



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**SILICIO Y CALCIO EN LA
TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN
PEPINO EN CULTIVO
HIDROPÓNICO Y EN SUELO**

GUSTAVO EDUARDO GONZÁLEZ TERÁN

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

La presente tesis titulada **“Silicio y calcio en la tolerancia a la salinidad en pepino en cultivo hidropónico y en suelo”**, realizada por el alumno Gustavo Eduardo González Terán, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

ASESORA:



M. C. ALEJANDRINA RUÍZ BELLO

ASESORA:



DRA. SOLEDAD GARCÍA MORALES

Montecillo, Texcoco, Estado de México. Agosto de 2017

Silicio y calcio en la tolerancia a la salinidad en pepino en cultivo hidropónico y en suelo

Gustavo Eduardo González Terán, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación foliar de calcio (Ca) y de silicio (Si), cada uno a concentración de 2 mM, así como su combinación resultante, en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) variedad Modan sometidas a dos condiciones de salinidad. Para lo anterior se condujeron dos experimentos en invernadero, uno para cada condición de salinidad. En el primero se estudió el efecto del Ca, el Si, la combinación resultante y un testigo en plantas de pepino en sistema hidropónico, donde la salinidad fue inducida (100 mM NaCl) y comparada con una condición normal (0 mM NaCl). Para ello se utilizó un diseño en parcelas divididas con distribución completamente al azar. El efecto del factor salinidad disminuyó significativamente los valores de las variables agronómicas y de crecimiento, así como la concentración nutrimental de N, P, K, Zn y Mn; por otro lado incrementó los valores de las variables de calidad interna de fruto. Las variables de crecimiento, biomasa seca y rendimiento de las plantas en la condición salina no mostraron ser incrementadas con las aplicaciones foliares de Ca o Si; en la condición normal (0 mM NaCl) se incrementó el rendimiento 14.9% y el número de frutos por planta 10.52%, con la aplicación conjunta de Si + Ca, mientras que en la condición salina con este mismo tratamiento foliar se disminuyó en 58.8% la concentración de Na en hoja. En el segundo experimento se estudiaron las mismas aplicaciones foliares en plantas de pepino de la misma variedad en un suelo propiamente sódico. Para este experimento se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 2² en 6 repeticiones. La aplicación foliar de Ca incrementó el diámetro de tallo basal (15.50%) y apical (8.19%), así como la biomasa seca total (19.50%) y el número de frutos (11.6%). El rendimiento se incrementó 6.3% con la aplicación foliar conjunta de Si + Ca. La aplicación foliar individual de Si originó una mayor firmeza a los frutos e incrementó la concentración de prolina.

Palabras clave: Cucurbitaceae, estrés salino, elementos benéficos, calcio foliar, calidad de fruto.

**Silicon and calcium on the tolerance to salinity in cucumber
in hydroponic and soil cultivation**

Gustavo Eduardo González Terán, M. Sc.

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

In this study we evaluated the effect of foliar application of calcium (Ca) and silicon (Si), each at a concentration of 2 mM, as well as its resulting combination, on cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) cv. Modan exposed to two salinity conditions. With that aim, two independent experiments were conducted in greenhouse, one for each salinity condition. In the first one, the effect of Ca, Si, the resulting combination and a control in cucumber plants were studied in a hydroponic system, where the salinity was induced by adding 100 mM NaCl to the nutrient solution, and compared with a normal condition (0 mM NaCl). A split - plot design with a completely random distribution was used. The effect of the salinity factor significantly decreased the values of the agronomic and growth variables, as well as the nutritional concentrations of N, P, K, Zn and Mn; On the other hand it increased the values of the variables of internal quality of fruit. Growth variables, dry biomass and yield of the plants in the saline condition were not increased with the Ca or Si foliar applications. In the normal condition (0 mM NaCl) the yield increased 14.9% and the number of fruits per plant 10.52%, with the combined application of Si + Ca, while in the saline condition with this same foliar treatment was decreased in 58.8% the concentration of Na in leaf. In the second experiment, the same foliar applications were studied in cucumber plants of the same variety in a properly sodium soil. For this experiment a completely randomized experimental design with factorial arrangement 2² in 6 replicates was used. The foliar application of Ca increased the diameter of basal stem (15.50%) and apical (8.19%), as well as the total dry biomass (19.50%) and the number of fruits (11.6%) as compared to the control. The yield increased 6.3% with the combined application of Si + Ca. The individual application of Si gave a greater firmness to the fruits and increased the concentration of proline.

Key words: Cucurbitaceae, saline stress, beneficial elements, foliar calcium, fruit quality.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, dador de la vida, pues su gracia permitió que el transcurso de esta etapa sucediese de una manera inmejorable.

Al Colegio de Postgraduados, por abrir sus puertas y permitir hacer uso de bastos recursos que permitieron mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) quien a través del recurso otorgado permitió se cumpliesen los objetivos planteados y culminar el posgrado sin limitantes.

A la Doctora Libia, mi agradecimiento y reconocimiento, quien formó parte clave en mi formación y culminación del posgrado, mostró ser una consejera singular, basta en aptitudes.

A la maestra Alejandrina, agradezco sus acertadas observaciones que permitieron realizar de la mejor manera la presente investigación.

A la Doctora Soledad agradezco sus valiosas aportaciones y puntuales observaciones que permitieron orientarme y realizar el presente escrito.

Agradezco a todos los doctores con quienes tuve el gusto y la oportunidad de tomar cursos, pues ayudaron de gran manera en mi formación.

A todos los que de una u otra manera se involucraron en la realización de la presente investigación, muchas gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, Gustavo González y Laura Terán, quienes siempre han mostrado su apoyo incondicional. Por haber inculcado en mi vida principios que me han permitido lograr mis objetivos.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xviii
MARCO TEÓRICO	1
1. Situación mundial de la salinidad en los suelos irrigados.....	1
2. La salinidad de los suelos irrigados en México.....	3
3. Clasificación de los suelos salinos.....	6
4. Mecanismos de transporte de sales en plantas.....	8
5. Efecto de la salinidad en los cultivos.....	10
6. Mecanismos de tolerancia a la salinidad.....	13
7. Funciones del calcio en la tolerancia a la salinidad.....	20
7.1. El Ca ²⁺ como segundo mensajero en rutas de señalización en respuesta al estrés salino.....	21
7.2. El Ca ²⁺ en procesos de regulación iónica.....	23
8. Funciones del silicio en la tolerancia a la salinidad.....	23
9. Fertilización foliar.....	29
10. El cultivo de pepino.....	29
11. Literatura citada.....	30
CAPÍTULO I. SILICIO Y CALCIO EN LA TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN PEPINO EN CULTIVO HIDROPÓNICO	40
1.1. INTRODUCCIÓN.....	40

1.2. OBJETIVOS.....	42
1.2.1. Objetivo general.....	42
1.2.2. Objetivos específicos.....	42
1.3. HIPÓTESIS.....	43
1.3.1. Hipótesis general.....	43
1.3.2. Hipótesis específicas.....	43
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
1.4.1. Ubicación y condiciones del experimento.....	43
1.4.2. Material vegetal.....	44
1.4.3. Producción de plántulas.....	44
1.4.4. Diseño de tratamientos.....	43
1.4.5. Diseño experimental.....	45
1.4.6. Instalación del experimento.....	46
1.4.7. Manejo agronómico del cultivo.....	46
1.4.8. Variables estudiadas.....	47
1.4.8.1. Variables agronómicas.....	47
1.4.8.2. Variables de calidad de fruto.....	48
1.4.8.3. Variables bioquímicas.....	49
1.4.9. Análisis estadístico.....	51
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
1.5.1. Variables de crecimiento y agronómicas.....	51
1.5.1.1. Crecimiento del tallo.....	52
1.5.1.2. Biomasa seca.....	58
1.5.1.3. Rendimiento y número de frutos.....	62
1.5.1.4. Peso de materia fresca y seca de fruto.....	67
1.5.2. Variables de calidad de fruto.....	69
1.5.2.1. Longitud y diámetro de frutos.....	69
1.5.2.2. Firmeza de frutos.....	71
1.5.2.3. Coloración en frutos.....	73
1.5.2.4. Calidad interna de frutos.....	77
1.5.3. Variables bioquímicas.....	83

1.5.3.1. Concentración de prolina.....	83
1.5.3.2. Concentración de macronutrientos.....	86
1.5.3.3. Concentración de micronutrientos, Na, Cl ⁻ y Si.....	99
1.6. CONCLUSIONES.....	122
1.7. LITERATURA CITADA.....	124
CAPÍTULO II. SILICIO Y CALCIO EN LA TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN PEPINO EN CONDICIONES DE SUELO SÓDICO	137
2.1. INTRODUCCIÓN.....	137
2.2. OBJETIVOS.....	139
2.2.1. Objetivo general.....	139
2.2.2. Objetivos específicos.....	139
2.3. HIPÓTESIS.....	139
2.3.1. Hipótesis general.....	139
2.3.2. Hipótesis específicas.....	139
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	140
2.4.1. Ubicación y condiciones del experimento.....	140
2.4.2. Material vegetal.....	140
2.4.3. Producción de plántulas.....	140
2.4.4. Diseño de tratamientos.....	141
2.4.5. Diseño experimental.....	141
2.4.6. Instalación del experimento.....	141
2.4.7. Manejo agronómico del cultivo.....	142
2.4.8. Variables estudiadas.....	143
2.4.8.1. Variables agronómicas y de crecimiento.....	143
2.4.8.2. Variables de calidad de fruto.....	144
2.4.8.3. Variables bioquímicas.....	146
2.4.9. Análisis estadístico.....	147
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	147
2.5.1. Variables de crecimiento y agronómicas.....	147
2.5.1.1. Crecimiento de tallo.....	147

2.5.1.2. Biomasa seca.....	150
2.5.1.3. Rendimiento y número de frutos.....	152
2.5.2. Variables de calidad de fruto.....	154
2.5.2.1. Longitud y diámetro de fruto.....	154
2.5.2.2. Peso fresco y seco de frutos.....	154
2.5.2.3. Firmeza de frutos.....	155
2.5.2.4. Coloración en frutos.....	157
2.5.2.5. Calidad interna de frutos.....	159
2.5.3. Variables bioquímicas.....	161
2.5.3.1. Concentración de prolina.....	161
2.5.3.2. Concentración de macronutrientos.....	163
2.5.3.3. Concentración de micronutrientos, Na ⁺ , Cl ⁻ y Si.....	168
2.6. CONCLUSIONES.....	174
2.7. LITERATURA CITADA.....	175

LISTA DE CUADROS

Página

MARCO TEÓRICO

Cuadro 1.	Distribución regional de las áreas afectadas por la salinidad en México, 1985 (Umali, 1993).....	4
Cuadro 2.	Superficie sin vegetación de las unidades de producción bajo diferentes condiciones en México (INEGI, 2007).....	5
Cuadro 3.	Clasificación general de los suelos afectados por sales (Ali, 2011).....	7

CAPÍTULO I

Cuadro 1.1.	Tratamientos estudiados en el experimento de pepino en sistema hidropónico.....	45
Cuadro 1.2.	Efecto de la salinidad en variables de crecimiento de tallo de plantas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	52
Cuadro 1.3.	Efecto de la salinidad en la biomasa seca de plantas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	58
Cuadro 1.4.	Efecto de la salinidad en el rendimiento y el número de frutos por planta del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	63
Cuadro 1.5.	Efecto de la salinidad en el peso de materia fresca y seca de fruto del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	68
Cuadro 1.6.	Efecto de la salinidad en la longitud y diámetro de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	70
Cuadro 1.7.	Efecto de la salinidad en la firmeza de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	72
Cuadro 1.8.	Efecto de la salinidad en parámetros de color (luminosidad e índice de saturación) de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	74

Cuadro 1.9. Efecto de la salinidad en parámetros de calidad interna (sólidos solubles totales, pH, conductividad eléctrica y acidez titulable) de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	78
Cuadro 1.10. Efecto de la salinidad en la concentración de prolina en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	84
Cuadro 1.11. Efecto de la salinidad en la concentración de nitrógeno (N) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	87
Cuadro 1.12. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de nitrógeno (N) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	88
Cuadro 1.13. Efecto de la salinidad en la concentración de fósforo (P) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	89
Cuadro 1.14. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de fósforo (P) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	91
Cuadro 1.15. Efecto de la salinidad en la concentración de potasio (K) en raíz, tallo y hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	92
Cuadro 1.16. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de potasio (K) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	94
Cuadro 1.17. Efecto de la salinidad en la concentración de calcio (Ca) en frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	95
Cuadro 1.18. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de calcio (Ca) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	97

Cuadro 1.19. Efecto de la salinidad en la concentración de magnesio (Mg) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	98
Cuadro 1.20. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de magnesio (Mg) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	99
Cuadro 1.21. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de hierro (Fe) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	102
Cuadro 1.22. Efecto de la salinidad en la concentración de cobre (Cu) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	103
Cuadro 1.23. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de cobre (Cu) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	105
Cuadro 1.24. Efecto de la salinidad en la concentración de zinc (Zn) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	106
Cuadro 1.25. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de zinc (Zn) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	107
Cuadro 1.26. Efecto de la salinidad en la concentración de manganeso (Mn) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico...	107
Cuadro 1.27. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de manganeso (Mn) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	109
Cuadro 1.28. Efecto de la salinidad en la concentración de boro (B) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	109

Cuadro 1.29. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de boro (B) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	110
Cuadro 1.30. Efecto de la salinidad en la concentración de sodio (Na) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico...	112
Cuadro 1.31. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de sodio (Na) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	115
Cuadro 1.32. Efecto de la salinidad en la concentración de cloro (Cl) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	116
Cuadro 1.33. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de cloro (Cl) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	116
Cuadro 1.34. Efecto de la salinidad en la concentración de silicio (Si) en hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	118
Cuadro 1.35. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de silicio (Si) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	122

CAPÍTULO II

Cuadro 2.1. Características químicas del suelo empleado en esta investigación.....	142
Cuadro 2.2. Efecto principal de la aplicación foliar de Ca en el diámetro basal de tallo en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	148
Cuadro 2.3. Efecto de los tratamientos en las variables de crecimiento de tallo (longitud, diámetro basal, diámetro medio y diámetro apical) en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	149

Cuadro 2.4.	Efecto de los tratamientos foliares en la biomasa seca de hojas, tallo y total en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	152
Cuadro 2.5.	Efecto de los tratamientos foliares en el rendimiento y el número de frutos por planta, en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	152
Cuadro 2.6.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en peso fresco, peso seco, longitud y diámetro de frutos de un cultivo pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	154
Cuadro 2.7.	Efecto de los tratamientos foliares en peso fresco, peso seco, longitud y diámetro de frutos de un cultivo pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	155
Cuadro 2.8.	Efecto de las aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la firmeza de frutos, en el cultivo pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	156
Cuadro 2.9.	Efecto principal de la aplicación foliar de calcio en el ángulo hue de frutos, en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	157
Cuadro 2.10.	Efecto de los tratamientos foliares en parámetros de color (luminosidad, ángulo hue e índice de saturación) en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.	158
Cuadro 2.11.	Efectos principales de los factores de estudio (aplicación foliar de Si y aplicación foliar de Ca) en la concentración sólidos solubles totales en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	159
Cuadro 2.12.	Efecto principal del factor aplicación foliar de Si en la conductividad eléctrica en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	160
Cuadro 2.13.	Efecto de los tratamientos foliares en variables de calidad interna de frutos (SST, pH, CE, AT) del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	161

Cuadro 2.14. Efecto principal del factor aplicación foliar Si en la concentración de prolina en hojas del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	162
Cuadro 2.15. Efecto de los tratamientos en la concentración de prolina de hojas del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	162
Cuadro 2.16. Efecto de la aplicación foliar de Si, Ca y su combinación en la concentración de nitrógeno (N) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido en un suelo sódico.....	163
Cuadro 2.17. Efecto de la aplicación foliar de Si, Ca y su combinación en la concentración de fósforo (P) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	164
Cuadro 2.18. Efecto principal del factor aplicación foliar de Si en la concentración de potasio (K) en tallos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	165
Cuadro 2.19. Efecto de los tratamientos en la concentración de potasio (K) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	165
Cuadro 2.20. Efecto de los tratamientos en la concentración de calcio (Ca) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	167
Cuadro 2.21. Efecto de los tratamientos en la concentración de calcio (Mg) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	167
Cuadro 2.22. Efecto principal del factor aplicación foliar de Si en la concentración de cobre (Cu) en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	168
Cuadro 2.23. Efecto de los tratamientos foliares en la concentración de micronutrientes en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	169

Cuadro 2.24. Efecto de los tratamientos en la concentración de sodio (Na) y cloro (Cl) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	172
Cuadro 2.25. Efecto de los tratamientos en la concentración de silicio (Si) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.....	174

LISTA DE FIGURAS

Página

MARCO TEÓRICO

Figura 1.	Superficie sin vegetación de las unidades de producción bajo condiciones de ensalitramiento por región ecológica (INEGI, 2007).....	6
Figura 2.	Mecanismos de transporte de Na ⁺ en plantas (Park <i>et al.</i> , 2016)...	9
Figura 3.	Mecanismos principales de tolerancia a la salinidad en plantas cultivadas (Roy <i>et al.</i> , 2014).....	15
Figura 4.	Ruta de señalización de Ca ²⁺ en respuesta al estrés salino (Muchate <i>et al.</i> , 2016).....	17

CAPÍTULO I.

Figura 1.1.	Curva de calibración para determinar la concentración de prolina en hojas de pepino bajo estrés salino en sistema hidropónico.....	50
Figura 1.2.	Curva de calibración para determinar la concentración de cloruro en tejido vegetal de pepino bajo estrés salino en sistema hidropónico.....	51
Figura 1.3.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la longitud de tallo del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	53
Figura 1.4.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el diámetro de tallo del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	54
Figura 1.5.	Efecto de la salinidad en el crecimiento del cultivo de pepino variedad Modan.....	55
Figura 1.6.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la biomasa seca de plantas del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	59
Figura 1.7.	Efecto de la salinidad en el fruto de pepino variedad Modan.....	63

Figura 1.8.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el rendimiento del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	65
Figura 1.9.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el número de frutos por planta del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	66
Figura 1.10.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el peso de materia fresca y seca de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	69
Figura 1.11.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la longitud y diámetro de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	71
Figura 1.12.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la firmeza de frutos medida en tres puntos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	73
Figura 1.13.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el porcentaje de luminosidad de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	75
Figura 1.14.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el ángulo hue (tono de color) de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	76
Figura 1.15.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el índice de saturación de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	77
Figura 1.16.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el pH de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	79
Figura 1.17.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el contenido de sólidos solubles totales de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	80
Figura 1.18.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el pH de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	81

Figura 1.19.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la conductividad eléctrica de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	82
Figura 1.20.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la acidez titulable de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	83
Figura 1.21.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de prolina en hojas del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.....	85
Figura 1.22.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de P en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	90
Figura 1.23.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Fe en raíz del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	100
Figura 1.24.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Cu en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	104
Figura 1.25.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Na en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	113
Figura 1.26.	Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Si en tallo del cultivo de pepino en sistema hidropónico.....	119

CAPÍTULO II

Figura 2.1.	Curva de calibración empleada en la determinación de prolina en hojas secas.....	146
Figura 2.2.	Curva de calibración para determinar la concentración de cloruro en tejido vegetal de pepino bajo condición de suelo sódico.....	147

MARCO TEÓRICO

1. Situación mundial de la salinidad en los suelos irrigados

El concepto de salinidad es entendido como la presencia de sales solubles en suelos o aguas, y describe la presencia de un nivel elevado de diferentes sales, tales como: cloruro de sodio, sulfato de magnesio y calcio, así como bicarbonatos, tanto en la fase líquida del suelo como en el agua (Blaskó, 2011).

El 20% de la superficie terrestre continental está representada por condiciones de clima árido y semiárido, donde la escasa precipitación tiene como efecto la acumulación de sales en la zona radical de las plantas, propiciando el decremento de la productividad de los cultivos (Aceves, 2011; Qadir *et al.*, 2014; Kanmani *et al.*, 2016).

Alrededor del mundo, la salinización es uno de los grandes problemas de degradación de las tierras agrícolas que se presenta por causas naturales (primaria) o por la actividad humana (secundaria). Cuando el alto contenido de sales y/o Na⁺ es debido al intemperismo de los minerales de los materiales parentales se conoce como salinidad/sodicidad primaria y cuando es propiciada por actividades antropogénicas que involucran el manejo inapropiado de tierras y agua contribuyen a la formación de la salinidad/sodicidad secundaria (Horie *et al.*, 2012; Qadir *et al.*, 2007).

Existe una amplia distribución de los suelos salinos y salinizados a nivel mundial, éstos ocupan entre 40 y 50% de toda el área del planeta (González *et al.*, 2002). Aproximadamente 20% de las tierras cultivadas del mundo (Zhu *et al.*, 2008). En algunos países el problema de salinidad afecta el 50% de las áreas bajo irrigación (Qadir *et al.*, 2014).

La condición de salinidad es un problema que se extiende alrededor del planeta, teniendo un marcado impacto negativo tanto agrícola como medioambiental, lo cual se ve reflejado en daños económicos y sociales (Mateo-Sagasta y Burke, 2010; Gupta y Huang, 2014). El impacto en la agricultura se ve reflejado en la constante disminución de áreas dedicadas a la producción de cultivos (Ahangar y Agarwal, 2017).

Dentro de los procesos de salinización, la sodificación es al que se le ha prestado menos atención y a su vez es el menos comprendido en el desarrollo de suelos salinos (Pla,

2014). Los niveles de Na⁺ en las tierras agrícolas están en incremento y se convierten en una seria amenaza para la agricultura mundial (Horie *et al.*, 2012).

La sodicidad de los suelos se caracteriza por niveles excesivos de Na⁺ en la solución del suelo y en el complejo de intercambio catiónico, estas condiciones confieren a los suelos bajo este problema características específicas, tales como, costras en la superficie y suelo disperso (Qadir *et al.*, 2007).

El riego pesado para el lavado del exceso de sales es el método mayormente utilizado para disminuir la concentración de sales en la zona radical de los cultivos, tal práctica propicia un incremento en concentración en el agua de drenaje hasta de 50 veces, con lo cual se favorece la salinización de los cuerpos de agua receptores (FAO, 2012).

El problema de escasez de agua hace necesario el uso de fuentes alternativas, tal como es el caso de aguas salinas, permitiendo de esta manera disminuir el desabasto en cuanto a la demanda y oferta de aguas adecuadas para la irrigación de cultivos, aspectos que en conjunto con un incorrecto manejo del riego y un mal drenaje del suelo propician el incremento en proporción y gravedad de las tierras salinizadas (Chinnusamy *et al.*, 2005; Bezborodov *et al.*, 2010; Jayakannan *et al.*, 2015). Una vez presente esta condición de suelo se vuelve un problema en dos aspectos, por una parte es costosa su recuperación y por otra el tiempo que se requiere volverlos productivos (Jayakannan *et al.*, 2015).

Alrededor del 70% del total de agua no salina es usada para la irrigación en la agricultura, lo cual ha permitido hasta el momento, alimentar a la población mundial creciente y se especula que para el 2050 el consumo de agua a nivel mundial para la irrigación, uso doméstico, industria y ganado aumente 21% (Rosegrand *et al.*, 2009).

