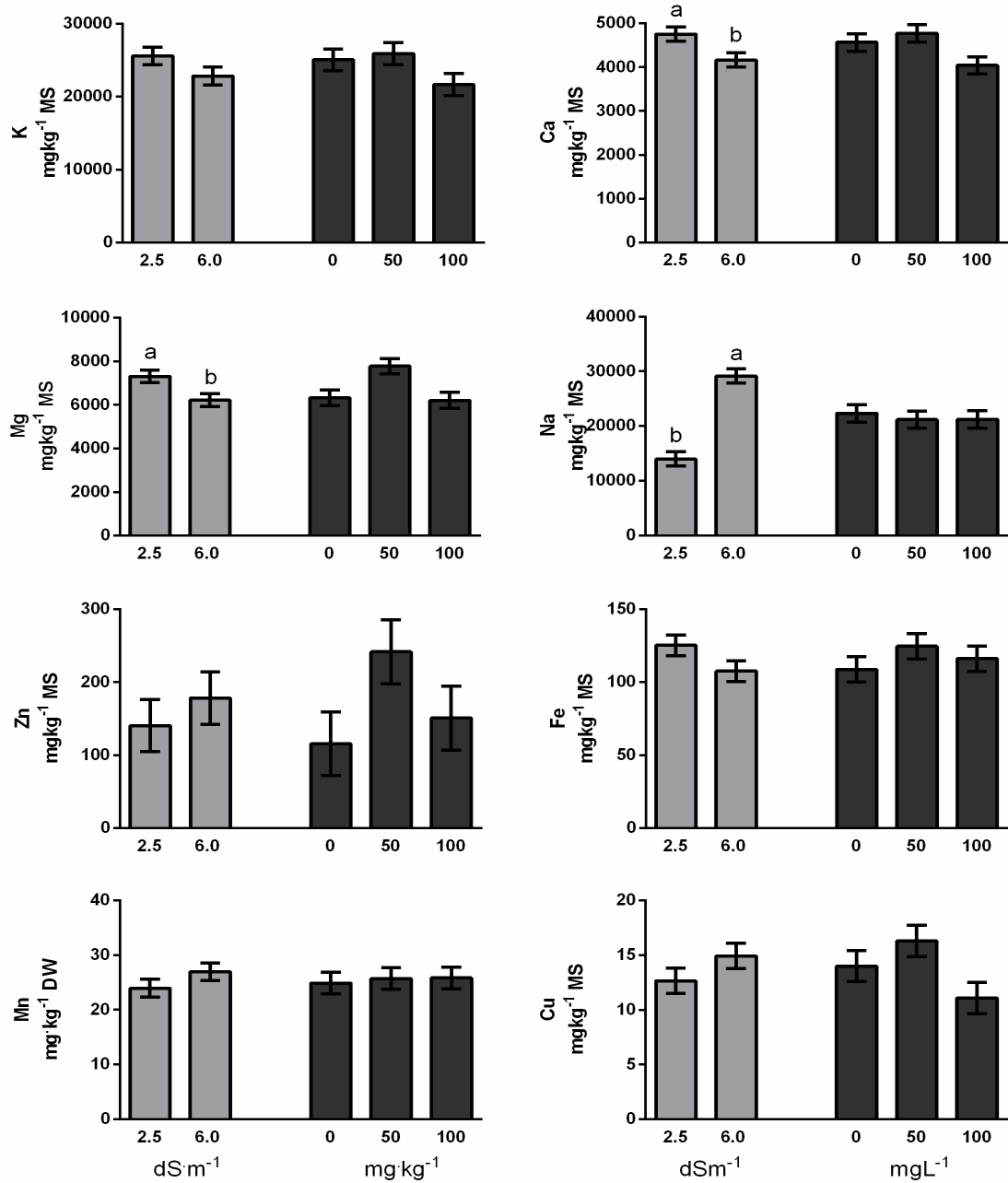


Figura 11. Efectos de la CE y el Si en la concentración de iones en el tallo de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

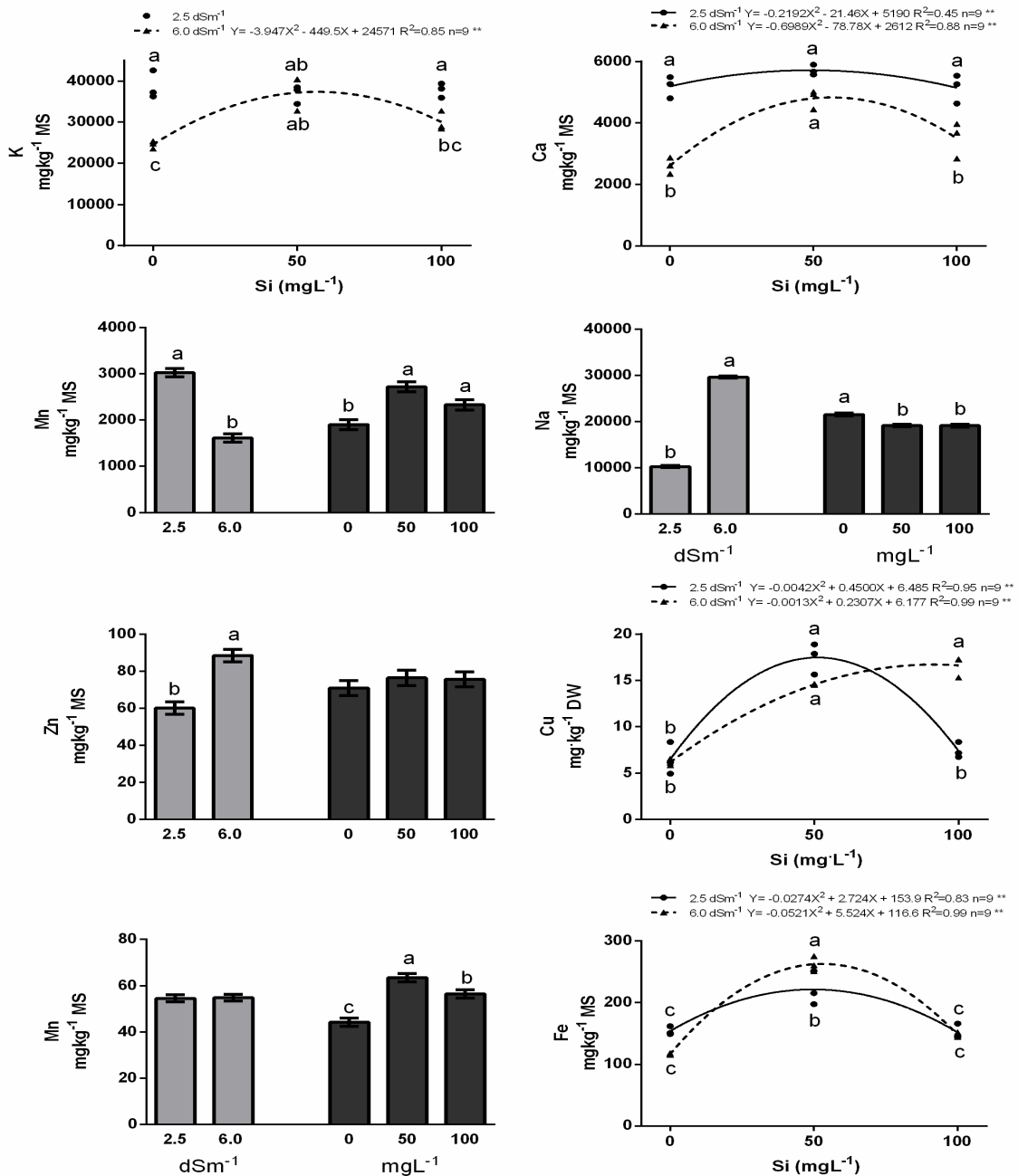


Figura 12. Efectos de la CE y el Si o la interacción entre ambos factores, en la concentración de iones en la hoja de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

4.4 Experimento 4

4.4.1 Emergencia

El aumento de la CE no mostró ningún efecto en la emergencia y uniformidad de emergencia. Sin embargo, la supervivencia de plántulas mostró un decremento de 9 % cuando la CE de la solución nutritiva fue de 6.5 dSm^{-1} (Cuadro 7). La presencia de Si en la solución nutritiva incrementó la supervivencia de plántulas en 15 % y 6 %, cuando la solución nutritiva contenía 50 y 100 mgL^{-1} de Si, respectivamente (Cuadro 7). Algunos autores han reportado el efecto benéfico del Si en la emergencia, tal es el caso de Haghghi *et al.* (2012), quienes reportaron que en *Solanum lycopersicum* L. el Si mantuvo el porcentaje de emergencia en niveles bajos y moderados de salinidad, mientras que en un nivel alto de salinidad, una concentración de 1 mM incrementó dicha variable. Sin embargo, nuestros resultados sólo muestran efecto de este elemento en la supervivencia de las plántulas.

Cuadro 7. Efecto de la CE y el Si de la solución nutritiva en la emergencia de *Solanum lycopersicum* L.

CE	E	U	S
(dSm⁻¹)	%	%	%
1.5	88.52	4.04	95.09 a
4.0	89.44	3.55	85.02 a
6.5	85.37	3.37	77.63 b
EE±	2.34	0.35	2.35
<i>p</i>	ns	ns	0.000
Si	%	%	%
(mgL⁻¹)	%	%	%
0	88.52	3.52	80.15 b
50	86.11	3.44	92.28 a
100	88.70	4.00	85.31 ab
EE±	2.34	0.35	2.35
<i>p</i>	ns	ns	0.007

G: germinación; U: uniformidad de germinación; S: supervivencia de plántulas.
 Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; *p*: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

4.4.2 Crecimiento

El crecimiento de la plántula fue significativamente afectado por la salinidad. La altura de plántula se redujo en 34 % cuando la CE pasó de 1.5 a 4 dSm⁻¹ y 40 % cuando la CE pasó de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹. El diámetro de tallo se redujo en 17 % en ambos incrementos de CE. El número de hojas se redujo en 18 % y 16 % cuando la CE pasó de 1.5 a 4.0 dSm⁻¹ y de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹, respectivamente. El área foliar fue la variable más afectada, el incremento de la CE de 1.5 a 4.0 dSm⁻¹ redujo en 43 % dicha variable, mientras que cuando la CE pasó de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹ la reducción fue de 56 % (Cuadro 8).

La aplicación de Si mostró un efecto cuadrático en las CE de 4.0 y 6.5 dSm⁻¹ para el número de hojas y en las CE de 1.5 y 4 dSm⁻¹ para el área foliar (Figura 13).

En la CE de 4.0 dSm⁻¹ el número de hojas aumentó en 40 % cuando se incrementó 0 a 50 mgL⁻¹ de Si, sin embargo, sufrió una reducción del 2 % cuando la concentración de Si pasó de 50 a 100 mgL⁻¹ Si. Mientras que a una CE de 6.5 dSm⁻¹, el número de hojas de aumentó en 8 % cuando el Si se incrementó 0 a 50 mgL⁻¹, sin embargo, sufrió una reducción del 4 % cuando concentración de Si pasó de 50 a 100 mgL⁻¹.

El área foliar fue la variable de crecimiento más afectada en la interacción de CE*Si. En una CE de 1.5 dSm⁻¹ el área foliar se incrementó en 36 % cuando se incrementó 0 a 50 mgL⁻¹ de Si, mientras que cuando el Si pasó de 50 a 100 mgL⁻¹ el incremento fue del 3 %. En una CE de 4.0 dSm⁻¹ la presencia de Si tuvo mayor efecto en el área foliar, ya que cuando se incrementó 0 a 50 mgL⁻¹ el área foliar incrementó en 175 %, mientras que cuando el Si pasó de 50 a 100 mgL⁻¹ hubo un decremento de 19 %.

4.4.3 Biomasa

Todas las variables de materia seca fueron afectadas por la salinidad. El peso seco de raíz, tallo y hoja se redujeron en 46 %, 57 % y 48 %, respectivamente, cuando la CE se incrementó de 1.5 a 4.0 dSm⁻¹, mientras que cuando la CE pasó de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹ el decremento del peso seco fue de 72 %, 66 % y 61 % para raíz, tallo y hoja, respectivamente (Cuadro 8).

La interacción CE*Si fue significativa para cada uno de órganos en los tres niveles de CE (Figura 14). La raíz fue el órgano más beneficiado por el Si. El peso seco de raíz en una CE de 1.5 dSm⁻¹ se incrementó en 38 % y 50 %, cuando la concentración de Si pasó de 0 a 50 mgL⁻¹ y de 50 a 100 mgL⁻¹, respectivamente. Mientras que a una CE de 4.0 dSm⁻¹ se incrementó en 231 % y redujo en 16 %, cuando la concentración de Si pasó de 0 a 50 mgL⁻¹ y de 50 a 100 mgL⁻¹, respectivamente. En la CE 6.5 dSm⁻¹, el peso seco de raíz aumentó en 37 % y se redujo en 5 % cuando la concentración de Si pasó de 0 a 50 mgL⁻¹ y de 50 a 100 mgL⁻¹, respectivamente. Las tendencias de los datos antes presentados se observaron en tallo y hojas, siendo la concentración de 50 mgL⁻¹ a una CE de 4.0 dSm⁻¹, donde se presentó el mayor impacto, incrementando en 92 % y 111 % el peso seco de tallo y hoja, respectivamente.

Cuadro 8. Efecto de la CE de la solución nutritiva en el crecimiento y biomasa de plántulas *Solanum lycopersicum* L.

CE	AP	DT	NH	AF	PSR	PST	PSH
(dSm⁻¹)							
	cm	mm		cm²		mg	
1.5	28.12 a	4.10 a	6.02 a	121.97 a	118.51 a	309.52 a	424.39 a
4.0	18.64 b	3.40 b	4.94 b	69.99 b	63.56 b	133.82 b	220.97 b
6.5	11.14 c	2.83 c	4.15 c	30.49 c	18.00 c	45.72 c	86.08 c
\pm EE	0.70	0.45	0.10	2.72	2.72	3.69	5.80
<i>p</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

AP: altura de planta; DT: diámetro de tallo; LR: longitud de raíz; NH: número de hojas; AF: área foliar; PSR: peso seco de raíz; PST: peso seco de tallo; PSH: peso seco de hoja.

