

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



APLICACIONES DE CALCIO Y SILICIO AUMENTAN LA TOLERANCIA AL
ESTRÉS POR NaCl EN TOMATE HIDROPÓNICO

Tesis

Que presenta MARTÍN HERNÁNDEZ SALINAS
como requisito parcial para obtener el Grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

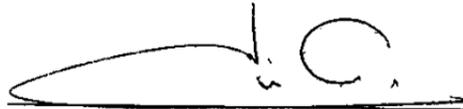
Saltillo, Coahuila

Diciembre 2015

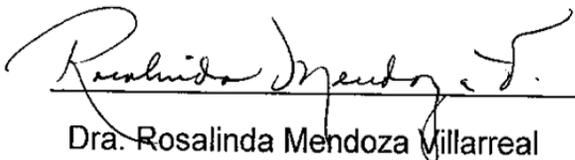
APLICACIONES DE CALCIO Y SILICIO AUMENTAN LA TOLERANCIA AL
ESTRÉS POR NACL EN TOMATE HIDROPÓNICO

Tesis

Elaborada por MARTÍN HERNÁNDEZ SALINAS como requisito parcial para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



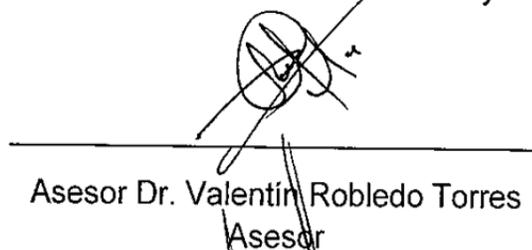
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Asesor Principal:



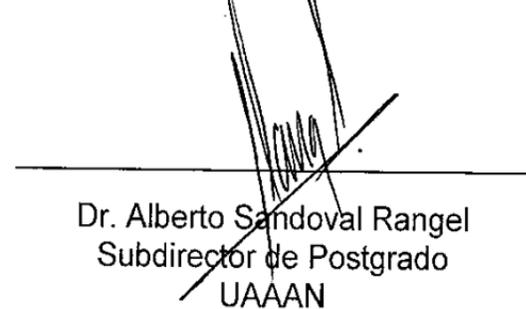
Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Asesor Dr. Valentín Robledo Torres
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro mi “Alma Terra Mater” por su apoyo para la realización de este proyecto de investigación.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por su confianza y la asesoría para la realización de este proyecto de investigación.

A las personas que hacen posible la realización de un proyecto de investigación así como el conocimiento compartido en las aulas, que son los profesores investigadores del programa de Maestría en Ciencias en Horticultura.

A la T.A. Martina de la Cruz Casillas por su apoyo como técnico laboratorista en la realización de este proyecto de investigación.

Al Dr. Iran Alia Tejacal por su apoyo en la aceptación de una estancia en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

A la M.C. Alyn Mariana Palacios Sosa por su apoyo como técnico laboratorista en la realización de una estancia en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos con fines de asesoría para la realización del proyecto de investigación.

A aquellas grandes personas, mis compañeros de generación (Yesica, Antonio, Joaquín, Víctor y Obed, por la retroalimentación del conocimiento y por todos los buenos y malos momentos que viví con ellos. Y a mis amigos (Raquel, Flor, Omar, Avilés, Julieta, Roberto, Eduardo) que han compartido los momentos de felicidad y angustia conmigo.

Finalmente agradezco a mi familia por su apoyo, confianza, comprensión.

Dedicatorias

A Dios por darme la oportunidad de vivir cada día.

A mi familia por su apoyo moral y económico, por su confianza en mí para ser un profesional.

A los que ya no están en este mundo mortal abuelos, tíos y a mi hermano que en vida me dieron la oportunidad de pasar tiempo con ellos y por la confianza puesta en mí.

A los maestros investigadores que compartieron sus conocimientos en el aula.

Índice General

Agradecimientos	iii
Dedicatorias	iv
Resumen	viii
Abstract.....	x
Introducción	1
Objetivo.....	2
Objetivos Específicos.....	2
Hipótesis	2
Revisión de Literatura	3
Salinidad.....	3
Efectos de la salinidad en plantas	3
Efecto del sodio en plantas.....	4
Efecto del cloro en plantas	5
Efectos del calcio en plantas	5
Efectos del silicio en plantas.....	6
Tolerancia de las plantas a salinidad.....	7
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	7
Materiales y Métodos.....	9
Resultados y Discusión.....	13
Conclusiones	23
Referencias.....	24

Lista de Figuras

- Figura 1.** Efecto de la aplicación suplementaria de Ca + Si y salinidad inducida con NaCl en la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de fruto de plantas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Liberty. Medias con letras iguales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar de la media. 14
- Figura 2.** Efecto de la aplicación suplementaria de Ca+Si y salinidad inducida con NaCl en la solución nutritiva en la actividad enzimática antioxidante, proteína soluble y prolina en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Liberty. Medias con letras iguales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar de la media. 16
- Figura 3.** Efecto de la aplicación suplementaria de Ca+Si y salinidad inducida con NaCl en la solución nutritiva en la concentración de Na y Cl en parte aérea y raíz de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Liberty. Medias con letras iguales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar de la media. 18

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Diseño de tratamientos para medir el efecto de la adición suplementaria de Ca en combinación con silicio (Si) en la tolerancia al estrés causado por NaCl en plantas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L). cv. Liberty.	10
Cuadro 2. Efecto de Ca+Si y concentración de NaCl en la nutrición mineral en tomate parte aérea (A) y raíz (R).	20
Cuadro 3. Efecto de Ca+Si y concentración de NaCl en la nutrición mineral en tomate parte aérea (A) y raíz (R).	20

Resumen

**APLICACIONES DE CALCIO Y SILICIO AUMENTAN LA TOLERANCIA AL
ESTRÉS POR NaCl EN TOMATE HIDROPÓNICO**

POR

MARTÍN HERNÁNDEZ SALINAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Dr. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR –ASESOR–

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2015

La producción de tomate en áreas con problemas de salinidad provoca en las plantas un sinnúmero de efectos fisiológicos, morfológicos y bioquímicos. El objetivo de este estudio fue definir el efecto de aplicaciones suplementarias de calcio (Ca) y Silicio (Si) sobre la tolerancia al estrés por salinidad en tomate hidropónico. El experimento se estableció con un diseño de bloques completos al azar con seis repeticiones. Las concentraciones de NaCl fueron 20, 60 mM L⁻¹, Ca 9, 12 meq L⁻¹ y Si 0, 42 mg L⁻¹. Los resultados indican que Ca+Si suplementarios aumentan la altura de planta, peso seco de raíz, peso seco total, rendimiento, contenido de proteína soluble y prolina en una concentración de 20 mM. La actividad de la peróxidasa se incrementa en una concentración de 60 mM. El análisis mineral mostró que la concentración de Na se incrementó en la parte aérea de plantas con estrés salino, sin embargo al suplementar Ca+Si el Na disminuye. En contraste la concentración de Na en la raíz se incrementa en las plantas con estrés salino. La concentración de Cl en la parte aérea de plantas con estrés salino se incrementó al suplementar Ca+Si. Y muestra un comportamiento similar en la concentración de Cl en la raíz de plantas irrigadas con 20 y 60 mM de NaCl. Por lo tanto se concluye que, el Ca+Si disminuyen parcialmente el estrés por salinidad en tomate y aumenta la concentración de prolina y proteína soluble, además de la actividad de la peróxidasa e intervienen en la disminución de la translocación de Na hacia la parte aérea

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, salinidad, enzimas antioxidantes, Prolina, calcio suplementario.