El agua es un recurso imprescindible en la producción de cultivos, siendo a su vez la agricultura el sector que hace mayor uso de este recurso y la principal actividad que causa el detrimento de su calidad (Mateo-Sagasta y Burke, 2010; FAO, 2012), por ello es inevitable descartar el uso de aguas salinas y/o sódicas para la irrigación, lo cual, para su correcta aplicación requiere de una evaluación de la sustentabilidad, que permita conocer su impacto, pues la información actualmente generada a través de investigación y los modelos computacionales, si bien proveen una idea de lo que pueda suceder en un futuro, están basados en métodos de laboratorio que no reflejan las condiciones de

salinidad sódica que están ocupando grandes extensiones del planeta ([Qadir y Oster, 2004](#)).

El acelerado crecimiento demográfico que demanda tierras, agua y alimentos conlleva a la necesidad de incrementar la producción de alimentos en una menor superficie. Tal producción se ve limitada por la escasez de agua, el incremento en temperaturas y dióxido de carbono debido al cambio climático, así como por los microclimas locales impredecibles, la erosión y degradación del suelo que intensifican las condiciones de estrés abiótico; por tanto, será necesario que la producción agrícola se extienda a suelos marginales, como salinos, así como el uso de aguas marginales para cultivos en suelo o en sistema hidropónico ([Pereira, 2016](#); [Arzani y Ashraf, 2016](#)).

2. La salinidad de los suelos irrigados en México

La degradación de los suelos es un problema creciente en las zonas productivas de México ([Semarnat, 2016](#)), a pesar de la importancia de este fenómeno, en la actualidad se carece de estudios recientes y precisos que proporcionen cifras de la gravedad del tema. En el “Informe de Medio Ambiente” de la SEMARNAT, en su edición 2015, se hace mención del estudio realizado por [Semarnat y Colegio de Postgraduados \(2003\)](#) el cual fue realizado en el periodo 2001-2002 y reporta un 44.9% de los suelos de la república afectados por algún proceso de degradación, dentro de tales procesos fueron cuestión de estudio, ordenados de los que mayor a menor proporción en extensión ocupan del territorio Nacional: a) la degradación química (17.8%), erosión hídrica (11.9%), erosión eólica (9.5%) y degradación física (5.7%). El factor causante de la mayor proporción, pero no el único, de tierras degradadas es la actividad agrícola. De las 34,042,600 (17.8%) hectáreas del territorio nacional que son afectadas por la degradación química, alrededor de 1,064,600 hectáreas están afectadas por salinidad/sodicidad ([Semarnat, 2016](#)).

De las 5 millones de hectáreas bajo irrigación en México, aproximadamente 500 mil de ellas (10%) se encontraban hasta lo reportado en 1985, afectadas por diferentes grados de salinidad ([Umali, 1993](#); **Cuadro 1**). Por su parte, [Feuchter \(2000\)](#) menciona que alrededor de 600 mil hectáreas bajo irrigación presentan problemas de salinidad, misma que incrementa a una tasa anual de 10,000 ha. Mientras que [Palacios-Vélez y Pedraza-](#)

Oropeza (2015) mencionan que la salinidad en México ocupa entre 10 y 15% de las zonas irrigadas.

Cuadro 1. Distribución regional de las áreas afectadas por la salinidad en México, 1985 (Umali, 1993).

REGIÓN	ÁREA AFECTADA (ha)	PORCENTAJE (%)
Noroeste	250,000	50
Norte	80,000	16
Noreste	75,000	15
Centro	90,000	18
Sureste	5,000	1
Total	500,000	100

En el año 2016 se contabilizaron 6,047,390 hectáreas de cultivos sembrados bajo irrigación en México (SIAP, 2017), esto es un crecimiento de 1,047,390 ha desde 1985, y tal crecimiento trajo consigo el incremento en áreas salinizadas, pues a la fecha, lejos de disminuir el 10% afectado hace 32 años, se proyecta para los próximos años un incremento de la salinidad en las áreas irrigadas por arriba del 30% (Palacios-Vélez y Pedraza-Oropeza, 2015).

Dentro de las zonas agrícolas en México se encuentran los distintos distritos de riego. Representando a la zona I (los estados del norte del país), Baja California Norte y Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit y Jalisco, tal zona cuenta con una importante actividad agrícola, pues en ella hay alrededor de 3.1 millones de hectáreas dedicadas a la agricultura y dentro de las cuales se cuenta con 2.5 millones de ha en las unidades de riego (Feuchter, 2000). Los distritos de riego del norte del país según Pulido *et al.* (2010) son los que presentan los problemas más agravados de salinidad, mientras que Ruíz *et al.* (2007) mencionan que no sólo el norte del país se ve afectado por este problemas, también la región centro. Por su parte Partida-Ruvalcaba *et al.* (2006) mencionan que en México existen áreas importantes que están afectadas por condiciones de alta salinidad y sodicidad, condición que se sigue empeorando debido a la utilización de aguas del

subsuelo para la irrigación de cultivos, caso de los estados de Sonora, Baja California, Baja California Sur, Michoacán, Guanajuato, Estado de México y Coahuila.

Además del ensalitramiento que existente en áreas con producción agrícola, en México se advierte este problema también en superficies considerables sin vegetación (casi 140 mil ha) de las unidades de producción, como se observa en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Superficie sin vegetación de las unidades de producción bajo diferentes condiciones en México (INEGI, 2007).

Condición	Hectáreas
Con arenales o pedregales	823112.661
Ensalitrada	139256.789
Erosionada	115549.324
Cubierta con agua la mayor parte de año	1004207.939
Contaminada	10675.122
Otra	31024.986
Total	2123826.821

En la **Figura 1** se presenta de manera específica, la distribución del ensalitramiento en superficies sin vegetación dentro de las regiones ecológicas de México. La región ecológica con mayor ensalitramiento son las selvas cálido-secas, seguida de la región desiertos de América del Norte. Por el contrario, la región ecológica con menor superficie con problemas de ensalitramiento es la de las sierras templadas.

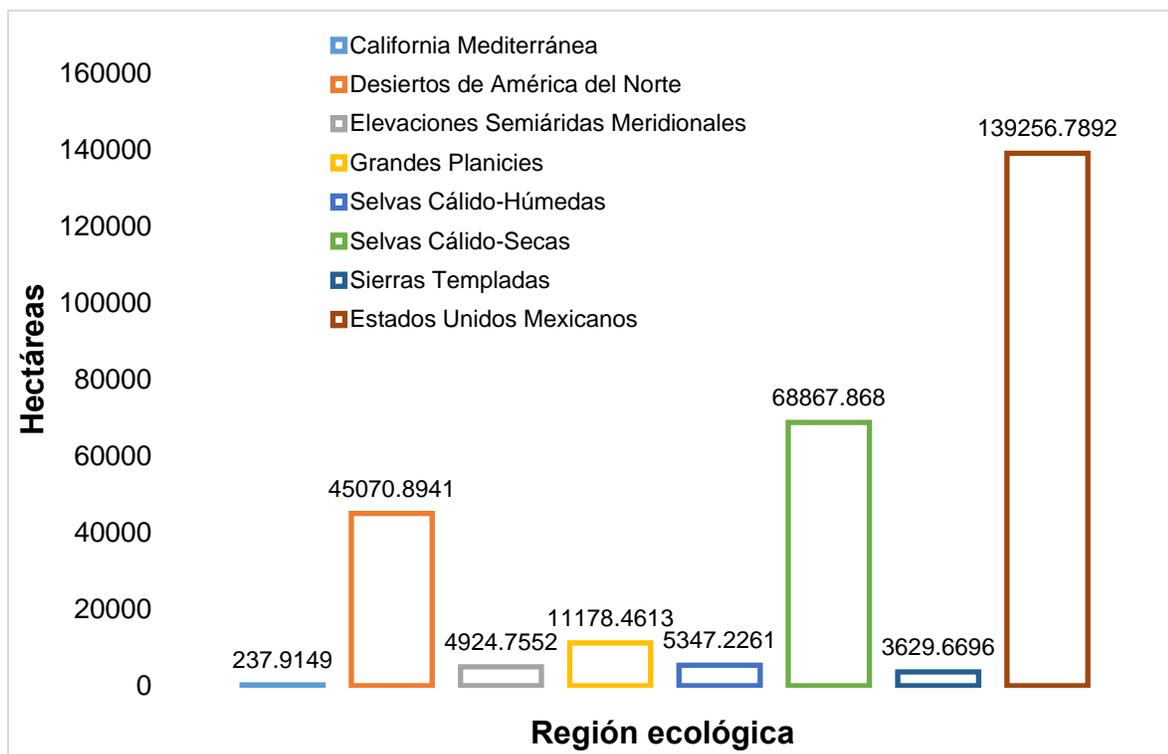


Figura 1. Superficie sin vegetación de las unidades de producción bajo condiciones de ensalitramiento por región ecológica (INEGI, 2007).

3. Clasificación de los suelos salinos

La clasificación para suelos afectados por sales están categorizados según [Qadir et al. \(2014\)](#) de la siguiente manera:

- a) **Salino**, cuando no son sódicos, pero contienen sales solubles que pueden afectar el crecimiento de la mayoría de las plantas cultivadas.
- b) **Sódico**, cuando los niveles de iones sodio (Na^+) son elevados y presentan problemas en su estructura, como resultado de procesos físicos (dispersión de arcillas) y condiciones específicas (encostramiento y endurecimiento).
- c) **Salino-sódico**, cuando el suelo contiene altos niveles de iones sodio y otras sales solubles.

Estos autores mencionan que la clasificación de los suelos afectados por sales es importante para poder tomar medidas correctivas recomendables y estimar la inversión necesaria para su recuperación.

La clasificación de suelos afectados por sales reportada por Ali (2011) se presenta en el **Cuadro 3**. En ésta, los criterios son las propiedades del suelo conductividad eléctrica, pH y porcentaje de sodio intercambiable.

Cuadro 3. Clasificación general de los suelos afectados por sales (Ali, 2011).

Clase de suelo	Conductividad eléctrica (CE) (dS m ⁻¹)	pH	Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)
Salino	>2.0	<8.5	<15
Sódico	<2.0	>8.5	>15
Salino-sódico	>2.0	<8.5	>15

Nota: Suelo normal – CE <2 dS m⁻¹ – PSI <15

Ambas clasificaciones se relacionan, pues los criterios medidos en suelos (CE, pH y PSI) tienen efectos directos e indirectos en el crecimiento normal de las plantas: a) directo, cuando los niveles de sales en la solución del suelo alcanzan conductividades eléctricas (CE) umbrales para las plantas, provocando síntomas de estrés hídrico, también altos niveles de iones específicos (Na⁺ y Cl⁻) en la solución del suelo son transportados al interior de la planta con la absorción de agua, provocando de esta manera desbalance iónico y síntomas de toxicidad; b) indirecto, los criterios de pH y PSI, principalmente, afectan las propiedades del suelo (alcalinidad, pérdida de estructura y encostramiento) con lo cual se afecta la disponibilidad nutrimental, la infiltración y movimiento de agua y aire, afectando el desarrollo normal de raíces y el crecimiento general de las plantas.

Con el incremento de sales en el suelo se disminuye el potencial osmótico, provocando la disminución de transporte de agua y nutrimentos de la solución del suelo a la planta, manifestándose síntomas de sequía y el consecuente detrimento del crecimiento (Ali, 2011).

Los suelos sódicos y salino-sódicos (elevados niveles de Na⁺) tienen como característica la pérdida de estructura, la cual es propiciada por el desplazamiento de cationes, tales como Ca²⁺ y Mg²⁺, de las partículas de arcilla, siendo reemplazados por Na⁺, lo cual se vuelve un aspecto importante por el tiempo requerido en recuperar la agregación natural

(Daliakopoulos *et al.*, 2016). Esta pérdida de estructura, debido al elevado PSI, disminuye la entrada de aire y agua al perfil del suelo (Ali, 2011). Además los suelos sódicos tienen un pH desfavorable (mayor a 8.5) para el crecimiento de los cultivos.

Los suelos sódicos y salino-sódicos, pueden ser recuperados, pero es un proceso lento y costoso, ya que se debe desplazar el sodio y lavar el exceso de sales (Ali, 2011).

4. Mecanismos de transporte de sales en plantas

Una alta relación Na^+/K^+ es mantenida en citosol, pero al incrementarse los niveles de Na^+ a nivel extracelular se da un alto gradiente electroquímico que favorece el transporte pasivo de Na^+ al interior de la célula (Yamaguchi y Blumwald, 2005).

Una vez dentro de la planta, las sales tomadas mediante difusión o el flujo transpirativo, continúan procesos de difusión y convección que son complementados por procesos activos y pasivos (Foster y Miklavcic, 2013).

Dentro de los mecanismos de absorción de Na^+ no se han encontrado canales específicos para este catión, proponiéndose un mecanismo de canales de cationes no selectivos (NSCC, por sus siglas en inglés). En específico, dentro de los NSCC, los canales regulados por nucleótidos cíclicos (CNGCs), en conjunto con los transportadores HKT (transportadores de alta afinidad a K^+) constituyen los medios de entrada a la raíz (**Figura 2**); a los canales de cationes no selectivos activados por la depolarización (DA-NSCC) y canales de cationes no selectivos independientes de voltaje (VI-NSCC) se les atribuyen funciones importantes en la absorción y translocación (Demidchik y Maathuis, 2007; Isayenkov, 2012).

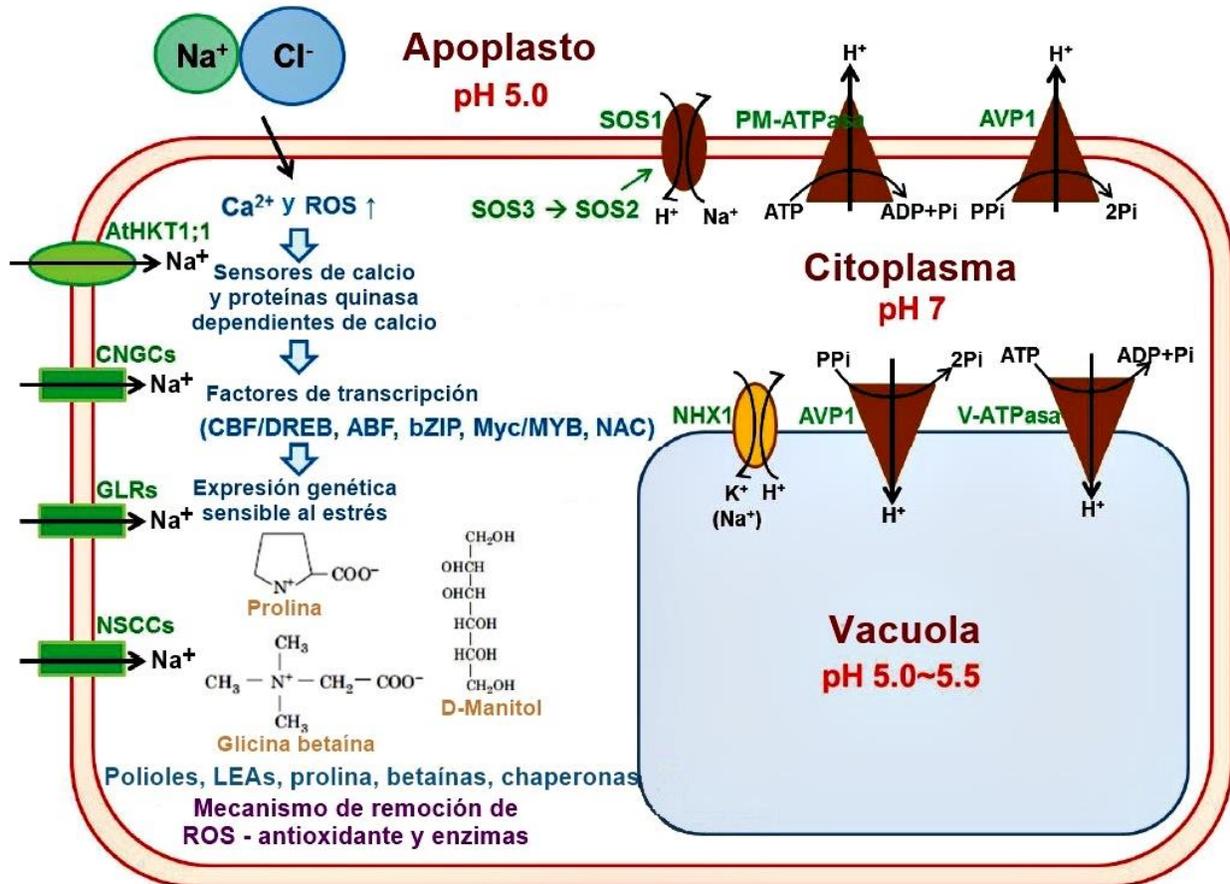


Figura 2. Mecanismos de transporte de Na^+ en plantas. Canales regulados por nucleótidos cíclicos (CNGC), canal de cationes no selectivos (NSCC), receptor de glutamato (GLR), y transportadores de K^+ de alta afinidad (HKT) intervienen en la absorción de Na^+ . SOS1 participa en la extrusión de Na^+ del citoplasma y AtNHX1 interviene en el intercambio $\text{K}^+(\text{Na}^+)/\text{H}^+$, implicado en el control del potencial osmótico vacuolar y la regulación de la relación Na^+-K^+ citosólica a través de la compartimentación vacuolar de K^+ (Park *et al.*, 2016).

En *Arabidopsis* se encontró que HKT1 es responsable de la carga de Na^+ al floema en tallos y su descarga en raíz, propiciando la recirculación de Na^+ y confiriendo tolerancia a la salinidad (Berthomieu *et al.*, 2003).

Las plantas transpiran entre 30 y 70 veces más agua que la utilizada para la expansión celular, por tanto, las sales que están en el suelo que no son excluidas por las raíces se

concentran en la misma proporción en la planta; es decir, entre 30 y 70 veces ([Munns, 2002](#)).

5. Efecto de la salinidad en los cultivos

La salinidad es uno de los tipos de estrés abiótico que ha reducido en manera significativa la producción agrícola en grandes extensiones del territorio alrededor del mundo ([Yamaguchi y Blumwald, 2005](#); [Nxele et al., 2017](#)).

La mayoría de las plantas cultivadas son glicófitas las cuales no son capaces de soportar altos niveles de salinidad y no tienen estructuras que les ayuden a la excreción de sal, como es el caso de las halófitas, pero sí presentan una variación natural en su tolerancia a la salinidad entre las diferentes especies ([Julkowska y Testerink, 2015](#)). Entonces la respuesta de las plantas a la salinidad está basada en su genética ([Yamaguchi y Blumwald, 2005](#)).

Ha sido ampliamente puntualizado que el estrés salino reduce el crecimiento y afecta el desarrollo de las plantas, afectando de manera diferencial el crecimiento de órganos de plantas individuales, lo que resulta en una alteración en la morfología de la planta ([Munns y Tester, 2008](#)). La inhibición del crecimiento del tallo es uno de los principales efectos de la salinidad en las plantas ([Shahzad et al., 2013](#)). Según [Roy et al. \(2014\)](#), esta inhibición puede deberse a muy distintos procesos que se relacionan en dos fases, una de ellas implica la acumulación de sales en el tallo (efectos medibles de días a semanas) y otra es independiente de la acumulación de sales en el tallo (efectos medibles de minutos a unos pocos días). [Munns y Tester \(2008\)](#) reiteran que la disminución del crecimiento de las plantas efectivamente se puede dividir en dos fases, una que se da a corto plazo y otra a largo plazo, la primera se presenta una vez las sales del medio han alcanzado un nivel umbral para el cultivo y se manifiesta como una disminución del crecimiento del tallo, la tasa de crecimiento de hojas es reducida, la emergencia de nuevas hojas y brotes se disminuye o simplemente se inactiva; la segunda fase se presenta una vez que las sales se han acumulado en concentraciones tóxicas en las hojas viejas, provocando su muerte. Por tanto, el estrés osmótico que reduce la emergencia y desarrollo de nuevas hojas, seguido por la muerte de hojas debido a la

acumulación tóxica de sales, propician en conjunto la reducción de la capacidad fotosintética y por tanto la tasa de crecimiento.

Altas concentraciones de sales provocan desequilibrio de iones y estrés hiperosmótico en las plantas, lo que puede llevar a la muerte de las mismas (Zhu y Gong, 2014). Esto se debe a que las sales se acumulan en la parte externa de la raíz (efecto osmótico) y penetran al interior de la célula vegetal produciendo un efecto tóxico (Horie *et al.*, 2012). Las plantas crecidas en estas condiciones se ven atrofiadas y pueden presentar quemaduras y secado de los bordes de las hojas que continúa hacia el interior, entre las nervaduras (Ali, 2011). Los efectos tóxicos del Na⁺ se presentan cuando éste se acumula en el tallo de la planta y se observa como primeros síntomas en las hojas más viejas el amarillamiento seguido por una coloración café oscuro, esto debido a la senescencia, lo cual lleva a su posterior muerte (Negrão *et al.*, 2017).

Por lo general, el aumento en la concentración de sales en la zona radical resulta en un incremento en concentración de Na⁺ y Cl⁻ en el tejido, que son los iones más perjudiciales, y decrece la concentración de ciertos nutrimentos como N, P, K, Ca y Cu (Wang y Han, 2007; Tavakkoli *et al.*, 2011; Chondraki *et al.*, 2012). Por su parte Savvas *et al.* (2005), encontraron que en pepino se ve marcada la disminución en concentración de K, Mg, Ca y P. Shahzad *et al.* (2013) encontraron en plantas de haba, bajo un nivel de 100 mM NaCl, una disminución de la concentración de K, Ca y Mg debido al daño de los mecanismos de transporte de estos elementos ocasionado por la alta acumulación de Na, provocando por ende un disturbio del metabolismo vegetal que decantó en la reducción del crecimiento.

El Na⁺ puede interrumpir la homeostasis del K⁺, catión más abundante en las células de la planta y esencial para muchos procesos celulares, su efecto empieza despolarizando la membrana plasmática con la entrada de Na⁺, lo que puede resultar en un eflujo de K⁺, reduciendo con ello su concentración en el citosol (Shabala y Cuin, 2008) y por tanto, se producen desórdenes fisiológicos significativos (Gupta y Huang, 2014). El Na⁺ compete con el K⁺ por los sitios de unión que son esenciales para diversas funciones celulares, debido a sus radios iónicos similares (David *et al.*, 2010). Por otra parte, el Cl⁻ reduce la capacidad fotosintética debido a la degradación de clorofila (Tavakkoli *et al.*, 2011).

La concentración de Na^+ y Cl^- en raíz, tallo y hojas se ve incrementada conforme la salinidad (NaCl) se aumenta en el medio de crecimiento, siendo la raíz el órgano donde mayormente se concentra el Na^+ . Otro efecto de la salinidad es que inhibe la absorción de K^+ , propiciando una disminución en su concentración en raíz de hasta un 59%, en tallos de 49% y en hojas de hasta un 63% ([Kchaou et al., 2010](#)).

Según [Ali \(2011\)](#) el impacto de la salinidad en la nutrición de cultivos implica:

- ❖ Efecto osmótico. La presión osmótica de la solución del suelo se incrementa conforme se acumulan sales. Con esto el agua disponible para la planta disminuye y en casos severos puede haber pérdida de agua desde la raíz, provocando deshidratación en la planta.
- ❖ Efecto de ion específico. La acumulación de iones específicos, Na^+ y Cl^- , en la zona radical y posteriormente en la célula vegetal, además del efecto de la presión osmótica, adiciona un efecto tóxico, propiciando una disminución en el crecimiento de la raíz y un decremento en la absorción de agua y nutrimentos.
- ❖ Antagonismo. La acumulación de ciertos iones en la célula vegetal puede causar interferencia en la absorción de otros. La acumulación de Na^+ y Cl^- inhiben la entrada de Zn^{2+} y NO_3^- , respectivamente.
- ❖ pH alto. Impacta en la disponibilidad de los nutrimentos.
- ❖ Niveles altos de Na^+ en el complejo de intercambio pueden provocar desbalance nutrimental y deficiencias de Ca^{2+} .
- ❖ Baja disponibilidad de fuentes de N orgánicas. En suelos salinos la mineralización del N orgánico es baja.
- ❖ Cierre estomático. Se reduce la relación CO_2 a O_2 y se inhibe la fijación de CO_2 , lo que afecta la tasa de elongación de la hoja y reduciendo la expansión y división celular.