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. \pm EE: error estándar; *p*: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

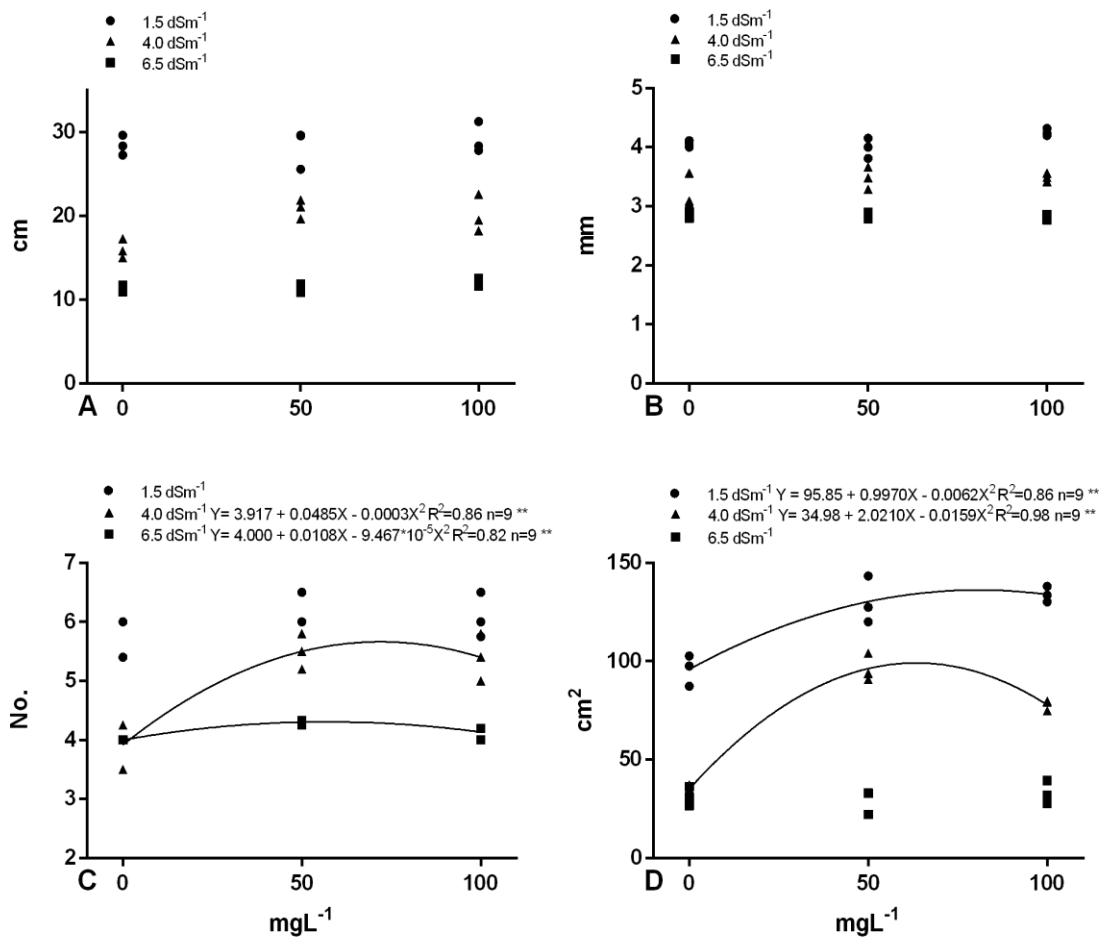


Figura 13. Efectos de la interacción CE*Si, en el crecimiento de *Solanum lycopersicum* L.

A: altura de planta; B: diámetro de tallo; C: número de hojas; D: área foliar.

Nivel de significancia: * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

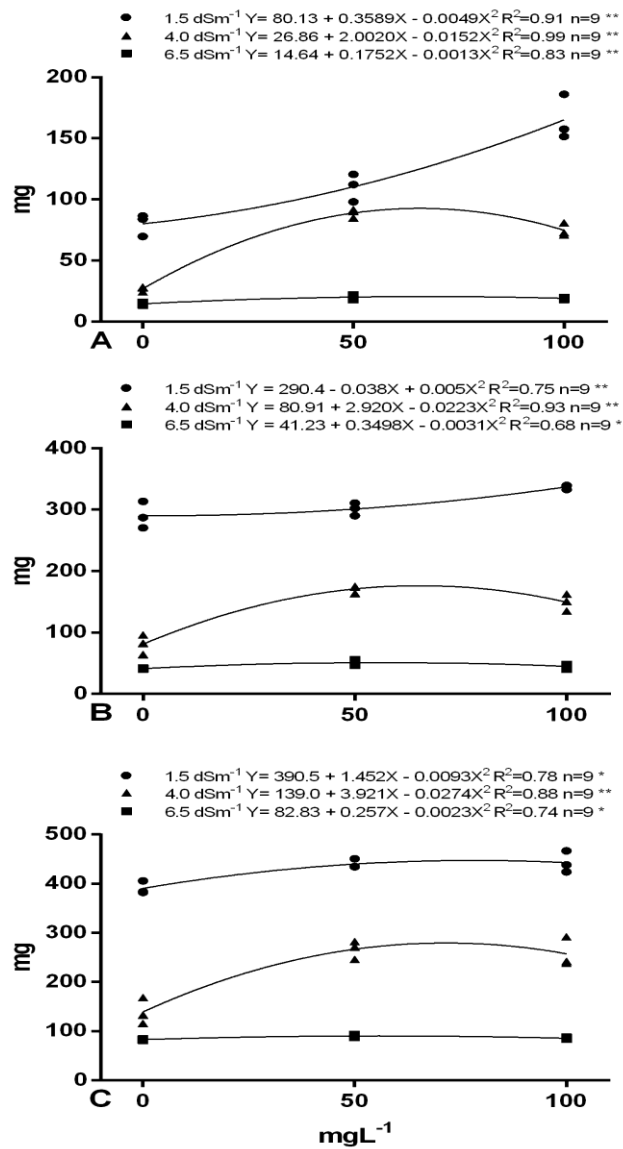


Figura 14. Efectos de la interacción CE*Si, en la biomasa de *Solanum lycopersicum* L.

A: raíz; B: tallo; C: hoja.

Nivel de significancia: * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

4.4.4 Concentración Mineral

El incremento de la CE modificó la concentración mineral en hojas de plántulas de *Solanum lycopersicum* L. ($p=0.000$). Los porcentajes de K y de Ca se redujeron en 20 % y 38 %, cuando la CE pasó de 1.5 a 4.0 dSm⁻¹, mientras que cuando cambió de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹, las reducciones fueron de 28 % y 20 %, respectivamente. Las concentraciones de Fe y Mn se redujeron en 25 % y 23 % cuando la CE pasó de 1.5 a 4.0 dSm⁻¹, mientras que cuando cambió de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹, las reducciones fueron de 23 % y 13 %, respectivamente. El Mg sufrió un decremento de 17 % cuando la CE pasó de 1.5 a 6.5 dSm⁻¹. Contrario a lo anterior, el Zn y Cu, mostraron un incremento de 19 % y 27 %, cuando la CE pasó de 1.5 a 6.5 dSm⁻¹. El Na, fue el elemento mayormente beneficiado con el incremento de la CE, lo cual era esperado, ya que el incremento de la CE se dio mediante NaCl. El Na se incrementó en 228 % cuando la solución nutritiva pasó de 1.5 a 4.0 dSm⁻¹, mientras que cuando pasó de 4.0 a 6.5 dSm⁻¹ el Na se incrementó en 16 %. Las proporciones entre el Na y macroelementos también fueron afectadas por el nivel de CE. La relación K:Na fue la que mayor impacto mostró, pues se redujo en 75 % cuando la CE 1.5 a 4.0 dSm⁻¹ y 39 % cuando la CE 4.0 a 6.5 dSm⁻¹. Mientras que las proporciones Ca:Na y Mg:Na se comportaron de la misma manera, disminuyendo en 52 % y 78 %, respectivamente, cuando la CE fue mayor a 1.5 dSm⁻¹ (Cuadro 9). Al igual que en los resultados antes mostrados, el incremento de la CE de la solución nutritiva ha provocado disminución de las concentraciones foliares, principalmente de Ca, Mg y Mn en diversos cultivos como lo son *Coriandrum sativum* L., (Ahmadi y Souri, 2018) y *Olea europea* L. (Bader *et al.*, (2018).

Cuadro 9. Efecto de la CE de la solución nutritiva en la concentración de elementos esenciales en plántulas *Solanum lycopersicum* L.

CE (dSm ⁻¹)	K	Ca	Mg	Zn	Cu	Fe	Mn	Na	K:Na	Ca:Na	Mg:Na
	-----%-----			-----mgkg ⁻¹ -----			%				
1.5	2.8 a	2.5 a	1.3 a	88 b	65 b	626a	429 a	1.0 c	2.8 a	2.6 a	1.3 a
4.0	2.2 b	1.6 b	1.0 b	94 b	63 b	469 b	332 b	3.2 b	0.7 b	1.3 b	0.3 b
6.5	1.63 c	1.2 c	0.9 b	109 a	81 a	361 c	288 c	3.8 a	0.4 c	1.1 b	0.2 b
±EE	0.05	0.05	0.03	2.82	1.05	14.4	8.4	0.04	0.07	0.09	0.05
<i>p</i>	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; *p*: nivel de significancia observado.

La interacción CE*Si resultó significativa para el porcentaje de K y Mg. Para K, se encontró una tendencia cuadrática con los niveles de Si en la CE de 4.0 dSm⁻¹, y para Mg la tendencia cuadrática ocurrió en 4.0 y 6.5 dSm⁻¹, siendo la concentración de Si de 50 mgL⁻¹ la de mayor impacto en ambos elementos, incrementando las concentraciones en 40 % y 20 %, respectivamente. A diferencia de los elementos esenciales antes mencionados, la concentración de Si de 50 mgL⁻¹ redujeron el Na en las CE de 4.0 y 6.5 dSm⁻¹, en 24 % y 26 % (Figura 15). De igual manera, los cuatro micronutrientes analizados fueron afectados por la interacción CE*Si. La concentración de Si de 50 mgL⁻¹ incrementó la concentración de Fe en todos los niveles de CE, la concentración de Mn en 6.0 dSm⁻¹ y la concentración de Cu en 4.0 dSm⁻¹. Contrario a lo anterior, en el Zn, a una CE de 1.5 dSm⁻¹, la presencia de Si disminuyó la concentración de dicho elemento (Figura 16). Las proporciones de los macronutrientes con el sodio también fueron significativas para la interacción CE*Si. La presencia del Si beneficio el contenido de K, Ca y Mg respecto al sodio, principalmente en las soluciones con mayor cantidad de sal en la solución nutritiva. Las mayores se observaron en la concentración de 50 mgL⁻¹ de Si (Figura 17). Al igual que en otras investigaciones (Li *et al.*, 2015; Romero-Aranda *et al.*, 2006) nuestros resultados muestran un efecto benéfico del Si en la reducción de la concentración de sodio cuando se incrementa la salinidad. Los iones que incrementan los efectos nocivos de la salinidad (Na y Cl, principalmente), son transportados de la raíz a las hojas por medio de la corriente de transpiración y se acumulan en las hojas, provocando un efecto toxico. Sin embargo, la presencia de Si incrementa el área foliar y el estado hídrico de las hojas, por lo que el efecto de toxicidad puede disminuir por efecto de dilución Romero-Aranda *et al.*, 2006).

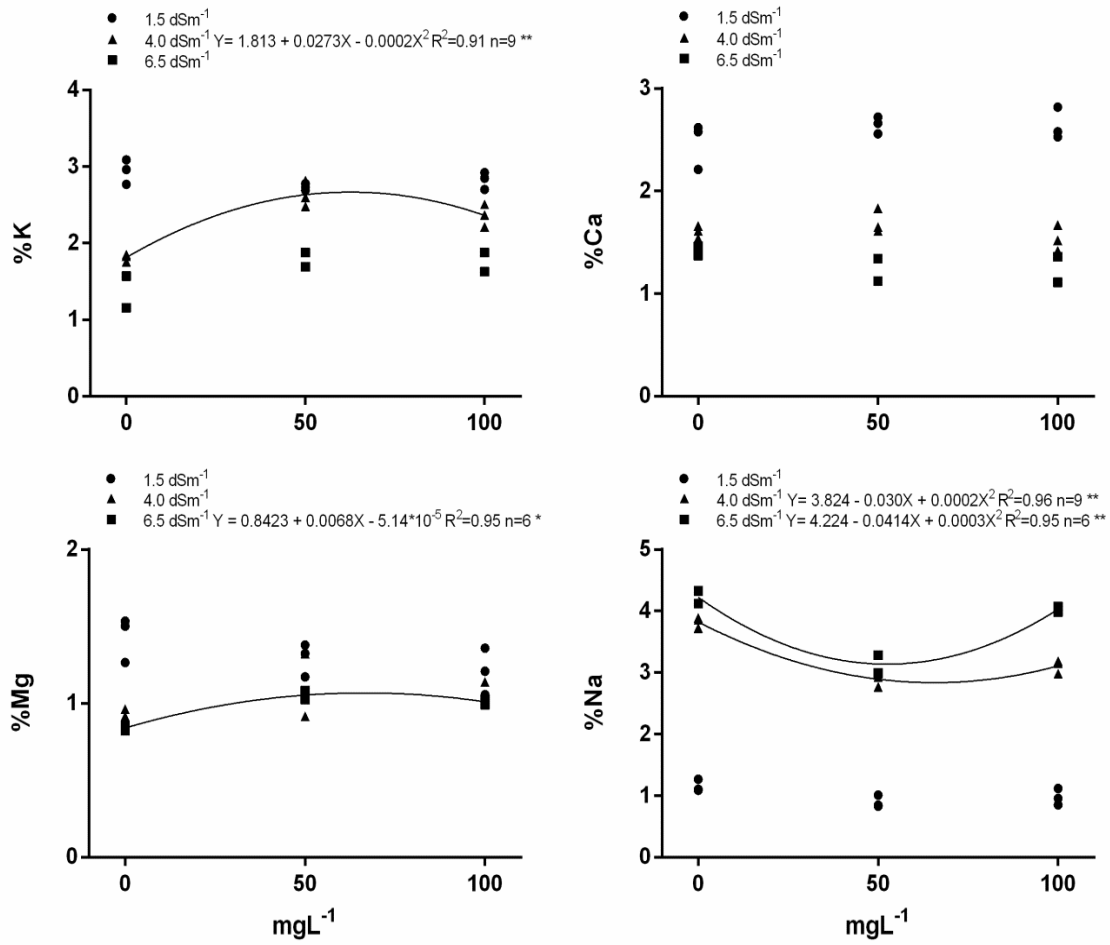


Figura 15. Efectos de la interacción CE*Si, en la concentración de macroelementos esenciales y sodio en hojas de *Solanum lycopersicum* L.