Abstract

**APPLICATIONS OF CALCIUM AND SILICON INCREASES NaCl STRESS
TOLERANCE IN HYDROPONIC TOMATO**

BY

MARTÍN HERNÁNDEZ SALINAS

MASTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Dr. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR –ADVISOR–

Saltillo, Coahuila

December 2015

Tomato production in areas with salinity problems causes a number of physiological, morphological and biochemical effects. The aim of this study was to define the effect of supplementary calcium (Ca) and silicon (Si) on salt stress tolerance in hydroponic tomato. The experiment was a completely randomized design with six replicates. NaCl concentrations were 0, 20, and 60 mM L⁻¹, Ca: 9, 12 meq L⁻¹, and Si: 0, 42 mg L⁻¹. The results indicate that supplementary Ca + Si increased plant height, root dry weight, total dry weight, yield, soluble protein content and proline when NaCl concentration was at 20 mM. The peroxidase activity increased when NaCl concentration was 60 mM. The mineral analysis showed that the concentration of Na increased in the aerial part of plants with salt stress, however, with supplementary Ca + Si, Na concentration trended to decrease. In contrast, the concentration Na in the root increased in plants with salt stress. The concentration of chlorine (Cl) in the aerial part of plants with salt stress increased with supplementary Ca + Si and showed similar behavior in the concentration of Cl at the root of plants irrigated with 20 and 60 mM NaCl. Therefore it is concluded that the Ca + Si partially reduced salinity stress in tomato and the concentration of proline and soluble protein, plus the peroxidase activity and are involved in decreased translocation of Na to the aerial part.

Keywords: *Solanum lycopersicum*, salinity, antioxidant enzymes, proline, supplemental calcium.

Introducción

El tomate es un cultivo importante en México ya que es el principal producto agrícola de exportación. En áreas dedicadas a la agricultura cada vez está teniendo más restricciones debido a la salinización de los suelos y limitando la obtención de altos rendimientos y la posibilidad de cultivar una amplia variedad de especies. Uno de los efectos ante el estrés salino en las plantas es la reducción de absorción de agua, y se manifiesta en la disminución de la expansión foliar y pérdida de turgencia en plantas (Leidi y Pardo, 2002).

Por otra parte, la producción de tomate en suelos con problemas de salinidad desencadena en las plantas diversos efectos fisiológicos, morfológicos y bioquímicos que, afectan el proceso de fotosíntesis (Chaves *et al.*, 2009), frutos de menor peso (Del Rosario *et al.*, 1990; Pérez-Alfocea *et al.*, 1996), baja tasa de crecimiento reflejado por una disminución en la absorción de agua por las raíces (Nuñez *et al.*, 2007), así como también se presentan cambios cuantitativos y cualitativos en la síntesis de proteínas a causa de la expresión de genes en respuesta a un estrés salino (Singh y Chatrath, 2001).

El calcio (Ca) es uno de los nutrimentos relacionados con la mitigación ante el estrés ya que interviene en la respuesta de las plantas a salinidad por su desempeño como señalizador, su función estructural en la membrana y su efecto sobre la actividad de algunos transportadores iónicos (Klimecka y Muszynska, 2007). El Ca puede intercambiar a otros cationes como el sodio en la membrana plasmática, pudiendo disminuir la toxicidad por sodio, por su efecto en la estabilidad y la integridad de la membrana celular (Marschner, 2012). A pesar de aún no haber sido comprobada su esencialidad en plantas superiores, los efectos benéficos del silicio (Si) han sido reportados para una gran variedad de especies vegetales. De acuerdo con Lima Filho *et al.* (2003), además en situaciones de estrés abiótico, el Si puede activar genes ligados con la producción de fenoles y enzimas relacionadas con mecanismos de defensa de la planta, por lo que esto se convierte en un buen indicador para evaluar la capacidad de algunos elementos para proteger a las plantas contra este tipo de estrés.

Sin embargo, a pesar de que se encuentra bien documentada la acción favorable tanto del Ca como del Si en el incremento de la tolerancia al estrés, existen pocos estudios realizados en los que se considere la acción de ambos elementos. El presente trabajo se realizó con el objetivo de estudiar el efecto de la aplicación simultánea de Ca y Si sobre la tolerancia al estrés causado por la salinidad en agua de riego y la respuesta en crecimiento, rendimiento y fisiología de plantas de tomate cultivadas en condiciones de hidropónica.

Objetivo

Estudiar el efecto de calcio más silicio en el incremento a la tolerancia al estrés por salinidad en tomate en condiciones de hidroponía.

Objetivos Específicos

Determinar el efecto de calcio más silicio sobre variables morfológicas y bioquímicas de tomate en condiciones de salinidad.

Hipótesis

La relación calcio más silicio tendrá efecto en la tolerancia al estrés por salinidad en tomate.

Revisión de Literatura

Salinidad

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

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

La salinidad es considerada como un estrés abiótico que perjudica en gran magnitud a los cultivos, provocando una disminución en la productividad y calidad de las cosechas (Yestisir y Uygur, 2009).

En suelos se presentan diversos problemas por estrés salino provocados por sales de sodio, particularmente por NaCl (Demiral, 2005). En plantas son varios los efectos por acumulación de estas sales. Sin embargo, los efectos con mayor importancia y de los más estudiados son el estrés osmótico, el desbalance iónico y la toxicidad que produce la acumulación de iones como sodio y cloro sobre los procesos metabólicos de la planta (Munns *et al.*, 2006; Turhan y Eris, 2007).

Efectos de la salinidad en plantas

Los suelos salinos causan considerables pérdidas en el rendimiento en una amplia variedad de cultivos alrededor del mundo. Este problema es más severo en las regiones semiáridas.

El efecto dañino de la salinidad puede inhibir el crecimiento de plantas y reducir la productividad de los cultivos, esto debido principalmente por tres causas: el déficit hídrico, la toxicidad por iones y el desbalance nutricional (Munns, 2002).

El estrés salino afecta a las plantas en la germinación, el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo porque reduce el potencial hídrico de la solución del suelo, por lo que disminuye la disponibilidad de agua, y crea un desequilibrio nutritivo, dada la elevada concentración de iones tóxicos como el Na^+ y Cl^- que pueden tener efectos negativos en la nutrición mineral y el metabolismo celular (Amini *et al.*, 2007). En consecuencia, los efectos dañinos de la salinidad provocan una reducción de turgencia y crecimiento, hasta la pérdida de la estructura celular por desorganización de membranas e inhibición de la actividad enzimática, son el producto combinado del estrés hídrico, la toxicidad iónica y el desequilibrio nutricional (Parida y Das, 2005).

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

Efecto del sodio en plantas

En plantas la toxicidad por (Na) se encuentra asociada a desórdenes en la membrana celular, o bien por competencia con potasio (K) en sitios de enlace esenciales para el metabolismo, por otra parte una alta concentración de Na desplaza los iones de calcio (Ca) de los sitios de enlace en la membrana celular de la raíz, causando una alteración en la permeabilidad de la misma, lo que puede causar que el K salga de las células, favoreciendo la entrada de Na (Dodd *et al.*, 2010).

La entrada de Na en las raíces puede ser mediante un transporte pasivo y éste es almacenado en las vacuolas de las células, por lo tanto en el citosol la concentración de Na se reduce.

Sin embargo para que éste ion salga del citosol se requiere energía utilizando antiportes Na/H ubicados en la membrana plasmática y en el tonoplasto los cuales utilizan el gradiente de protones que se generan por las bombas ATPasa-H de las membranas plasmática y del tonoplasto (Wang *et al.*, 2001).

Reportes indican que una alta concentración de Na inhibe la absorción de nutrientes por la interferencia con los transportadores iónicos en la membrana plasmática de la raíz, como los canales selectivos de K, además inhibe el crecimiento radicular por el efecto osmótico del Na (Tester y Davenport, 2003).

Efecto del cloro en plantas

En la actualidad hay pocos reportes que expliquen la entrada de cloro (Cl) a nivel celular y su compartimentación en la vacuola. Por otra parte el establecimiento de un potencial de membrana negativo ocurre cuando la célula se encuentra en homeostasis iónica, y genera una barrera termodinámica estable que permite el paso de este ion (Carrasco, 2004).

Sin embargo la entrada de Na al citosol provoca la despolarización de la membrana, por lo que el Cl podría ingresar por medio de canales iónicos de manera pasiva.

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

Efectos del calcio en plantas

Algunos estudios reportan que la adición suplementaria de calcio (Ca) en plantas sometidas a estrés salino puede reducir la absorción de Na y/o Cl, y favorecer la absorción de K y Ca, de esta manera se reduce el efecto dañino de la salinidad en plantas (Rangel, 1992).

Larcher (2003) menciona que el Ca en la planta regula la hidratación, activa enzimas (Amilasa, ATPasa), regula la elongación y crecimiento. Mientras que Marschner (2012) menciona que el Ca mantiene la estabilidad y la integridad de la membrana celular.