Especies reactivas de oxígeno (ROS), como superóxido (O_2^-), radicales hidroxilo (OH^\cdot), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y oxígeno singlete (O_2) tienden a sobre-acumularse en la célula bajo condiciones de salinidad induciendo peroxidación y de-esterificación de lípidos de membrana, lo cual conlleva a una interrupción de los procesos celulares vitales y un posterior incremento en los niveles de muerte celular, traduciéndose como efecto negativo en el crecimiento y productividad de los cultivos ([Han et al., 2015](#); [Nxele et al.,](#)

2017). Bajo esta condición de salinidad, el H_2O_2 , un metabolito ubicuo, también puede estar involucrado en la cascada de transducción de señales y la regulación de genes, pudiendo actuar en la tolerancia a esta condición (ver apartado 6 de este capítulo, Mecanismos de tolerancia a la salinidad) (Sofo *et al.*, 2015).

Las relaciones de agua en la planta, como el potencial de agua y la conductividad hidráulica, son factores afectados de manera significativa por condiciones de salinidad, siendo el potencial de agua el determinante en la dirección de movimiento del agua, siguiendo la dirección del lugar de mayor potencial hacia el de menor potencial. La conductividad hidráulica se refiere a la facilidad con la que esa agua se mueve de una locación a otra, por tanto al atrofiarse ésta, se afecta la tasa de movimiento de agua (Negrão *et al.*, 2017). La conductividad hidráulica de la raíz se ve significativamente reducida bajo condiciones de salinidad, a causa del desbalance iónico, en el que pueden estar involucrados procesos celulares de fosforilación/defosforilación e internalización de membrana (Kaneko *et al.*, 2015).

Una conductividad eléctrica (CE) de alrededor de 6 dS m^{-1} reduce aproximadamente el 23% del rendimiento en cultivo de pepino en comparación con aquellos tratamientos manejados con CE entre 1 y 3 dS m^{-1} ; a partir de 4 dS m^{-1} , el decremento en la absorción de nutrimentos es significativa y cuando aumenta a 7 dS m^{-1} se presenta una exudación de nutrimentos, principalmente de Ca (Sonneveld y Kreij, 1999).

6. Mecanismos de tolerancia a la salinidad

La complejidad de los factores abióticos, sea de forma individual o combinada, que impactan en la producción de cultivos son sólo algunos de los desafíos que se enfrentan en la agricultura moderna; lo anterior, hace necesario una combinación de enfoques para mejorar de manera significativa la tolerancia al estrés (Mittler y Blumwald, 2010). La complejidad reside en que para un estrés en específico se necesita dar una respuesta determinada que le permita a la planta aclimatarse y adaptarse (Mittler, 2006).

La respuesta diferencial en rendimiento de una variedad y/o especie vegetal bajo condiciones de salinidad y bajo condiciones normales expresa la tolerancia de dicha variedad y/o especie, pudiendo entonces definirse la tolerancia a la salinidad desde una

perspectiva agronómica como la habilidad de las plantas de sobrevivir y producir rendimientos económicos ([González et al., 2002](#)).

Diferentes mecanismos son utilizados por las plantas para lidiar con el estrés causado por salinidad, la activación de diversos genes de respuesta es un mecanismo que primeramente consta de censar el componente hiperosmótico y el componente iónico (Na^+) que están dando lugar a la condición de estrés presente ([Deinlein et al., 2014](#)).

Los mecanismos principales de tolerancia a la salinidad según [Munns y Tester \(2008\)](#), incluyen:

- ❖ Ajuste osmótico. Mediante este mecanismo las plantas retienen agua a pesar de su bajo potencial, aliviando de esta manera el estrés osmótico.
- ❖ Exclusión de sales a las hojas. Se realiza en las raíces, limitando su entrada y asegurando una disminución en la concentración de iones (Na^+) en tejidos fotosintéticamente activos.
- ❖ Tolerancia del tejido a la acumulación de sales (Na^+ y/o Cl^-). Este mecanismo es mediado por la compartimentalización de Na^+ y Cl^- evitando que lleguen a una concentración tóxica en el citoplasma.

Con respecto a lo anterior, [Roy et al. \(2014\)](#) mencionan que la tolerancia osmótica es desencadenada después de una acumulación de Na^+ en tallos, reduciendo su crecimiento mediante señales a larga distancia (**Figura 3**).

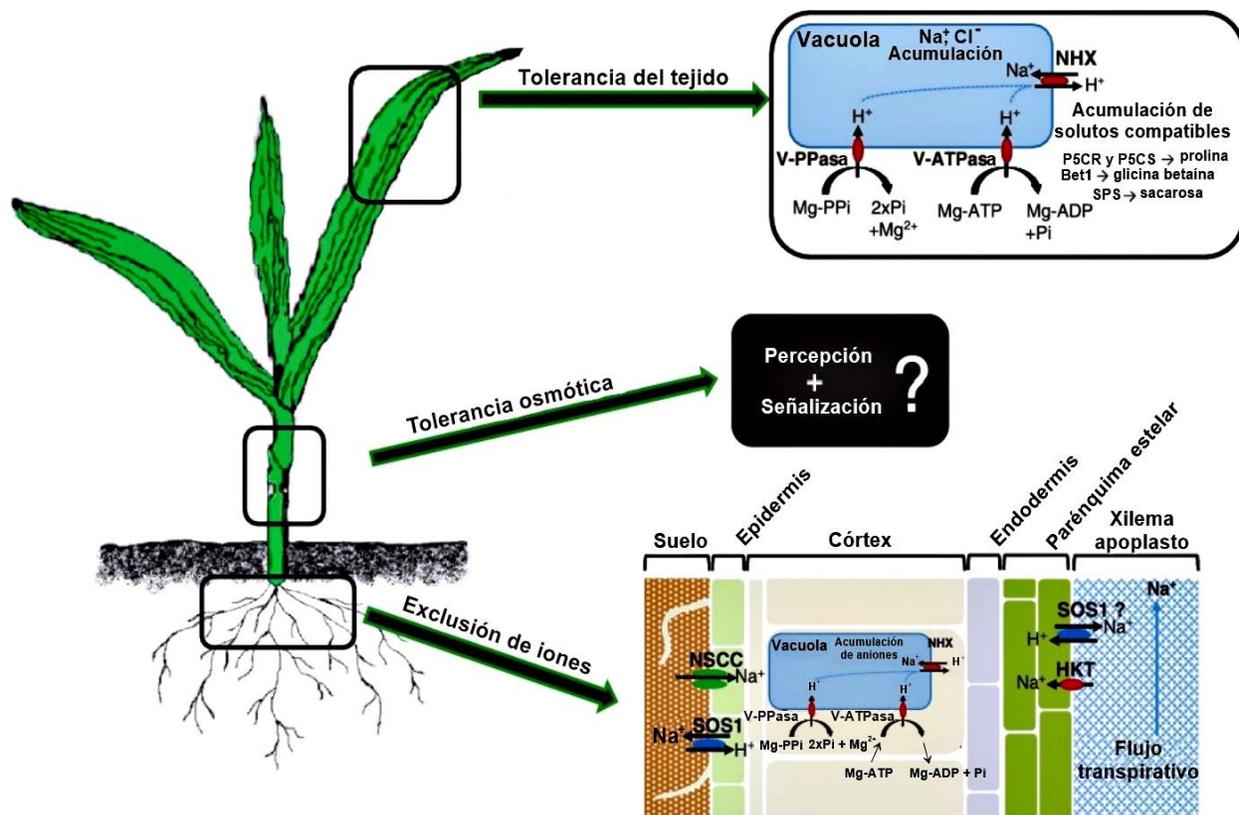


Figura 3. Mecanismos principales de tolerancia a la salinidad en plantas cultivadas. Tolerancia de tejido, se presenta cuando las sales alcanzan niveles elevados en las hojas y estas son compartimentalizadas a nivel celular e intracelular, proceso en el que se involucran: transportadores, bombas de protones y síntesis de solutos compatibles. Tolerancia osmótica, minimiza el efecto de la reducción del crecimiento de tallo, pudiendo también estar relacionado con mecanismos de percepción (sensado) y señalización, hasta hora desconocidos. Exclusión de iones, donde los procesos de transporte de Na^+ y Cl^- , predominantes en raíces, previenen la acumulación de niveles tóxicos de Na^+ y Cl^- en hojas. También se puede incluir dentro de los mecanismos a: la recuperación de Na^+ del xilema, compartimentalización de iones en vacuolas de las células corticales y/o eflujo de iones desde las raíces al suelo (Roy *et al.*, 2014).

En cuanto a la exclusión de iones, Dabuxilatu e Ikeda (2005) concluyen que la tolerancia a la salinidad implica la habilidad de mantener una concentración iónica adecuada en los órganos de las plantas. La mayoría de las plantas que toleran la salinidad deben restringir la absorción de Na^+ y Cl^- manteniendo la absorción de macronutrientes, tales como,

K^+ , NO_3^- y Ca^{2+} (Tavakkoli *et al.*, 2011). Por tanto, un mecanismo para tolerar la salinidad es disminuir la tasa de absorción y transporte de sales (Na^+ y Cl^-) desde la raíz hacia las hojas (Munns, 2002; Foster y Miklavcic, 2013). Los mecanismos de exclusión de Na^+ y Cl^- son independientes (Tavakkoli *et al.*, 2011).

El mecanismo de tolerancia del tejido se presenta bajo condiciones de alta salinidad, de tal forma que las sales acumuladas en las hojas son compartimentalizadas en diferentes tejidos a nivel celular e intracelular (vacuolas principalmente), siendo éste un mecanismo importante y clave en la tolerancia a la salinidad (Roy *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2016).

Por su parte Gupta y Huang (2014), puntualizan que los mecanismos fisiológicos y bioquímicos que las plantas han desarrollado para tolerar las condiciones de alta salinidad en suelos comprenden:

- ❖ Homeostasis y compartimentalización de iones.
- ❖ Absorción y transporte de iones.
- ❖ Biosíntesis de osmoprotectores y solutos compatibles.
- ❖ Activación de enzimas antioxidantes y síntesis de compuestos antioxidantes.
- ❖ Síntesis de poliaminas.
- ❖ Generación de óxido nítrico (NO).
- ❖ Modulación de hormonas.
- ❖ Decremento en la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) (Han *et al.*, 2015).
- ❖ Señalización de estrés (Han *et al.*, 2015).

Las condiciones de estrés desencadenan en la planta rutas regulatorias que le permiten responder y adaptarse, tales rutas se inician en el sistema sensor que detecta y activa posteriormente cascadas de señalización y de control transcripcional, que involucra gran número de factores de transcripción y se expresa como cambios en la programación de expresión de genes (Cabello *et al.*, 2014).

Las plantas tienen la capacidad de sintetizar y/o liberar moléculas señalizadoras (ABA, ROS y Ca^{2+}) cuando se ven sometidas a un estrés salino (**Figura 4**). Estas moléculas señalizadoras pueden inducir la activación de factores de transcripción, los cuales se unen a elementos *cis* dentro de las regiones promotoras de los genes blanco, lo que puede controlar la expresión de dichos genes, ya sea induciéndola o reprimiéndola.

Finalmente, estas rutas de señalización pueden iniciar procesos de fosforilación y desfosforilación de enzimas y metabolitos, a través de la acción de cinasas y fosfatasas. En respuesta al estrés salino, una ruta muy importante es la señalización de la proteína demasiado sensible a sal (SOS, salt overlay sensitive), que depende de Ca^{2+} y regula la homeostasis iónica (García-Morales *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2015).

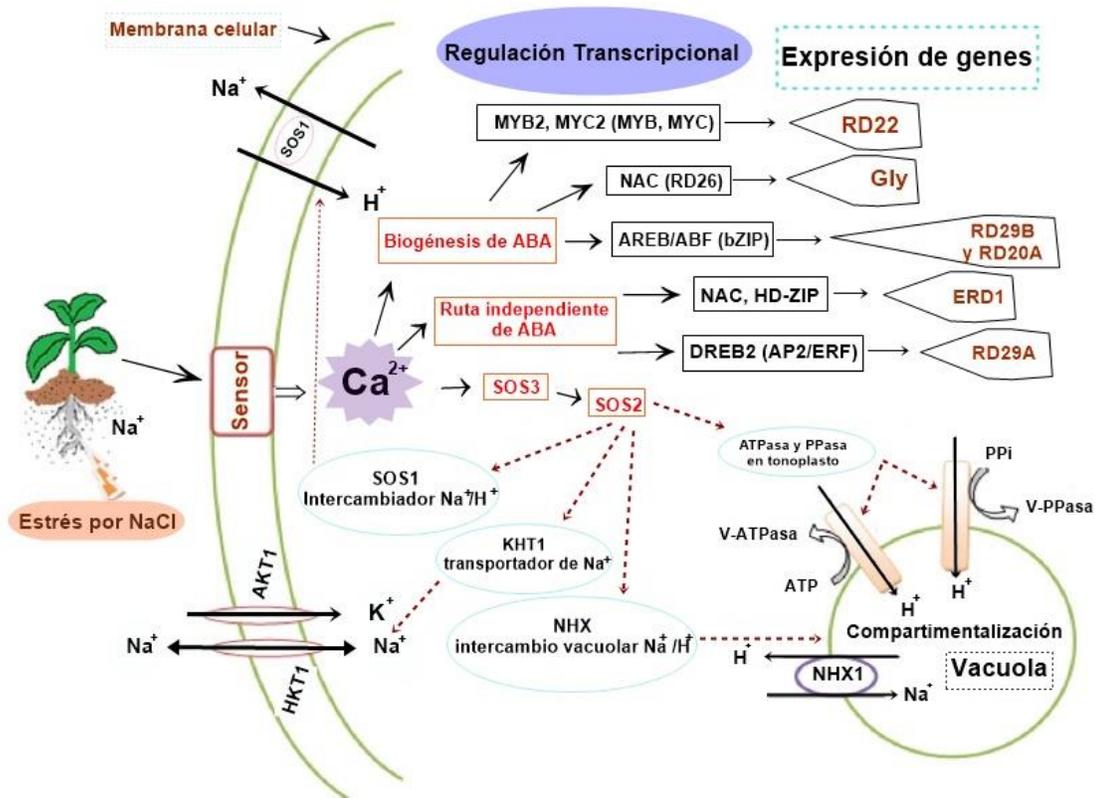


Figura 4. Ruta de señalización de Ca^{2+} en respuesta al estrés salino. El exceso de Na^+ es percibido por los sensores en la membrana plasmática, lo que induce el aumento en el nivel de Ca^{2+} citosólico. Esto activa el complejo de proteínas SOS3-SOS2 que fosforilan a SOS1. SOS2 puede regular la actividad antiporte NHX1 y la actividad de la V-ATPasa. El estrés salino provoca una acumulación de ABA, resultando en la expresión de genes mediante vías dependientes e independientes de ABA (Muchate *et al.*, 2016).

Las bombas de H⁺, antiportes Na⁺/H⁺ y los canales, en forma individual o conjunta, tienen la capacidad de compartimentalizar intracelularmente (vacuola) al Na⁺, de esta forma se incrementa la diferencia de presión osmótica y se facilita la absorción de agua en la célula, incrementando la resistencia al estrés osmótico (Foster y Miklavcic, 2015; Peng *et al.*, 2016). A pesar de que la bomba de H⁺ de membrana ayuda a disminuir los niveles de Na⁺ citosólico y a incrementar la concentración de K⁺, no es tan efectiva como el antiporte Na⁺/H⁺ en la reducción de Na⁺ citosólico (Foster y Miklavcic, 2015). Los transportadores NHX (antiporte Na⁺/H⁺), SOS1 (antiporte Na⁺/H⁺) y HKT (transportador de K⁺ de alta afinidad) están involucrados en la tolerancia a las sales (**Figura 4**) (Yamaguchi *et al.*, 2013). Los NHXs contribuyen manteniendo la homeostasis de Na⁺ y de pH (Arzani y Ashraf, 2016).

La acumulación de prolina en plantas bajo condiciones de estrés, ha sido bien documentada, cumpliendo funciones de osmolito, fuente de energía, como removedor de ROS y mitigador del estrés (Dar *et al.*, 2016). También juega un papel importante mediando el ajuste osmótico y protegiendo las estructuras subcelulares (Ashraf y Foolad, 2007). Aunque bajo ciertas condiciones de salinidad y/o sequía, el aumento en el contenido de prolina no es suficiente para disminuir el daño oxidativo causado por el H₂O₂ y el consecuente incremento en la peroxidación de lípidos causando la muerte celular (Nxele *et al.*, 2017).

El ácido abscísico (ABA) ha mostrado ser efectivo en desencadenar vías de señalización para mejorar la tolerancia a la salinidad (**Figura 4**) al promover la reducción en las concentraciones de Na⁺ y Cl⁻ e incrementar la de K⁺ y Ca²⁺, propiciando también la acumulación de prolina (Gurmani *et al.*, 2011).

Por su parte los reguladores de crecimiento vegetal también tienen un efecto positivo bajo condiciones de salinidad; por ejemplo, el uso de brasinoesteroides tiene efecto positivo en la germinación; mientras que, el empleo de ácido giberélico y kinetina incrementan la producción de materia seca (Kanmani *et al.*, 2016). Los brasinoesteroides, a través de la producción de H₂O₂, activan la producción de etileno y la ruta de señalización de etileno en plantas sometidas a estrés salino, contribuyendo en la reducción del daño oxidativo (Zhu *et al.*, 2016). También al inducir la producción de

H₂O₂ se desencadena la biosíntesis de ABA, el cual también incentiva la producción de H₂O₂ prolongando la tolerancia al estrés (Zhou *et al.*, 2014).

El hecho de que el H₂O₂ funcione en rutas de señalización para responder a una condición de estrés se debe a que bajo condiciones normales es producido por el metabolismo aeróbico de plantas y en baja concentraciones puede cumplir con funciones como molécula señalizadora capaz de regular procesos fisiológicos, no descartando que su acumulación excesiva lleva a un estrés oxidativo y la posterior muerte celular, hasta ciertos niveles el H₂O₂ puede ser metabolizado por enzimas como catalasas, ascorbato peroxidasa, peroxiredoxinas, glutatión peroxidasa y glutatión sulfotransferasas, transformando este metabolito dañino a H₂O (Sofo *et al.*, 2015).

El NO interviene en procesos fisiológicos y asociados con la salinidad, funcionando como molécula señalizadora en el citosol a través de su reacción con constituyentes solubles y ligados a la membrana de la mitocondria, pudiendo de esta manera alterar la actividad de proteínas transportadoras específicas (David *et al.*, 2010).

En plantas de cebada clasificadas como tolerantes a la salinidad, Vysotskaya *et al.* (2010) encontraron que se inhibe en mayor grado la conductividad hidráulica y la transpiración en comparación con plantas de la misma especie pero clasificadas como sensibles, proponiendo que una disminución en la conductancia hidráulica en condiciones de salinidad es un mecanismo importante, el cual es mediado por la supresión de genes para acuaporinas (AQP) que propician el cierre de estomas y la disminución en la tasa de transpiración, teniendo efecto benéfico en plántulas, pues al evitar la entrada de agua cargada de sales se evita la acumulación tóxica en la parte aérea.

En cuatro ecotipos de *Arabidopsis thaliana* sometidos a estrés salino (0 o 100 mM NaCl), Jha *et al.* (2010) encontraron que cada ecotipo tiene un índice diferente de tolerancia al estrés, atribuyéndosele tal diferencia a la regulación diferenciada de genes específicos y a la concentración de Na⁺ en la planta, los genes que intervienen en tales respuestas son; AtHKT1 (su expresión en raíces disminuye la concentración de Na⁺ en parte aérea; posiblemente por la remoción de Na⁺ del flujo transpirativo y compartimentalizándolo en raíces), AtSOS1 (participa en el eflujo de Na⁺ desde la planta) y AtAVP1 (su expresión en raíz y tejido se relaciona con la tolerancia en tejido).

7. Funciones del calcio en la tolerancia a la salinidad

El calcio (Ca) es un macronutriente esencial para las plantas, que cumple con funciones estructurales importantes en la pared celular y membranas, en las paredes forma enlaces iónicos con pectinas (Bauer *et al.*, 2011). Así mismo, es un regulador importante del crecimiento y desarrollo de las plantas, pues se involucra en procesos fisiológicos fundamentales como balance iónico, expresión de genes, metabolismo de lípidos, proteínas y carbohidratos, de igual manera está involucrado en el crecimiento, división, diferenciación, polaridad y desarrollo celular e interviene en procesos de fotomorfogénesis, tigmotropismo, gravitropismo y secreción (Hepler, 2005; Song *et al.*, 2008; Tuteja, 2009).

Hojjatnooghi y colaboradores (2014) describen que al incrementar los niveles de salinidad disminuye el número de hojas, área foliar, pesos secos de tallos y raíces, y al aplicar 0.5 mM Ca se obtiene mayor área foliar y pesos secos, pero al incrementar la concentración de Ca (1 mM) se tiene un efecto negativo. Altas concentraciones de Ca intracelular son tóxicas, pues éste puede precipitar con fósforo y formar fosfato de calcio, interfiriendo con el metabolismo de ácidos nucleicos (Arzani y Ashraf, 2016).

En las células de hojas de pepino, la concentración de K⁺ disminuye principalmente en el espacio apoplástico más drásticamente en presencia de NaCl que de CaCl₂. La aplicación suplementaria de Ca suprime la disminución en la concentración de K⁺ ocasionada por la salinidad por NaCl. Por tanto, el incremento en la concentración de Ca en el medio puede ser una estrategia para la tolerancia de pepino a la salinidad por NaCl, ayudando a aliviar la reducción del crecimiento y de la tasa fotosintética (Dabuxilatu e Ikeda, 2005). Economakis y Daskalaki (2003) encontraron que al someter al cultivo de tomate a estrés salino por NaCl (600 mg L⁻¹) se disminuía de una manera significativa el rendimiento, el aumento en la proporción de potasio en la solución propició un incremento en el rendimiento y en el número de frutos por planta.

Aplicaciones de calcio al follaje de plantas de perejil puede ayudar a sobrellevar el impacto negativo de la salinidad a una concentración de 30 mM NaCl pero no de 90 mM NaCl (Chondraki *et al.*, 2012).

Aplicaciones de calcio a plantas de pepino bajo condiciones de estrés mejora el sistema antioxidante en mitocondria y por ende la homeostasis mitocondrial a través de la

disminución de los niveles de ROS, además de aumentar la acumulación de enzimas involucradas en la glicólisis y en el ciclo de los ácidos tricarbóxicos (He *et al.*, 2015).

7.1. El Ca^{2+} como segundo mensajero en rutas de señalización en respuesta al estrés salino

Sofisticadas estrategias de señalización han sido desarrolladas por las plantas, las cuáles le permiten, en la mayoría de los casos, sobrellevar diferentes tipos de estrés y sobrevivir a condiciones adversas (Ranty *et al.*, 2016). El Ca^{2+} es el transductor de señales universal más importante usado por organismos vivos para transferir información a diversos procesos celulares (Tuteja, 2009). En el proteoma de *Arabidopsis thaliana* se encontraron alrededor de 700 componentes de proteínas que funcionan en diversas etapas de señalización de calcio. Por lo anterior, las plantas poseen innumerable rutas en las cuales el Ca^{2+} puede operar como intermediario en la transducción de estímulos en una respuesta apropiada (Hepler, 2005).