Nivel de significancia: * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

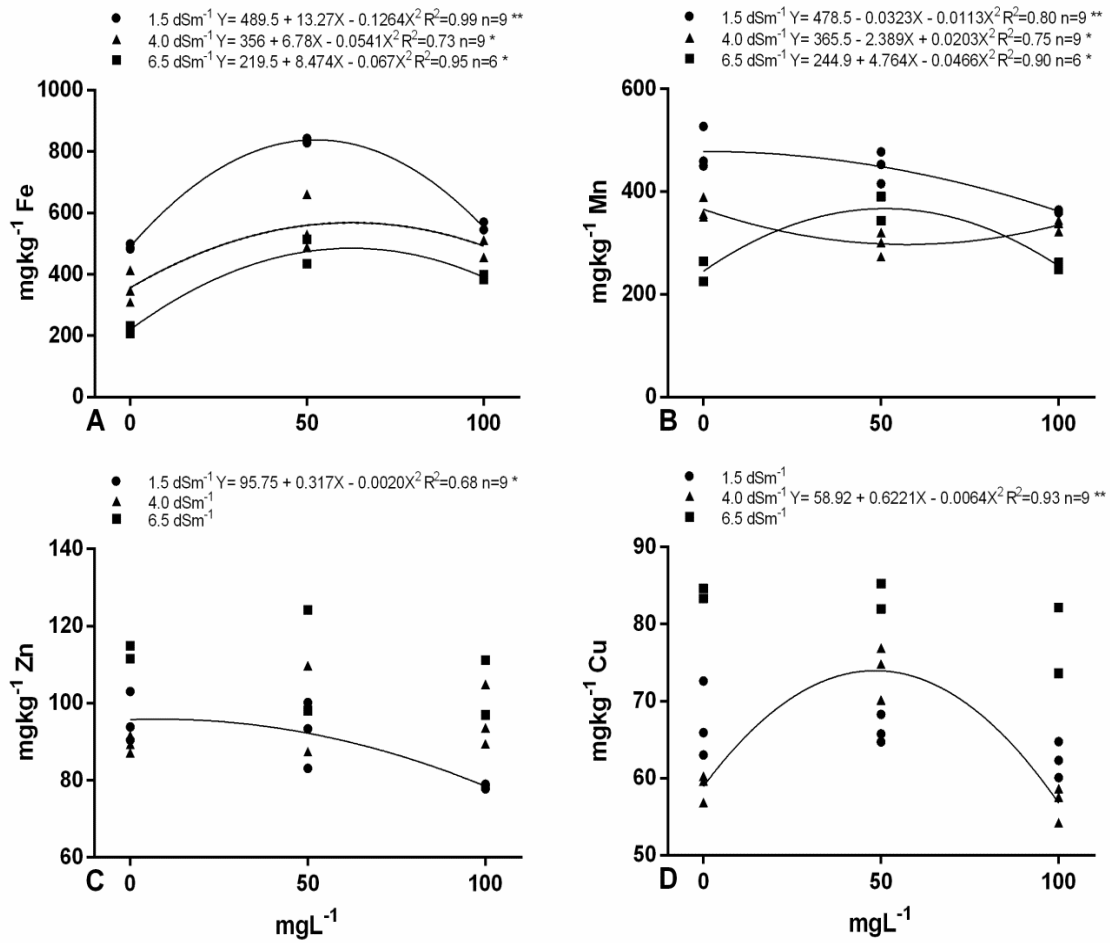


Figura 16. Efectos de la interacción CE*Si, en la concentración de microelementos esenciales mineral en hojas de *Solanum lycopersicum* L.

Nivel de significancia: * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

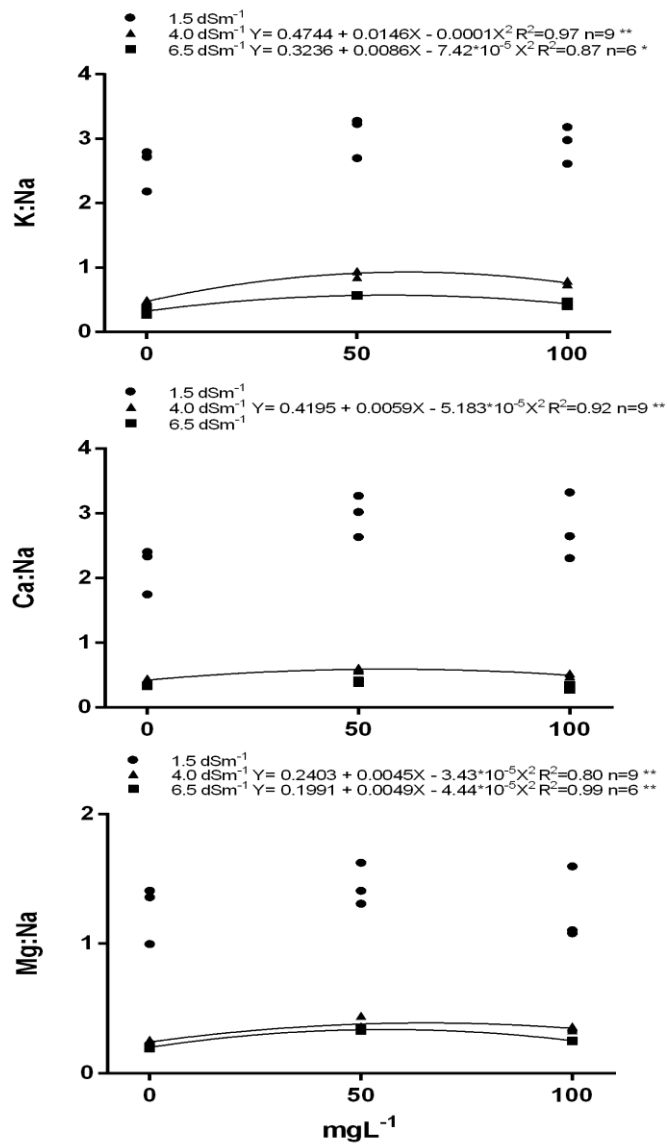


Figura 17. Efectos de la interacción CE*Si, en las proporciones de macronutrientes y sodio en hojas de *Solanum lycopersicum* L.

Nivel de significancia: * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

4.5 Experimento 5

4.5.1 Crecimiento y Unidades Spad

El crecimiento de plantas de moringa mostró reducción significativa en cada nivel de salinidad. En el primer ciclo, al incrementar la salinidad de 3 a 6 dSm⁻¹ y de 3 a 9 dSm⁻¹, la longitud de tallo se redujo en 22 % y 38 %, el largo de hoja se redujo en 28 % y 38 %, mientras que en el ancho de hoja la reducción fue de 32 % y 38 %. El número de hojas sólo fue afectado por una CE de 9 dSm⁻¹, reduciéndose 18 %. Las unidades Spad mostraron un efecto positivo al incrementarse la CE de la solución nutritiva de 3 a 6 dSm⁻¹, aumentando en 2 %. Sin embargo, a una CE de 9 dSm⁻¹ se observó una reducción del 4 % (Cuadro 1). A diferencia del primer ciclo, en el segundo ciclo todas las variables de crecimiento y unidades Spad fueron afectadas significativamente en cada incremento de CE. La variable más afectada al incrementarse la CE de 3 a 6 dSm⁻¹ fue la longitud de hoja, con una reducción del 21 %, mientras que cuando la CE pasó de 3 a 9 dSm⁻¹ la longitud del tallo fue la variable más afectada, con una reducción del 39 % (Cuadro 12).

La presencia de Si en la solución nutritiva benefició el crecimiento y unidades Spad en los dos ciclos del cultivo. En el primer ciclo, la longitud del tallo, número de hojas, longitud de hoja y unidades Spad se incrementaron en 17 %, 17 %, 9 % y 4 %, respectivamente (Cuadro 10). En el segundo ciclo, el incremento fue mayor al observado en el primer ciclo, con un incremento de 23 %, 28 %, 21 %, 14 % y 11 % en la longitud de tallo, número de hojas, longitud de hoja, ancho de hoja y unidades Spad, respectivamente (Cuadro 11). Al igual

que en presente experimento, algunos autores han observado un papel importante por parte del Si en la protección y producción de pigmentos relacionados con la fotosíntesis (Li *et al.*, 2015; Amirossadat *et al.*, 2012; Mateos-Naranjo *et al.*, 2013), lo cual se ve reflejado en el incremento de las unidades Spad.

Cuadro 10. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y Unidades Spad de plantas de *Moringa oleifera* Lam, cosecha 1.

	LT	NH	LH	AH	USpad
	cm		cm	cm	
CE					
(dSm⁻¹)					
3.0	26.08 a	11.625 a	42.40 a	39.32 a	45.39 b
6.0	20.46 b	11.486 a	30.04 b	26.90 b	46.26 a
9.0	16.24 c	9.50 b	26.42 c	24.17 c	43.41 c
±EE	0.876	0.254	1.599	1.321	0.368
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Si					
- Si	18.80 b	9.75 b	31.17 b	29.47	43.77 b
+ Si	21.99 a	11.43 a	33.85 a	30.46	45.65 a
±EE	1.011	0.27	1.652	1.535	.390
p	0.002	0.000	0.004	ns	0.000

LT: longitud de tallo; NH: número de hojas; LH: longitud de hoja; AH: Ancho de hoja; Uspad: unidades Spad.

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; p: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

Cuadro 11. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y Unidades Spad de plantas de *Moringa oleifera* Lam, cosecha 2.

	LT	NH	LH	AH	USpad
	cm		cm	cm	
CE					
(dSm⁻¹)					
3.0	26.60 a	10.32 a	35.33 a	30.28 a	43.58 a
6.0	22.30 b	9.02 b	28.05 b	25.05 b	41.04 b
9.0	16.22 c	6.73 c	23.18 c	18.63 c	36.77 c
±EE	0.765	0.194	1.074	0.899	0.625
p	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Si					
- Si	19.57 b	7.52 b	26.20 b	23.40 b	38.37 b
+ Si	24.09 a	9.62 a	31.59 a	26.61 a	42.46 a
±EE	1.0159	0.315	1.389	1.135	0.701
p	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

LT: longitud de tallo; NH: número de hojas; LH: longitud de hoja; AH: Ancho de hoja; Uspad: unidades Spad.

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; p: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

4.5.2 Biomasa

El aumento de la CE de la solución nutritiva provocó una menor producción de biomasa en las dos cosechas ($p=0.000$). El incremento de la CE de 3 a 6 dSm^{-1} provocó un decremento de 59 % y 22 % en el peso seco de tallo y 48 % y 47 % en el peso seco de hoja, en la primera y segunda cosecha, respectivamente. Los decrementos observados en la producción de biomasa cuando la CE se incrementó de 3 a 6 y 9 dSm^{-1} fueron, en el peso seco del tallo de 70 % y 83 % y de 69 % y 68 %, en la primera y segunda cosecha, respectivamente. El peso seco de raíz mostró un descenso significativo solo en una CE de 9 dSm^{-1} reduciéndose en 41 % de manera general comparándolo con el promedio de las CE más bajas. La biomasa total por planta producida en las cosechas descendió en 19 % y 58 % cuando la CE pasó de 3 a 6 y 9 dSm^{-1} , respectivamente (Figura 18).

La presencia de Si, independientemente la concentración, benefició la producción de biomasa en las dos cosechas evaluadas ($p=0.000$). El peso seco de tallo se incrementó en 30 % en la primera cosecha y 10 % en la segunda cosecha. El peso seco de hoja no fue significativamente diferente en la primera cosecha. Sin embargo, en la segunda cosecha la presencia de Si aumentó dicha variable en 20 %. La raíz fue el órgano más beneficiado por la presencia de Si en la solución nutritiva, pues dicho elemento incrementó en 73 % el peso seco de mencionado órgano. De manera general la presencia de Si benefició la producción de biomasa de la planta, aumentando en 46 % el peso seco total (Figura 18).