En la nutrición mineral el Ca desempeña un papel importante ya que se considera necesario para el crecimiento de plantas. Además de que participa en varios

procesos celulares como el mantenimiento de la estructura de la pared celular y está implicado en la tolerancia a varios tipos de estrés (salinidad, sequía, temperatura, etc.). También puede actuar como segundo mensajero en la traducción de señales en las plantas (Buchanan y Engman, 2002; Chaney *et al.*, 2008; Chao *et al.*, 2009).

El transporte de Ca se da por la corriente de transpiración. Como no es un elemento móvil en la planta, cortos periodos de deficiencia afectan rápidamente a los órganos y tejidos en crecimiento (Kleemann, 2000; Olle y Bender, 2009).

El Ca en los tejidos vegetales se puede encontrar de forma libre o adsorbido a iones no difusibles entre ellos los grupos carboxílicos, fosfóricos; además puede formar oxalatos, carbonatos y fosfatos de Ca; compuestos que se encuentran con frecuencia en las vacuolas (Mengel y Kirkby, 2000).

Efectos del silicio en plantas

El silicio es el segundo elemento más abundante en la superficie de la tierra, sin embargo, su papel en la biología de las plantas ha sido mal entendido y los intentos de asociar silicio (Si) con el metabolismo o actividades fisiológicas han sido concluyentes. Estrés sal ha sido un gran obstáculo para el uso exitoso de los suelos afectados por sales para la producción agrícola (Epstein, 1994).

A pesar de aún no haber sido comprobada su esencialidad en plantas superiores, los efectos benéficos del silicio (Si) han sido reportados para una gran variedad de especies vegetales.

De acuerdo con Lima Filho *et al.* (2003), además, en situaciones de estrés abiótico, el Si puede activar genes ligados con la producción de fenoles y enzimas relacionadas con mecanismos de defensa de las plantas.

El Si proporciona resistencia mecánica a las plantas de arroz y caña de azúcar, al ataque de enfermedades fungosas al formar barreras estructurales externas y promover la producción de fenoles, además, es un factor de tolerancia al exceso de aluminio, hierro y manganeso en suelos ácidos (Chérif y Belángier, 1992), y disminuye la transpiración en plantas (Hewitt y Smith, 1974).

El Si quede depositado en las paredes celulares del tejido epidérmico, y puede proporcionar a la planta diversos beneficios, tales como evitar la pérdida del agua por transpiración cuticular e incrementa la elasticidad de la pared celular durante el crecimiento de la planta al interactuar con pectinas y polifenoles (Marschner, 1995).

Tolerancia de las plantas a salinidad

Las plantas sometidas a altas concentraciones de NaCl evitan los efectos adversos por sales mediante exclusión de iones en las hojas o mediante su compartimentación en las vacuolas. En plantas sensibles, la resistencia a niveles moderados de salinidad en la solución del suelo depende de la capacidad de las raíces para impedir la absorción de iones tóxicos (Carvajal *et al.*, 2000).

Las plantas pueden ser clasificadas en aquellas que requieren o toleran altas concentraciones de sales, o halófitas, y las que no son tolerantes a la presencia de sales, o glicófitas. La sensibilidad de las plantas a las sales varía durante el desarrollo fenológico, dependiendo de la especie, el cultivar y factores ambientales (Munns, 2002). Se ha sugerido que los mecanismos de tolerancia y adaptación de las plantas al estrés salino se han dado por la evolución y se puede observar la existencia de niveles de susceptibilidad y de tolerancia diferentes, tanto de los mecanismos como de la amplitud y distribución entre diversas especies.

Por otra parte algunos solutos orgánicos que intervienen en la tolerancia al estrés por salinidad son los azúcares solubles (Reddy *et al.*, 1997; Dubey y Singh, 1999; Abdel, 2007) y prolina (Kuznetsov y Schevyakova, 1999; Abdel, 2007), por lo tanto, estos compuestos se pueden incrementar en plantas expuestas a estrés por salinidad (Rhodes *et al.*, 2002).

Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

El tomate es un cultivo importante en México ya que es el principal producto agrícola de exportación con alto valor comercial y gran importancia como alimento.

El tomate es, en sentido estricto, una fruta, pues nace de una flor y tiene semillas. El nombre tomate y/o jitomate varía dependiendo de la región de México en la que se esté produciendo, constituye uno de los ingredientes más utilizados en la cocina de nuestro país y de una buena parte del mundo. La industria de la alimentación lo prepara en infinidad de maneras: desde jugos, purés, conservas de tomates enteros y pelados, fritos, hasta como ingredientes de diversas salsas picantes, dulces, mermeladas, esencia para la elaboración de alimentos, saborizantes y más productos (SIAP, 2015).

El jitomate y/o tomate es originario de la América del Sur, de la región andina, particularmente de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile. Sin embargo, su domesticación fue llevada a cabo en México. El nombre de jitomate procede del náhuatl xictli, ombligo y tomatl, tomate, que significa tomate de ombligo. Es una planta de porte erecto o semierecto, arbustivo, cultivo de tipo anual. Existen variedades de crecimiento limitado (determinadas) y otras de crecimiento ilimitado (indeterminadas). El fruto es una baya ovalada, redonda o periforme, su tamaño va desde pequeños frutos del tamaño de una cereza, hasta enormes frutos de 750 gr. (SFA, 2010).

Materiales y Métodos

El experimento se realizó en julio de 2014 a febrero de 2015, en un invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (25° 23'' de latitud norte, 101° 00'' longitud oeste, altitud 1743 msnm). Durante el desarrollo del experimento se registró una temperatura promedio de 17.6 °C (promedio de la temperatura máxima de 29.9 °C y promedio de la temperatura mínima de 11.1 °C), una humedad relativa promedio de 77.3 % (máxima promedio de 95.1 %, mínima promedio de 40.5 %) y una radiación fotosintéticamente activa promedio diurna de 164.236 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ (radiación fotosintéticamente activa promedio, día solar 2:00 pm de 417.057 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$). Se utilizaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tipo bola cv. Liberty, las cuales fueron germinadas en charolas de 200 cavidades con turba ácida (11 Jul. 2014). El trasplante se realizó una vez que las plántulas presentaban cuatro hojas verdaderas (17 Ago. 2014) en contenedores de plástico rígido (80 cm de largo, 45 cm de ancho y 30 cm de alto), donde se agregó 30 L de un sustrato inerte como la perlita; la distancia entre plantas fue de 80 cm y 120 cm entre hileras.

Las soluciones nutritivas se prepararon con agua potable considerando su composición química y fueron aplicadas en las unidades experimentales respectivas a través de manguera de 16 mm, con goteros de cuatro L/hora y cuatro piquetas por contenedor. El cultivo se estableció bajo un sistema hidropónico cerrado; los tratamientos consistieron de una solución control correspondiente a la formulación de Steiner (1984) y soluciones que contenían dos concentraciones de NaCl, con o sin la adición de Ca y Si suplementario (Cuadro 1). Las soluciones nutritivas tuvieron un pH promedio de seis y la solución que no era retenida por el sustrato se recuperaba para su reuso en el siguiente riego, siendo remplazadas totalmente cada siete días.

El pH de las soluciones se mantuvo entre cinco punto ocho y seis punto dos mediante la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diariamente.

Tratamientos	NaCl mM L ⁻¹	Ca ⁺⁺ meq L ⁻¹	Si ppm	Conductividad Eléctrica dS m ⁻¹
Control	0	9	0	2.9
NaCl + Ca	20	9	0	5.9
NaCl + Ca + Si	20	12	42	6.8
NaCl + Ca	60	9	0	10.6
NaCl + Ca + Si	60	12	42	11.8

Cuadro 1. Diseño de tratamientos para medir el efecto de la adición suplementaria de Ca en combinación con silicio (Si) en la tolerancia al estrés causado por NaCl en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L). cv. Liberty.