Los primeros mensajeros son sintetizados por las plantas al verse sometidas a cierta condición de estrés, cuyas señales son detectadas por su unión a receptores de membrana y el evento de unión es transducido al interior de la célula con la síntesis (proteínas), influjo (Ca^{2+}) y/o liberación (Ca^{2+}) de los compartimentos intracelulares, provocando una perturbación (incremento) en concentración en el citosol, tal incremento en concentración es específico para cada señal recibida, dado por la especificidad de las firmas de calcio y es censado de manera precisa al unirse a proteínas específicas de unión a calcio, tales como calmodulina (CaM), proteínas del tipo CaM (CMLs), quinasas dependientes de calcio (CDPKs, CRKs, CaMKs, CCAMKs, CIPKs), calcineurinas del tipo B (CBL), fosfolipasa D (PLD), anexinas, proteínas que se expresan en pistilo (PCP), calreticulina (CRT), calnexinas (CNX) y forisomas, cada cual cumple con funciones específicas que da respuesta al primer mensaje recibido (Alberts *et al.*, 2002; Hepler, 2005; Tuteja, 2009; Hashimoto *et al.*, 2012).

El calcio puede ser movido rápidamente al interior de la célula o liberado de compartimentos intracelulares principalmente por canales permeables a calcio, antiportes $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^+$ y Ca^{2+} -ATPasas (Song *et al.*, 2008), lo que le permite incrementar su

concentración en un lapso muy corto y una vez cumplida su función tal concentración regresa al estado inicial.

Niveles elevados de Na^+ son sensados, posteriormente se activan diversas cascadas de señalización, donde el Ca^{2+} al liarse con proteínas de unión a calcio inicia con la ruta de señalización de Ca^{2+} llegando a afectar familias de factores de transcripción específicas que por ende provocan una alteración del perfil transcripcional de la planta que lleva a respuestas celulares tales como mecanismos de detoxificación (mecanismos de transporte que incluyen HKT, NHX y SOS) y estrategias de protección osmótica (Deinlein *et al.*, 2014). Aplicaciones externas de Ca impactan fuertemente en las rutas SOS y AtHKT1, permitiendo responder a un estrés fuerte por Na (Horie *et al.*, 2006).

Los mecanismos de traducción de señales donde interviene el Ca^{2+} activando proteínas, principalmente del tipo quinasa, son eventos de fosforilación (Sanyal *et al.*, 2015).

Los genes SOS (SOS1-SOS3) funcionan en la ruta de tolerancia a la salinidad, su principal efecto es en la homeostasis de iones, ruta en la que el Ca^{2+} es fundamental, pues el incremento en la concentración de Ca^{2+} en el citosol es percibido por SOS3 (sensor de calcio) que interactúa con SOS2 (proteína quinasa); este complejo SOS3-SOS2 fosforila SOS1 (antiporte Na^+/H^+ expresado en membrana) que permite el eflujo del exceso de Na^+ . Este mismo complejo (SOS3-SOS2) inhibe la actividad de HKT1 (transportador de Na^+ de baja afinidad) restringiendo la entrada de Na^+ al citosol. La fosforilación del NHX (antiporte Na^+/H^+) por SOS2 tiene como resultado la compartimentalización del exceso de Na^+ (Mahajan *et al.*, 2008) siendo entonces esta ruta de gran importancia en el establecimiento de homeostasis celular (Kim *et al.*, 2007). La expresión del gen *MdSOS2L1*, bajo condiciones de salinidad, es aumentada por la aplicación de CaCl_2 , pues el calcio activa proteínas CBL (MdCBL1, MdCBL4 y MdCBL10) y éstas a su vez interactúan con *MdSOS2L1* (proteína quinasa del tipo CIPK) para dar como respuesta una disminución del estrés oxidativo por ROS, incrementando el contenido de procianidina y mediante el mantenimiento de homeostasis de iones (Hu *et al.*, 2016).

La sobreexpresión del gen que codifica para la proteína CML (dependiente de Ca^{2+} del tipo CaM), en plantas de tomate silvestre (*Solanum habrochaites*) bajo condiciones de estrés, tiene como efecto el incremento de la tolerancia, pues mejora la integridad de las

membranas, reduce la fotooxidación de la clorofila y la acumulación de ROS, incrementa la actividad de enzimas antioxidantes, mejora el intercambio de gases y mantiene las relaciones de agua en la planta. En específico, plantas crecidas en un medio salino muestran un mayor contenido de prolina en comparación con las crecidas en un medio normal y aquellas con la sobreexpresión del gen no mostraron contenidos tan elevados como aquellas plantas silvestres (Munir *et al.*, 2016).

El uso eficiente del agua es un mecanismo que ayuda a las plantas a tolerar condiciones de salinidad, es sabido que el ABA ocasiona una elevación de Ca^{2+} citosólico en las células guarda, el cual funciona como segundo mensajero, y con ello propicia el cierre de estomas y una disminución en el proceso fotosintético (Reyes *et al.*, 2013).

7.2. El Ca^{2+} en procesos de regulación iónica

Bajo condiciones de niveles altos de Na extracelular, el Na^+ bloquea el rectificador externo de K^+ (KOR) y activa canales de cationes no selectivos independientes de voltaje (VI-NSCCs) (permiten la entrada de cationes como Na^+ y NH_4^+). El Ca^{2+} por su parte, bloquea el KOR (lo que previene la pérdida de K^+ de la célula), bloquea los VI-NSCCs y los DA-NSCCs, evitando de esta manera la entrada de Na^+ a la célula y previniendo el eflujo de K^+ (Demidchik y Maathuis, 2007).

Los NSCCs, VI-NSCCs, están también involucrados en la entrada de Ca^{2+} a la célula, pero su función no es la de incrementar en gran manera su concentración en citosol, más bien permite la elevación inicial para posteriormente estimular los canales de calcio activados por hiperpolarización (HACaCs) que se encargan del incremento fuerte de Ca^{2+} en citosol, aunque no se puede anular la posibilidad de que la activación de los NSCCs para mediar la entrada de Ca^{2+} y activar la ruta de señalización, puede propiciar la entrada de Na^+ (Demidchik y Maathuis, 2007). Lo anterior nos lleva a que el efecto del calcio en los procesos de regulación de iones está relacionado con su función como segundo mensajero.

8. Funciones del silicio en la tolerancia a la salinidad

El pepino es una especie que acumula silicio en las raíces en mayor grado que otras dicotiledóneas, llegando a acumular el 21% del Si en este órgano y el 71% en la punta

de hojas viejas, siendo su concentración en hojas entre 1.8 y 2.4% y el sitio preferencial de acumulación (más del 90%), es la pared celular ([Wiese et al., 2007](#)).

Los efectos benéficos del silicio (Si) se deben a su acumulación en tejidos vegetales ([Carneiro et al., 2010](#); [Ma y Yamaji, 2015](#)). La absorción de Si es influenciada principalmente por el potencial de agua y la disponibilidad del Si en el suelo, siendo éste el primer obstáculo, pues el silicio aunque está presente en los suelos en altas concentraciones, sólo puede ser absorbido de la solución del suelo como ácido silícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ ([Sahebi et al., 2015](#)). Esta forma se puede encontrar en pH de 5 a 6 ([Haynes, 2014](#)). Por tanto, rangos de pH ácido en el suelo, incrementan la solubilidad de Si y a su vez se incrementa su absorción y acumulación en el tejido ([Keeping et al., 2015](#)). Bajo condiciones de sodicidad de suelo el pH es alcalino, por tanto la disponibilidad de Si es muy baja.

El papel del Si en el metabolismo de la planta aún tiene muchas interrogantes, pues no hay evidencia de que forme parte de un metabolito o constituyente molecular esencial en la planta, pero al interactuar en funciones que ayudan a sobrellevar el estrés como barrera física y como regulador metabólico o fisiológico lo hace un elemento de interés ([Yin et al., 2013](#)). Por lo anterior, ha sido clasificado como un elemento benéfico y no como esencial, siendo su respuesta benéfica en el rendimiento demostrada en plantas acumuladoras de Si ([Haynes, 2014](#); [Pontigo et al., 2015](#)). Pues los efectos benéficos de este elemento se han encontrado en plantas que tienen capacidades acumulativas de Si elevadas ([Yamaji et al., 2012](#)). Tales diferencias en la capacidad de acumular Si en el tejido está dado por la densidad de transportadores de Si encargados de transportarlo de la solución externa a células corticales y la presencia o ausencia de aquellos transportadores encargados de transportar Si de las células corticales al xilema ([Ma y Yamaji, 2006](#)). Entonces, la mayoría de las plantas no pueden beneficiarse con Si, debido a la falta de un sistema de transporte eficiente ([Ma y Yamaji, 2015](#)).

[Savvas y Ntatsi \(2015\)](#) mencionan que los mecanismos en los que se involucra Si para sobrellevar el estrés abiótico en plantas son:

- ❖ Cambios anatómicos debido a la deposición de fitolitos que proveen de rigidez a la membrana, mantiene hojas erectas y modula la entrada de agua y nutrientes.
- ❖ Mejora el sistema antioxidante.

- ❖ Acompleja y/o co-precipita metales tóxicos tanto en suelo como en la planta.
- ❖ Modula la expresión de genes y participa en procesos de señalización a través de fitohormonas.

Por su parte [Luyckx et al. \(2017\)](#) clasifican los efectos benéficos del Si para sobrellevar condiciones de estrés en dos procesos principales: a) la deposición de SiO₂ en el tejido vegetal, con lo que se incrementa la protección física y mecánica; y b) respuestas bioquímicas que tienen la capacidad de desencadenar cambios metabólicos.

El principal mecanismo que involucra al Si en la reducción de acumulación de elementos nocivos es el mantenimiento de la permeabilidad de la membrana plasmática, manteniendo la selectividad de membrana para el influjo y eflujo de iones, lo cual se logra mediante el favorecimiento del Si en la actividad de enzimas antioxidantes ([Savvas y Ntatsi, 2015](#)). Tal como se ha propuesto para el cultivo de pepino bajo estrés salino, donde la adición de Si (1 mM) al medio incrementa la actividad de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), guaiacol peroxidasa (GPX), ascorbato peroxidasa (APX) y glutatión reductasa (GR), y a su vez disminuye el nivel de pérdida electrolítica (ELP), la peroxidación de lípidos (LPO) y la concentración de H₂O₂, todo ello decanta en la disminución de la permeabilidad de la membrana plasmática y de la peroxidación de lípidos de membrana, manteniendo la integridad y funcionalidad de membrana ([Zhu et al., 2004](#)). [Khoshgoftarmanesh et al. \(2014\)](#) afirman lo anterior y añaden que en el cultivo de pepino el estrés por la salinidad puede ser sobrellevado por la adición de Si, mediante el incremento de la actividad de enzimas antioxidantes, como catalasa (CAT), GPX y APX. La implicación del Si en el sistema enzimático antioxidante durante el estrés salino, también ha sido encontrado en plantas de chile ([Manivannan et al., 2016](#)).

Uno de los efectos benéficos del silicio en cultivos bajo estrés osmótico es el incremento en la absorción de agua, tal como se ha reportado en cultivares de pepino ([Zhu et al., 2015](#)) y sorgo ([Liu et al., 2014](#)). [Sahebi et al. \(2015\)](#) mencionan que el Si propicia la expansión de la pared celular, por ende hay un agrandamiento celular que permite mantener una mayor cantidad de agua. También ha sido reportado que el mejoramiento de la membrana celular por la adición de Si disminuye la absorción de Ca²⁺ por la ruta transcelular, ruta mayormente utilizada por dicotiledóneas ([Mehrabanjoubani et al., 2015](#)). Por su parte [Shi et al. \(2013\)](#), atribuyen el efecto del silicio de sobrellevar el

problema de estrés salino a la disminución de la absorción de sales. El silicio puede mitigar el efecto adverso de salinidad mediante la prevención de la absorción de Na^+ y/o su transporte de las raíces al tallo (Zhu y Gong, 2014) y a hojas (Yin *et al.*, 2013; Kafi y Rahimi, 2011); y a su vez incrementa el contenido de K en tejido (Xu *et al.*, 2015; Hellal *et al.*, 2012; Kafi y Rahimi, 2011). Otra de sus funciones para sobrellevar este problema es que incrementa la actividad enzimática antioxidante, como se ha demostrado en pepino (Zhu *et al.*, 2004).

Se ha reportado que el Si incrementa la tasa transpirativa (Manivannan *et al.*, 2016). Aunque esta función aún es contradictoria en diferentes investigaciones, por lo que Coskun *et al.* (2016) mencionan que las plantas difieren en sus estrategias para mantenerse hidratadas en condiciones de estrés, por lo que el efecto del Si en la transpiración es dependiente de la especie vegetal y de las condiciones medioambientales en la que se establece el estudio.

También, bajo estrés por NaCl, incrementa la tasa fotosintética (Gengmao *et al.*, 2015; Manivannan *et al.*, 2016) al proteger a los cloroplastos (Gengmao *et al.*, 2015), posiblemente mediante la supresión del estrés oxidativo (Hashemi *et al.*, 2010).

El efecto del Si ha sido estudiado ampliamente en monocotiledóneas bajo condiciones de estrés salino; en cebada se ha encontrado que la absorción y transporte de Na^+ hacia el tallo desde la raíz, es de gran manera inhibido al añadir silicio, además, se aumenta la concentración de K^+ en tallos y raíces, y en menor grado también se aumenta la absorción de Ca^{2+} , lo que facilita al cultivo tolerar el problema por sales (Liang, 1999).

Las dicotiledóneas en su mayoría no tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de Si (Sahebi *et al.*, 2015).

En plantas de haba (*Vicia faba*), al ser sometida a una salinidad alta (100 mM NaCl) se ha observado incremento en la concentración de Na^+ en el apoplasto de la hoja, lo cual se ha correlacionado con la disminución del crecimiento de tallo; tales efectos se ven disminuidos con la adición de Si, siendo el efecto de concentración en apoplasto similar con respecto a Cl^- , de igual manera, la concentración de Na^+ se ve disminuida en el simplasto en el tejido vegetal completo de hojas (Shahzad *et al.*, 2013).

Por su parte, Stamatakis *et al.* (2003) encontraron que al inducir salinidad con NaCl (4 dS m^{-1}) en la solución nutritiva en un cultivo de tomate en sistema hidropónico y a su vez

suministrar Si, la translocación de Na^+ y Cl^- a las hojas y de Na^+ al fruto es suprimida de manera significativa en comparación con aquellas no tratadas con Si, lo anterior tuvo efecto en el rendimiento, pues en los tratamientos con Si, a pesar de una condición salina, no se redujo el rendimiento.

En plántulas de pepino sometidas a estrés osmótico se presenta como principal efecto la reducción en crecimiento, el cual se ve mejorado con la aplicación de silicio, esto mediante la reducción de CO_2 intracelular de la hoja (disminución de daño al tejido) y el incremento de la tasa fotosintética (Hattori *et al.*, 2008). Por su parte, Qiongqiu *et al.* (2006) mencionan que la aplicación exógena de Si a un cultivo de pepino bajo estrés salino protege a la mitocondria de la peroxidación de lípidos y mantiene la integridad de la membrana propiciando el incremento de la tasa respiratoria. Wang *et al.* (2015) encontraron que la aplicación de Si incrementa la tolerancia del cultivo de pepino a la salinidad mediante el aumento del balance de agua (incrementando la conductancia hidráulica en raíz), disminuyendo el contenido de Na^+ en hojas e incrementando la acumulación de poliamina.

En un estudio en calabacita italiana tipo Zucchini en un sistema hidropónico, donde se evaluó una concentración alta y una baja de salinidad (0.8 y 35 mM NaCl) y una alta y una baja de silicio (0.1 y 1.0 mM Si), se concluyó que los efectos negativos producidos por la salinidad (crecimiento y rendimiento) lograron ser mitigados con la adición de Si (Savvas *et al.*, 2009).

Aplicaciones diarias de silicio como silicato de potasio (K_2SiO_3) en la solución nutritiva a la raíz y de manera foliar, no tuvieron efecto en el crecimiento y en los parámetros de calidad de fruto de chile, únicamente hubo una mayor firmeza y grosor de la cutícula del fruto (Jayawardana *et al.*, 2014).

La acumulación de prolina en plantas bajo cierta condición de estrés ha sido bien documentada en sorgo (Yin *et al.*, 2013), trigo (Pei *et al.*, 2010) y soya (Lee *et al.*, 2010), en los cuáles se ha encontrado también que la adición de Si disminuye esta acumulación y consigo muestra un efecto positivo en variables tanto fisiológicas como de crecimiento. Entendiéndose entonces la acumulación de prolina como síntoma de daño y la disminución de la acumulación de este osmolito, por la adición de Si, como un alivio del daño por estrés (Pei *et al.*, 2010).

Al crecer un cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en suelos con salinidad creciente (2.84, 6.03 y 8.97 dS m⁻¹) y aplicarle soluciones foliares de Si, de igual manera de forma creciente (0, 250, 500 y 1000 ppm SiO₂, diatomita) se obtuvieron incrementos en clorofila, caroteno, rendimiento y número de semillas por planta, en todas las condiciones de salinidad, siendo de mayor impacto la aplicación de 1000 ppm SiO₂ (Hellal *et al.*, 2012). El rápido crecimiento de la población que demanda alimento y la creciente condición de salinidad que afecta el crecimiento y desarrollo de los cultivos y decanta en una disminución considerable de la productividad de los mismos, requiere investigación que permita implementar prácticas que ayuden a aminorar el efecto negativo de las sales, donde el Si actualmente es el elemento de interés (Coskun *et al.*, 2016). Por lo anterior mencionado Savvas y Ntatsi (2015) proponen la adición de Si a los cultivos irrigados con aguas marginales, para evitar síntomas de salinidad.

En contraste a lo anterior mencionado, también ha sido reportado que las aplicaciones de Si pueden no tener ningún efecto (Matlou, 2006), tener efectos negativos (Parra-Terraza *et al.*, 2004; Jana y Ryong 2014); diferir en efecto entre cultivares (Wijaya, 2016) y a su vez diferir en su efecto de acuerdo a la forma de aplicación, siendo su aplicación al suelo o directo a la raíz la forma más efectiva en comparación con la aplicación vía foliar (Savvas y Ntatsi 2015; Haynes, 2014; Guével *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2005). Jana y Ryong (2014) después de realizar una amplia revisión del efecto del Si en cultivos hortícolas concluyen que es primordial saber cuáles son aquellos cultivos acumuladores y que sean éstos los estudiados. También es importante reiterar que en la mayor parte de los trabajos de investigación no se toma en cuenta el efecto del ion acompañante, pudiendo entonces enmascarar el posible efecto del silicio (Parra-Terraza *et al.*, 2004). La fuente de Si mayormente utilizada es el silicato de potasio, el cual es soluble en agua, pero para los trabajos de esta índole pudiera no ser la mejor fuente, pues Ashraf *et al.* (2015) encontraron que aplicaciones de Si al suelo por sí solas no muestran efectos tan marcados como el combinar la aplicación de Si con K en la disminución de la absorción y el transporte de Na⁺, en el aumento de la absorción y transporte de K⁺, en el incremento del contenido relativo de agua y del índice de estabilidad de membrana. Investigaciones recientes afirman lo anterior pues, así como el Si tiene efecto en la actividad enzimática antioxidante, el K por sí solo tiene efecto significativo también en la regulación de las

enzimas SOD, CAT, APX, GR, GPX de plantas sometidas a estrés salino ([Ahanger y Agarwal, 2017](#)).

9. Fertilización foliar

La respuesta de los cultivos a la fertilización foliar es diferente para cada especie; particularmente se obtienen respuestas positivas del suministro foliar en el rendimiento y en la calidad de frutos al prevenir deficiencias, cuando los nutrimentos se encuentran poco disponibles en el suelo ([Trejo-Téllez et al., 2003](#)).

La hoja es fisiológicamente la principal fábrica de fotosintatos, ahí radica la importancia de poner al alcance de la fábrica, los nutrimentos necesarios que se incorporan de inmediato a los metabolitos al ser asperjados al follaje ([Trinidad y Aguilar, 1999](#)). Por ello, las aplicaciones al follaje proporcionan una utilización de los nutrimentos en un lapso de tiempo menor que aplicados al suelo, pues en el follaje los nutrimentos penetran la cutícula de la hoja o el estoma y luego entran a la célula ([Fageria et al., 2009](#)).

10. El cultivo de pepino

En México, es un cultivo importante por el consumo y producción, que contribuye en la generación de divisas y empleos, pues es un producto de exportación, debido a que es una hortaliza de alto consumo alrededor del mundo ([Hernández-González et al., 2014](#)).

El cultivo de pepino es originario de las regiones tropicales del sur de Asia, siendo cultivado en la India desde hace más de 3000 años. De la India se extiende a Grecia, y de ahí a Roma, y posteriormente es introducido a China. Esta cucurbitácea fue introducida por los romanos a otras partes de Europa. Aparecen registros de esta especie en Francia en el siglo IX, e Inglaterra en el siglo XIV, en Norteamérica en el siglo XVI, ya que Cristóbal Colón llevó semillas a América, el primer híbrido apareció en 1872 ([Jiménez, 2011](#)).

Se trata de una hortaliza perteneciente a la familia de las cucurbitáceas, cuyo nombre científico es *Cucumis sativus* L. Es una especie fanerógama por reproducirse por medio de semillas, del grupo de las angiospermas ([Reche, 2011](#)).

Los frutos de pepino tipo francés puede alcanzar longitud, de los 22 a los 25 cm ([Camacho, 2014](#)).

Se puede considerar que la temperatura mínima de germinación de semillas de pepino está cercana a los 12 °C y la óptima sobre los 30 °C. Por encima de los 35 °C, la germinación es inhibida. Respecto a la temperatura del aire, la óptima se sitúa alrededor de los 18 y 20 °C durante la noche y de 20 a 25 °C durante el día (FAO, 2002).

La humedad relativa óptima durante el día es de 60 a 70% y durante la noche de 70 a 90% (Camacho, 2014).

Este cultivo crece, florece y fructifica con normalidad hasta en días cortos (con menos de 12 horas de luz), aunque a mayor cantidad de radiación solar, mayor es la producción (Arias, 2007).

Literatura citada

- Aceves NE. 2011. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Segunda edición. Biblioteca básica de agricultura. Publicado por Colegio de Postgraduados. p. 2.
- Ahanger MA, Agarwal RM. 2017. Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum aestivum* L) as influenced by potassium supplementation. *Plant Physiol. Biochem.* 19: 449-460.
- Alberts B, Lewis J, Raff M, Roberts K, Walter P. 2002. Cell Communication. *In: Molecular Biology of the Cell.* 4th edition. New York: Garland Science. pp. 2120-2302.
- Ali MH. 2011. Management of Salt-Affected Soils *In: Practices of Irrigation and On-farm Water Management* Vol. 2. Ali MH (ed.). Springer. NY, USA. pp. 271-325. Doi: 10.1007/978-1-4419-7637-6_8
- Arias S. 2007. Manual de producción: producción de pepino. USAID- Desarrollo Económico Rural. Honduras. 31 p.
- Arzani A, Ashraf M. 2016. Smart Engineering of Genetic Resources for Enhanced Salinity Tolerance in Crop Plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 35(3): 146-189. Doi: 10.1080/07352689.2016.1245056
- Ashraf M, Abid M, Teixeira da Silva JA, Shahzad SM, Hussain A, Imtiaz M. 2015. Silicon and potassium nutrition enhances salt adaptation capability of sunflower by improving plant water status and membrane stability. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 46(8): 991-1005.
- Ashraf M y Foolad MR. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Exp. Bot.* 59: 206-216.
- Bauer P, Elbaum R, Weiss IM. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: Transport, structure and function. *Plant Sci.* 180: 746-756.
- Berthomieu P, Conéjéro G, Nublat A, Brackenbury WJ, Lubert C, Savio C, Uozumi N, Oiki S, Yamada K, Cellier F, Gosti F, Somonneau T, Essah PA, Tester M, Véry AA, Sentenac H, Casse F. 2003. Functional analysis of *AtHKT1* in *Arabidopsis* shows that Na⁺ recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance. *EMBO J.* 22(9): 2004-2014.