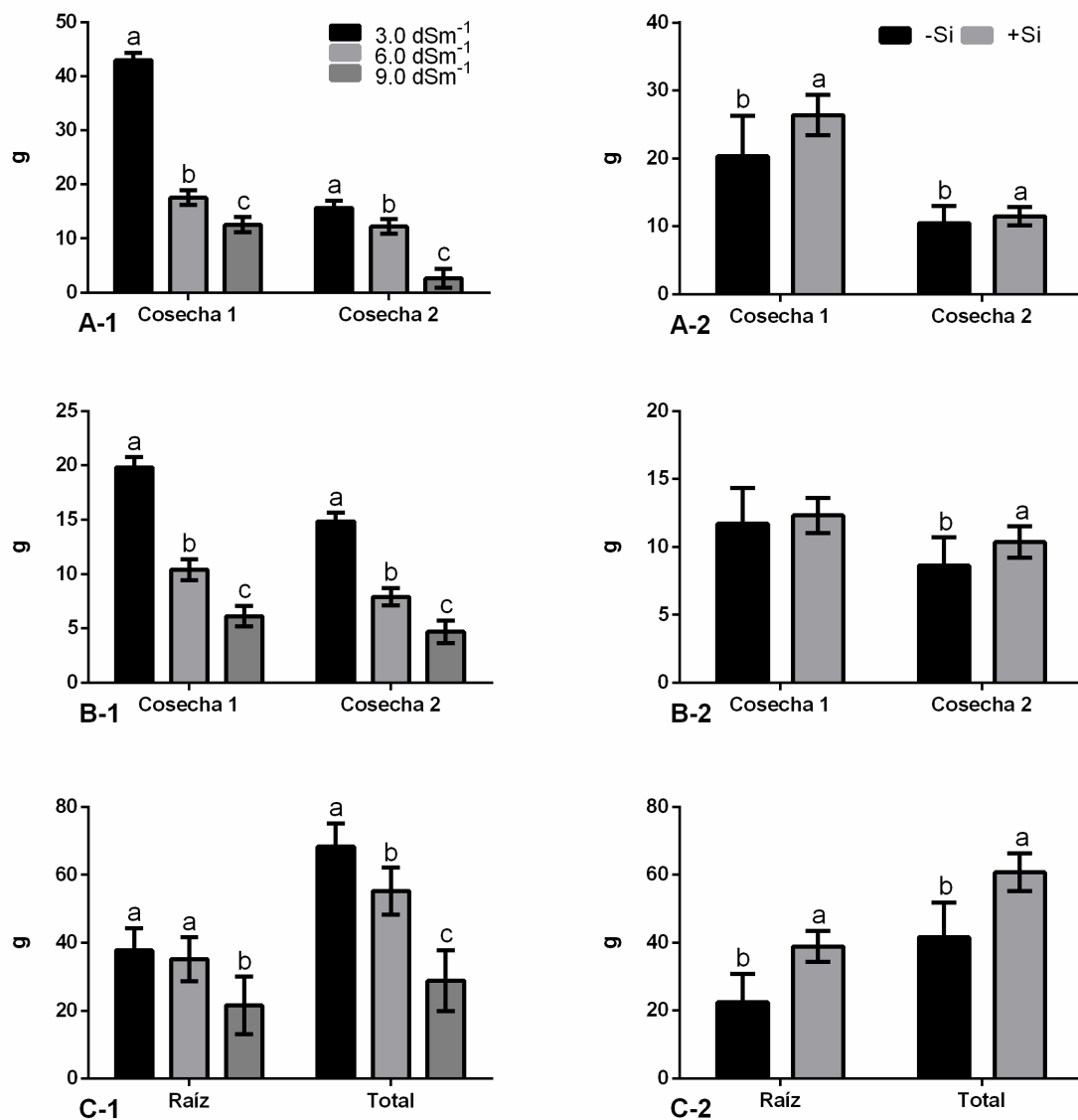


Figura 18. Efecto de la CE y el Si en la biomasa de *Moringa oleifera* Lam.

A: tallo; B: hoja; C: general. 1: Efecto de CE; 2: Efecto de Si.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

4.5.3 Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante

Los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de hojas de moringa fueron afectados por el incremento de la CE. Los fenoles totales, flavonoides totales, capacidad antioxidante DPPH y ABTS, de ambas cosechas, fueron incrementados al incrementarse la solución nutritiva de 3 a 6 y 9 dSm⁻¹ ($p \leq 0.05$) (Figura 19). Le CE que produjo mayor incremento en las variables antes mencionadas fue de 6 dSm⁻¹, aumentando mayormente los flavonoides totales en 68 % en la primer cosecha y los fenoles totales en 15 % en la segunda cosecha.

Todos los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de hojas de moringa, en las dos cosechas, fueron incrementados por la presencia de Si en la solución nutritiva ($p \leq 0.001$). En la primera cosecha todas las variables, en promedio, se incrementaron en 47 %, sobresaliendo los flavonoides totales con un incremento de 111 %. En la segunda cosecha el incremento fue menor, mostrando, en promedio, 22 % de incremento, sobresaliendo la capacidad antioxidante ABTS con un incremento del 29 % (Figura 20). Muchos de los compuestos fenólicos son generados mediante la vía fenilpropanoide, la cual es estimulada por diversos tipos de estrés. Las plantas estresadas inducen hormonas, como el ácido jasmónico, que a su vez induce enzimas como la fenilalanina amonio liasa (PAL), la cual produce acumulación de compuestos fenólicos (Lim *et al.*, 2012).

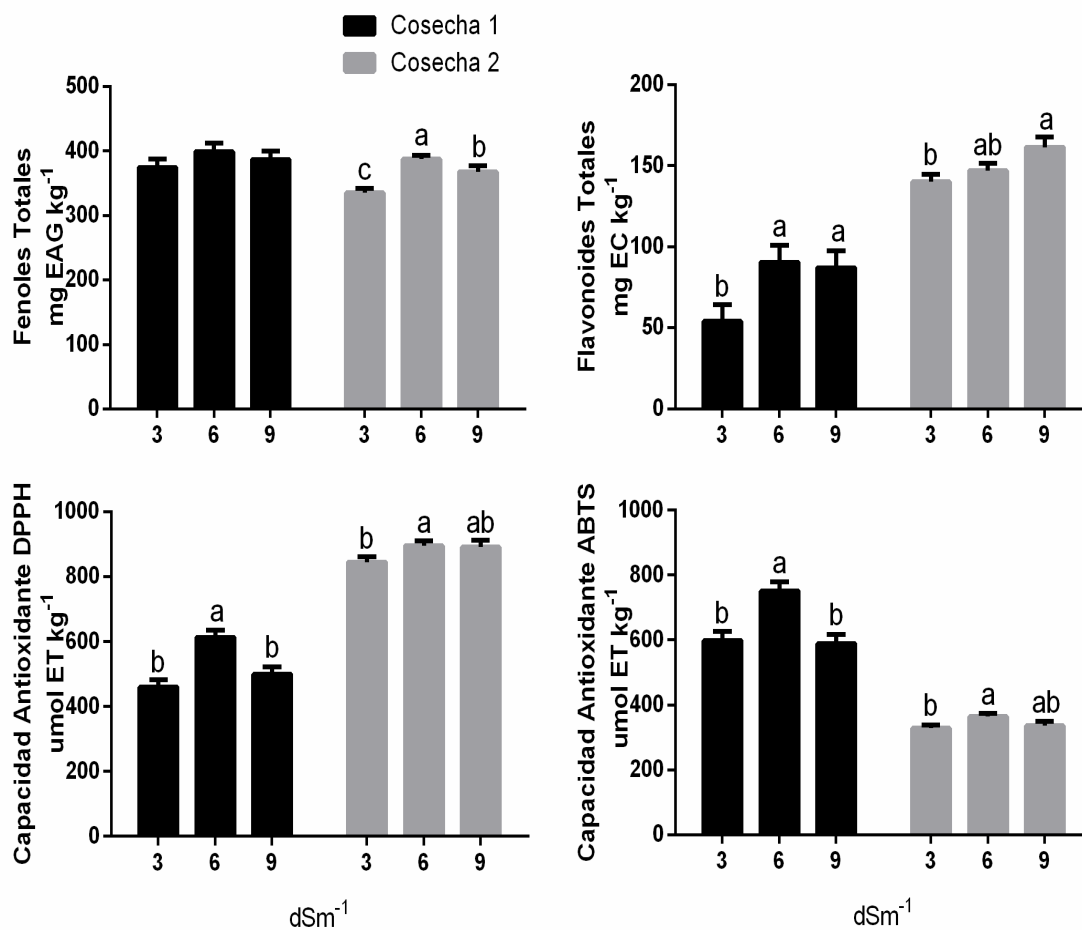


Figura 19. Efecto de la CE en la concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en hojas de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

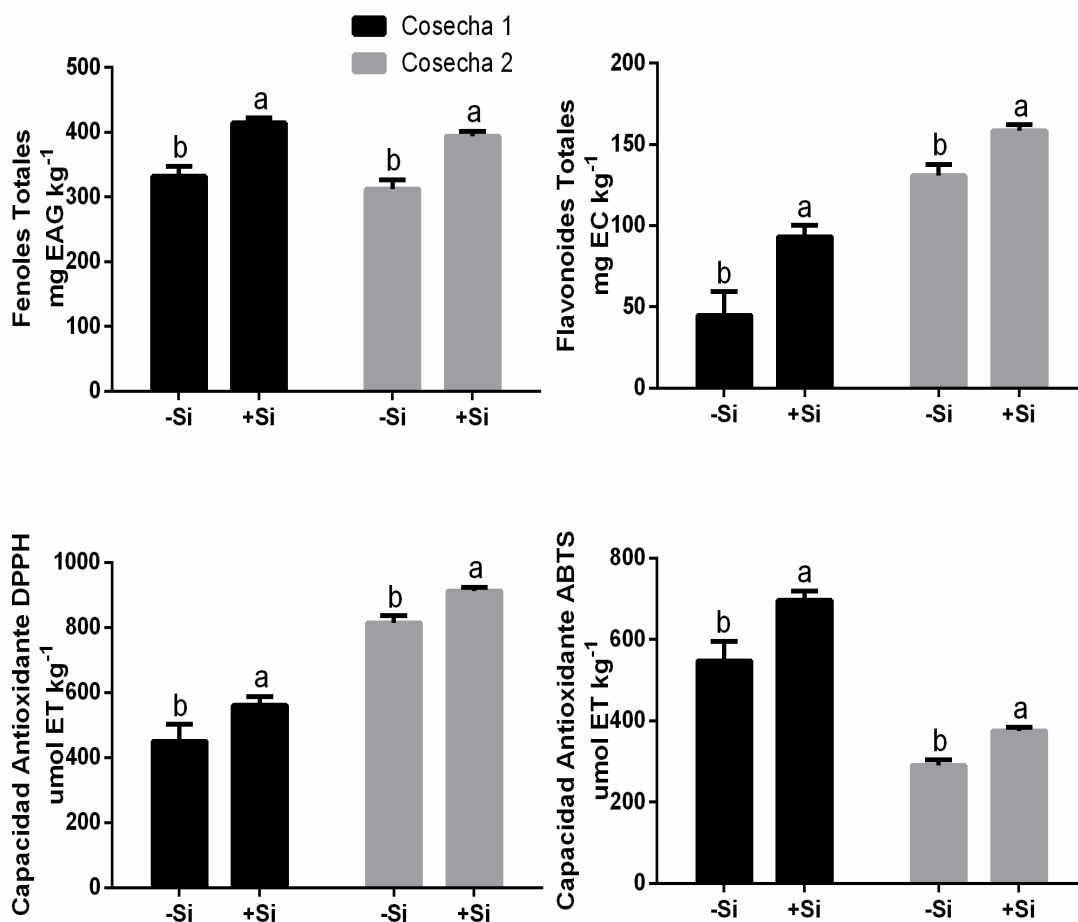


Figura 20. Efecto del Si en la concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en hojas de *Moringa oleifera* Lam.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

4.5.4 Proteína

La salinidad provocó un decremento en el porcentaje de proteína en hojas de moringa. En la primera cosecha una CE mayor a 3 dSm^{-1} provocó una disminución de 6 % en el porcentaje de proteína ($p=0.000$). Sin embargo, en la segunda cosecha, solo la CE de 6 dSm^{-1} provocó un decremento equivalente a 5 % ($p=0.000$) (Figura 21 A-1). El contenido de proteína fue afectado significativamente ($p=0.000$) en cada nivel de CE, en ambas cosechas (Figura 21 A-2). El contenido de proteína disminuyó en 55 % y 64 % al incrementarse la solución nutritiva de 3 a 6 dSm^{-1} y de 3 a 9 dSm^{-1} , respectivamente, en la primera cosecha, mientras que en la segunda cosecha, el decremento fue de 35 % y 70 %.

La presencia de Si en la solución nutritiva no afectó el porcentaje de proteína en la primera cosecha; sin embargo, en la segunda cosecha mostró un incremento significativo ($p=0.000$) superior a 6 % (Figura 21 B-1). El contenido de proteína fue beneficiado por la presencia de Si en las dos cosechas. En la primera cosecha el Si incrementó en 11 % ($p=0.018$), mientras que en la segunda cosecha el incremento fue de 20 % ($p=0.001$) (Figura 21 B-2). La presencia de Si en la solución nutritiva ha incrementado la concentración de proteína en hoja de tomate, principalmente cuando la planta fue sometida a estrés salino (Li *et al.*, 2015). Nuestros resultados son parcialmente similares a los antes mencionados, ya que en nuestra investigación el efecto benéfico del Si se observó en todos los niveles de CE.

La localización de las hojas en los estratos de la planta influyó en el porcentaje ($p=0.000$) y contenido de proteína ($p=0.000$). En la primera cosecha, el estrato alto superó en

10 % y 26 % al estrato medio y bajo (Figura 21 C-1); mientras que en la segunda cosecha el porcentaje de proteína fue superior en 6 % al estrato medio y 26 % al estrato bajo (Figura 21 C-2). Contrario a lo observado en el porcentaje de proteína, el contenido de proteína presentó la tendencia inversa, a disminuir conforme el estrato ascendía de la base al ápice. En ambas cosechas el estrato bajo mostró mayor contenido de proteína, dicha variable disminuyó en 43 % y 81 %, comparado con el estrato medio y alto en la primera cosecha y 13 % y 46 % en la segunda cosecha, respectivamente (Figura 21 C-2).