El experimento finalizó a los 168 días después del trasplante (ddt), midiéndose la altura de planta en cada unidad experimental, el rendimiento de fruto se obtuvo mediante la suma del peso fresco de los frutos cosechados durante todo el estudio. Para determinar el peso seco de raíz, las plantas se extrajeron del sustrato y las raíces se lavaron con agua para eliminar los residuos del mismo, posteriormente la raíz, tallo y hojas fueron lavados con agua destilada y se sometieron a deshidratación en una estufa de secado a 65 °C por 72 h. Una vez obtenido el peso seco de los órganos se sumó para calcular el peso seco total. Se realizó un análisis de proteína soluble, actividad de enzimas antioxidantes y prolina en muestras de hojas centrales de las plantas a los 160 ddt, a partir de polvo de acetona, el cual se preparó de la siguiente manera: se elaboró una mezcla con 10 g de material vegetal (hojas) más 30 mL de acetona fría (4 °C) la cual se homogeneizó por 1 min con un homogeneizador (Ultra Turrax, IKA T25), el macerado obtenido se filtró al vacío utilizando una bomba de vacío (Felisa, PE-1600 L), posteriormente el macerado se homogeneizó y filtró dos veces más y se dejó secar a temperatura ambiente (18-22 °C). Posteriormente el polvo de acetona extraído de hojas de tomate, se almacenó en bolsas de plástico a 4 °C hasta el análisis de proteína soluble y actividad de las enzimas.

La concentración de proteína soluble se determinó por el método descrito por Bratford (1976). Para ello se mezclaron 0.2 g de polvo de acetona con 10 mL de buffer Tris-HCl 0.1 M en frío. La mezcla se centrifugó a 10 000 rpm por 20 min a 4 °C utilizando una centrifuga refrigerante (Z 326 K). A una muestra de 0.1 mL

del sobrenadante se le agregaron 5 mL de la solución Coomassie Blue (100 mg de Azul de Coomassie, 50 mL de Etanol al 95%, 100 mL de Ácido fosfórico, Agua destilada hasta 1000 mL), se agitó y registró la absorbancia en un espectrofotómetro (HACH, DR 500) a 595 nm mediante una curva de calibración con albumina de bovino.

La actividad de la peróxidasa (POD) se determinó utilizando 0.3 g de polvo de acetona obtenido de hojas de tomate, con 13 mL de Tris-HCl pH 7.2, se homogenizaron y centrifugaron a 10 000 rpm por 20 min a 4 °C, utilizando un homogeneizador (Ultra Turrax, IKA T25) y una centrifuga refrigerante (Z 326 K). La actividad de la POD se determinó con el método de Flurkey y Jen (1978), con las siguientes modificaciones: 2.6 mL del buffer Tris-HCl, pH 7.2, 0.25 mL de guayacol 0.1 M, 0.1 mL de peróxido de hidrógeno 0.25 % y 0.05 mL del sobrenadante; se registró el cambio de absorbancia en un espectrofotómetro (HACH, DR 500) a 470 nm en 5 min.

Para determinar la actividad de la superóxido dismutasa (SOD) se extrajo de una muestra de 0.2 g de polvo de acetona de hojas de tomate con 10 mL de solución buffer de fosfatos pH 7.8, 0.1 M a 4 °C, mezcla que se homogenizó por 30 seg. utilizando un homogeneizador (Ultra Turrax, IKA T25). Durante el proceso, las muestras se mantuvieron en baño de hielo. Una vez realizada la extracción se centrifugó a 10 000 rpm por 20 min a 0 °C mediante una centrifuga refrigerante (Z 326 K). Esta enzima se evaluó mediante el método propuesto por Bayer y Fridovich (1987), con la siguiente mezcla de reacción: 27 mL de buffer de fosfatos pH 7.8, 0.05 M, que contenía 0.01 M de EDTA, 1.5 mL de L-metionina (30 mg mL⁻¹), 1 mL de nitro blue tetrazolium (1.41 mg mL⁻¹) y 0.75 mL de Triton X-100 al 1 %. Se tomó 3 mL de la mezcla y adicionaron 0.03 mL de riboflavina (4.4 mg 100 mL) y 0.5 mL del sobrenadante; la mezcla final se iluminó durante 7 min con lámparas de luz fluorescente y se registró la absorbancia en un espectrofotómetro (HACH, DR 500) a 560 nm. Todo el proceso anterior se realizó con luz indirecta.

La extracción de la prolina se realizó a partir de 5 g de hoja fresca con 10 mL de ácido sulfosalicílico al 3 %, se homogenizó y centrifugó a 10 000 rpm por 30 min.

utilizando un homogeneizador (Ultra Turrax, IKA T25) y una centrifuga refrigerante (Z 326 K). Este aminoácido se determinó mediante el método de Bates *et al.* (1973); donde 1 mL de sobrenadante, 1 mL de ninhidrina y 1 mL de ácido acético glacial se agitan por 20 seg y se mantienen a baño María por 1 hora a 90 °C. Posteriormente se enfría bruscamente sobre hielo y se dejó reposar por 15 min; se agregaron 3 mL de tolueno y agitaron por 1 min; se colecta la fase superior y se registró la absorbancia a 520 nm en un espectrofotómetro (HACH, DR 500).

Se realizó un análisis mineral en muestras secas y molidas de los órganos deshidratados como la raíz y una mezcla de la parte aérea (hojas, tallo), para determinar la concentración de Nitrógeno (N) por el método de Kjeldhal, la concentración de Potasio (K) se determinó con un flamómetro Corning 400, donde se tomó una muestra del digestado obtenido a partir de 10 g de muestra molida (Alcántar y Sandoval, 1999).

La concentración de Fosforo (P), Ca, Magnesio (Mg), Na, Cloro (Cl) y Si se determinaron por espectrofotometría de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES VARIAN, modelo Liberty) utilizando el extracto diluido (1:50) obtenido con la digestión acida de las muestras.

Los tratamientos en estudio fueron establecidos utilizando un diseño experimental bloques completos al azar con seis repeticiones. La unidad experimental consistió en un contenedor con una planta. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y comparación de medias por el método de Duncan ($P \leq 0.05$) empleando SAS versión 8.0.

Resultados y Discusión

La altura fue afectada cuando las plantas fueron irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl. Sin embargo al aplicar Ca + Si suplementario la altura de las plantas se incrementó ligeramente aunque sin superar significativamente el correspondiente nivel de NaCl (Figura. 1A).

El peso seco de raíz de plantas sometidas a estrés salino no fue afectado significativamente. Sin embargo, el peso seco de la raíz disminuyó al suplementar Ca + Si (Figura. 1B) cuando la solución nutritiva contenía 60 mM de NaCl.

El peso seco total fue afectado cuando las plantas fueron irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl, en comparación con las plantas control. Sin embargo, cuando fueron suplementadas con Ca + Si el peso seco total se incrementó ligeramente (Figura. 1C).

El rendimiento de fruto fue afectado negativamente cuando las plantas fueron irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl en comparación con las plantas control. Sin embargo al suplementar con Ca + Si el rendimiento se incrementó en plantas estresadas con una concentración de 20 mM L⁻¹ de NaCl (Figura. 1D).