- Bezborodov GA, Shadmanov DK, Mirhashimov RT, Yuldashev T, Qureshid AS, Noble AD, Qadir M. 2010. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 138: 95-102. Doi: 10.1016/j.agee.2010.04.005
- Blaskó L. 2011. Salinity, Physical Effects on Soils. *In: Encyclopedia of Agrophysics.* Glinski J, Horabik J, Lipiec J (eds.). *Encyclopedia of Earth Sciences Series.* pp. 723-725.
- Cabello JV, Lodeyro AF, Zurbriggen MD. 2014. Novel perspectives for the engineering of abiotic stress tolerance in plants. *Curr. Opin. Biotech.* 26: 62-70. Doi: 10.1016/j.copbio.2013.09.011
- Camacho FF. 2014. El cultivo del pepino bajo invernadero. Disponible en línea en: <http://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/02430.pdf>. Consultado: julio 04, 2017.
- Carneiro JMT, Oliveira LA, Rossete ALRM, Abreu CH, Bendassolli JA. 2010. Accumulation and translocation of silicon in rice and bean plants using the ³⁰Si stable isotope. *J. Plant Nutr.* 33: 1374-1383. Doi: 10.1080/01904167.2010.484097
- Chinnusamy V, Jagendorf A, Zhu JK. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Sci.* 45: 437-48.
- Chondraki S, Tzerakis C, Tzortzakis N. 2012. Influence of sodium chloride and calcium foliar spray on hydroponically grown parsley in nutrient film technique system, *J. Plant Nutr.* 35(10): 1457-1467. Doi: 10.1080/01904167.2012.689906
- Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ. 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Front. Plant Sci.* 7: 1072. Doi: 10.3389/fpls.2016.01072
- Dabuxilatu, Ikeda, M. 2005. Distribution of K, Na and Cl in Root and Leaf Cells of Soybean and Cucumber Plants Grown under Salinity Conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51(7): 1053-1057. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00144.x
- Daliakopoulos IN, Tsanis IK, Koutroulis A, Kourgialas NN, Varouchakis AE, Karatzas GP, Ritsema CJ. 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Sci. Total Environ.* 573: 727-739.
- Dar MI, Naikoo MI, Rehman F, Naushin F y Khan FA. 2016. Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development. *In: Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies.* Iqbal N, Nazar R, Khan NA (eds.). Springer Indiapp. pp. 155-166. Doi: 10.1007/978-81-322-2616-1
- David A, Yadav S, Bhatla SC. 2010. Sodium chloride stress induces nitric oxid accumulation in root tips and oil body surface accompanying slower oleosin degradation in sunflower seedlings. *Physiol. Plant.* 140(4): 342-354. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2010.01408.x
- Deinlein U, Stephan AB, Horie T, Luo W, Xu G, Schroeder JI. 2014. Plant salt-tolerance mechanisms. *Trends Plant Sci.* 19(6): 371-379. Doi: 10.1016/j.tplants.2014.02.001
- Demidchik V, Maathuis FJM. 2007. Physiological roles of nonselective cation channels in plants: from salt stress to signalling and development. *New Phytol.* 175(3): 387-404. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02128.x

- Economakis C, Daskalaki A. 2003. Effect of Potassium Nutrition on Yield and Quality of Tomato Plants Grown with Nutrient Film Technique under Sodium Chloride Saline Conditions. *Acta Hort.* 609: 337-339. Doi: 10.17660/ActaHortic.2003.609.50
- Fageria NK, Barbosa FMP, Moreira A, Guimarães CM. 2009. Foliar Fertilization of Crop Plants. *J. Plant Nutr.* 32(6): 1044-1064. Doi: 10.1080/01904160902872826
- FAO. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Roma. pp. 231-232.
- FAO. 2012. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Feuchter AFR. 2000. Transferencia de tecnología para el rescate de suelos mediante la integración ganadera Recuperación de suelos salinos agrícolas, mediante el establecimiento de praderas bajo riego y cultivos alternativos Diez acciones propuestas de bioingeniería sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora.
- Foster KJ, Miklavcic SJ. 2013. Mathematical modelling of the uptake and transport of salt in plant roots. *J. Theor. Biol.* 336: 132-143. Doi: 10.1016/j.jtbi.2013.07.025
- Foster KJ, Miklavcic SJ. 2015. Toward a biophysical understanding of the salt stress response of individual plant cells. *J. Theor. Biol.* 385: 130-142. Doi: 10.1016/j.jtbi.2015.08.024
- García-Morales S, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Herrera-Cabrera EB. 2013. Transcription factors involved in molecular responses of plants to osmotic stress. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(2): 105-115.
- 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. *Sci. Rep.* 5: 12696. Doi: 10.1038/srep12696
- González LM, González CM, Ramírez R. 2002. Aspectos generales sobre la tolerancia a la salinidad en las plantas cultivadas. *Cultivos Tropicales* 23(2): 27-37.
- Guével MH, Menzies JG, Bélanger RR. 2007. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. *Eur. J. Plant Pathol.* 119: 429-436.
- Gupta B, Huang B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. *Int. J. Genomics* 2014: 1-18. Doi: 10.1155/2014/701596
- Gurmani AR, Bano A, Khan SU, Din J, Zhang JL. 2011. Alleviation of salt stress by seed treatment with abscisic acid (ABA), 6-benzylaminopurine (BA) and chlormequat chloride (CCC) optimizes ion and organic matter accumulation and increases yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Australian J. Crop Sci.* 5(10): 1278-1285.
- Han Y, Yin S, Huang L. 2015. Towards plant salinity tolerance-implications from ion transporters and biochemical regulation. *Plant Growth Regul.* 76: 13-23. Doi: 10.1007/s10725-014-9997-6

- Hashemi A, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 56: 244-253.
- Hashimoto K, Eckert C, Anschütz U, Scholz M, Held K, Waadt R, Reyer A, Hippler M, Becker D, Kudla J. 2012. Phosphorylation of calcineurin B-like (CBL) calcium sensor proteins by their CBL-interacting protein kinases (CIPKs) is required for full activity of CBL-CIPK complexes toward their target proteins. *J. Biol. Chem.* (11): 7956-7968. Doi: 10.1074/jbc.M111.279331
- Hattori T, Sonobe K, Inanaga S, An P, Morita S. 2008. Effects of Silicon on Photosynthesis of Young Cucumber Seedlings Under Osmotic Stress. *J. Plant Nutr.* 31(6): 1046-1058. Doi: 10.1080/01904160801928380
- Haynes RJ. 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177: 831-844.
- He L, Li B, Lu X, Yuan L, Yang Y, Yuan Y, Du J, Guo S. 2015. The effect of exogenous calcium on mitochondria, respiratory metabolism enzymes and ion transport in cucumber roots under hypoxia. *Sci. Rep.* 5: 11391. Doi: 10.1038/srep11391
- Hellal FA, Abdelhamid MT, Abo-Basha DM, Zewainy RM. 2012. Alleviation Of The Adverse Effects Of Soil Salinity Stress By Foliar Application Of Silicon On Faba bean (*Vicia faba* L.). *J. Appl. Sci. Res.* 8(8): 4428-4433.
- Hepler PK. 2005. Calcium: a central regulator of plant growth and development. *Plant Cell* 17: 2142-2155. Doi: 10.1105/tpc.105.032508
- Hernández-González Z, Sahagún-Castellanos J, Espinosa-Robles P, Colinas-León MT, Rodríguez-Pérez JE. 2014. Efecto del patrón en el rendimiento y tamaño de fruto en pepino injertado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(1): 41-47.
- Hojjatnooghi F, Mozafari V, Tajabadipour A, Hokmabadi H. 2014. Effects of salinity and calcium on the growth and chemical composition of pistachio seedlings. *J. Plant Nutr.* 37(6): 928-941. Doi: 10.1080/01904167.2014.888737
- Horie T, Horie R, Chan WY, Leung HY, Schroeder JI. 2006. Calcium regulation of sodium hypersensitivities of *sos3* and *athkt1* mutants. *Plant Cell Physiol.* 47(5): 622-633.
- Horie T, Karahara I, Katsuhara M. 2012. Salinity tolerance mechanisms in glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice* 5: 11. Doi: 10.1186/1939-8433-5-11
- Hu DG, Ma QJ, Sun CH, Sun MH, You CX, Hao YJ. 2016. Overexpression of MdSOS2L1, a CIPK protein kinase, increases the antioxidant metabolites to enhance salt tolerance in apple and tomato. *Physiol. Plantarum* 156: 201-214. Doi: 10.1111/ppl.12354
- INEGI. 2007. Superficie sin vegetación de las unidades de producción según su condición o característica por región ecológica, año censal 2007. Disponible en línea en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb271&s=est&c=32502>. Consultado: enero 18, 2017.
- Isayenkov SV. 2012. Physiological and Molecular Aspects of Salt Stress in Plants. *Cytol. Genet.* 46(5): 302-318. Doi: 10.3103/S0095452712050040

- Jana S, Ryong JB. 2014. Silicon: The most under-appreciated element in horticultural crops. *Trends Hortic. Res.* 4: 1-19.
- Jayakannan M, Bose J, Babourina O, Rengel Z, Shabala S. 2015. Salicylic acid in plant salinity stress signalling and tolerance. *Plant Growth Regul.* 76: 25-40. Doi: 10.1007/s10725-015-0028-z
- Jayawardana HAR, Weerahewa KHL, Saparamadu MDJS. 2014. Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of capsicum. *Trop. Agric. Res.* 26(1): 74-81.
- Jha D, Shirley N, Tester M, Roy SJ. 2010. Variation in salinity tolerance and shoot sodium accumulation in *Arabidopsis* ecotypes linked to differences in the natural expression levels of transporters involved in sodium transport. *Plant Cell Environ.* 33: 793-804. Doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.02105.x
- Jiménez BJL. 2011. Producción de hortalizas en ambientes protegidos, 2^{da} edición, Editorial Laserlogo, Culiacán Sinaloa, México. 165 p.
- Julkowska MM, Testerink C. 2015. Tuning plant signaling and growth to survive salt. *Trends Plant Sci.* 20(9): 586-594. Doi: 10.1016/j.tplants.2015.06.008
- Kafi M, Rahimi Z. 2011. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Soil Sci. Plant Nutr.* 57: 341-347.
- Kaneko T, Horie T, Nakahara Y, Tsuji N, Shibasaki M, Katsuhara M. 2015. Dynamic regulation of the root hydraulic conductivity of barley plants in response to salinity/osmotic stress. *Plant Cell Physiol.* 56(5): 875-882. Doi: 10.1093/pcp/pcv013
- Kanmani E, Sivakumar R, Ravichandran V, Senthil A, Boominathan P. 2016. Effect of Plant Growth Regulators on Seed Germination Associated Traits under Salinity Stress in Rice. *Madras Agric. J.* 103(1-3): 1-4.
- Kchaou H, Larbi A, Gargouri K, Chaieb M, Morales F, Msallem M. 2010. Assessment of tolerance to NaCl salinity of five olive cultivars, based on growth characteristics and Na⁺ and Cl⁻ exclusion mechanisms. *Sci. Hortic.* 124: 306-315. Doi: 10.1016/j.scienta.2010.01.007
- Keeping MG, Rutherford RS, Sewpersad C, Miles N. 2015. Provision of nitrogen as ammonium rather than nitrate increases silicon uptake in sugarcane. *AoB Plants* 7: plu080
- Khoshgoftarmansh AH, Khodarahmi S, Haghighi M. 2014. Effect of silicon nutrition on lipid peroxidation and antioxidant response of cucumber plants exposed to salinity stress. *Arch. Agron. Soil Sci.* 60(5): 639-653.
- Kim BG, Waadt R, Cheong YH, Pandey GK, Dominguez-Solis JR, Schültke S, Lee SC, Kudla J, Luan S. 2007. The calcium sensor CBL10 mediates salt tolerance by regulating ion homeostasis in *Arabidopsis*. *Plant J.* 52: 473-484.
- Lee SK, Sohn EY, Hamayun M, Yoon JY, Lee IJ. 2010. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforest Syst.* 80: 333-340.

- Liang Y. 1999. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant Soil* 209: 217-224. Doi: 10.1023/A:1004526604913
- Liang YC, Sun WC, Si J, Römheld V. 2005. Effects of foliar and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathol.* 54: 678-685.
- Liu P, Yin L, Deng X, Wang S, Tanaka K, Zhang S. 2014. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *J. Exp. Bot.* 65: 4747-4756. Doi: 10.1093/jxb/eru220
- Luyckx M, Hausman JF, Lutts S, Guerriero G. 2017. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Front. Plant Sci.* 8: 411. Doi: 10.3389/fpls.2017.00411
- Ma JF, Yamaji N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science* 11(8): 392-397. Doi: 10.1016/j.tplants.2006.06.007
- Ma JF, Yamaji N. 2015. A cooperated system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science* 20(7): 1-8. Doi: 10.1016/j.tplants.2015.04.007
- Mahajan S, Pandey GK, Tuteja N. 2008. Calcium- and salt-stress signaling in plants: Shedding light on SOS pathway. *Arch. Biochem. Biophys.* 471(2): 146-158. Doi: 10.1016/j.abb.2008.01.010
- Manivannan A, Soundararajan P, Muneer S, Ko CH, Jeong BR. 2016. Silicon mitigates salinity stress by regulating the physiology, antioxidant enzyme activities, and protein expression in *Capsicum annuum* 'Bugwang'. *BioMed Res. Int.* 2016: 3076357.
- Mateo-Sagasta J, Burke J. 2010. Agriculture and water quality interactions: a global overview. FAO. SOLAW Background Thematic Report - TR08.
- Matlou MC. 2006. A comparison of soil and foliar applied silicon on nutrient availability and plant growth and soil-applied silicon on phosphorus availability. MSc thesis. University of KwaZulu-Natal. South Africa. 96 p.
- Mehrabanjoubani P, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR, Aghdasi M. 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere* 25: 192-201.
- Mittler R, Blumwald E. 2010. Genetic engineering for modern agriculture: challenges and perspectives. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61: 443-462. Doi: 10.1146/annurev-arplant-042809-112116
- Mittler R. 2006. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends Plant Sci.* 11 (1): 15-19. Doi: 10.1016/j.tplants.2005.11.002
- Muchate NS, Nikalje GC, Rajurkar NS, Suprasanna P, Nikam TD. 2016. Plant salt stress: adaptive responses, tolerance mechanism and bioengineering for salt tolerance. *Bot. Rev.* 82: 371-406. Doi: 10.1007/s12229-016-9173-y

- Munir S, Liu H, Xing Y, Hussain S, Ouyang B, Zhang Y, Li H, Ye Z. 2016. Overexpression of calmodulin like (*ShCML44*) stress-responsive gene from *Solanum habrochaites* enhances tolerance to multiple abiotic stresses. *Sci. Rep.* 6: 31772. Doi: 10.1038/srep31772
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59: 651-681. Doi: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
- Munns R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell Environ.* 25: 239-250. Doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x
- Negrão S, Schmöckel SM, Tester M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Ann. Bot.* 119: 1-11. Doi: 10.1093/aob/mcw191
- Nxele X, Kleinb A, Ndimba BK. 2017. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *S. Afr. J. Bot.* 108: 261-266. Doi: 10.1016/j.sajb.2016.11.003
- Palacios-Vélez OL, Pedraza-Oropeza FJA. 2015. Drainage and salinity problems in the Mexican irrigation districts: an overview 1962-2013. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6(6): 113-123.
- Park HJ, Kim WY, Yun DJ. 2016. A new insight of salt stress signaling in plant. *Mol. Cells.* 39: 447-459. Doi: 10.14348/molcells.2016.0083
- Parra-Terraza S, Baca-Castillo GA, Carrillo-González R, Kohashi-Shibata J, Martínez-Garza A, Trejo-López C. 2004. Silicio y potencial osmótico de la solución nutritiva en el crecimiento de pepino. *Terra Latin.* 22(4): 467-473.
- Partida-Ruvalcaba L, Velázquez AT, Acosta VB, Angulo GC. 2006. Extractos vegetales y su efecto en la conductividad eléctrica de dos suelos salinos y de soluciones. *Terra Latin.* 24(1): 83-89.
- Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou WJ. 2010. Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. *J. Plant Growth Regul.* 29: 106-115.
- Peng Z, He S, Sun J, Pan Z, Gong W, Lu Y, Du X. 2016. Na⁺ compartmentalization related to salinity stress tolerance in upland cotton (*Gossypium hirsutum*) seedlings. *Sci. Rep.* 6: 34548. Doi: 10.1038/srep34548
- Pereira A. 2016. Plant abiotic stress challenges from the changing environment. *Front. Plant Sci.* 7: 1123. Doi: 10.3389/fpls.2016.01123
- Pla SI. 2014. Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland irrigated conditions. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2: 50-63. Doi: 10.1016/S2095-6339(15)30058-7
- Pontigo S, Ribera A, Gianfreda L, Mora MA, Nikolic M, Cartes P. 2015. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. *Planta* 242: 23-37. Doi: 10.1007/s00425-015-2333-1
- Pulido ML, González MJ, Wiegand CL, Infante RJ, Delgado JM. 2010. Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. *Terra Latin.* 8(1): 15-26.
- Qadir M, Oster JD. 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 323: 1-19.

- Qadir M, Oster JD, Schubert S, Noble AD, Sahrawat KL. 2007. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Adv. Agron.* 96: 197-247. Doi: 10.1016/S0065-2113(07)96006-X
- Qadir M, Quill rou E, Nangia N, Murtaza G, Singh M, Thomas RJ, Drechsel P, Noble AD. 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum. Naciones Unidas.* Doi: 10.1111/1477-8947.12054
- Qiongqiu Q, Wenshan Z, Yong H. 2006. Protection of exogenous silicon and CoQ10 on mitochondria in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots under salt stress. *Zhongguo nongye Kexue* 39(6): 1208-1214.
- Ranty B, Aldon D, Cotelte V, Galaud JP, Thuleau P, Mazars Ch. 2016. Calcium sensors as key hubs in plant responses to biotic and abiotic stresses. *Front. Plant Sci.* 7: 327. Doi: 10.3389/fpls.2016.00327
- Reche MJ. 2011. Cultivo del pepino en invernadero. Madrid, España. 19 p.
- Reyes AJ,  lvarez-Herrera JG, Fern andez JP. 2013. Papel del calcio en la apertura y el cierre estomático y sus interacciones con solutos compatibles. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 7(1): 111-122.
- Rosegrant MW, Ringler C, Zhu T. 2009. Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34: 205-222. Doi: 10.1146/annurev.environ.030308.090351
- Roy SJ, Negrão S, Tester M. 2014. Salt resistant crop plants. *Curr. Opinion Biotechnol.* 26: 115-124. Doi: 10.1016/j.copbio.2013.12.004
- Ruíz CE, Aldaco NRA, Montemayor TJA, Fortis HM, Olague RJ, Villagómez GJC. 2007. Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *T c. Pecu. M x.* 45(1): 19-24.
- Sahebi M, Hanafi MM, Siti Nor AA, Rafii MY, Azizi P, Tengoua FF, Mayzaitul AJN, Shabanimofrad M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Res. Int.* 2015: 1-16. Doi: 10.1155/2015/396010
- Sanyal SK, Pandey A, Pandey GK. 2015. The CBL–CIPK signaling module in plants: a mechanistic perspective. *Physiol. Plantarum* 155: 89-108. Doi: 10.1111/ppl.12344
- Savvas D, Giotis D, Chatzieustratiouc E, Bakeab M, Patakioutas G. 2009. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environ. Exp. Bot.* 65(1): 11-17. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2008.07.004
- Savvas D, Meletiou G, Margariti S, Tsirogiannis I. 2005. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *HortScience* 40(30): 802-807.
- Savvas D, Ntatsi G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Sci. Hortic.* 196: 66-81. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.010
- Semarnat. 2016. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México.

- Semarnat, Colegio de Postgraduados. 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, Escala 1:250,000. Memoria Nacional 2001-2002. Semarnat, CP. México.
- Shabala S, Cuin TA. 2008. Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiol. Plantarum* 133(4): 651-669. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x
- Shahzad M, Zörb C, Geilfus C-M, Mühling KH. 2013. Apoplastic Na⁺ in *Vicia faba* Leaves Rises After Short-Term Salt Stress and Is Remedied by Silicon. *J. Agron. Crop Sci.* 199: 161-170. Doi: 10.1111/jac.12003
- Shi Y, Wang Y, Flowers TJ, Gong H. 2013. Silicon decrease chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. *J. Plant Physiol.* 170(9): 847-853. Doi: 10.1016/j.jplph.2013.01.018
- SIAP. 2017. Uso de riego en la superficie sembrada por entidad federativa 2016. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/opt/agricultura/tecnologia/Modalidad_hidrica.pdf. Consultado: junio 8, 2017.
- Sofo A, Scopa A, Nuzzaci M, Vitti A. 2015. Ascorbate Peroxidase and Catalase Activities and Their Genetic Regulation in Plants Subjected to Drought and Salinity Stresses. *Int. J. Mol. Sci.* 16: 13561-13578. Doi: 10.3390/ijms160613561
- Song WY, Zhang ZB, Shao HB, Guo XL, Cao HX, Zhao HB, Fu ZY, Hu XJ. 2008. Relationship between calcium decoding elements and plant abiotic-stress resistance. *Int. J. Biol. Sci.* 4(2): 116-125. Doi: 10.7150/ijbs.4.116
- Sonneveld C, de Kreij C. 1999. Response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to an unequal distribution of salts in the root environment. *Plant Soil* 209(1): 47-56. Doi: 10.1023/A:1004563102358
- Stamatakis A, Papadantonakis N, Savvas D. 2003. Effects of Silicon and Salinity on Fruit Yield and Quality of Tomato Grown Hydroponically. *Acta Hort.* 609: 141-147. Doi: 10.17660/ActaHortic.2003.609.18
- Tavakkoli E, Fatehi F, Coventry S, Rengasamy P, McDonald GK. 2011. Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on barley growth under salinity stress. *J. Exp. Bot.* 62(6): 2189-2203. Doi: 10.1093/jxb/erq422
- Trejo-Téllez LI, Rodríguez-Mendoza MN, Alcántar-González G, Vázquez-Alarcón A. 2003. Fertilización foliar específica para corregir deficiencias nutrimentales en tres tipos de suelo. *Terra Latin.* 21(3): 635-372.
- Trinidad SA, Aguilar MD. 1999. Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra Latin.* 17(3): 247-255.
- Tuteja N. 2009. Integrated calcium signaling in plants. *In: Signaling in Plants.* Baluška F, Mancuso S (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 29-49. Doi: 10.1007/978-3-540-89228-1
- Umali DL. 1993. Irrigation Induced Salinity: A Growing Problem for Development and the Environment. The World Bank. Technical paper No. 215. p. 21.
- Vysotskaya L, Hedley PE, Sharipova G, Veselov D, Kudoyarova G, Morris J, Jones HG. 2010. Effect of salinity on water relations of wild barley plants differing in salt tolerance. *AoB Plants* 2010: plq006. Doi: 10.1093/aobpla/plq006

- 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. *Front. Plant Sci.* 6: 759. Doi: 10.3389/fpls.2015.00759
- Wang XS, Han JG. 2007. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53: 278-285. Doi: 10.1111/j.17470765.2007.00135.x
- Wiese H, Nikolic M, Römheld V. 2007. Silicon in plant nutrition. *In: The apoplast of higher plants: compartment of storage.* Settelmacher B, Horst WJ (eds.). pp. 33-47.
- Wijaya KA. 2016. Effects of Si-Fertilizer Application through the Leaves on Yield and Sugar Content of Sugarcane Grown in Soil Containing Abundant N. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 9: 158-162.
- Xu CX, Ma YP, Liu YL. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *S. Afr. J. Bot.* 98: 26-36. Doi: 10.1016/j.sajb.2015.01.008
- Yamaguchi T, Blumwald E. 2005. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends Plant Sci.* 10(12): 615-620. Doi: 10.1016/j.tplants.2005.10.002
- Yamaguchi T, Hamamoto S, Uozumi N. 2013. Sodium transport system in plant cells. *Front. Plant Sci.* 4: 410. Doi: 10.3389/fpls.2013.00410
- Yamaji N, Chiba Y, Mitani-Ueno N, Ma JF. 2012. Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley. *Plant Physiol.* 160: 1491-1497. Doi: 10.1104/pp.112.204578
- Yin L, Wang S, Li W, Tanaka K, Oka M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol Plant.* 35: 3099-3107. Doi: 10.1007/s11738-013-1343-5
- Zhou J, Wang J, Li X, Xia XJ, Zhou YH, Shi K, Chen Z, Yu JQ. 2014. H₂O₂ mediates the crosstalk of brassinosteroid and abscisic acid in tomato responses to heat and oxidative stresses. *J. Exp. Bot.* 65(15): 4371-4383. Doi: 10.1093/jxb/eru217
- Zhu J, Bie Z, Huang Y, Han X. 2008. Effect of grafting on the growth and ion concentrations of cucumber seedlings under NaCl stress. *Soil Sci. Plant Nutr.* 54(6): 895-902. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2008.00306.x
- Zhu T, Deng X, Zhou X, Zhu L, Zou L, Li P, Zhang D, Lin H. 2016. Ethylene and hydrogen peroxide are involved in brassinosteroid induced salt tolerance in tomato. *Sci. Rep.* 6: 35392. Doi: 10.1038/srep35392
- Zhu YX, Xu XB, Hu YH, Han WH, Yin JL, Li HL, Gong HJ. 2015. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Rep.* 34: 1629-1646. Doi: 10.1007/s00299-015-1814-9
- Zhu Y, Gong H. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron. Sustain. Dev.* 34d: 455-472. Doi: 10.1007/s13593-013-0194-1
- Zhu Z, Wei G, Li G, Quian Q, Yu J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci.* 162: 527-533. Doi: 10.1016/j.plantsci.2004.04.020

CAPÍTULO I. SILICIO Y CALCIO EN LA TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN PEPINO EN CULTIVO HIDROPÓNICO

1.1. INTRODUCCIÓN

La salinidad es un tipo de estrés abiótico que reduce de manera significativa la producción y calidad de los cultivos agrícolas en grandes extensiones alrededor del mundo (Nxele *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2016).