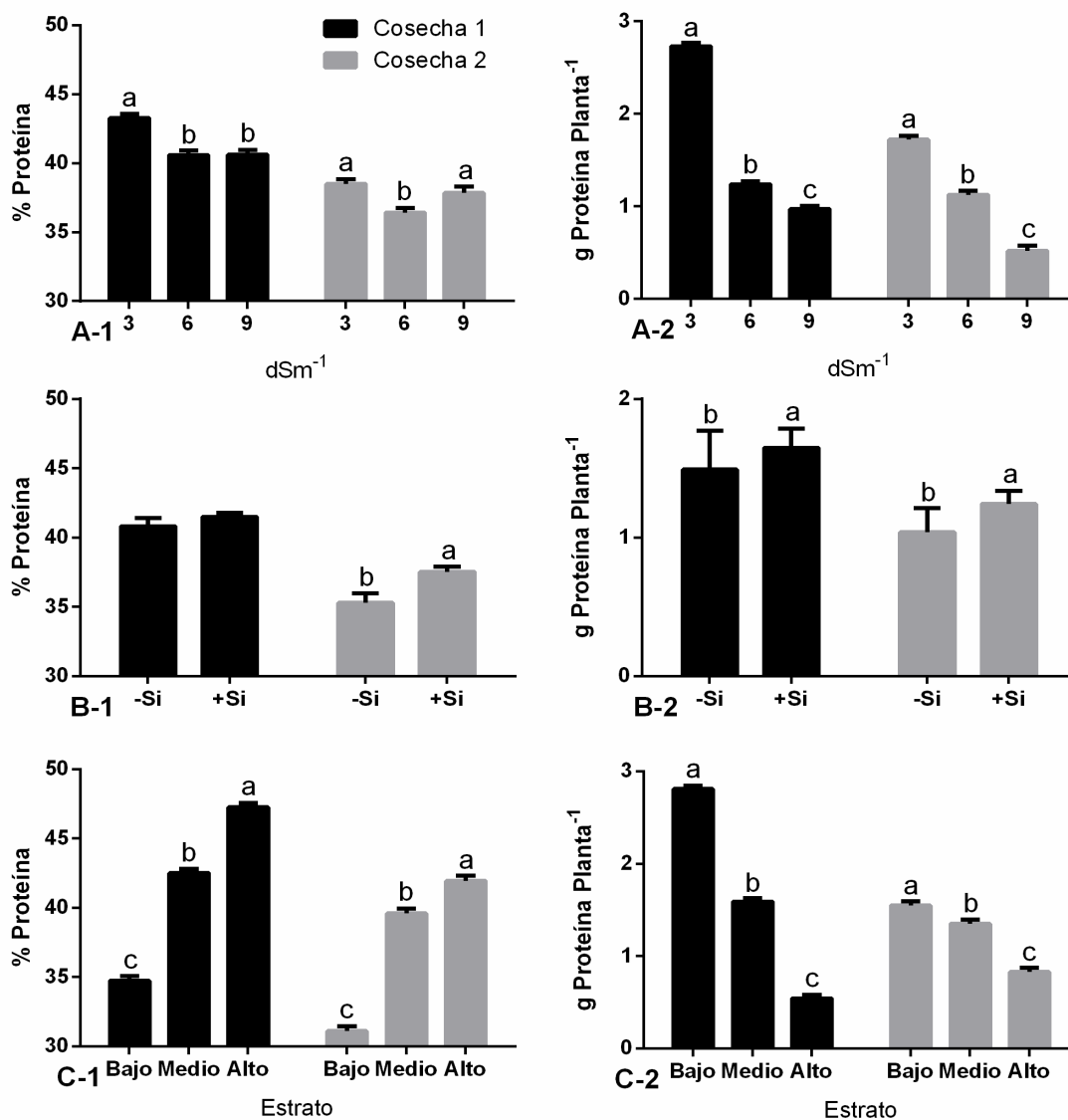


Figura 21. Efecto de la CE, el Si y el estrato en el porcentaje y contenido de proteína en hojas de *Moringa oleifera* Lam.

A: CE; B: Si; C: Estrato; 1: porcentaje; 2: contenido.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

4.6 Experimento 6

4.6.1 Crecimiento y unidades Spad

La salinidad afectó negativamente todas las variables de crecimiento (Cuadro 21). La longitud del tallo se redujo en 7 %, el diámetro de tallo en 8 % y el área foliar en 9 %, cuando la solución nutritiva pasó de 2 a 5 dSm⁻¹; cuando la CE fue de 8 dSm⁻¹, el efecto negativo de la salinidad fue más evidente ya que redujo en 20 %, 22 % y 33 % la longitud del tallo, diámetro del tallo y área foliar, respectivamente. La presencia de Si, particularmente 60 mgL⁻¹, en la solución nutritiva incrementó en 8 % la longitud y diámetro del tallo y en 14 % el área foliar (Cuadro 21). Las unidades Spad fueron significativamente reducidas en 3 % cuando la CE pasó de 3 a 6 dSm⁻¹ y 4 % cuando la CE pasó de 3 a 9 dSm⁻¹. Estadísticamente la presencia de Si no afectó la cantidad de unidades Spad (Cuadro 21).

4.6.2 Biomasa

El incremento de la CE de la solución nutritiva redujo significativamente el peso seco de tallo y hoja de plantas de tomate. El tallo sufrió un decremento en su peso seco de 19 % en una CE de 5 dSm⁻¹, y un 34 % en una CE de 8 dSm⁻¹, comparadas con una CE de 2 dSm⁻¹, respectivamente. En la misma condición antes mencionada, el peso seco de la hoja se redujo en 12 % y 27 % (Cuadro 12). El Si benefició la producción de biomasa de plantas de tomate. Estadísticamente la concentración de 60 mgL⁻¹ de Si fue superior al resto, aumentando en 32 % el peso seco de tallo y en 15 % el peso seco de hoja. Nuestros resultados son similares a los

reportados por Li *et al.* (2015), quienes reportaron que 1.5 mM de Si incrementó la altura de la planta, número de hojas, área foliar y peso seco de raíz y tallo en plantas de tomate sometidas a solución con 150 Mm de NaCl.

4.6.3 Fotosíntesis

El proceso fotosintético fue afectado por el incremento de la CE de la solución nutritiva. La fotosíntesis se redujo significativamente ($p=0.05$) en 8 dSm^{-1} , disminuyendo en 18 %. La concentración interna de CO_2 se incrementó estadísticamente ($p=0.04$) en 5 % en una CE de 5 dSm^{-1} . Mientras que la transpiración sufrió un decremento significativo ($p=0.03$) de 16 % en una CE de 8 dSm^{-1} . A diferencia de la salinidad, la presencia de Si en la solución nutritiva no mostró efectos estadísticamente significativos (Figura 22).

Resultados similares a los antes presentados fueron reportados por Li *et al.* (2015), quienes registraron un comportamiento similar al de las variables analizadas en este ensayo cuando las plantas fueron fertirrigadas con solución salina. Estos mismos autores reportaron que la presencia de Si en la solución nutritiva óptima para el cultivo en cuestión, no representa beneficios en el proceso fotosintético. Sin embargo, y a diferencia de nuestros resultados, la presencia de Si en condiciones de salinidad mejoró el proceso comparando dicho tratamiento con solución salina sin Si, ya que aumentó fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y redujo la concentración intercelular de CO_2 .

El estrés por salinidad provoca una reducción en la expansión foliar, lo que reduce en gran medida la fotosíntesis y ello compromete la producción de biomasa. Además, la

reducción de la fotosíntesis está relacionada con el efecto tóxico de las sales hacia algunos pigmentos relacionados al proceso. La reducción en la transpiración está influenciada, principalmente por el cierre de los estomas, lo cual es consecuencia de un déficit hídrico provocado por las sales (Haghighi y Pessaraki, 2013). A pesar de que algunos autores han encontrado efecto positivo del Si en el proceso de fotosíntesis en plantas sometidas a algún tipo de estrés, nuestros resultados no muestran efectos significativos que apoyen tal afirmación. Existen diversos aspectos a considerar para determinar el efecto real de la aplicación de Si en el proceso fotosintético, el tipo de planta, respecto a la acumulación de Si, consideramos es el más importante.

4.6.4 Rendimiento

La salinidad redujo todas las variables de rendimiento ($p=0.000$). El incremento de la CE de 2 a 5 dSm^{-1} redujo en 135 %, 23 %, 5 % y 7 % el número de frutos, peso de fruto y diámetro ecuatorial y polar, respectivamente. Mientras que el incremento de 2 a 8 dSm^{-1} redujo en 35 % el número de frutos, 35 % el peso de fruto, 11 % el diámetro ecuatorial y 14 % el diámetro polar (Figura 23). El número de frutos y peso de frutos fueron las únicas variables de rendimiento que mostraron un efecto positivo por la presencia de Si en la solución nutritiva. En ambos casos, la concentración de 60 mgL^{-1} mostró los mejores resultados incrementando dichas variables en 18 % y 16 %, respectivamente (Figura 23). En general, las plantas sometidas a estrés por salinidad, sufren daños por toxicidad en los ovarios, lo que resulta en la caída de frutos, con un consecuente decremento en el rendimiento (Haghighi y Pessaraki, 2013), como se observó en el número de frutos en el presente experimento.

Cuadro 12. Efecto de la CE y el Si en el crecimiento y unidades Spad de plantas de *Solanum lycopersicum* L.

	LT	DT	AF	USpad	PST	PSH
	cm	mm	cm²		g	g
CE						
(dSm⁻¹)						
2.0	20.49 a	6.45 a	461.80 a	48.62 a	60.38 a	51.25 a
5.0	19.02 b	5.94 b	419.14 b	47.05 b	49.11 b	45.11 b
8.0	16.30 c	5.03 c	307.22 c	46.47 b	40.11 c	37.56 c
±EE	0.240	0.029	3.747	0.368	1.986	1.414
p	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Si						
(mgL⁻¹)						
0	17.98 b	5.65 b	368.47 c	46.88	43.67 b	41.33 b
60	19.44 a	6.10 a	419.39 a	48.16	54.78 a	47.56 a
120	18.03 b	5.59 b	392.60 b	47.08	50.00 ab	44.25 ab
±EE	0.240	0.029	3.747	0.368	1.986	1.414
p	0.001	0.000	0.000	ns	0.003	0.017

LT: longitud de tallo; DT: diámetro de tallo; AF: área foliar; PST: peso seco de tallo; PSH: peso seco de hoja; USpad: unidades Spad.

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; p: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

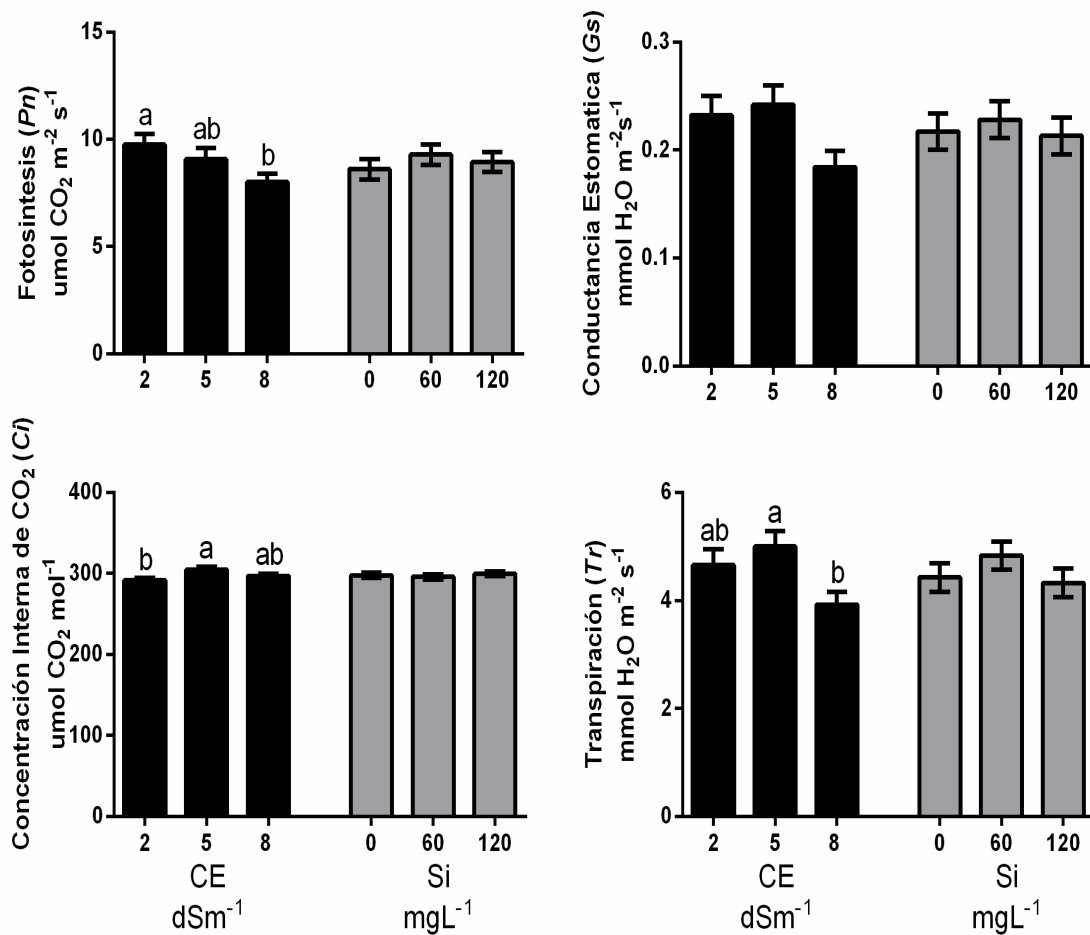


Figura 22. Efecto de la CE y el Si en la fotosíntesis de *Solanum lycopersicum* L.

Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

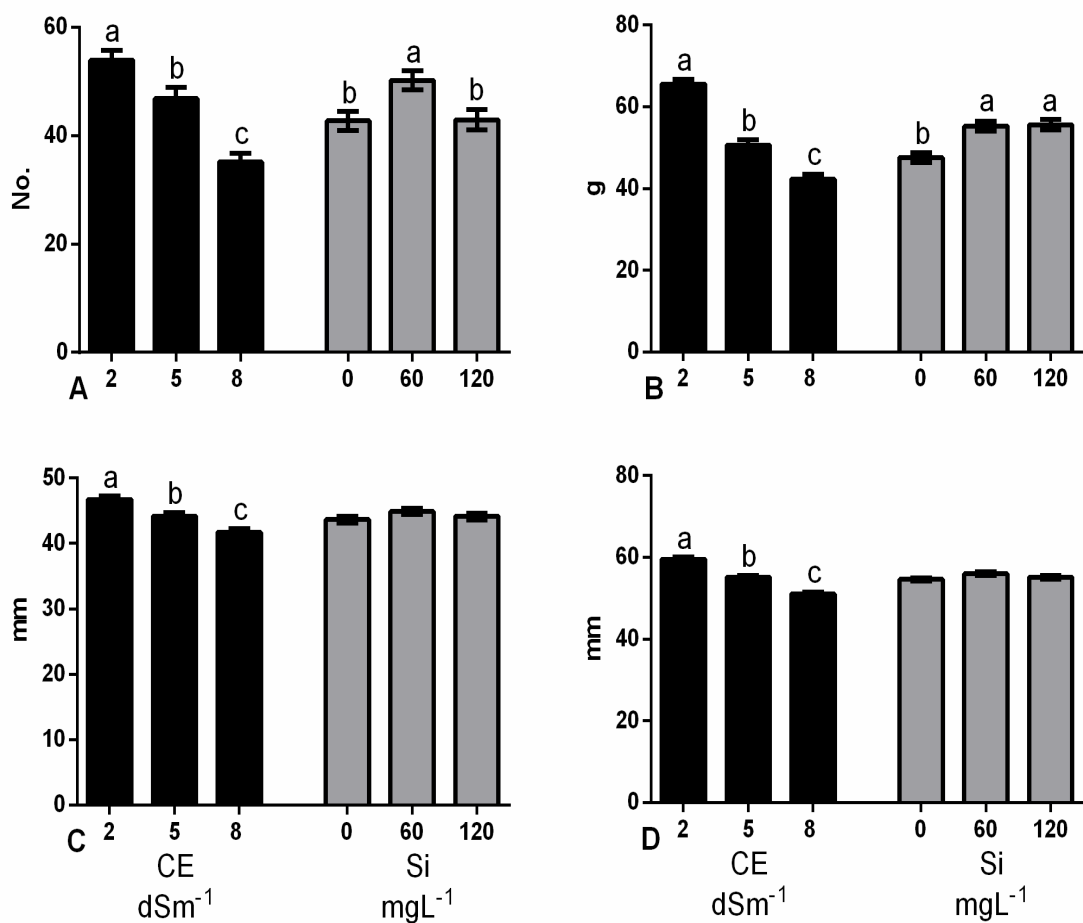


Figura 23. Efecto de la CE y el Si en el rendimiento de frutos de *Solanum lycopersicum* L.

A: número de frutos; B: peso de fruto; C: diámetro ecuatorial de fruto; D: diámetro polar de fruto. Líneas en la parte superior de las barras verticales representan el error estándar. Nivel de significancia: $p \leq 0.05$. Diferentes letras significan una diferencia significativa.

4.6.5 Calidad de fruto

La firmeza de fruto e índice de madurez no fueron afectados por el incremento de la salinidad. Los grados Brix del fruto, así como la acidez titulable aumentaron en 12 % y 23 % cuando la CE de la solución nutritiva se incrementó a 8 dSm⁻¹. A diferencia de las variables antes mencionadas, el incremento de la CE causó un efecto contrario en el pH disminuyendo en 13 % en las CE mayores a 2 dSm⁻¹. La presencia de Si en la solución nutritiva sólo mostró efecto sobre los grados Brix, incrementándolos en 13 % en una CE de 8 dSm⁻¹ (Cuadro 13).

Cuadro 13. Efecto de la CE y el Si en la calidad de frutos de *Solanum lycopersicum* L.

	Firmeza	Grados Brix	pH	AT	IM
	N	°Bx		%	
CE					
(dSm⁻¹)					
2.0	13.43	4.42 b	3.60 a	0.394 c	11.55
5.0	12.75	4.63 b	3.51 b	0.440 b	10.66
8.0	13.85	5.08 a	3.45 b	0.483 a	10.61
±EE	0.301	0.104	0.022	0.011	0.370
p	ns	0.002	0.002	0.000	ns
Si					
(mgL⁻¹)					
0	13.28	4.40 b	3.50	0.441	10.21
60	13.30	4.79 ab	3.52	0.432	11.20
120	13.45	4.94 a	3.54	0.445	11.41
±EE	0.325	0.113	0.023	0.011	0.399
p	ns	0.014	ns	ns	0.017

AT: acidez titulable; IM: índice de madurez.

Los valores representan las medias. Literales diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas. ±EE: error estándar; p: nivel de significancia observado; ns: diferencia no significativa.

5. CONCLUSIONES

5.1 Experimento 1

El efecto de la salinidad en la germinación de *Moringa oleifera* Lam. fue diferente para cada tipo de sal. El CaCl_2 fue la sal que menos estrés salino causó en el crecimiento y producción de biomasa de las plántulas; contrario a lo anterior, el NaCl fue la sal que indujo el mayor estrés en las plántulas de *M. oleifera* Lam.

Una CE de 3 dSm^{-1} no causó estrés; sin embargo, a 6 dSm^{-1} el estrés salino fue significativo en todas las variables. El incremento de la CE de 3 dSm^{-1} a 6 dSm^{-1} con NaCl , incrementó los fenoles totales y la capacidad antioxidante DPPH y ABTS, mientras que el incremento de la CE con CaCl_2 redujo los fenoles totales, flavonoides totales y la capacidad antioxidante DPPH y ABTS. A una CE de 3 dSm^{-1} la mayor capacidad antioxidante DPPH y ABTS se presentó con el CaCl_2 , mientras que a 6 dSm^{-1} la tendencia se invirtió siendo el NaCl quien provocó mayor cantidad de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante DPPH.

El Si tuvo un efecto benéfico en el crecimiento, producción de biomasa, índices de vigor, fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante, independientemente de la sal y nivel de salinidad.

5.2 Experimento 2

Este estudio comprobó los efectos negativos de la salinidad en etapas tempranas de crecimiento de *Moringa oleifera* Lam. La salinidad redujo la emergencia de las semillas, el crecimiento y producción de biomasa de las plántulas. La salinidad redujo principalmente la altura de la plántula, número de hojas y área foliar.

El incremento de la CE de la solución provocó un decremento importante de algunos elementos esenciales, mientras que aumentó la concentración de sodio, además de reducir las proporciones de K:Na, Ca:Na y Mg:Na. Por otra parte, se registró un aumento en el porcentaje de proteína y una disminución en el porcentaje de carbono y contenido de proteína y contenido de carbono, conforme se incrementó la CE.

Moringa oleifera Lam. puede ser considerada como una planta tolerante a la salinidad provocada por NaCl, en la etapa de emergencia de la semilla, pues no se encontraron diferencias significativas en dicho proceso por debajo de 6 dSm⁻¹. Sin embargo, el crecimiento de la plántula es más susceptible a dicha salinidad, encontrando que de manera general, en 3 dSm⁻¹ inició una reducción del crecimiento y después de 4 dSm⁻¹ se incrementó la reducción en la concentración de elementos esenciales y el contenido de proteína.

5.3 Experimento 3

Una CE de 6.0 dSm^{-1} causó un efecto negativo en la emergencia, retardando dicho proceso. El crecimiento y la biomasa se redujeron, mientras que las concentraciones de minerales fueron afectadas principalmente en la raíz y hoja, disminuyendo elementos esenciales y aumentando Na; mientras que en CE de 9.5 dSm^{-1} , las plantas de *Moringa oleifera* Lam. no mostraron ningún crecimiento.

El Si aumentó el crecimiento de la parte aérea de la planta y la biomasa independientemente de la salinidad.

Para la concentración mineral, el efecto negativo de la salinidad se compensó con la aplicación de Si a una dosis de 50 mgL^{-1} e incrementó las concentraciones de K, Ca, Cu y Fe en las hojas y Fe en las raíces, y redujo la concentraciones de Na en las raíces.

5.4 Experimento 4

La diferencia entre los niveles de CE (1.5, 4.0 y 6.5 dSm⁻¹) provocada con NaCl no afectó la emergencia, pero si disminuyó la supervivencia de plántulas de *Solanum lycopersicum* L. Contrario a lo anterior, el Si aumentó la supervivencia de dichas plántulas.

A una CE de 4.0 dSm⁻¹ la plántula redujo el crecimiento y producción de biomasa. El Si, particularmente la concentración de 50 mgL⁻¹, benefició el crecimiento de hojas y de biomasa en general.

Para la concentración mineral, a partir de 4 dSm⁻¹, la planta sufrió un desequilibrio nutricional disminuyendo la concentración de K, Ca, Mg, Fe y Mn y las proporciones K:Na, Ca:Na y Mg:Na y aumentando Na, Zn y Cu.

El efecto negativo de la salinidad se compensó con la aplicación de Si a una dosis de 50 mgL⁻¹, principalmente en condiciones de media (4 dSm⁻¹) y alta salinidad (6.5 dSm⁻¹), incrementando las concentraciones de K, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu y las proporciones de los macroelementos con el Na, además de que redujo la concentración de Na, lo que causó una mayor tolerancia de las plántulas a la salinidad.

5.5 Experimento 5

La presencia de NaCl (CE a partir de 6.0 dSm^{-1}) causó una disminución en el crecimiento, biomasa y unidades Spad de plantas de *Moringa oleifera* Lam. Contrario a lo anterior, la CE de 6.0 dSm^{-1} fue la que incrementó los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.

La adición de Si a la solución nutritiva, independientemente de la CE, aumentó el crecimiento, biomasa, unidades Spad, los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.

El porcentaje y contenido de proteína fueron disminuidos conforme aumentó la CE. Sin embargo, la presencia de Si en la solución contribuyó a aumentar los valores de dichas variables. La posición de las hojas también mostró efectos sobre las variables antes mencionadas. El porcentaje de proteína se comportó de la siguiente manera en los tres estratos analizados: bajo<medio<alto; contrario a lo anterior, el contenido de proteína, afectado por la producción de biomasa, se comportó de manera inversa bajo>medio>alto.

5.6 Experimento 6

Una CE de 5 dSm^{-1} , comprometió el crecimiento de plantas de *Solanum lycopersicum* L., reduciendo principalmente el área foliar. De igual manera disminuyeron las unidades Spad y la producción de biomasa, afectando principalmente a la hoja.

El Si, en concentración de 60 mgL^{-1} , benefició el crecimiento de las plantas, aumentando el área foliar. De igual manera mejoró la producción de biomasa, particularmente la de tallo.

Uno de los principales efectos de la salinidad fue la disminución del proceso fotosintético. El Si no mostró efectos sobre dicho proceso.

La producción de frutos, el peso de fruto y sus dimensiones, descendieron a partir de 5 dSm^{-1} . Sin embargo, la presencia de 60 mgL^{-1} de Si aumentó el número y peso de frutos.

La presencia de sal y de Si, beneficiaron la calidad de frutos, al incrementar los grados Brix.

5.7 Conclusión general

El Si mostró efectos benéficos en la germinación, emergencia, crecimiento, producción de biomasa, concentración mineral y sustancias de importancia nutricional, como los compuestos fenólicos y proteínas en *Moringa oleifera* Lam. y *Solanum lycopersicum* L., en condiciones normales de producción, pero con mayor efecto en condiciones de estrés por salinidad.

Por todo lo antes expuesto, el Si debe considerarse como una alternativa viable para reducir los efectos de la salinidad y con ello mejorar las condiciones de producción de diversas plantas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, T., Balal R.M., Shahid M.A., Pervez M.A., Ayyub C.M., Aqueel M.A., Javaid M.M. 2015. Silicon induced alleviation of nacl toxicity in okra (*Abelmoschus Esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants y antioxidant metabolism. *Acta physiologiae plantarum* 37(2):1–15.
- Acosta-Motos, J., Ortuño M., Bernal-Vicente A., Diaz-Vivancos P., Sanchez-Blanco M., Hernandez J. 2017. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy* 7(1):18.
- Adrees, M., Ali S., Rizwan M., Zia-ur-rehman M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Farooq M., Kashif M. 2015. ecotoxicology y environmental safety mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants : A review. *Ecotoxicology y Environmental Safety* 119:186-197.
- Ahmadi, M., Souri M.K. 2018. Growth and mineral content of coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants under mild salinity with different salts. *Acta Physiologiae Plantarum* 40(11):194.
- Alatar, A.A. 2011. Effect of temperature and salinity on germination of *Achillea fragrantissima* and *Moringa peregrina* from Saudi Arabia. *African Journal of Biotechnology* 10(17):3393-3398.
- Allu, A.D., Soja A.M., Wu A., Szymanski J., Balazadeh S. 2014. Salt stress and senescence: identification of cross-talk regulatory components. *Journal of experimental botany* 65(14):3993-4008.

- Amirossadat, Z., Ghehsareh A.M., Mojiri A. 2012. Impact of silicon on decreasing of salinity stress in greenhouse cucumber (*Cucumis Sativus* L.) in soilless culture. *Journal of Biological y Environmental Sciences* 6(17): 171–174.
- Araújo, W.L., Tohge T., Ishizaki K., Leaver C.J., Fernie A.R. 2011. Protein degradation—an alternative respiratory substrate for stressed plants. *Trends in plant science* 16(9):489-498.
- Ashraf, M., Harris P.J.C. 2013. Photosynthesis under stressful environments : An overview. *Photosynthetica* 51(2):163–190.
- Astegiano ED., Favaro J.C., Bouzo C.A. 2001. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg* 16(2):249-256.
- Ayala-Astorga, G.I., Alcaraz-Meléndez L. 2010. Salinity effects on protein content, lipid peroxidation, pigments, and proline in *Paulownia imperialis* (Siebold y Zuccarini) and *Paulownia fortunei* (Seemann y Hemsley) grown in vitro. *Electronic Journal of Biotechnology* 13(5):13-14.
- Azeem, M., Iqbal N., Kausar S., Javed M.T., Akram M.S., Sajid M.A. 2015. Efficacy of silicon priming and fertigation to modulate seedling's vigor and ion homeostasis of wheat (*Triticum aestivum* L.) under saline environment. *Environmental Science and Pollution Research* 22(18):14367-14371.
- Azuma, R., Ito N., Nakayama N., Suwa R., Nguyen N.T., Larrinaga-Mayoral J.Á., Saneoka H. 2010. Fruits are more sensitive to salinity than leaves and stems in pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Scientia horticultrae*, 125(3):171-178.