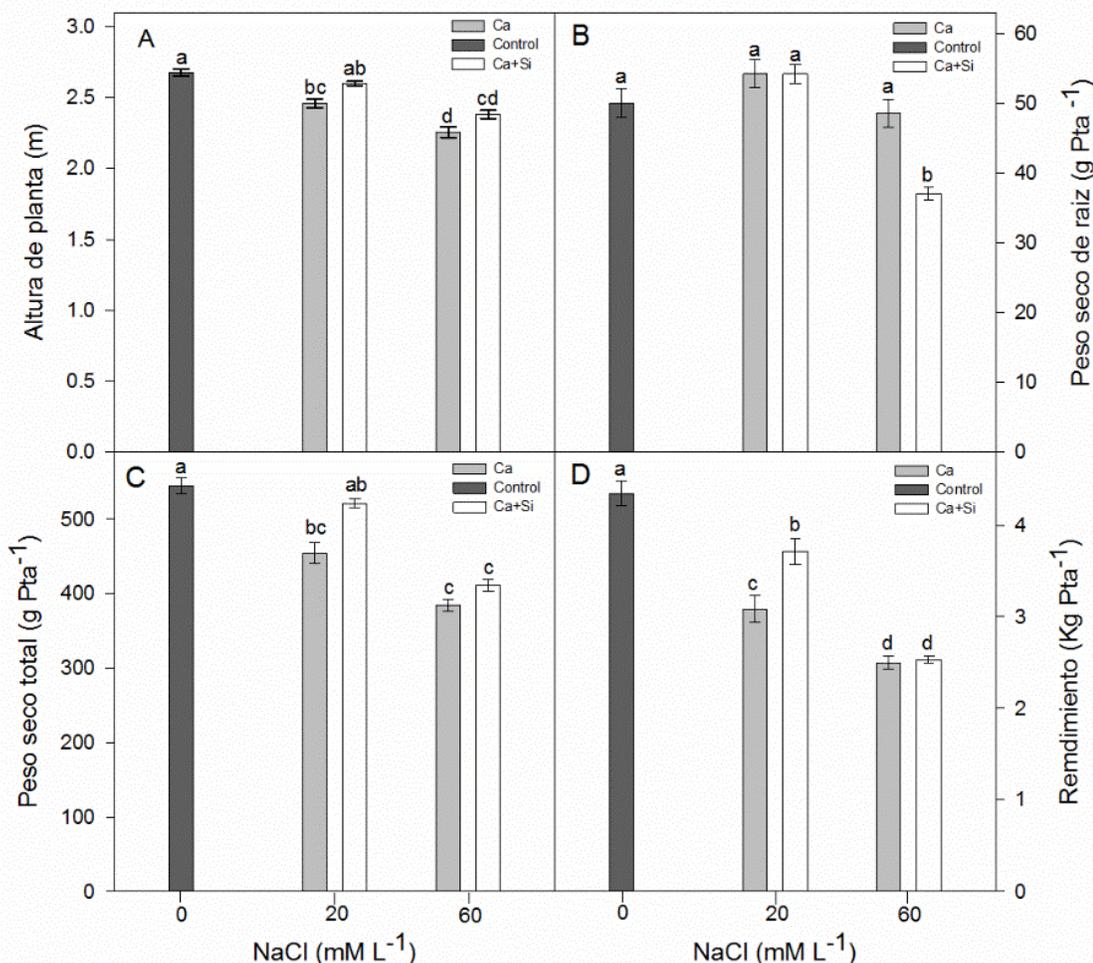


Figura 1. Efecto de la aplicación suplementaria de Ca + Si y salinidad inducida con NaCl en la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de fruto de plantas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Liberty. Medias con letras iguales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar de la media.

En el presente estudio, la inducción de estrés salino en la solución nutritiva mediante NaCl reduce el crecimiento y productividad en tomate; sin embargo las plantas suplementadas con Ca+Si en los niveles de 20 mM de NaCl exhibieron una mejora en el rendimiento, lo que demuestra que estos elementos contribuyen al aumento de la tolerancia al estrés salino en tomate. Lo anterior puede ser debido a que el Ca puede intercambiar a otros cationes como el Na en la membrana plasmática, pudiendo disminuir la toxicidad por Na y mantener la estabilidad y la integridad de la membrana celular (Marschner, 2012).

El estrés salino disminuyó el contenido de proteína soluble en plantas de tomate, sin embargo se observó un aumento en el contenido de proteína soluble al adicionar Ca y Si suplementarios. Lo anterior puede ser debido a que las HSP (heat shock protein) y las proteínas LEA (late embryogenesis abundance) intervienen en la protección de las proteínas celulares contra el estrés, controlando el plegamiento y la conformación de las proteínas estructurales y enzimas (Wang *et al.*, 2004).

El contenido de proteína soluble muestra un incremento cuando las plantas fueron irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl y suplementadas con Ca + Si (Figura. 2A).

La actividad de la POD disminuyó significativamente en plantas sometidas a estrés salino en comparación con las plantas control. Sin embargo al suministrar una dosis suplementaria de Ca + Si la actividad de esta enzima se incrementa en las plantas sometidas a estrés salino con 60 mM L⁻¹ de NaCl (Figura. 2B).

La actividad de la SOD disminuyó en plantas con dosis suplementaria de Ca + Si, cuando fueron irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl en comparación con las plantas control (Figura. 2C).

Se presentó un aumento significativo ($P \leq 0.05$) en el contenido de prolina en plantas sometidas a estrés salino irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl en los tratamiento con Ca + Si suplementario (Figura. 2D).

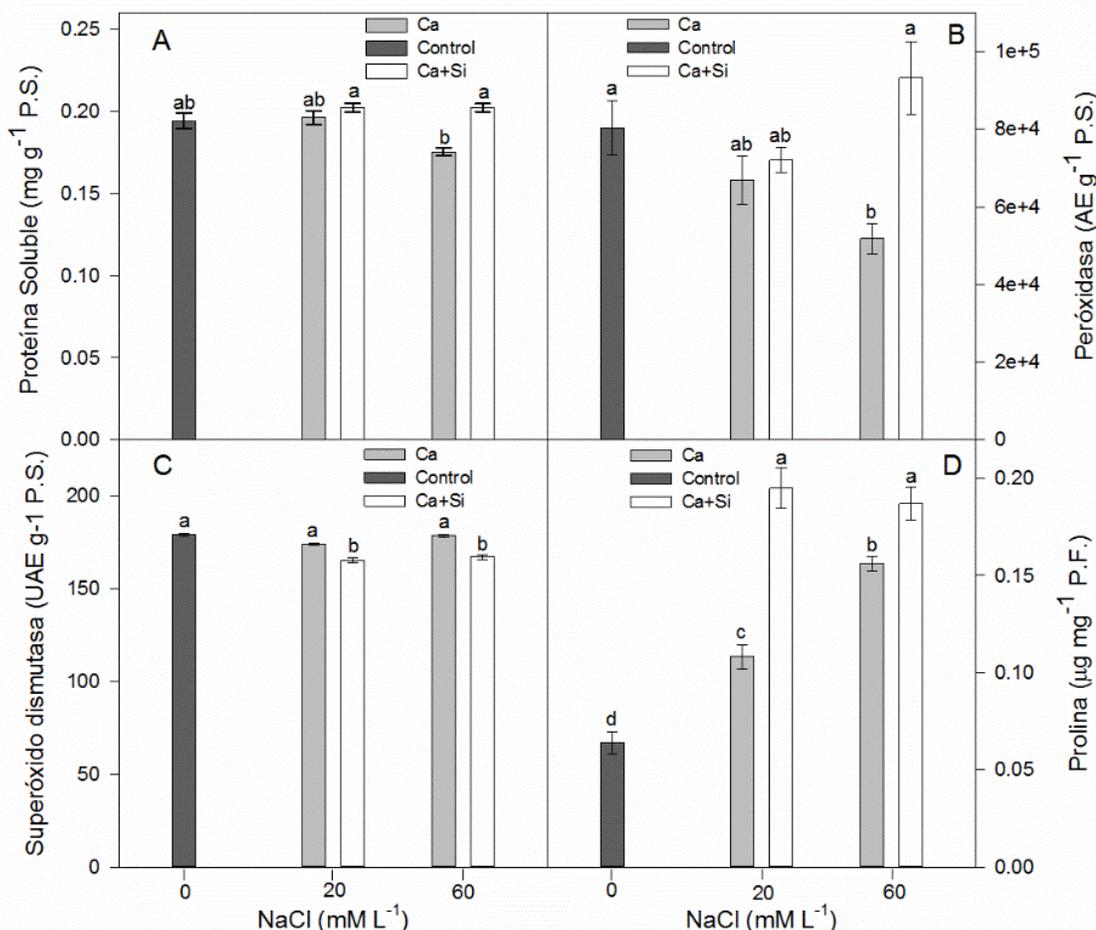


Figura 2. Efecto de la aplicación suplementaria de Ca+Si y salinidad inducida con NaCl en la solución nutritiva en la actividad enzimática antioxidante, proteína soluble y prolina en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Liberty. Medias con letras iguales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar de la media.

Por otra parte Larcher (2003), menciona que el Ca en las plantas regula la hidratación, elongación, crecimiento y la activa de enzimas (Amilasa, ATPasa). Mientras que en este estudio se observó un incremento en la actividad enzimática de la POD, otros estudios coinciden con los resultados obtenidos en esta investigación donde indican la relación entre el incremento en la capacidad antioxidante y la tolerancia a salinidad en varias especies tales como chícharo, cítricos, tomate (Jithesh *et al.*, 2006), y el incremento en la actividad de la POD en respuesta a un estrés salino, así como el incremento en la actividad antioxidante en especies y variedades tolerantes a salinidad (Roxas *et al.*, 2000).

Zheng y Wang (2001) mencionan a un sistema antioxidante enzimático localizado en varios compartimentos de la célula, donde la SOD convierte al superóxido en H_2O_2 y la POD convierte el H_2O_2 en agua (Oueslati *et al.*, 2010).