De las 325.1 millones de hectáreas bajo irrigación a nivel mundial (FAO, 2016), alrededor de 34 millones presentan algún grado de salinidad (FAO, 2012; Mateo-Sagasta y Burke, 2010) y cada año se incrementa esta proporción entre 1 y 2% (Rizwan *et al.*, 2015).

En general, la acumulación de sodio y la salinización de los suelos se deben al uso de aguas de mala calidad (Pisinaras *et al.*, 2010). La agricultura es el sector que mayor demanda tiene de agua no salina (70%), agua que una vez utilizada para la irrigación, regresa a los cuerpos receptores con una calidad menor, pues el agua depositada en tales cuerpos receptores puede llevar una carga de sales hasta 50 veces mayor a la utilizada inicialmente (FAO, 2012; Rosegrant *et al.*, 2009). Siendo pues la agricultura una de las principales actividades que inducen la acumulación de sales tanto en suelos como en el agua (Mateo-Sagasta y Burke, 2010).

El uso de aguas salinas en la agricultura ha permitido reducir el desabasto que genera el desbalance provocado por la alta demanda y cada vez menor oferta de aguas adecuadas para la irrigación de cultivos (Jayakannan *et al.*, 2015; Bezborodov *et al.*, 2010). Lo anterior es inevitable pues la agricultura de regadío crece en conjunto con el incremento de la población (Qadir y Oster, 2004), pues la tendencia actual es la de incrementar los rendimientos en áreas cada vez más reducidas (Pereira, 2016).

Por lo anterior mencionado, el uso de aguas de baja calidad para cultivos en suelo o en sistema hidropónico se está volviendo cada vez más frecuente (Pereira, 2016; Arzani y Ashraf, 2016), trayendo consigo una serie de problemas que se refleja como síntomas de estrés por sales y perjudicando la productividad de los cultivos.

El estrés por sales afecta el crecimiento de las plantas en tres formas: 1) reduce el potencial de agua del suelo, provocando un estrés osmótico; 2) ocasiona un desbalance iónico en las células, especialmente concentraciones bajas de K^+ , Ca^{2+} y NO_3^- , y 3) causa toxicidad de iones Na^+ y Cl^- (Tavakkoli *et al.*, 2011). Además de desencadenar efectos de tipo oxidativo (Han *et al.*, 2015; Nxele *et al.*, 2017).

Existen elementos que ayudan a mitigar los efectos negativos causados por altas concentraciones de sales, dentro de los cuales encontramos al nitrógeno (N), calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+) y silicio (Si) entre los más estudiados.

El Ca^{2+} participa en la adaptación de las plantas a las sales al reducir los efectos tóxicos del NaCl facilitando una mayor absorción de K^+ respecto al Na^+ (Parida y Das, 2005; Dabuxilatu y Ikeda, 2005a). Asimismo, participa en rutas de señalización (SOS) que permiten establecer la homeostasis celular, al excluir el Na^+ y mantener el K^+ en citosol (Deinlein *et al.*, 2014). El Ca^{2+} es un regulador de muchos procesos fisiológicos y bioquímicos en respuesta al estrés abiótico en las plantas (Bowler y Flurh, 2000). Además, se involucra en el sistema antioxidante en mitocondria disminuyendo los niveles de ROS (reactive oxygen species), también participa en la acumulación de enzimas involucradas en la glicolisis y en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (He *et al.*, 2015).

El silicio (Si) por su parte, ha mostrado tener efectos benéficos en diversas plantas, en especial aquellas que se encuentran sometidas a diferentes tipos de estrés abiótico o biótico (Trejo-Téllez *et al.*, 2012). Este elemento puede estar involucrado en actividades fisiológicas o metabólicas en la exposición de pepino a estrés salino (Zhu *et al.*, 2004). Además el silicio reduce el transporte de cloruro en la planta (Shi *et al.*, 2013), aumenta el uso eficiente del nitrógeno (Detmann *et al.*, 2012), da estabilidad a la ultra-estructura de cloroplastos aumentando la tasa fotosintética (Gengmao *et al.*, 2015), modula la expresión de genes y mantiene la permeabilidad de membranas (Savvas y Ntatsi, 2015), e incrementa la actividad de enzimas antioxidantes (Manivannan *et al.*, 2016). A pesar de que el silicio es el segundo elemento más abundante en el suelo, éste es encontrado usualmente formando complejos de minerales silicatados, que son de muy baja solubilidad (Zhu y Gong, 2014). Por tanto, la aplicación de silicio puede ser una

alternativa para incrementar la producción agrícola en suelos salinizados (Zhu *et al.*, 2015).

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una especie moderadamente sensible a la salinidad; es una hortaliza de alto potencial económico, por ser un producto de exportación, y para la economía agrícola de México es importante para el ingreso de divisas y para la generación de empleos en el campo (Hernández-González *et al.*, 2014). En el año agrícola de 2016, se reportaron un total de 17,236.33 hectáreas cultivadas con pepino bajo modalidad de riego, generando un valor de producción de 4,692,412.34 en miles de pesos (SIAP, 2017).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de silicio y calcio en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto de pepino bajo condiciones de salinidad en un sistema hidropónico.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto principal del silicio aplicado vía foliar en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto en pepino bajo estrés salino con NaCl en un sistema hidropónico.
2. Evaluar el efecto principal del calcio aplicado vía foliar en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto en pepino bajo estrés salino con NaCl en un sistema hidropónico.
3. Evaluar la combinación de silicio y calcio suministrado vía foliar en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto en pepino bajo estrés salino con NaCl en un sistema hidropónico.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

El suministro de calcio y el silicio vía foliar a plantas de pepino tratadas con NaCl en hidroponía, mitiga los efectos negativos de la salinidad. La aplicación conjunta de Ca y Si tienen un efecto positivo mayor en la tolerancia a la salinidad, que su aplicación individual.

1.3.2. Hipótesis específicas

1. La aplicación de silicio vía foliar mejora parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto en pepino bajo estrés salino con NaCl en un sistema hidropónico.
2. La aplicación de calcio vía foliar mejora parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto en pepino bajo estrés salino con NaCl en un sistema hidropónico.
3. La aplicación conjunta de silicio y de calcio vía foliar, tiene mayor eficacia que su aplicación individual en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de fruto en pepino bajo estrés salino con NaCl en un sistema hidropónico.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1. Ubicación y condiciones del experimento

El experimento se condujo bajo sistema protegido en el periodo primavera-verano de 2016, utilizando un invernadero tipo tropical asimétrico con plástico blanco lechoso, perteneciente al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, el cual se localiza en Texcoco, Estado de México, en las coordenadas 19° 27' 47.9" LN 98° 54' 12.8" LO a 2250 m de altitud. La temperatura promedio durante el día y noche fue de 30 °C y 15 °C, respectivamente. La humedad relativa promedio fue de 31% durante el día y 86% durante la noche, mientras que la intensidad luminosa promedio durante el día fue de 137 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

1.4.2. Material vegetal

Se utilizó semilla de pepino (*Cucumis sativus* L.) variedad Modan de la casa comercial Rijk Swaan, la cual es una variedad partenocárpica de pepino francés, cuyos frutos presentan espinas, coloración verde oscuro y una longitud promedio de 22 cm, variedad recomendable para ciclos de primavera y otoño (Rijk Swaan, 2017).

1.4.3. Producción de plántulas

La germinación y producción de plántula se llevó a cabo en charolas de poliestireno de 128 cavidades utilizando turba como sustrato (Kekkilä®). Después de la emergencia se aplicaron riegos alternos entre días con agua corriente, siendo hasta la segunda semana (presencia de la primera hoja verdadera desarrollada) cuando se inició con la aplicación de solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1984) al 50% hasta su trasplante. En esta etapa se aplicó como fungicida preventivo Previcur® N (i. a. Propamocarb clorhidrato) a una dosis de 2 mL L⁻¹.

1.4.4. Diseño de tratamientos

Las aplicaciones foliares de silicio y calcio fueron estudiadas a concentraciones de 2 mM cada uno, además de la combinación de silicio y calcio a concentración de 2 mM cada uno (**Cuadro 1.1**). La fuente de silicio utilizada fue dióxido de silicio (SiO₂) y la de calcio fue óxido de calcio (CaO), ambas fuentes grado reactivo (Sigma-Aldrich® y Merck®, respectivamente). El testigo consistió en aspersiones de agua destilada. Para la preparación de estas soluciones se disolvió lo correspondiente de cada reactivo en vasos de precipitado con agua destilada, a cada uno incluyendo al testigo se le adicionó Tween 20 al 0.05% como surfactante, y fueron agitados de forma constante durante una hora con la ayuda de un magneto. Posteriormente el pH fue regulado a 4 con H₂SO₄ 0.5 N, incluyendo al testigo. Una vez iniciados, los tratamientos foliares se repitieron semanalmente a las 6:00 pm durante 5 semanas.

Cuadro 1.1. Tratamientos estudiados en el experimento de pepino en sistema hidropónico.

PG	PP
NaCl (mM)	Aplicación foliar
0	Testigo
	Silicio
	Calcio
	Silicio + Calcio
100	Testigo
	Silicio
	Calcio
	Silicio + Calcio

PG: parcela grande; PP: parcela pequeña

La condición de salinidad fue inducida utilizando cloruro de sodio (NaCl) grado reactivo (Reactivos Química Meyer®) en dos concentraciones (0 y 100 mM), adicionadas a la solución nutritiva Steiner al 100%, la cual se reguló a pH de 5.5 utilizando H₂SO₄ grado analítico (Reactivos Química Meyer®) sin diluir. La solución nutritiva se preparó con reactivos grado analítico (Reactivos Química Meyer®) en las siguientes concentraciones: 1.06 g L⁻¹ de Ca(NO₃)₂ 4H₂O; 0.30 g L⁻¹ de KNO₃; 0.14 g L⁻¹ de KH₂PO₄; 0.49 g L⁻¹ de MgSO₄ 7H₂O y 0.26 g L⁻¹ de K₂SO₄. Los micronutrientes fueron adicionados a partir de Tradecorp A-Z® a razón de 0.0665 g L⁻¹ con lo cual se proporcionó: 5 mg L⁻¹ de Fe, 2.3 mg L⁻¹ de Mn, 0.46 mg L⁻¹ de Zn, 0.19 mg L⁻¹ de Cu, 0.43 mg L⁻¹ de B y 0.20 mg L⁻¹ de Mo.

1.4.5. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas completamente al azar. Consistió en dos parcelas grandes (PG) y cuatro parcelas pequeñas (PP) que fueron repetidas cinco veces. El factor salinidad se estudió en dos parcelas grandes, que consistieron en una condición sin salinidad (0 mM NaCl) y una condición salina (100 mM NaCl). Por su parte las parcelas pequeñas que se estudiaron dentro de cada parcela grande fueron las

aplicaciones foliares de silicio (2 mM), calcio (2 mM), combinación de silicio y calcio (2 mM cada una) y el testigo que consistió en aplicaciones de agua destilada.

Cada unidad experimental estuvo representada por una planta de pepino por maceta, teniendo en total 40 unidades experimentales.

Tanto las parcelas grandes dentro del invernadero, como las parcelas pequeñas dentro de las parcelas grandes fueron aleatorizadas.

1.4.6. Instalación del experimento

Plántulas de 28 días (desde su siembra en charolas) fueron trasplantadas a bolsas de polietileno de 35 x 35 cm (10 L) utilizando tezontle rojo como sustrato, cuya granulometría fueron partículas de 0.5 a 0.7 cm de diámetro.

Previo al trasplante el tezontle fue desinfectado utilizando una solución de NaClO a una concentración de 0.05 mL L⁻¹ (a partir de Cloralex®) y posteriormente se lavó utilizando constantes riegos con agua acidulada.

La distancia entre el punto medio de maceta a maceta fue de 0.40 m y la distancia entre parcelas fue de 0.80 m, obteniéndose así una densidad de 3.1 plantas m⁻².

Las hileras fueron las parcelas grandes, dentro de las cuales estuvieron las parcelas pequeñas.

Pasados 19 días después del trasplante se inició con los tratamientos de salinidad, que consistió en añadir una concentración de 100 mM NaCl al tanque de solución nutritiva para las parcelas grandes que llevarían la condición salina, mientras que las que crecerían bajo condiciones no salinas se siguieron regando únicamente con solución nutritiva de Steiner al 100%. Después de 4 días del inicio de los tratamientos con salinidad, se iniciaron las aplicaciones foliares.

1.4.7. Manejo agronómico del cultivo

Desde el trasplante se utilizó la solución nutritiva de Steiner antes descrita para todos los tratamientos mediante un sistema de riego por goteo utilizando tubín y estacas. Se aplicaron 8 riegos programados a lo largo del día con gasto total de 0.65 L día⁻¹ en la fase vegetativa el cual fue incrementado a 1.3 L día⁻¹ al inicio de floración, nuevamente

se incrementó a 1.7 L día⁻¹ al inicio del amarre de los primeros frutos y después de la segunda cosecha se aplicó 2 L día⁻¹ hasta la fase experimental final.

El tutorado del cultivo se llevó a cabo mediante el uso de rafia, la cual fue anudada en la parte basal del tallo y el extremo opuesto en el alambre tensor a 3 m sobre la línea de plantación, de esta manera se tuvo la planta erguida permitiendo ventilación y luminosidad óptima, además de facilitar las labores culturales.

Dentro de las labores culturales realizadas se eliminaron los primeros tres frutos para la formación de la planta y para mejorar el sistema radicular antes de entrar en producción de acuerdo a lo descrito por Jiménez (2011), también se eliminaron los zarcillos periódicamente.

Se mantuvo un manejo preventivo contra hongos utilizando aplicaciones de Cupravit® (i. a. oxiclورو de cobre) a razón de 2.5 g L⁻¹ en los días nublados y lluviosos. A pesar del manejo preventivo se presentó cenicilla (*Erysiphe cichoracearum*), por lo cual se implementó un método curativo a partir de aplicaciones de Amistar® (i. a. azoxistrobin) a dosis de 0.5 g L⁻¹ y Rally® (i. a. myclobutanil) a dosis de 0.23 g L⁻¹ en intervalos de acuerdo a ficha técnica. Debido a la presencia de pulgones y mosca blanca se utilizó Actara 25 WG® (i. a. tiametoxam) a dosis de 2 g L⁻¹.

Para evitar acumulación de sales en el sustrato, se aplicó un riego pesado cada semana con agua acidulada.

1.4.8. Variables estudiadas

1.4.8.1. Variables agronómicas

Rendimiento (g planta⁻¹). Al alcanzar la madurez fisiológica, los frutos fueron cosechados y pesados en una balanza analítica (PCE-BSH 6000, capacidad 6,000 g). Al realizar la cosecha final, se sumó el peso total de frutos cosechados por planta, este peso correspondió al rendimiento.

Peso de materia fresca de fruto (g). Se obtuvo promediando el peso de todos los frutos cosechados por planta.

Peso de materia seca de fruto (g). Frutos de la segunda cosecha se rebanaron en rodajas de manera individual, posteriormente fueron sometidos a secado en una estufa

de circulación forzada de aire a 72 °C hasta que la totalidad de frutos tuvieron un secado uniforme. Una vez los frutos estuvieron secos se pesaron en una balanza analítica.

Longitud de tallo (cm). A los 58 días después del trasplante se finalizó el experimento, en esta fecha final se midió la longitud de tallo utilizando una cinta métrica.

Diámetro de tallo (mm). Al final del cultivo se midió el diámetro basal, medio y apical de tallo utilizando un vernier digital.

Peso de biomasa seca de raíz, tallo, hojas y total aérea (g). Se separó la parte aérea y raíz, posteriormente se separaron las hojas del tallo; se sometieron a secado en una estufa de circulación forzada de aire a 72 °C durante 48 h. Posteriormente se pesaron en una balanza analítica.

1.4.8.2. Variables de calidad de fruto

Longitud de fruto (cm). Cada fruto cosechado fue medido en longitud con una regla metálica graduada a 30 cm.

Diámetro de fruto (mm). Cada fruto cosechado fue medido en diámetro de la parte ecuatorial con un vernier digital.

Firmeza de fruto (N). Los frutos de la tercera cosecha fueron evaluados en firmeza en tres puntos, correspondientes al extremo hacia el pedúnculo, punto medio y en el extremo hacia la flor, para lo cual la cáscara fue removida. La medición se realizó con un texturómetro Chatillon (FDV-30 Greenwich, CT 06836, USA), con puntal cónico de 0.7 cm de base, el cual fue introducido 1 cm en cada una de las posiciones y se registró la fuerza aplicada para tal penetración.

Sólidos solubles totales en jugo de fruto (°Brix). Se determinó en una muestra de jugo de la parte ecuatorial del fruto, en un refractómetro digital Atargo N1, graduado con una escala Brix, siendo un grado Brix la densidad de una solución de sacarosa al 1% en peso, a la cual le corresponde un determinado índice de refracción, de tal manera que los grados Brix expresan la concentración de sólidos solubles totales (azúcares y ácidos orgánicos) y es uno de los índices de calidad interna de frutos que más se utiliza ([Domene y Segura, 2014](#)).

Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) y pH en jugo de frutos. Se pesaron 10 g de pulpa de pepino sin cáscara de la parte ecuatorial, se pasó al extractor de jugos y se licuó con

50 mL de agua destilada, a la mezcla resultante se le midió directamente la CE y el pH con un equipo Conductronic PC-18.

Acidez titulable en jugo de frutos. Del extracto obtenido para CE y pH, se midió el volumen (V), se filtró y se tomó una alícuota de 10 mL, se tituló con NaOH 0.01 N utilizando fenolftaleína como indicador, según la metodología de la AOAC (Boland, 1990). La medición de acidez titulable se realizó con base al porcentaje de ácido cítrico, tal como se muestra:

$$\% \text{ ácido} = \frac{(\text{mL de NaOH gastados})(N \text{ NaOH})(\text{meq del ácido})(V)(100)}{(\text{peso de la muestra})(\text{alícuota})}$$

Donde:

N = normalidad del NaOH.

meq = miliequivalentes del ácido que se encuentra en mayor proporción en el fruto (ácido cítrico = 0.064)

V = volumen total (mililitros de agua más gramos de fruto)

Coloración de fruto. Se obtuvieron los valores L, a y b con un colorímetro (Hunter Lab D25-PC2, Reston, Virginia, USA). Las mediciones se realizaron en ambos lados ecuatoriales del fruto. La luminosidad corresponde al valor L, representa la claridad y toma valores desde 0 (negro) hasta 100 (blanco), este valor se obtuvo directamente del colorímetro. El valor "a", representa el componente rojo-verde, donde el rojo presenta valores positivos y el verde valores negativos. El valor "b" define el componente amarillo-azul. Se estimó el valor del ángulo de tono (Hue) con la fórmula: $\text{Hue} (^{\circ}) = \arctan(b/a)$ y la pureza de color con la fórmula: $\text{croma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$ (Vázquez y Santiago, 2013; Domene y Segura, 2014).

1.4.8.3. Variables bioquímicas

Concentración de prolina. Para esta determinación se utilizó 0.05 g de tejido seco de hojas obtenidas en la fase experimental final, siguiendo la metodología propuesta por Bates *et al.* (1973) y utilizando tolueno como blanco. Cabe señalar que la metodología propone utilizar material fresco liofilizado. La curva de calibración se presenta en la **Figura 1.1.**

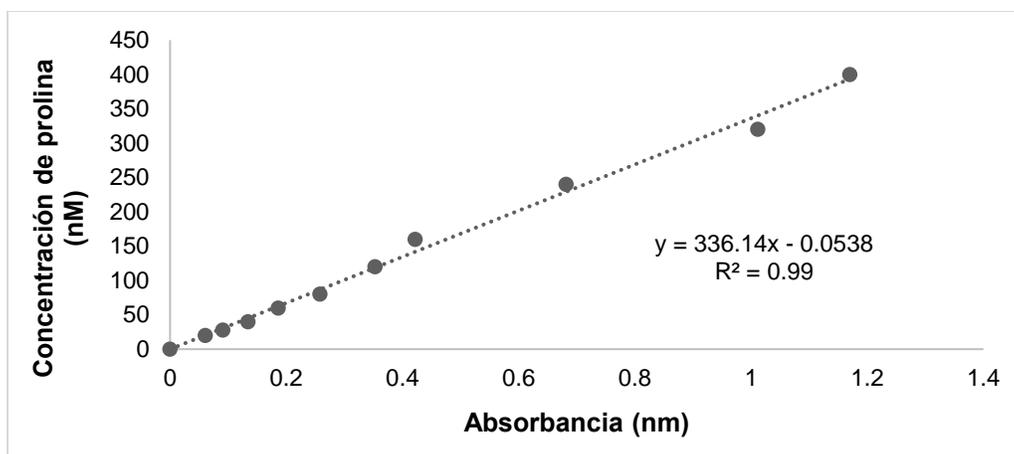


Figura 1.1. Curva de calibración para determinar la concentración de prolina en hojas de pepino bajo estrés salino en sistema hidropónico.