- Bader, B., Aissaoui F., Kmicha I., Salem A. B., Chehab H., Gargouri K., Chaieb M. 2015. Effects of salinity stress on water desalination, olive tree (*Olea europaea* L. cvs 'Picholine', 'Meski' and 'Ascolana') growth and ion accumulation. *Desalination* 364: 46-52.
- Balakhnina, T., Borkowska A. 2013. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: Review. *International Agrophysics* 27:225–32.
- Balakhnina, T.I., Matichenkov V.V., Wlodarczyk T., Borkowska A., Nosalewicz M., Fomina I.R. 2012. Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding. *Plant Growth Regulation* 67(1):35-43.
- Baneh, H.D., Attari H., Hassani A., Abdollahi R., Taheri M., Ghani F. 2014. Genotypic variation in plant growth and physiological response to salt stress in grapevine. *Philippine Agricultural Scientist* 97(2):113–121.
- Castillo-Lopez, R.I., Leon-Felix J., Angulo-Escalante M.A., Gutierrez-Dorado R., Muiy-Rangel M.D., Heredia J.B. 2017. Nutritional and phenolic characterization of *Moringa oleifera* leaves grown in Sinaloa, Mexico. *Pakistan Journal of Botany* 49(1):161-168.
- Da Silva, E.C., Nogueira R.J.M.C., de Araújo F.P., de Melo N.F., de Azevedo Neto, A.D. 2008. Physiological responses to salt stress in young umbu plants. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1-3):147-157.
- Batool, M., Saqib M., Murtaza G., Basra S., Nawaz S. 2015. Silicon application improves Fe and Zn use efficiency and growth of maize genotypes under saline conditions. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 52(2):445-451.
- Bhuiyan, M.S., Raman A., Hodgkins D., Mitchell D., Nicol H.I. 2017. Influence of high levels of Na⁺ and Cl⁻ on ion concentration, growth, and photosynthetic performance of three

- salt-tolerant plants. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 228:1-9.
- Biju, S., Fuentes S., Gupta D. 2017. Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. *Plant Physiol. Bioch.*, 119:250-264.
- Boari, F., Donadio A., Pace B., Schiattone M.I., Cantore V. 2016. Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato. *Agricultural Water Management* 167:29-37.
- Bose, J., Rodrigo-Moreno A., Lai D., Xie Y., Shen W., Shabala S. 2015. Rapid regulation of the plasma membrane H⁺-ATPase activity is essential to salinity tolerance in two halophyte species, *Atriplex lentiformis* and *Chenopodium quinoa*. *Annals of botany* 115(3): 481-494.
- Bybordi, A. 2012. Effect of ascorbic acid and silicium on photosynthesis, antioxidant enzyme activity, and fatty acid contents in canola exposure to salt stress. *Journal of Integrative Agriculture* 11(10):1610-1620.
- Bybordi, A. 2014. Interactive effects of silicon and potassium nitrate in improving salt tolerance of wheat. *Journal of Integrative Agriculture* 13(9):1889-1899.
- Bybordi, A. 2015. Influence of exogenous application of silicon and potassium on physiological responses, yield, and yield components of salt-stressed wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46(1):109-122.
- Camargo, M.S., Korndörfer G.H., Wyler P. 2014. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. *Field Crops Research* 16:64-75.

- Castillo-Lopez, R.I., Leon-Felix J., Angulo-Escalante M.A., Gutierrez-Dorado R., Muy-Rangel M.D., Heredia J.B. 2017. Nutritional and phenolic characterization of *Moringa oleifera* leaves grown in Sinaloa, Mexico. *Pakistan Journal of Botany* 49(1):161-168.
- Chen, D., Yin L., Deng X., Wang S. 2014. Silicon increases salt tolerance by influencing the two-phase growth response to salinity in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta physiologiae plantarum* 36(9):2531-2535.
- Cooke, J., Leishman M.R. 2016. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Functional Ecology* 30:1340–1357.
- Connor, J.D., Schwabe K., King D., Knapp K. 2012. Irrigated agriculture and climate change: the influence of water supply variability and salinity on adaptation. *Ecological Economics* 77:149-157.
- Coskun, D., Britto D.T., Huynh W.Q., Kronzucker H.J. 2016. The role of Silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science* 7:1-7.
- Coskun, D., Britto D.T., Jean Y.K., Kabir I., Tolay I., Torun A.A., Kronzucker H.J. 2013. K⁺ efflux and retention in response to NaCl stress do not predict salt tolerance in contrasting genotypes of rice (*Oryza sativa* L.). *PLoS One* 8:1-16.
- Da Silva, E.C., Nogueira R.J.M.C., de Araújo F.P., de Melo N.F., de Azevedo Neto, A.D. 2008. Physiological responses to salt stress in young umbu plants. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1-3):147-157.
- Dadkhah, A. (2018). Effect of Salinity on Carbon Isotope Discrimination of Shoot and Root of Four Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Cultivars. *J. Agr. Sci. Tech.* 5:901-910

- Duan, X., Tang M., Wang W. 2013. Effects of silicon on physiology and biochemistry of dendrobium moniliforme plantlets under cold stress. *Agricultural Biotechnology* 2(3):18.
- Debona, D., Rodrigues F.A., Datnoff L.E. 2017. Silicon's Role in Abiotic and Biotic Plant Stress. *Annual Review of Phytopathology* 55(1):1-23.
- Deshmukh, R.K., Vivancos J., Guérin V., Sonah H., Labbé C., Belzile F., Bélanger R.R. 2013. Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in Arabidopsis and rice. *Plant molecular biology* 83(4-5):303-315.
- Elhag, A.Z., Abdalla M.H. 2012. Effect of sodium chloride on germination and emergence of moringa (*Moringa oleifera* L.) seeds. *Journal of Science and Technology* 13(2):62-67.
- Escalona, A., Salas-Sanjuán M.C., Dos Santos C., Guzmán M. 2014. Efecto de aguas salinas sobre el crecimiento, concentración y relaciones de iones en *Zinnia elegans* y *Tagetes erecta* para su uso en jardinería urbana. ITEA, información técnica económica agraria: revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA) (4):325-334.
- Esmaeili, S., Salehi H., Eshghi S. 2015. Silicon ameliorates the adverse effects of salinity on turfgrass growth and development. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences* 38(12):1885-1901.
- Etheridge, R.D., Pesti G.M., Foster E.H. 1998. A comparison of nitrogen values obtained utilizing the Kjeldahl nitrogen and Dumas combustion methodologies (Leco CNS 2000) on samples typical of an animal nutrition analytical laboratory. *Anim. Feed Sci. Technol* 73:21

- Exley, C. 2015. A possible mechanism of biological silicification in plants. *Frontiers in plant science* 6:853.
- Fariied, H.N., Ayyub C.M., Amjad M., Ahmed R. 2016. Salinity impairs ionic, physiological and biochemical attributes in potato. *Pakistan Journal in Agriculture Sciences* 53(1):17-25.
- Flexas, J., Bota J., Galmes J., Medrano H., Ribas-Carbó M. 2006. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. *Physiologia Plantarum*, 127(3):343-352.
- Gabriel, J.L., Almendros P., Hontoria C., Quemada M. 2012. The role of cover crops in irrigated systems: soil salinity and salt leaching. *Agriculture, ecosystems and environment* 158:200-207.
- Gengmao, Z., Shihui L., Xing S., Yizhou W., Zipan C. 2015. The role of silicon in physiology of the medicinal plant (*Lonicera japonica* L.) under salt stress. *Scientific reports* 5:1-11.
- Giorgi, A., Mingozi M., Madeo M., Speranza G., Cocucci M. 2009. Effect of nitrogen starvation on the phenolic metabolism and antioxidant properties of yarrow (*Achillea collina* Becker ex Rchb.). *Food Chemistry* 114(1):204-211.
- Gottardi, S., Iacuzzo F., Tomasi N., Cortella G., Manzocco L., Pinton R., Cesco S. 2012. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 56:14-23.
- Grégoire, C., Rémus-Borel W., Vivancos J., Labbé C., Belzile F., Bélanger R.R. 2012. Discovery of a multigene family of aquaporin silicon transporters in the primitive plant *Equisetum arvense*. *The Plant Journal* 72(2):320-330.

- Guerriero, G., Hausman J.F., Legay S. 2016. Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in plant science* 7:1–8.
- Guntzer, F., Keller C., Meunier J.D. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32(1):201-213.
- Gupta, B., Huang B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International journal of genomics* 2014:1–18.
- Habibi, G., Hajiboland R. 2013. Alleviation of drought stress by silicon supplementation in pistachio (*Pistacia vera* L.) plants. *Folia Horticulturae* 25(1):21-29.
- Haghighi, M., Afifipour Z., Mozafarian M. 2012. The alleviation effect of silicon on seed germination and seedling growth of tomato under salinity stress. *Vegetable Crops Research Bulletin* 76:119-126.
- Haghighi, M., Pessaraki M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae* 161: 111-117.
- Hameed, A., Sheikh M.A., Jamil, A., Basra, S.M.A. 2013. Seed priming with sodium silicate enhances seed germination and seedling growth in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit stress induced by polyethylene glycol. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences* 11: 19-24.
- Haynes, R.J. 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *J. Plant Nutrition and Soil Science* 177(6):831-844.

- He, Y., Chen Y., Yu C L., Lu K.X., Jiang Q.S., Fu J.L., Wang G.M., Jiang, D.A. 2016. Photosynthesis and yield traits in different soybean lines in response to salt stress. *Photosynthetica* 54(4):630-635.
- Hegazi, M.A. 2015. Influence of soil type, sowing date and diluted seawater irrigation on seed germination, vegetation and chemical constituents of *Moringa oleifera*, Lam. *Journal of Agricultural Science* 7(3):138-147.
- Henschke, M. 2016. Growth of ornamental grasses under salinity stress. *Journal of Horticultural Research* 24(2):5-11.
- Hernández-Apaolaza, L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta* 240(3):447-458.
- Hoagland, D.R., Arnon, D.I. 1950 *Water-Culture Method for Growing Plants Without Soil*. (CAES. Circular, 347) California Agricultural Experiment Station, California. p. 32.
- Hussein, M.M., Abou-Baker N.H. 2014. Growth and mineral status of moringa plants as affected by silicate and salicylic acid under salt stress. *International Journal of Plant and Soil Science* 3(2):163-177.
- IBM Corp. Released. 2013. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0*. Armonk, NY: IBM Corp.
- Ibrahim, E.A. 2016. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. *Journal of plant physiology* 192:38-46.
- Iglesias, M.J., García-López J., Collados-Luján J.F., López-Ortiz F., Díaz M., Toresano F., Camacho F. 2015. Differential response to environmental and nutritional factors of high-quality tomato varieties. *Food chemistry* 176:278-287.

- Imtiaz, M., Rizwan M.S., Mushtaq M.A., Ashraf M., Shahzad S.M., Yousaf B., Anser D. 2016. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *Journal of Environmental Management* 183:521-529.
- ISTA (International Seed Testing Association). 2012. International rules for seed testing. *Seed Science and Technology* 24, 243 p.
- Jana, S., Jeong B.R. 2014. Silicon: The most under-appreciated element in horticultural crops. *Trends in Horticultural Research* 4:1-19.
- Jia-Wen, W., Yu S., Yong-Xing Z., Yi-Chao W., Hai-Jun G. 2013. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. *Pedosphere* 23(6):815-825.
- Khan, W.U.D., Aziz T., Waraich E.A., Khalid M. 2015. Silicon application improves germination and vegetative growth in maize grown under salt stress. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 52(4):937-944.
- Khan, H.R., Ashraf M., Shahzad S.M., Imtia M., Aziz A., Piracha M.A., Siddiqui A.R. 2016. Additional application of plant nutrients with farm yard manure for improving the adaptation of cotton crop to salinity stress. *Journal of Applied Agriculture and Biotechnology* 1(2):47-56.
- Khattab, H.I., Emam M. A., Ema, M.M., Helal N.M., Mohamed M.R. 2014. Effect of selenium and silicon on transcription factors NAC5 and DREB2A involved in drought-responsive gene expression in rice. *Biologia plantarum* 58(2):265-273.
- Khoshgoftarmanesh, A.H., Khodarahmi S., Haghghi M. 2014. Effect of silicon nutrition on lipid peroxidation and antioxidant response of cucumber plants exposed to salinity stress. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60(5):639-653.

- Kim, Y.H., Khan A.L., Lee I.J. 2016. Silicon: a duo synergy for regulating crop growth and hormonal signaling under abiotic stress conditions. *Critical reviews in biotechnology* 36(6):1099-1109.
- Kim, Y.H., Khan A.L., Waqas M., Shim J.K., Kim D.H., Lee K.Y., Lee I.J. 2014. Silicon application to rice root zone influenced the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation* 33(2):137-149.
- Kong, D., Ju C., Parihar A., Kim S., Cho D., Kwak J.M. 2015. Arabidopsis glutamate receptor homolog3.5 modulates cytosolic Ca_2^+ level to counteract effect of abscisic acid in seed germination. *Plant physiology* 167(4):1630-1642.
- Kosová K., Vítámvás P., Prášil I.T., Renaut J. 2011. Plant proteome changes under abiotic stress—contribution of proteomics studies to understanding plant stress response. *Journal of proteomics* 74(8):1301-1322.
- Krishnamurthy, P., Ranathunge, K., Nayak, S., Schreiber, L., y Mathew, M. K. (2011). Root apoplastic barriers block Na^+ transport to shoots in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany* 62(12):4215-4228.
- Kronzucker, H.J., Coskun D., Schulze L.M. et al. Wong J.R., Britto D.T. 2013. Sodium as Nutrient y Toxicant. *Plant Soil* 369:1-23.
- Krzymińska, A., Ulczycka-Walorska M. 2015. The effect of sodium chloride on growth and quality. *Journal of Horticultural Research* 23(1):17-20.
- Lamz, P.A., González C. 2013. Salinity as a problem in agriculture: plant breeding an immediate solution. *Cultivos Tropicales* 34(4):31-42.