En el presente estudio se observó un incremento en el contenido de prolina debido a que las plantas superiores pueden acumular prolina en respuesta a diversos tipos de estrés como sequía, salinidad y altas temperaturas (Munns *et al.*, 2008). Hur *et al.* (2004) menciona que el glutamato es el principal precursor en la síntesis de prolina, en células osmóticamente estresadas. Por otra parte diversos estudios sugieren que la prolina participa en múltiples mecanismos en la tolerancia de las plantas al estrés, actuando como regulador del ajuste osmótico (López, 2007), y es un aminoácido que constituye el compuesto osmoprotector más común que se acumula en plantas sometidas a estrés salino (Chen *et al.*, 2007). Además la prolina induce la expresión de genes en respuesta al estrés salino (Sato *et al.*, 2002). Por otra parte los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Argentel *et al.*, (2010) donde se plantea que el aumento de prolina es uno de los factores que ayuda a las células a mantener un bajo potencial osmótico y en consecuencia el potencial hídrico, lo que resulta en un aumento a la tolerancia al estrés osmótico y en consecuencia mantener el crecimiento y desarrollo mediante la síntesis de otros compuestos como la glicina betaína y las proteínas solubles totales (Liu *et al.*, 2008). Resultados similares a los encontrados en este trabajo se reportan en trigo donde se observó que la actividad de la prolina aumenta en brotes de plantas con estrés salino (Nayyar, 2003).

La concentración de Na se incrementó en la parte aérea de plantas irrigadas con 20 y 60 mM L⁻¹ de NaCl. Sin embargo al hacer aplicaciones suplementarias de Ca+Si el Na disminuye (Figura. 3A). Por otra parte la concentración de Na en la raíz se incrementa cuando las plantas fueron irrigadas con Ca+Si suplementario (Figura. 3B).

La concentración de Cl en la parte aérea de plantas irrigadas con soluciones conteniendo 20 y 60 mM de NaCl se incrementó en comparación con las plantas control. Mientras que al suplementar Ca+Si la concentración de Cl se incrementa

aún más en la parte aérea (Figura. 3C). Por otra parte se muestra un comportamiento similar en la concentración de Cl en la raíz de plantas irrigadas con 20 y 60 mM de NaCl (Figura. 3D).

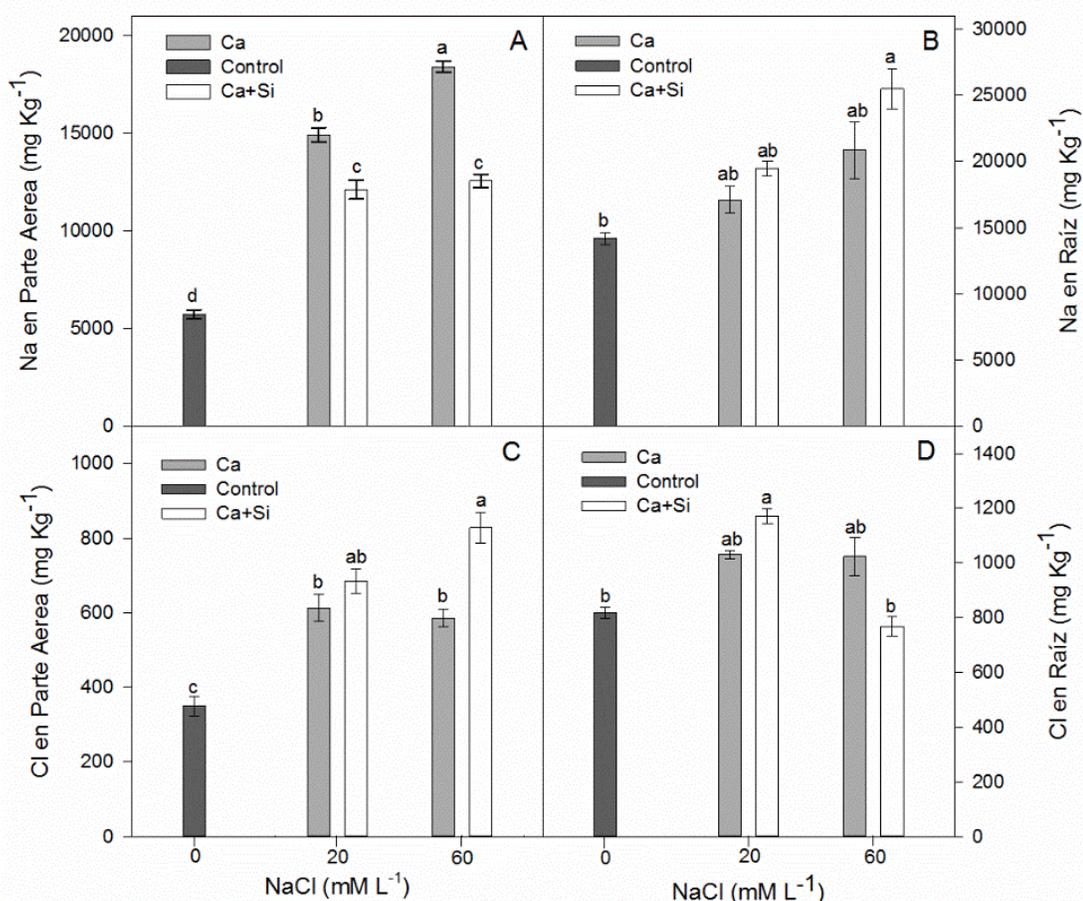


Figura 3. Efecto de la aplicación suplementaria de Ca+Si y salinidad inducida con NaCl en la solución nutritiva en la concentración de Na y Cl en parte aérea y raíz de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Liberty. Medias con letras iguales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar de la media.

En el presente estudio se observa una disminución en la acumulación de la concentración de Na en la parte aérea en plantas suplementadas con Ca+Si debido a que la aplicación de silicio puede disminuir la acumulación de Na la parte aérea.

Gong *et al.* (2006) encontraron que el silicio reduce considerablemente la concentración de Na en los brotes de arroz, pero no en raíces de las plantas con estrés salino, y se correlaciona con un mejor crecimiento de los brotes en presencia de silicio. Por otra parte, Gunes *et al.* (2007a) informaron que el silicio

disminuye la translocación de Na y Cl, de las raíces a los brotes de las plantas de tomate cultivadas en suelos salinos. También en cebada cultivada en suelos salinos la adición de silicio disminuye las concentraciones de Na y de boro en brotes (Gunes *et al.* 2007b). Estos estudios indican que el silicio puede mitigar los efectos adversos por salinidad al prevenir la absorción de Na y/o su transporte desde las raíces a los brotes.

Por otra parte se produjo un aumento en la concentración de Cl en la parte aérea como en la raíz de plantas estresadas con NaCl y suplementadas con Ca+Si, lo que es indicativo de una tasa alta en el transporte de Cl hacia la parte aérea y una acumulación de este ion en la raíz en presencia de un estrés salino moderado. En contraste resultados encontrados en caña de azúcar indican que la concentración de Cl en hojas como en la raíz se incrementan, pero al suplementar con Ca la concentración de Cl disminuye (García y Medina, 2009) esto concuerda con los resultados obtenidos para una concentración de 60 mM de NaCl. García y Medina (2009) mencionan que la mayor sensibilidad al Cl podría atribuirse a una absorción no controlada en las raíces, así como la ineficiencia de estas para reducir su transporte a las hojas donde se acumula en mayor concentración que el Na.

La concentración de N y K en la parte aérea no fueron afectados por las concentraciones de NaCl y la adición de Ca+Si suplementarios en la solución nutritiva (Cuadro 2), en tanto la concentración de P, Ca (Cuadro 2), Mg, Na, Cl y Si fueron afectados por la concentración de NaCl en la solución nutritiva (Cuadro 3).

En plantas suplementadas con Ca+Si y con una concentración de 60 mM L⁻¹ de NaCl se eleva la concentración de P y Ca en la parte aérea (cuadro 2). En contraste la concentración de N, P, K, Mg, Na y Cl en la raíz fue afectada por las concentraciones de NaCl. Con respecto al Ca y Si en la raíz no fue afectado por las concentraciones de NaCl y la adición de Ca+Si suplementarios (Cuadro 2 y 3).

Cuadro 2. Efecto de Ca+Si y concentración de NaCl en la nutrición mineral en tomate parte aérea (A) y raíz (R).