Concentración de N, P, K, Ca, Mg, Na, Si, Cl y micronutrientes en raíz, tallo, hojas y frutos. En el tejido seco de cada órgano se determinó nitrógeno total mediante la metodología de Semimicro-Kjeldahl descrita por [Bremner \(1965\)](#), la cual utiliza digestión húmeda con H_2SO_4 y $C_7H_6O_3$. Para la determinación de P, K, Ca, Mg, micronutrientes (excepto Cl), Na y Si, se llevó a cabo una digestión húmeda con HNO_3 y $HClO_4$ ([Alcántar y Sandoval, 1999](#)), permitiendo poner en solución los elementos a determinar, los cuales fueron cuantificados con un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES 725 Series, Agilent). Por su parte la determinación de cloruro se realizó en una muestra de 0.5 g del material seco sometida a una digestión húmeda utilizando 4 mL de HNO_3 en un matraz Kjeldahl colocado en plancha de calentamiento a $120\text{ }^\circ\text{C}$ y utilizando H_2O_2 al 30% hasta su digestión total. Se cuantificó por turbidimetría utilizando $AgNO_3$ al 10% como complejante, en un colorímetro a 400 nm longitud de onda, se utilizó una curva de calibración de 0 a 10 mg L^{-1} (**Figura 1.2**), utilizando NaCl grado reactivo.

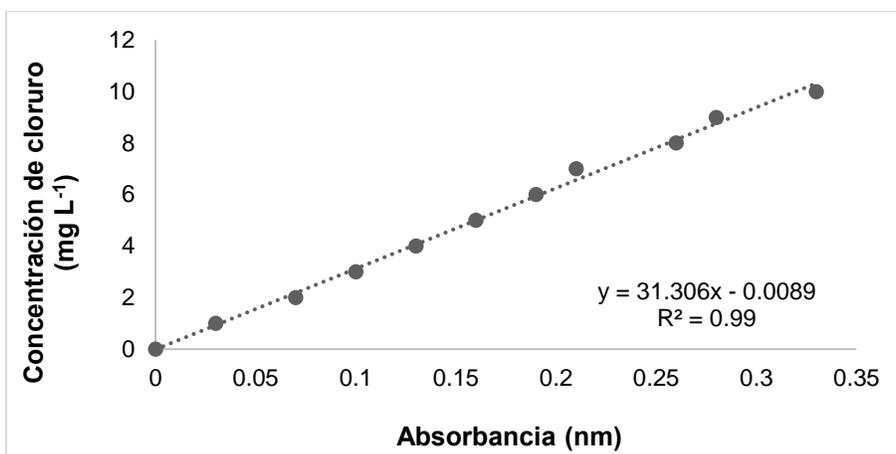


Figura 1.2. Curva de calibración para determinar la concentración de cloruro en tejido vegetal de pepino bajo estrés salino en sistema hidropónico.

1.4.9. Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias para las parcelas grandes y pequeñas con la prueba de LSD utilizando el procedimiento PROC ANOVA y se verificaron los supuestos de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas. En las pruebas estadísticas aplicadas se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. En estos análisis se usó el software SAS (SAS, 2011). Para determinar el efecto de las combinaciones se realizó la prueba de comparación de medias a mano utilizando la metodología para el análisis LSD en parcelas divididas.

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1. Variables de crecimiento y agronómicas

1.5.1.1. Crecimiento del tallo

La longitud de tallo disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) al someter las plantas de pepino al nivel de 100 mM NaCl comparadas con plantas crecidas en el nivel de 0 mM NaCl, como se observa en el **Cuadro 1.2**, siendo tal disminución de un 44.69%. De igual manera, los valores de diámetro basal y apical fueron reducidos significativamente ($P \leq 0.05$) bajo la condición salina (100 mM NaCl; **Cuadro 1.2**).

Cuadro 1.2. Efecto de la salinidad en variables de crecimiento de tallo de plantas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Variables de crecimiento de tallo		
	Longitud (cm)	Diámetro basal (mm)	Diámetro apical (mm)
0	179 ± 5.80 a	7.87 ± 0.34 a ^z	6.21 ± 0.47 a
100	99 ± 7.42 b	5.88 ± 0.52 b	4.73 ± 0.44 b
∇DMS	9.53	0.62	0.65
Pr>F	<0.0001	<0.0001	0.0008

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa.

La reducción del crecimiento de tallo y hojas de las plantas es uno de los efectos que es primeramente visible del estrés salino (Roy *et al.*, 2014; Shahzad *et al.*, 2013), siendo en primera instancia el factor causante de este detrimento, la acumulación de sales fuera de la raíz, lo que favorece un efecto osmótico que dificulta la absorción de agua y nutrientes (Munns y Tester, 2008). Pasado un tiempo de días o semanas, el crecimiento disminuye por la acumulación de sales en niveles perjudiciales en el tallo, al ser transportadas a hojas y provocar senescencia y muerte (Negrão *et al.*, 2017). La acumulación de sales y la muerte de las hojas reducen la capacidad fotosintética de la planta, por ende el crecimiento de la misma. Tal como proponen Del Amor *et al.* (2000) para el cultivo de melón, la reducción del crecimiento al ser sometido a estrés salino está relacionado con la alta acumulación de Cl⁻ en tejido y la disminución de la fotosíntesis neta. Estos autores coinciden con Shi *et al.* (2013), quienes afirman que la disminución de la acumulación de Na⁺ y Cl⁻ en tallos se traduce en un mayor crecimiento del mismo. En la prueba de efecto de combinaciones (parcela grande*parcela pequeña) en la longitud de tallo no se encontraron diferencias estadísticas significativas de las aplicaciones foliares en la condición no salina (0 mM NaCl), pero si las hubo en la condición salina (100 mM NaCl); en esta última, la aplicación foliar de Si redujo significativamente ($P \leq 0.05$) la longitud de tallo, en comparación con el testigo y con la aplicación foliar de Ca (Figura 1.3).

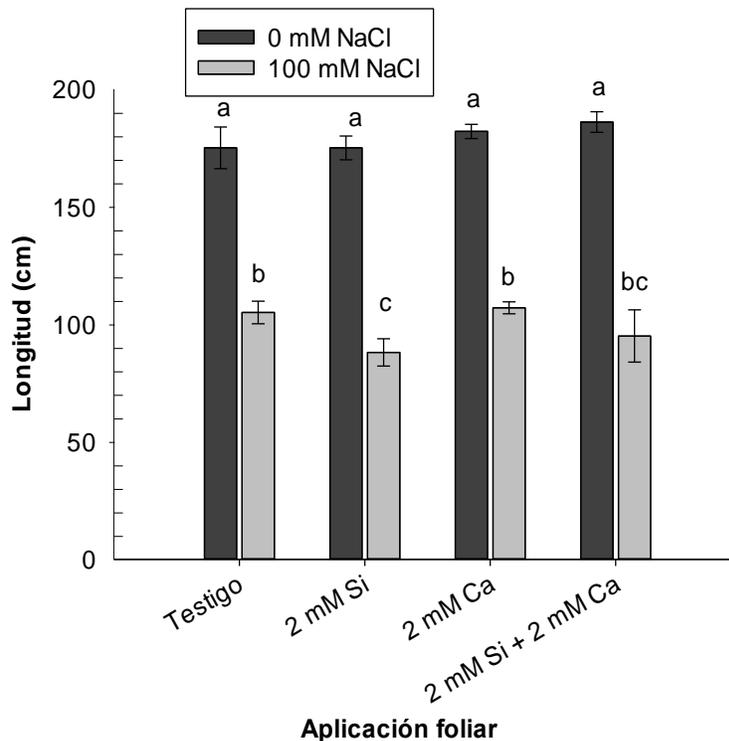


Figura 1.3. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la longitud de tallo del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

En las variables diámetro de tallo basal y diámetro de tallo apical, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) para las combinaciones (parcela grande*parcela pequeña); mientras que, el diámetro medio no mostró diferencia estadística (**Figuras 1.4A, 1.4B y 1.4C**).

El diámetro basal y el apical fueron influenciados de manera significativa por el factor salinidad (0 y 100 mM NaCl), siendo evidente la reducción en sus medias, al someter el cultivo a 100 mM NaCl (**Figuras 1.4A y 1.4C**). Es importante notar que, si bien no fue significativo, hubo un ligero incremento en el diámetro basal y apical con la aplicación foliar de Ca y la combinación de Si + Ca en plantas sin estrés salino (0 mM NaCl). En general se observó que los tratamientos foliares no mostraron tener efectos significativos en el diámetro de tallo evaluado en las tres posiciones, en las plantas tratadas con 0 mM NaCl. En el nivel de 100 mM NaCl, la aplicación foliar de Ca redujo significativamente el

diámetro basal en comparación con el testigo y la aplicación foliar de Si (**Figura 1.4A**). Por otra parte, bajo la condición normal, la aplicación foliar de Ca, incrementó en 14.9% el diámetro en comparación con el testigo, aunque tal incremento no fue estadísticamente significativo (**Figura 1.4C**).

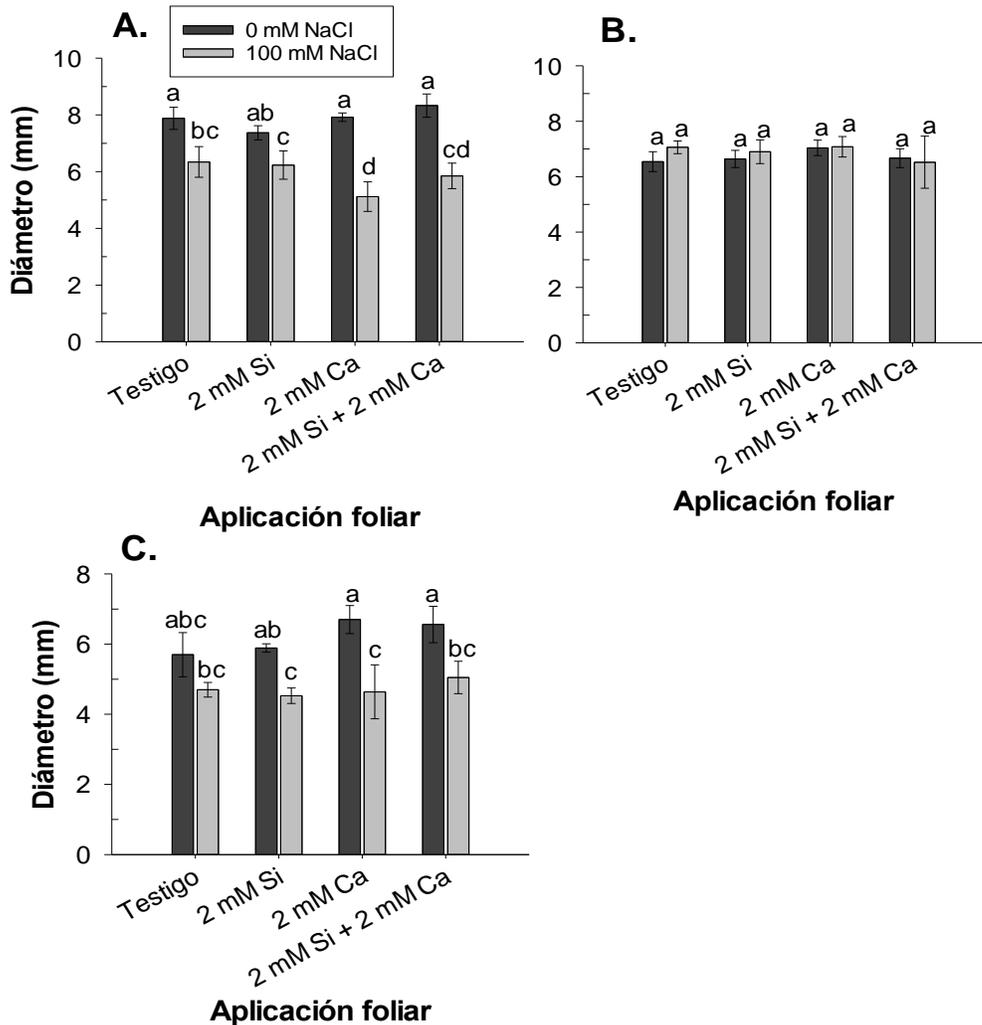


Figura 1.4. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el diámetro de tallo del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico. **A.** Diámetro basal; **B.** Diámetro medio; **C.** Diámetro apical.

Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

En la **Figura 1.5** se observan los efectos de los tratamientos de NaCl en el crecimiento de las plantas de pepino; siendo evidentes los resultados en crecimiento antes descritos.



Figura 1.5. Efecto de la salinidad en el crecimiento del cultivo de pepino variedad Modan.

Las aplicaciones foliares de Si, Ca y la combinación Ca + Si, no mostraron efecto positivo significativo en las variables de crecimiento de tallo (longitud y diámetro) en condiciones salinas (100 mM NaCl); ni en condiciones normales (0 mM NaCl). Lo anterior contrasta con lo encontrado por [Dabuxilatu e Ikeda \(2005a\)](#), quienes reportaron que al aumentar los niveles de Ca, a partir de CaSO_4 , a un cultivo de pepino bajo estrés salino por NaCl, se redujo la inhibición del crecimiento; en este caso el aumento en los niveles de Ca en el medio se relacionó de manera positiva con las concentraciones de Ca en el tejido, además de incrementar los niveles de K y de disminuir los de Na, lo que conduce a la reducción del desbalance iónico. Aunado a lo anterior [Xue et al. \(2012\)](#) encontraron que aplicaciones foliares de Si tiene como efecto incrementar el diámetro de tallo del cultivo de tomate. Tal como se expuso anteriormente, la condición de salinidad en el

experimento fue tal que no permitió se mostrasen los efectos benéficos del Si y el Ca en forma individual y conjunta (**Figuras 1.3, 1.4 y 1.5**).

Las aplicaciones foliares de Ca, Si y Ca + Si, no mostraron tener efecto positivo en las variables de crecimiento en tallo (**Figuras 1.3 y 1.4**) que otros investigadores han encontrado. En particular al Si se le otorgan atributos como elemento benéfico, al mejorar las variables de crecimiento en cultivos bajo condición de salinidad mediante la disminución en la absorción de sales ([Shi et al., 2013](#)), llegando a prevenir la absorción de Na⁺ y/o su transporte de las raíces al tallo ([Zhu y Gong, 2014](#)) y a las hojas ([Yin et al., 2013](#)); también al Si se le atribuye incrementar la absorción y transporte de K⁺ ([Rizwan et al., 2015](#)).

Al Ca se le atribuye que, mediante sus funciones regulatorias e intervención en procesos de respuesta al estrés ([Tuteja, 2009](#)), reestablecer la homeostasis celular a través de mecanismos de transporte que incluyen HKT, NHX y SOS ([Deinlein et al., 2014](#)), previniendo la absorción de Na⁺, compartimentalizando el exceso y favoreciendo la absorción de K⁺ ([Mahajan et al., 2008](#)). Por su parte [Yamaguchi y Blumwald \(2005\)](#) afirman que aunque los mecanismos de exclusión de iones pueden generar cierto nivel de tolerancia a la salinidad por NaCl, estos niveles no deben ser demasiado altos, pues en caso de serlo, es inevitable la inhibición del crecimiento.

Por su parte [Agostinho \(2016\)](#), al hacer aplicaciones foliares de Si a plantas de arroz, reporta con las dosis bajas menor número de vástagos y con las altas un incremento, en ambos casos con respecto al testigo y no encontrando tal efecto significativo ($P > 0.05$), este autor concluye que el Si no tiene efecto significativo en el crecimiento de plantas de arroz y recomienda utilizar Si vía foliar en el entendimiento de que puede no haber efectos positivos, pues éste puede no absorberse, indicando la importancia del tipo de solución, la fuente de Si y la frecuencia de aplicación. Aunado a lo anterior, [Haynes \(2014\)](#), menciona que las aplicaciones foliares de Si no muestran tener efecto significativo en el crecimiento, en comparación con aquellas aplicaciones de Si realizadas directamente al suelo. De igual manera reportan [Farshidi et al. \(2012\)](#) que, las aplicaciones de Si en la solución nutritiva al cultivo de canola bajo condiciones normales, no afecta significativamente el crecimiento del tallo.

Los resultados obtenidos en la presente investigación difieren a los obtenidos por [Hashemi et al. \(2010\)](#) quienes encontraron que la lignificación propiciada por la salinidad, daña la flexibilidad de la pared celular y por ende el crecimiento, pero la adición de Si sustituye a la lignina, facilitando la flexibilidad de la pared celular, promoviendo la extensión celular y el crecimiento de las plantas. Ha sido reportado que un factor importante de la disminución del crecimiento es la reducción de la tasa fotosintética debido al daño a los cloroplastos, siendo tal daño disminuido por la adición de Si, el cual da estabilidad a la ultra-estructura de cloroplastos ([Gengmao et al., 2015](#)). Además de mejorar la tasa fotosintética y el contenido de clorofilas, [Lee et al. \(2010\)](#) encontraron que la adición de Si a plantas bajo estrés salino mejora la actividad de la enzima ribulosa bifosfato carboxilasa (RuBisCO). Esto concuerda con lo encontrado por [Wang et al. \(2015\)](#) en pepino sometido a estrés salino (65 mM NaCl) con la adición de Si al medio, pues reportan un incremento en concentración de clorofila, una mayor tasa fotosintética neta, mayor transpiración y un mayor contenido de agua en hojas, en comparación con aquellas plantas no tratadas con Si. El efecto del Si puede ser muy disímil, pues como se ha planteado, ha sido reportado que mediante su participación en diversos procesos incrementa el crecimiento de plantas con o sin estrés. Por otro lado, ha sido reportado que cuando plantas de sorgo no son sometidas a condiciones de estrés, las aplicaciones de Si no muestran tener efectos significativos positivos en el crecimiento ([Yin et al., 2013](#)). También se ha propuesto que la deposición de Si en exceso en un estado temprano de la elongación celular, puede afectar este proceso, pues tales deposiciones promueven el endurecimiento de la pared celular y afectan su extensibilidad ([Yeo et al., 1999](#)). Por su parte, [Soundararajan et al. \(2015\)](#) proponen que la disminución del crecimiento, independientemente de ser plantas sometidas a estrés salino o no, debido a la aplicación de Si, puede deberse a la inducción de tallos adventicios, dada la posible regulación de citoquininas de este elemento. El pepino es un cultivo moderadamente sensible a las sales, aunado a esto, la concentración salina utilizada (100 mM NaCl) fue demasiado alta para que los posibles mecanismos en los que participan el Ca y el Si pudieran haber sido notorios.

1.5.1.2. Biomasa seca

El detrimento causado por el nivel de 100 mM NaCl en el crecimiento, afectó también de manera significativa ($P \leq 0.05$) el peso de biomasa seca al compararse con plantas crecidas en la condición normal (0 mM NaCl), pues las reducciones en esta variable para la raíz, tallo, hojas y biomasa aérea total fueron del orden de 65.8, 55.4, 66.8 y 65.2% respectivamente (**Cuadro 1.3**). La reducción en la tasa de crecimiento de la hoja de una planta bajo estrés salino, conlleva un decremento en la producción de biomasa seca, y es un proceso que se debe en primera instancia al estrés osmótico (Munns y Tester, 2008). Plantas de sorgo (tolerante a la salinidad) tratadas con 100 mM NaCl mostraron disminuir en un 60% la biomasa seca de hojas, en comparación con plantas testigo, tal detrimento fue relacionado con el incremento del contenido de H_2O_2 que trajo consigo la peroxidación de lípidos propiciando una muerte celular extensiva (Nxele *et al.*, 2017). Niveles altos de Na^+ y Cl^- en raíces favorecen efectos negativos por estrés osmótico y posteriormente un efecto tóxico que se aprecia en la reducción del crecimiento radical (Ali, 2011).

Cuadro 1.3. Efecto de la salinidad en la biomasa seca de plantas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Biomasa seca (g planta ⁻¹)			
	Raíz	Tallo	Hojas	Aérea total
0	1.52 ± 0.08 a ²	7.43 ± 0.38 a	43.95 ± 2.14 a	51.38 ± 2.48 a
100	0.52 ± 0.15 b	3.31 ± 0.38 b	14.57 ± 1.68 b	17.89 ± 2.05 b
∇DMS	0.22	0.59	2.63	3.18
Pr>F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

²Valores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa.

En la **Figura 1.6** se observa la sensibilidad del cultivo de pepino a la salinidad, al hacer la prueba para el efecto de combinaciones se presentó notable significancia ($P \leq 0.05$) en la disminución de la biomasa seca de raíz (**Figura 1.6A**), tallo (**Figura 1.6B**), hojas (**Figura 1.6C**) y aérea total (**Figura 1.6D**). Es posible que el efecto negativo del nivel de salinidad aplicado (100 mM NaCl) en una especie sensible como el pepino, no haya permitido observar efectos de la aplicación de Si, Ca y Si+Ca en las dosis estudiadas, pues no ayudaron a mitigar el daño provocado por el NaCl. Es de notarse que bajo

condiciones normales (0 mM NaCl) el efecto de las aplicaciones foliares tampoco fue significativo en ninguno de los órganos, ni la biomasa aérea total. Aunque en el nivel de 100 mM NaCl, la aplicación de Ca, en comparación con la aplicación testigo en el mismo nivel de NaCl, aumentó en 7.0% la biomasa seca total aérea, este incremento no fue significativo estadísticamente.