- Lekakis, E.H., Antonopoulos V.Z. 2015. Modeling the effects of different irrigation water salinity on soil water movement, uptake and multicomponent solute transport. *Journal of Hydrology* 530:431-446.
- 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 Physiologiae Plantarum* 37(4):1-9.
- Liang, X., Fang S., Ji W., Zheng D. 2015a. The positive effects of silicon on rice seedlings under saline-alkali mixed stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46(17):2127-2138.
- Liang, Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. 2015b. Silicon Uptake and Transport in Plants: Physiological and Molecular Aspects. In: Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. (ed.). *Silicon in agriculture: From theory to practice*. Springer pp 69-79.
- Lim, J.H., Park K.J., Kim B.K., Jeong J.W., Kim H.J. 2012. Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout. *Food chemistry* 135(3):1065-1070.
- Liu, P., Yin L., Wang S., Zhang M., Deng X., Zhang S., Tanaka K. 2015. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Environmental and Experimental Botany* 111:42-51.
- López-Contreras, J.J., Zavala-García F., Urías-Orona V., Martínez-Ávila G.C.G., Rojas R., Niño-Medina G. 2015. Chromatic, phenolic and antioxidant properties of *Sorghum bicolor* genotypes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 43(2):366-370.

- Lu, N., Luo Z., Ke Y., Dai L., Duan H., Hou R., Li Y. 2017. Growth, Physiological, Biochemical, and Ionic Responses of *Morus alba* L. Seedlings to Various Salinity Levels. *Forests* 8(12):488.
- Luyckx, M., Hausman J.F., Lutts S., Guerriero G. 2017. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science* 8:1-8.
- Ma, J.F., Yamaji N. 2015. A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in plant science* 20(7):435-442.
- Malčovská, S.M., Dučaiová Z., Bačkor M. 2014. Impact of silicon on maize seedlings exposed to short-term UV-B irradiation. *Biologia* 69(10):1349-1355.
- Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno L., Davy A.J. 2013. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant Physiology and Biochemistry* 63:115-121.
- Meharg, C., Meharg A.A. 2015. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice?. *Environmental and Experimental Botany* 120:8-17.
- Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aghdasi M. 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere* 25(2):192-201.
- Meng, D., Fricke, W. 2017. Changes in root hydraulic conductivity facilitate the overall hydraulic response of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to salt and osmotic stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 113:64-77.
- Mišić, D., Šiler B., Živković J.N., Simonović A., Maksimović V., Budimir S., Janošević D., Duričković M., Nikolić, M. 2012. Contribution of inorganic cations and organic

- compounds to osmotic adjustment in root cultures of two *Centaureum* species differing in tolerance to salt stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 108(3):389-400.
- Mohsen, A.A., Ebrahim M.K.H., Ghoraba, W.F.S. 2013. Effect of salinity stress on *Vicia faba* productivity with respect to ascorbic acid treatment. *Iranian Journal of Plant Physiology* 3(3):725-736.
- Muneer, S., Park Y.G., Manivannan A., Soundararajan P., Jeong B.R. 2014. Physiological and proteomic analysis in chloroplasts of *Solanum lycopersicum* L. under silicon efficiency and salinity stress. *International journal of molecular sciences* 15(12):21803-21824.
- Munns, R., Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59:651-681.
- Muñoz, R.J.J. 2009. Manejo del cultivo de tomate en invernadero. *In: Castellanos, J.Z. (Ed). Manual de producción de tomate en invernadero. Intagri, S.C. México. Pp 45-92.*
- Navarro, M., Cicero S.M., Gomes-Junior F.G. 2015. Determination of the germination temperature of *Moringa oleifera* seeds with support of vigor tests. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 49(4):509-514.
- Neocleous, D., Koukounaras A., Siomos A.S., Vasilakakis M. 2014. Assessing the salinity effects on mineral composition and nutritional quality of green and red “baby” lettuce. *J. Food Quality* 37(1):1-8.
- Negrão, S., Schmöckel S. M., Tester M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany* 119(1):1-11.
- Nouman, W., Qureshi M.K., Shaheen M., Zubair M. 2018. Variation in Plant Bioactive Compounds and Antioxidant Activities Under Salt Stress. *In: Vats S. (eds) Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants. Springer, Singapore. Pp. 77-101.*

- Nouman W., Siddiqui M.T., Basra S.M.A., Khan R.A., Gull T., Olson M.E., Munir H. 2012. Response of *Moringa oleifera* to saline conditions. *International Journal of Agriculture and Biology* 14:757-762.
- Nouman, W., Siddiqui M.T., Basra S.M.A., Khan R.A., Gull T., Olson, M. E., Munir, H. 2012. Response of *Moringa oleifera* to saline conditions. *International Journal of Agriculture and Biology* 14:757-762.
- Pati, S., Pal B., Badole S., Hazra G.C., Mandal B. 2016. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. *Commun. Soil Sci. and Plan* 47:284-290.
- Pavlovic, J., Samardzic J., Maksimović V., Timotijevic G., Stevic N., Laursen K.H., Nikolic M. 2013. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytologist* 198:1096-1107.
- Pérez-López, U., Miranda-Apodaca J., Mena-Petite A., Muñoz-Rueda A. 2014. Responses of nutrient dynamics in barley seedlings to the interaction of salinity and carbon dioxide enrichment. *Environ. Exp. Bot* 99:86-99.
- Petropoulos, S.A., Levizou E., Ntatsi G., Fernandes Â., Petrotos K., Akoumianakis K., Ferreira I.C. 2017. Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food chemistry* 214: 129-136.
- Pontigo, S., Ribera A., Gianfreda L., de la Luz Mora M., Nikolic M., Cartes P. 2015. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. *Planta* 242(1):23-37.
- Pozo, J., Urrestarazu M., Morales I., Sánchez J., Santos M., Dianez F., Álvaro J.E. 2015. Effects of silicon in the nutrient solution for three horticultural plant families on the

- vegetative growth, cuticle, and protection against *Botrytis cinerea*. *HortScience* 50(10):1447-1452.
- Qin, L., Kang W.H., Qi Y.L., Zhang Z.W., Wang N. 2016. The influence of silicon application on growth and photosynthesis response of salt stressed grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Acta physiologiae plantarum* 38(3):1-9.
- Quintana-Blanco, W.A., Pinzón-Sandoval E.H., Torres D.F. 2016. Evaluación del crecimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) CV ICA Cerinza, bajo estrés salino. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica* 19(1):87–95.
- Rasool, S., Hameed A., Azooz M.M., Muneebu-rehman., Siddiqi T.O., Ahmad P. 2013. Salt stress: causes, types and responses of plants. In: Ahmad P, Azooz MM, Prasad MNV (eds) *Ecophysiology and responses of plants under salt stress*. Springer, New York. pp. 1–24.
- Rios, J. J., Martínez-Ballesta, M. C., Ruiz, J. M., Blasco, B., y Carvajal, M. (2017). Silicon-mediated Improvement in Plant Salinity Tolerance: The Role of Aquaporins. *Frontiers in plant science* 8:948.
- Rizwan, M., Meunier J.D., Miche H., Keller C. 2012. Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination. *Journal of hazardous materials* 209:326-334.
- Sahebi, M., Hanafi M.M., Abdullah S.N.A., Rafii M.Y., Azizi P., Tengoua F., Azwa J.M.N., Shabanimofrad, M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed research international* 2015:1–16.
- Sahin, U., Ekinci M., Ors S., Turan M., Yildiz S., Yildirim E. 2018. Effects of individual and combined effects of salinity and drought on physiological, nutritional and biochemical

- properties of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*). *Scientia Horticulturae* 240:196-204.
- Sakurai, G., Satake A., Yamaji N., Mitani-Ueno N., Yokozawa M., Feugier F.G., Ma, J.F. 2015. In silico simulation modeling reveals the importance of the Casparian strip for efficient silicon uptake in rice roots. *Plant and Cell Physiology* 56(4):631–39.
- Salahshoor, F., Kazemi F. 2016. Effect of calcium on reducing salt stress in seed germination and early growth stage of *Festuca ovina* L. *Plant, Soil and Environment* 62(10):460-466.
- Savvas, D., Ntatsi G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196:66-81.
- Scagel, C.F., Bryla D.R., Lee J. 2017. Salt exclusion and mycorrhizal symbiosis increase tolerance to NaCl and CaCl₂ salinity in ‘Siam Queen’ basil. *HortScience* 52(2):278-287.
- Scagel, C.F., Lee J., Mitchell J.N. 2019. Salinity from NaCl changes the nutrient and polyphenolic composition of basil leaves. *Industrial Crops and Products* 127:119-128.
- Shahzad, M., Zörb C., Geilfus C.M., Mühling K.H. 2013. Apoplastic Na⁺ in *Vicia faba* leaves rises after short-term salt stress and is remedied by silicon. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199(3):161-170.
- Singh, K.L., Mukherjee A., Kar R.K., 2017. Early axis growth during seed germination is gravitropic and mediated by ROS and calcium. *Journal of Plant Physiology* 216:181-187.
- Shi, Y., Wang Y., Flowers T.J., Gong H. 2013. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. *Journal of plant physiology* 170(9):847-853.

- Sivanesan, I., Jeong, B.R. 2014. Silicon promotes adventitious shoot regeneration and enhances salinity tolerance of *Ajuga multiflora* Bunge by altering activity of antioxidant enzyme. *The Scientific World Journal* 2014:1-10.
- Sivanesan, I., Park S.W. 2014. The role of silicon in plant tissue culture. *Frontiers in plant science* 5:1-4.
- Shahid, MA, Balal RM, Pervez MA, Abbas T, Aqeel MA, Javaid MM, Garcia-sanchez F (2015) Foliar spray of phyto-extracts supplemented with silicon: an efficacious strategy to alleviate the salinity-induced deleterious effects in pea (*Pisum sativum* L.). *Turkish Journal of Botany* 39:408–419.
- Soundararajan, P., Sivanesan I., Jo E.H., Jeong B.R. 2013. Silicon promotes shoot proliferation and shoot growth of *Salvia splendens* under salt stress in vitro. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 54(4):311-318.
- Talei, D., Kadir M.A., Yusop M.K., Valdiani A., Abdullah M.P. 2012. Salinity effects on macro and micronutrients uptake in medicinal plant King of Bitters (*Andrographis paniculata* Nees.). *Plant Omics* 5(3):271-278.
- Tarchoune, I., Degl'Innocenti E., Kaddour R., Guidi L., Lachaâl M., Navari-Izzo F., Ouerghi, Z. 2012. Effects of NaCl or Na₂SO₄ salinity on plant growth, ion content and photosynthetic activity in *Ocimum basilicum* L. *Acta physiologiae plantarum* 34(2):607-615.
- Tang, X., Yang X., Li H., Zhang H. 2018. Maintenance of K⁺/Na⁺ Balance in the Roots of *Nitraria sibirica* Pall. in Response to NaCl Stress. *Forests* 9(10):601.
- Tester, M., Davenport R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of botany* 91(5):503-527.

- Thiam, M., Champion A., Diouf D., Ourèye S.Y.M. 2013. NaCl Effects on in vitro germination and growth of some senegalese cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) cultivars. *ISRN biotechnology 2013*: 11.
- Thomas, S.C., Martin, A.R. 2012. Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests 3*(2):332-352.
- Torabi, F., Majd A., Enteshari S. 2015. The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil science and plant nutrition 61*(5):788-798.
- Trembath-Reichert, E., Wilson J.P., McGlynn S.E., Fischer W.W. 2015. Four hundred million years of silica biomineralization in land plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences 112*(17):5449-5454.
- Tripathi, D.K., Singh V.P., Gangwar S., Prasad S.M., Maurya J.N., Chauhan D.K. 2014. Role of silicon in enrichment of plant nutrients and protection from biotic and abiotic stresses. *In: Ahmad P., Wani M., Azooz M., Tran LS. (eds) Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes. Springer, New York, NY. pp. 39-56.*
- Tripathi, D.K., Singh V.P., Prasad S.M., Chauhan D.K., Dubey N.K., Rai A.K. 2015. Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll florescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. *Ecotoxicology and environmental safety 113*:133-144.
- Tubana, B.S., Babu T., Datnoff L.E. 2016. A Review of Silicon in Soils and Plants and Its Role in US Agriculture: History and Future Perspectives. *Soil Science 181*(9/10):393-411.
- Vasanthi, N., Saleena L.M., Raj S.A. 2015. Silicon in crop production and crop protection-A review. *Agricultural Reviews 35*(1):14-23.

- Wang, S., Liu P., Chen D., Yin L., Li H., 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.
- Wu, G.Q., Liu H.L., Feng R.J., Wang C.M., Du Y.Y. 2017. Silicon ameliorates the adverse effects of salt stress on sainfoin (*Onobrychis viciaefolia*) seedlings. *Plant Soil Environ* 63:545-551.
- 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.
- Xu, H., Lu Y., Xie Z. 2016. Effects of silicon on maize photosynthesis and grain yield in black soils. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 28(11):779.
- 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 physiologiae plantarum* 35(11):3099-3107.
- Yin, Y., Yang R., Han Y., Gu Z. 2015. Comparative proteomic and physiological analyses reveal the protective effect of exogenous calcium on the germinating soybean response to salt stress. *Journal of Proteomics* 113:110-126.
- Zavariyan, A.M., Rad M.Y., Asghari M. 2015. Effect of seed priming by potassium nitrate on germination and biochemical indices in *Silybum marianum* L. under salinity stress. *International Journal of Life Sciences* 9(1):23-29.
- Zhang, M., Fang Y., Ji Y., Jiang Z., Wang L. 2013. Effects of salt stress on ion content, antioxidant enzymes and protein profile in different tissues of *Broussonetia papyrifera*. *South African journal of botany*, 85:1-9.

- Zhang, M., Wang Z., Yuan L., Yin C., Cheng J., Wang L., Zhang H. 2012. Osmopriming improves tomato seed vigor under aging and salinity stress. *African Journal of Biotechnology* 11(23):6305-6311.
- Zhani, K., Ben F.M., Mani F., Hannachi C. 2012. Impact of salt stress (NaCl) on growth, chlorophyll content and fluorescence of Tunisian cultivars of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Journal of Stress Physiology y Biochemistry* 8(4):236–252.
- Zhu, Y.X., Xu X.B., Hu Y.H., Han W.H., Yin J.L., Li H.L., Gong H.J. 2015. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant cell reports* 34(9):1629-1646.
- Zhu, Y., Gong H. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development* 34(2):455-472.