NaCl meq L ⁻¹	Ca meq L ⁻¹	Si ppm	N (%)		P (g kg ⁻¹)		K (g kg ⁻¹)		Ca (g kg ⁻¹)	
			Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz
0	9	0	2.66	2.45	7.48 ab	3.69	13.0	3.94ab	34.7a	22.9
20	9	0	2.64	2.15	6.01 bc	2.95	12.4	2.31bc	32.6ab	23.2
20	12	42	2.60	2.21	5.44 c	2.63	14.6	3.34abc	32.4ab	23.6
60	9	0	2.64	2.14	7.86 a	4.18	11.6	1.62c	32.7ab	21.7
60	12	42	2.59	2.24	7.14 bc	4.27	13.4	4.16 a	30.4b	22.4
Anova			P<0.869	P<0.250	P<0.050	P<0.109	P<0.340	P<0.044	P<0.050	P<0.648

C.V.= coeficiente de variación, Valores con la misma letra son estadísticamente iguales (LSD P≤ 0.05).

Cuadro 3. Efecto de Ca+Si y concentración de NaCl en la nutrición mineral en tomate parte aérea (A) y raíz (R).

NaCl mM L ⁻¹	Ca meq L ⁻¹	Si ppm	Mg (g kg ⁻¹)		Na (g kg ⁻¹)		Cl (g kg ⁻¹)		Si (g kg ⁻¹)	
			Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz
0	99	0	8820.8 a	5915.1 a	5713 d	14185 b	349.51 c	817.5 b	50.9	48.9
20	9	0	7832.7 b	3972.4 bc	14918 b	17108 ab	612.01 b	1029.9 ab	29.6	36.6
20	12	42	6729.4 c	4213.7 b	12113 c	19487 ab	683.79 ab	1171.4 a	25.2	36.8
60	9	0	8168.8 b	3452.3 c	18392 a	20851 ab	585.47 b	1023.0 ab	38.0	34.9
60	12	42	5574.3 d	3679.0 bc	12557 c	25491 a	827.33 a	766.4 b	31.1	35.0
Anova		(P≤0.05)	P<0.001	P<0.001	P<0.001	P<0.117	P<0.004	P<0.034	P<0.146	P<0.502

C.V.= coeficiente de variación, Valores con la misma letra son estadísticamente iguales (LSD P≤ 0.05).

En el presente estudio las concentraciones de NaCl en la solución nutritiva indujeron un aumento en la concentración de K en la raíz de plantas de tomate, esto puede ser debido a que los sistemas de transporte median la relación Na/K en células vegetales los cuales corresponden a los sistemas de transporte de alta y baja afinidad ubicados en el plasmalema y en el tonoplasto (Demidchik *et al.*, 2002; Zhu, 2002; Zhu, 2003). Sin embargo los canales rectificadores de la entrada de K (KIR) permiten el suministro de K de alta afinidad en las raíces de las plantas, mientras que los canales rectificadores de la liberación de K (KOR) presentes en diferentes especies vegetales, son altamente selectivos para la liberación de K en el xilema para transportarlo hacia la parte aérea de las plantas (Gilliam y Tester, 2005; Kohler *et al.*, 2003), lo que corresponde a lo encontrado en la concentración de K en la parte aérea de plantas de tomate sometidas a estrés salino.

El suministro suplementario de calcio puede disminuir el efecto dañino producido por NaCl. Esto debido a que el Na compite con el Ca por sitios de enlace en la membrana, por lo que un aumento en los niveles de Ca puede proteger a la membrana celular y disminuir los efectos dañinos de la salinidad (Carrasco, 2004). Los resultados obtenidos permiten suponer que el Ca suplementario no aumenta las concentraciones de Ca en los tejidos vegetales, pero este pudiese estar manteniendo la integridad de las membranas celulares. Lo que concuerda con Marschner (2012) donde menciona que el Ca mantiene la estabilidad y la integridad de la membrana celular.

La concentración de Mg en la parte aérea y en raíz muestra una diferencia significativa en las concentraciones de 20 y 60 mM de NaCl y la dosis suplementaria de Ca y Si, donde la concentración de Mg disminuye al suplementar Ca y Si en la parte aérea y por el contrario aumenta la concentración de este ion en la raíz de plantas sometidas a estrés salino.

En el presente estudio no se reporta diferencia en la concentración de Si en la parte aérea y raíz. Sin embargo algunos estudios han demostrado que la aplicación de Si aumenta la tolerancia a la salinidad en plantas (Liang *et al* 2007; Bauer *et al* 2011). Sin embargo el efecto nocivo de la salinidad es suprimido por la retención de agua debido a la presencia de Si en las plantas de tomate, lo que permite un incremento en el crecimiento y la dilución en la concentración de Na en las plantas (Romero *et al.*, 2006). Además se ha reportado que en plantas tratadas con Si muestran una reducción de los efectos negativos del déficit hídrico (Lobato *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2012).

Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se concluye que la adición suplementaria de calcio y silicio disminuyen parcialmente el estrés por salinidad en tomate y aumenta el contenido de proteína soluble y prolina, además de incrementar la actividad antioxidante de la peróxidasa e intervienen en la disminución de la translocación de sodio hacia la parte aérea de plantas de tomate sometidas a estrés salino.

Con la aplicación suplementaria de calcio y silicio recuperan la altura, el peso seco total y el rendimiento en plantas de tomate en condiciones de salinidad en agua de riego.

Referencias

- Alcántar, G.G., y Sandoval, V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México. 156 pp.
- Amini, F., Ehsanpour, A.A., Hoang Q.T., Shin, J.S. 2007. Protein pattern changes in tomato under in vitro salt stress. *Russian Journal of Plant Physiology*. 54 (4):464-472.
- Argentel, L., Fonseca, I., Gonzalez, L. M. y Lopez, D. R. 2010. Contenido de Prolina, Glicina Betaína y Proteínas Solubles en 12 Variedades Cubanas de Trigo en Condiciones Salinas. *Cultrop*. 31(4):5.
- Azcón J. y M. Talón. 2001. Fundamentos de la Fisiología Vegetal. Edicions Universitat de Barcelona. 522 pp.
- Bates, L., Waldren R.P., Teare I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39:205-207.
- Bauer, P., Elbaum, R., Weiss I.M. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: transport, structure and function. *Plant Sci*. 180:746–756.
- Beyer, F.W., I Fridovich. 1987. Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions. *Analyt. Biochem*. 161:559-566.
- Bratford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analyt. Biochem*. 72:248-254.
- Buchanan, K.T., Engman, D.M. 2002. Association of trypanosoma cruzi fcabp with the flagellar membrane is dependent on calcium binding. *FASEB Journal* 16:919
- Carrasco, L.V. 2004. Salinidad: homeostasis iónica y acuaporinas. *IDESIA*. 22 (2):61-68.
- Carvajal, M., Martínez-Ballesta, M., Martínez V. 2000. The response of plants to salinity involves root water channels. Hohmann and Nielsen, Kluwer Academic Plenum Publishers, New York. p. 261-267.
- Chaney, R.L., Chen, K.Y., Li, Y.M., Angle, J.S., Baker, A.J.M. 2008. Effects of calcium on nickel tolerance and accumulation in alyssum species and cabbage grown in nutrient solution. *Plant and Soil*. 311:131-140.
- Chao, L., Cao, W.Q., Yun, L., Hao, H., Liang, C., Liu, X.Q., Hong, F.S. 2009. Cerium under calcium deficiency-influence on the antioxidative defense system in spinach plants. *Plant and Soil*. 323:285-294.

- Chaves, M.M., Flexas, J., Pinheiro, C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany* 103(4):551-560.
- Chen, M.Q., Wei, H.B., Cao, J.W., Liu, R.J., Wang, Y.L., Zheng, C.Y. 2007. Expression of bacillus subtilis proBA genes and reduction of feedback inhibition of proline synthesis increases proline production and confers osmotolerance in transgenic Arabidopsis. *J. Biochem. Mol. Biol.* 40:396-403.
- Cherif, M. y R.R. Belanger. 1992. Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrient solutions to suppress *Pythium ultimum* on long English cucumber. *Plant Dis.* 76:1008-1011.
- Chinnusamy, V., A. Jagendorf y J. Zhuan. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science.* 45:437-448.
- Del Rosario, D. A., Sumague, A. C., Roxas, V. P., Bautista, T. S. 1990. Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) to salt stress. *The Philippine agriculturist.* 73 (2):193-198.
- Demidchik, V. y Tester, M. 2002. Sodium fluxes through nonselective cation in the plasma membrane of protoplasts from Arabidopsis roots. *Plant Physiol.* 128:379-387.
- Demiral, A. 2005. Comparative response of two olive (*olea europaea L.*) cultivars to salinity. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry.* 29 (4):267-274
- Dodd, K., Guppy, C., Lockwood, P., Rochester, I. 2010. The effect of sodicity on cotton: plant response to solutions containing high sodium concentration. *Plant. Soil.* 330:239-249.
- Donoso, P. 2003. Evaluación y selección de clones de Camote (*Ipomoea batatas*), bajo estrés de salinidad y toxicidad de boro en los Valles de Azapa y Lluta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Tarapacá. Arica. Chile. 20 pp.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 91:11-17.
- Flurkey, W.H., J. J. Jen. 1978. Peroxide and polyphenol oxide activities in developing peaches. *J. Food Sci.* 43:1828-1831.
- García, M., Medina, E. 2009. Acumulación de Iones y Solutos Orgánicos en Dos Genotipos de Caña de Azúcar, estresados con sales simples o suplementadas con calcio. *Bioagro.* 21 (1):3-14.
- Gilliham, M. y Tester, M. 2005. The regulation of anion loading to the maize root xylem. *Plant Physiol.* 137:819-828.

- Gong, H.J., Randall, D.P., Flowers T.J. 2006. Silicon deposition in root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. *Plant Cell Environ* 29:1970–1979.
- Gunes, A., Ali, I., Bagci, E.G., Pilbeam, D.J. 2007a. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. *Plant Soil* 290:103–114.
- Gunes, A., Inal, A., Bagci, E.G., Coban, S. 2007b. Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. *J Plant Physiol* 164:807–811.
- Hewitt, E.J. and T.A. Smith, 1974. *Plant mineral nutrition*. English Universities Press. London, UK.
- Hur, J., Jung, K.H., Lee, C.H., An, H. 2004. Stressinducible *osp5cs2* gene is essential for salt and cold tolerance in rice. *Plant Science*.167:417-426.
- Jithesh, M.N., Prashanth, S.R., Sivaprakash, K.R., Parida, A.K. 2006. Antioxidative response mechanisms in halophytes: their role in stress defence. *Journal of Genetics*. 85(3):237-245.
- Kleemann, M. 2000. Effects of salinity, nutrients and spraying with CaCl_2 solution on the development of calcium deficiency in chervil (*Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm.) and curled parsley (*Petroselinum crispum* (Mill.) Nym. *Convar. Crispum*).
- Klimecka, M., Muszynska, G. 2007. Structure and functions of plant calcium-dependent protein kinases. *Acta Biochimica*. 54(2):219-233.
- Kohler, B., A. Hills y M. Blatt. 2003. Control of guard cell ion channels by hydrogen peroxide and abscisic acid indicates their action through alternate signaling pathways. *Plant Physiol*. 131:385-388.
- Kuznestov, V.V., Shevyakova, N.I. 1997. Stress responses of tobacco cells to high temperature and salinity. Proline accumulation and phosphorylation of polypeptides. *Physiologia Plantarum* 100:320-326.
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology; Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Fourth edition. Springer. 513 p.
- Leidi, E. O. y Pardo, J. M. 2002. Tolerancia de los cultivos al estrés salino. *Revista de Investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 2(2):2-10.
- Liang, Y.C., Sun, W.C., Zhu, Y.G., Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environ Pollut* 147:422–428.

- Lima Filho, O.F., Grothge-Lima, M.T., TSAI, S.M. 2003. Efeito do silício na absorção de nitrogênio, fósforo e potássio em duas cultivares de soja. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência. Anais. Ribeirão Preto – SP, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, (CD-ROM).
- Liu, X., Hua, X., Guo, J., Qi, D., Wang, L., Liu, Z., Jin, Z., Chen, S., Liu, G. 2008. Enhanced tolerance to drought stress in transgenic tobacco plants overexpressing VTE1 for increased tocopherol production from *Arabidopsis thaliana*. *Biotechnol Lett.* 30:1275-1280.
- Lobato, A.K.S., L.M. Luz, R.C.L. Costa, B.G.Santos Filho, A.C.S. Meirelles and C.F.O. Neto. 2009. Silicon exercises influence on nitrogen components in pepper subjected to water deficit. *Res. J. Biol. Sci.* 4:1048-1055.
- López, R. D. 2007. Sodium content corroboration in spectrophotometric methods with micronealys. Water experiment. *Biochemical Sciences.* 23:156-159.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2ª Ed. Academic Press. Limited, London. 889 pp.
- Marschner, H. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. Academic Press Ltd, London.
- Mengel, K. y Kirkby, E. 2000. Principios de nutrición vegetal. Traducción al español de la 4ª edición. 1987. Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland. 692 p.
- SIAP. 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México D.F. Noviembre 2015. <http://www.siap.gob.mx/>
- SFA. 2010. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. Monografía Jitomate. 2-9 pp.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *PlanCell Environ.* 28:239-250.
- Munns, R. y Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review in Plant. Biology.* 59:651-681.
- Munns, R., R. James y A. Läuchli. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany.* 57 (5):1025-1043.
- Nayyar, H. 2003. Variation in osmoregulation in differentially drought-sensitive wheat genotypes involves calcium. *Biologia Plantarum* 47(4):541-547.
- Núñez, M., Mazorra, L., Martínez, L., González, M., y Robaina, C. 2007. Análogos de Brasinoesteroides revierten parcialmente el impacto del estrés salino en el crecimiento inicial de las plántulas de dos genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales.* 28(2):95-99.

- Olle, M., Bender, I. 2009. Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 84:577- 584.
- Oueslati, S., Karray-Bouraoui, N., Attia, H., Rabhi, M., Ksouri, R., Lachal, M. 2010. Physiological and antioxidant responses of *Mentha pulgium* (Pennyroyal) to salt stress. *Acta Physiologiae Plantarum*. 32:289-296.
- Parida, A., Das, A. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60: 324-349.
- Pérez, A. F., Balibrea M., Santa, C. A., Estan, M. T. 1996. Agronomical and physiological characterization of salinity tolerance in a commercial tomato hybrid. *Plant-and-Soil*. 180 (2):251-257.
- Romero-Aranda, M.R., Jurado, O., Cuartero, J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *J Plant Physiol* 163:847–855.
- Roxas, V.P., Sundus, A.L., Garrett, D.K., Mahan, J.R., Allen, R.D. 2000. Stress tolerance in transgenic tobacco seedlings that over express glutathione-S-transferase/glutathione peroxidase. *Plant Cell Physiol*. 41:1229-1234.
- Satoh, R., Nakashima, K., Seki, M. *et al.*, 2002. ACTCAT, a novel cis-acting element for proline and hypoosmolarity responsive expression of the ProDH gene encoding proline dehydrogenase in Arabidopsis. *Plant Physiol*.130:709-719.
- Silva, O.N., A.K.S., Lobato, F.W., Avila, R.C.L., Costa and C.F., Oliveira, N. 2012. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. *Plant Soil Environ*. 58:481-486.
- Singh, K. N., Chatrath, R. 2001. Breeding for adaptation to environmental factors. Chapter 8. Salinity Tolerance. 170 p.
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. In: Proc. Sixth International Congress on Soilless Culture. International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands. pp. 633-649.
- Tester, M. y R. Davenport. 2003. Na⁺ tolerance and Na transport in higher plants. *Annals of Botany*. 91 (5):503-527.
- Turhan, E. y A. Eris. 2007. Growth and stomatal behavior of two strawberry cultivars under long-term salinity stress. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 31 (1):55-61.
- Wang, B., Lüttge, U., Ratajczak R. 2001. Effects of salt treatment and osmotic stress on V-ATPase and V-PPase in leaves of the halophyte *Suaeda salsa*. *Journal of Experimental Botany*. 52:365, 2335-2365.

- Wang, W., Vinocur, B., Shoseyov, O., Altman, A. 2004. Role of plant heat shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends. Plant. Sci.* 9:244-252.
- Zheng, W., Wang, S.Y. 2001. Antioxidant activity and phenolic compounds in selected herbs. *Journal of Agriculture and Food Chemistry.* 49:5165-5170.
- Zhu, J.K. 2002. Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annu. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* 53:247-273.
- Zhu, J.K. 2003. Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annu. Plant Biol.* 53:247-273.