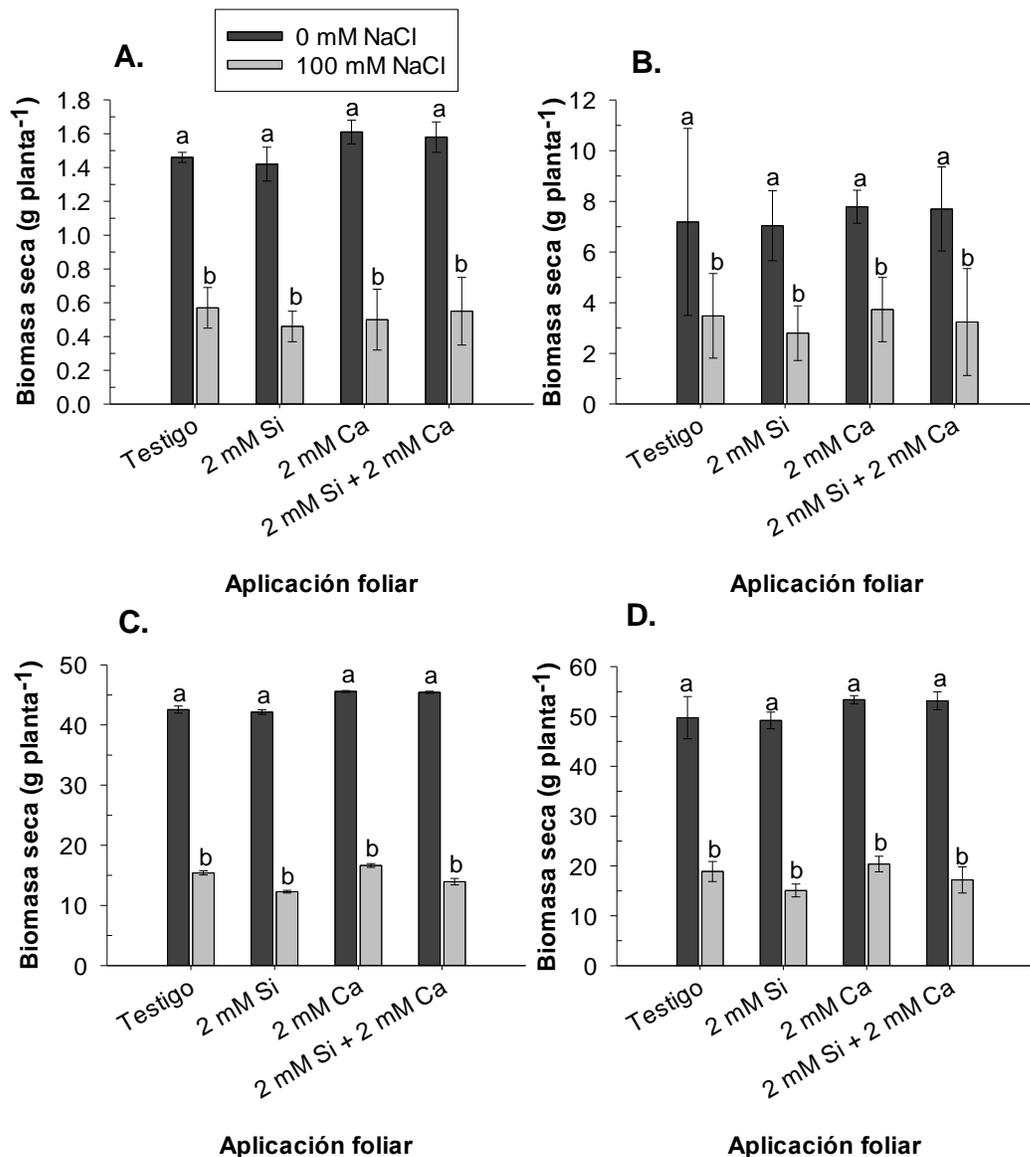


Figura 1.6. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la biomasa seca de plantas del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico. **A.** Biomasa seca de raíz; **B.** Biomasa seca de tallo; **C.** Biomasa seca de hojas; **D.** Biomasa seca aérea total.

Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

[Dabuxilatu e Ikeda \(2005b\)](#) encontraron que la disminución del crecimiento, y por ende la reducción de la biomasa seca del cultivo de pepino bajo estrés salino, son debidas a dos factores principales, el primero de ellos es desbalance iónico debido a la acumulación de Na en tejido y la disminución de elementos esenciales como Mg y K, el segundo es la disminución de la tasa fotosintética, siendo ambos efectos disminuidos de manera considerable con la adición de Ca al medio. Niveles crecientes de salinidad inducen una disminución incrementada de la biomasa seca de raíz, tallos y hojas; esta reducción es inhibida al ser suministrado el Ca vía foliar (0.5 mM Ca a partir de $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$). En este estudio, al aumentar la concentración de Ca a 1 mM se observaron efectos negativos de este elemento en cada uno de los órganos ([Hojjatnooghi et al., 2014](#)). Por otra parte, el cultivo de endibia en hidroponía sometido a 40 mM NaCl incrementó significativamente el peso seco de hojas con la aplicación de 15 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ en comparación con la aplicación foliar testigo (0 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) ([Tzortzakis, 2010](#)). Mismos resultados fueron encontrados en lechuga sometida a 0, 40 y 100 mM NaCl, donde el peso seco de lechuga en ambos niveles de salinidad (40 y 100 mM NaCl) fue incrementado significativamente con la aplicación foliar de 15 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, en comparación con las aplicaciones de agua destilada ([Tzortzakis, 2009](#)). Aspersiones de calcio al follaje (15 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) puede ayudar a sobrellevar el impacto negativo de la salinidad a una concentración de 30 mM NaCl pero no de 90 mM NaCl ([Chondraki et al., 2012](#)). Por su parte [Dios-Delgado et al. \(2006\)](#), encontraron que el peso fresco de lechuga es disminuido proporcionalmente con la aplicación de Si vía foliar (0, 2 y 4 mg L^{-1}); cuando las aplicaciones de Si se combinan con aplicaciones foliares de Ca (1% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), se obtiene una reducción del peso fresco aún mayor, lo cual se observó al final como pérdida de biomasa seca. El efecto que muestran las aplicaciones de Ca de incrementar el crecimiento de tallo y hojas y que es reflejado en la biomasa seca, es debido al incremento de la tasa de bombeo de protones por la alta actividad de la H^+ -ATPasa, con lo cual se acidifica el pH del apoplasto y se alcaliniza el pH del citosol; consecuentemente se reduce la concentración de Na^+ en citosol y se incrementa la de K^+ , favoreciendo el establecimiento de homeostasis de iones ([Morgan et al., 2014](#)); la homeostasis de iones es clave para aminorar el efecto del estrés salino ([Dabuxilatu e Ikeda, 2005b](#)). Aunado a esto, el Ca además de ser absorbido por las raíces para cumplir

sus roles como elemento esencial, también es tomado para estimular la exocitosis en el crecimiento (Wilkins *et al.*, 2016). También se ha reportado que bajo condiciones de estrés por NaCl, la adición de Ca (5 mM CaCl₂) en la solución, incrementa el contenido de clorofila y el peso de materia seca de hojas y raíces (Kaya *et al.*, 2002). Aunque la funcionalidad del Ca en sobrellevar condiciones de estrés por sales es clara, como ya antes se mencionó, la mayoría de los trabajos que se realizan utilizan nitrato de calcio, pudiendo entonces enmascararse el efecto del Ca con el del N, pues es sabido que las plantas responden de forma positiva a dosis crecientes de N.

Por otra parte, el Si ha sido también estudiado en diversos cultivos y bajo diferentes condiciones de estrés, obteniendo muy diversos resultados. En un cultivo de vid sometido a estrés por frío se encontró que las aplicaciones foliares de Si no tuvieron efecto significativo en la biomasa seca de hojas (Habibi, 2015). Al aplicar dosis crecientes de Si [MgCa(SiO₃)₂] en la solución a plantas de *Kalanchoe blossfeldiana* y clavel (*Dianthus caryophyllus*) bajo sistema hidropónico Bae *et al.* (2010) encontraron que la dosis de 40 g L⁻¹ incrementó la altura de planta, la longitud y peso de biomasa seca de raíz; sin embargo, al aumentar la dosis a 120 g L⁻¹, tales variables se redujeron. Por otro lado, Cooke y Leishman (2016) al estudiar 18 tipos de estrés en 14 familias de plantas encontraron que el efecto del Si es marcado en el incremento del peso de la biomasa seca tanto de raíz como de la parte aérea, siendo en cucurbitáceas más marcado el efecto en la parte aérea. Contrario a lo anterior, Pavlovic *et al.* (2016) encontraron que al adicionar 1.5 mM Si ([Si(OH)₄]) en la solución nutritiva a un cultivo de pepino no tuvo efecto en la biomasa seca de raíz, ni en la de tallo, pero mostró incrementar significativamente la biomasa seca de hojas. Plantas de pepino sometidas a estrés salino (50 mM NaCl) muestran disminución en el peso seco de tallo y raíz, al adicionar Si (1 mM) al medio, se disminuye significativamente el efecto negativo del NaCl (Zhu *et al.*, 2004). En cultivo de clavel bajo condición de salinidad (100 mM NaCl), Soundararajan *et al.* (2015) no encontraron efectos significativos en el peso de biomasa seca al aplicar Si en concentraciones de 0 o 50 mg L⁻¹, pero al aumentar la dosis a 100 mg L⁻¹, la biomasa seca se vio disminuida significativamente. En el cultivo de sorgo bajo condiciones normales, las aplicaciones de Si no incrementan la biomasa seca total, en comparación con las plantas no tratadas con Si (Chen *et al.*, 2016). Por su parte en el cultivo de papa

se encontró que las aplicaciones de Si al suelo incrementan el peso seco de hojas y tallos mientras que las aplicaciones de Si al follaje no muestra tener efecto diferente al control (Pilon *et al.*, 2013). En plantas de calabaza, la aplicación de Si (1 mM) en la solución nutritiva, no muestra tener efecto significativo en el peso seco de raíces bajo una condición de baja salinidad (0.8 mM NaCl), pero sí muestra incrementar de manera significativa esta variable cuando las plantas se someten a 35 mM NaCl (Savvas *et al.*, 2009). Con lo antes mencionado y con los resultados de la presente investigación se puede mencionar que si bien el Si y el Ca incrementan la biomasa seca en diversos cultivos, los efectos varían entre cultivares, dosis del elemento estudiado, tipo y fuerza del estrés, ion acompañante y solubilidad de la fuente utilizada, entre otros aspectos a considerar; por tanto, en el cultivar estudiado bajo condiciones normales la aplicación foliar individual de Ca y la aplicación conjunta de Si + Ca incrementan, aunque de una manera no significativa, la biomasa seca. Bajo una condición de estrés salino, si bien la aplicación de Si muestra disminuir esta variable respecto al testigo, la aplicación de Ca tiende a incrementarla, en ambos caso de una manera no significativa.

1.5.1.3. Rendimiento y número de frutos

El desabasto de aguas propias para la irrigación hace necesario la utilización de fuentes de agua de calidad marginal o mala calidad (alto contenido de sales) para la irrigación, propiciando una condición de estrés salino que da lugar a la reducción de la productividad de los cultivos, lo cual genera preocupación para este sector económico, pues este problema hace incosteable la actividad agrícola, al no lograr los rendimientos requeridos para costear la inversión, mucho menos para generar ganancias. Por lo anterior, el objetivo principal de los investigadores en el tema es mantener el rendimiento de los cultivos bajo condiciones de salinidad (Negrão *et al.*, 2017).

Como se presenta en el **Cuadro 1.4**, al estudiar el rendimiento (peso total de frutos cosechados por planta) y el número de frutos por planta de un cultivo de pepino bajo irrigación salina (100 mM NaCl) en comparación con una condición sin salinidad (0 mM NaCl) se obtienen resultados contrastantes, pues el rendimiento y el número de frutos por planta se ven disminuidos significativamente ($P \leq 0.05$) en valores de un 80 y 43.2%, respectivamente. Estos resultados son similares a los obtenidos por Huang *et al.* (2009),

quienes al someter a plantas de pepino a estrés salino (60 mM NaCl), se redujo el rendimiento total en 82% en comparación con aquellas plantas no sometidas a condición de estrés, además que la proporción de frutos no comerciables se incrementó bajo la condición salina. Cabe destacar que la totalidad de frutos cosechados en el nivel de 100 mM NaCl en la presente investigación fueron no comerciables, pues no alcanzaron el tamaño (longitud) y la apariencia de éstos no fue buena, tal como se presenta en la **Figura 1.7**.

Cuadro 1.4. Efecto de la salinidad en el rendimiento y el número de frutos por planta del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Rendimiento (g planta ⁻¹)	Número de frutos
0	2884.6 ± 179.6 a ^z	7.4 ± 0.4 a
100	576.6 ± 109.8 b	4.2 ± 0.4 b
^y DMS	217.8	0.72
Pr>F	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

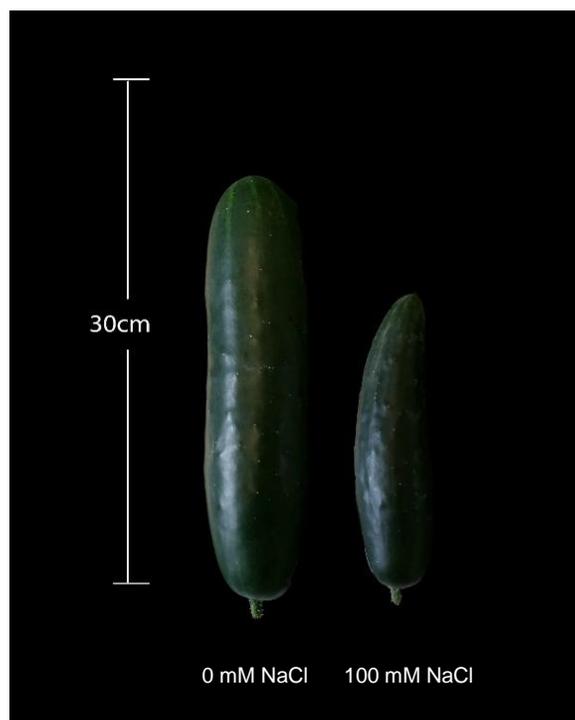


Figura 1.7. Efecto de la salinidad en el fruto de pepino variedad Modan.

Conductividades eléctricas mayores a 8 dS m^{-1} afectan significativamente el rendimiento de todos los cultivos, con excepción de aquellos altamente tolerantes (Ali, 2011). La adición de 100 mM NaCl (10 dS m^{-1}) a la solución nutritiva de Steiner (2 dS m^{-1}) genera una conductividad eléctrica muy desfavorable (12 dS m^{-1}) para la productividad de los cultivos, en especial para aquellos sensibles, siendo el cultivo de pepino moderadamente sensible a la salinidad. Conforme se incrementan los niveles de salinidad, el rendimiento del cultivo de pepino se ve reducido (Al-Sadi *et al.*, 2010). Sonneveld y de Kreij (1999) encontraron disminuciones del orden del 23% en el rendimiento del cultivo de pepino al irrigarlo con una conductividad eléctrica de alrededor de 6 dS m^{-1} , tal disminución fue atribuida a la disminución de la absorción de nutrientes y exudación de los mismos, principalmente de Ca. Abu-Zinada (2015) encontró que, independientemente de que el cultivo de pepino se someta a una condición de salinidad (5 dS m^{-1}) después de la antesis o durante todo el ciclo, la reducción del número de frutos en comparación con una irrigación con agua de buena calidad es muy significativa. La salinidad además de propiciar el detrimento en número de frutos, peso de frutos y tamaño de frutos, también reduce el número de frutos comerciables (Magán *et al.*, 2008).

Al realizar la prueba de efecto de combinaciones se encontró que al aplicar vía foliar Si+Ca en condición normal (0 mM NaCl) se aumenta significativamente ($P \leq 0.05$) el rendimiento por planta en un 14.9% en comparación con el testigo. Sin embargo, bajo la condición salina (100 mM NaCl), los tratamientos foliares no tuvieron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en el rendimiento (Figura 1.8). Voogt y Sonneveld (2001) al experimentar con dosis crecientes de Si en la solución ($0, 0.5, 1, 2$ y 4 mM) en el cultivo de pepino bajo condiciones normales, encontraron el mayor rendimiento con la concentración de 0.5 mM . Kaya *et al.* (2003) encontraron que al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva ($5 \text{ mM Ca(NO}_3)_2$) a un cultivo de pepino irrigado con 60 mM NaCl , parcialmente mitiga el impacto negativo de la salinidad en el rendimiento. Kaya *et al.* (2002) también encontraron en dos cultivares de fresa bajo condición salina que el rendimiento puede ser incrementado de manera significativa con la adición de 5 mM Ca (CaCl_2) a la solución nutritiva. Niveles crecientes de Ca aplicados a un cultivo de olivo bajo estrés salino por NaCl muestran incrementar de forma lineal el número de frutos, lo que resulta en un mayor rendimiento (Lolaei *et al.*, 2012). La

reducción en rendimiento en la presente investigación se debió a la disminución en número de frutos y un menor crecimiento (longitud y diámetro) de los mismos.

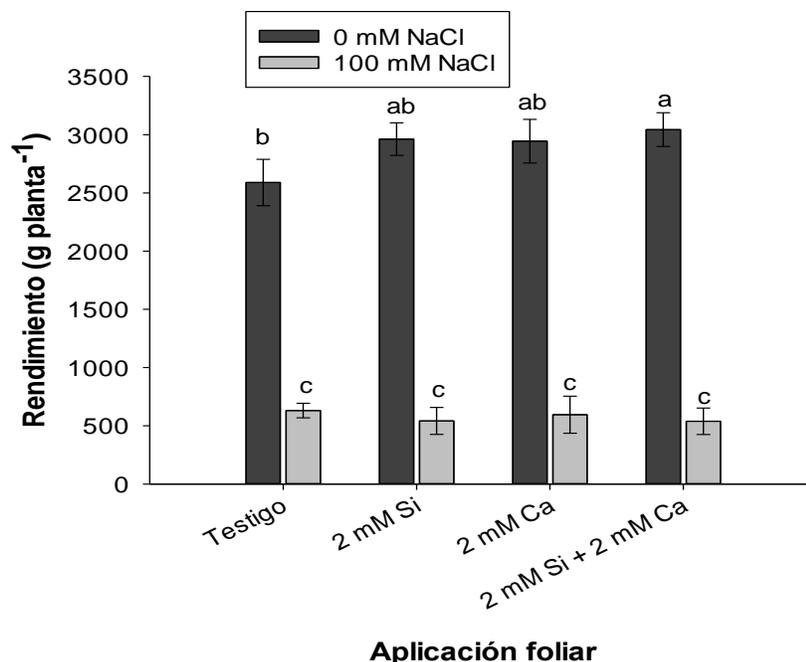


Figura 1.8. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el rendimiento del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

El número de frutos por planta del cultivo de pepino fue afectado significativamente ($P \leq 0.05$) por la condición de salinidad (0 y 100 mM NaCl), más no por las aplicaciones foliares de Si, Ca y Si+Ca, pues tras su aplicación se mantuvieron sin diferencia estadística significativa al estudiarse en la condición normal y en la condición salina (**Figura 1.9**). La reducción en el número de frutos del cultivo de pepino bajo estrés salino se ve reflejado en el rendimiento final (Huang *et al.*, 2009).

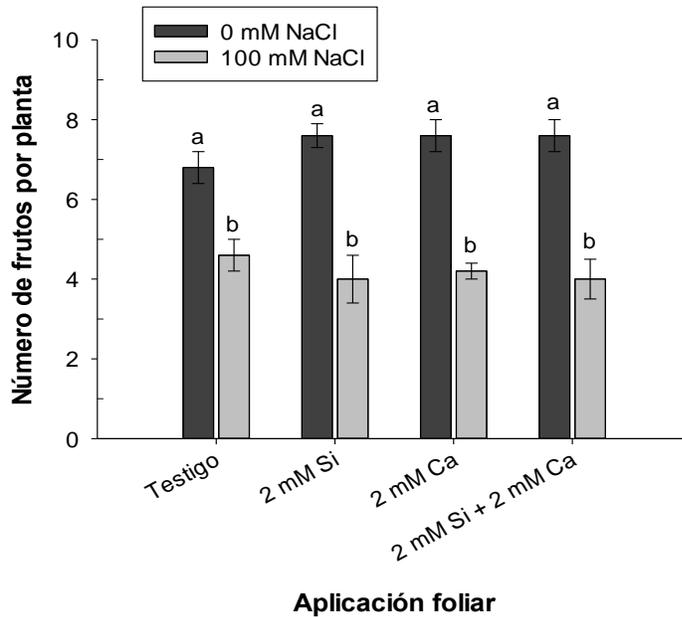


Figura 1.9. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el número de frutos por planta del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

Como se observa en los resultados de las variables de crecimiento (**Figuras 1.3 y 1.4**), de biomasa seca (**Figura 1.6**) y de rendimiento (**Figura 1.8**), el efecto de la aplicación de Ca en el nivel de 100 mM NaCl no fue significativo, pues no mostró tener efectos positivos en tales variables. [Hu et al. \(2016\)](#), encontraron que si bien la adición de 100 mM CaCl_2 al medio induce la expresión del gen *MdSOS2L1* que incrementa la tolerancia a la salinidad mediante la ruta de señalización dependiente de CBL (proteína calcineurina del tipo B), este gen fue encontrado en manzano y fue sobre expresado en tomate, al comparar dos líneas de tomate tenían la sobreexpresión de este gen y una línea silvestre, confirmaron que era la expresión de tal gen lo que generaba la tolerancia a la salinidad. En las mismas variables mencionadas, las aplicaciones foliares de Si de igual manera que las de Ca no mostraron tener un efecto benéfico. [Jana y Ryong \(2014\)](#) en una amplia revisión del efecto del Si en cultivos hortícolas concluyen que es primordial saber cuáles son aquellos cultivos acumuladores y que sean éstos los estudiados. Se han encontrado en algunas especies vegetales, principalmente gramíneas, genes que codifican para

proteínas específicas, tal como aquellas encargadas del influjo de ácido silícico (Lsi1) (Montpetit *et al.*, 2012); otras proteínas específicas encargadas de exportar el ácido silícico a la estela (Lsi2) (Deshmukh y Belanger, 2016); y otras encargadas de la descarga al xilema del parénquima de la hoja (Lsi6), siendo este último el encargado de su distribución en la hoja (Yamaji *et al.*, 2012). Los genes que codifican para las proteínas Lsi1 y Lsi2 son activados con la adición de Si, probablemente por la producción de ácido jasmónico, tal activación permite una mayor acumulación de Si en el tejido y con ello una mayor actividad enzimática antioxidante (Abdel-Haliem *et al.*, 2017). Es importante saber que no todas las plantas cuentan con éste mecanismo de absorción y transporte, y es de vital importancia entender que la magnitud del impacto positivo que puede tener el Si, depende de la habilidad de la planta para absorberlo y transportarlo (Montpetit *et al.*, 2012). Lo anteriormente mencionado y las bajas concentraciones de Ca (**Cuadro 1.18**) y Si (**Cuadro 1.34**), sugieren que el cultivar estudiado no presenta el potencial genético que permita tolerar el estrés por sales. Aunque, como ya se mencionó anteriormente hay otros factores que pueden influir en la efectividad de éstos, como la solubilidad de los compuestos empleados.

1.5.1.4. Peso de materia fresca y seca de fruto

En general, el crecimiento de los órganos y frutos de las plantas de pepino tratadas con NaCl fue inhibido y reflejado de igual manera en el peso seco. El peso de materia fresca y seca de frutos fue significativamente diferente ($P \leq 0.05$) bajo condiciones normales (0 mM NaCl) y de salinidad (100 mM NaCl) (**Cuadro 1.5**). El peso promedio de los frutos frescos de pepino bajo condiciones normales fue de 389.5 g, peso que fue disminuido 64% bajo condiciones salinas; por otro lado, el peso de materia seca fue disminuido 58% en condiciones de salinidad. Los resultados en materia fresca de frutos concuerdan con lo encontrado por Abu-Zinada (2015), quienes al aplicar una condición de salinidad de 5 dS m⁻¹ durante todo el ciclo del cultivo de pepino en dos temporadas, reportó que se disminuye significativamente ($P \leq 0.05$) esta variable.

Cuadro 1.5. Efecto de la salinidad en el peso de materia fresca y seca de fruto del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	PMFF (g)	PMSF (g)
0	389.5 ± 8.6 a ^z	12.02 ± 0.7 a
100	139.9 ± 26.4 b	5.04 ± 0.8 b
^y DMS	22.81	0.89
Pr>F	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; PMFF: peso de materia fresca de fruto; PMSF: peso de materia seca de fruto.

El efecto significativo de la salinidad se vuelve a manifestar en el peso del fruto, tanto fresco como seco, de tal manera que tampoco en estas variables se logran observar efectos de la aplicación de Si y Ca, ya fueran solo o en conjunto (**Figura 1.10**). [Bouzo y Cortez \(2012\)](#) al hacer aplicaciones foliares con diferentes fuente de Ca, no encontraron efecto significativo en el peso fresco de fruto de melón. Al someter al cultivo de papa a estrés hídrico y aplicarle vía foliar o al suelo silicio, muestra no tener diferencias estadísticas en el peso seco de los tubérculos, en comparación con el peso de tubérculos de plantas no tratadas con Si ([Pilon et al., 2014](#)).

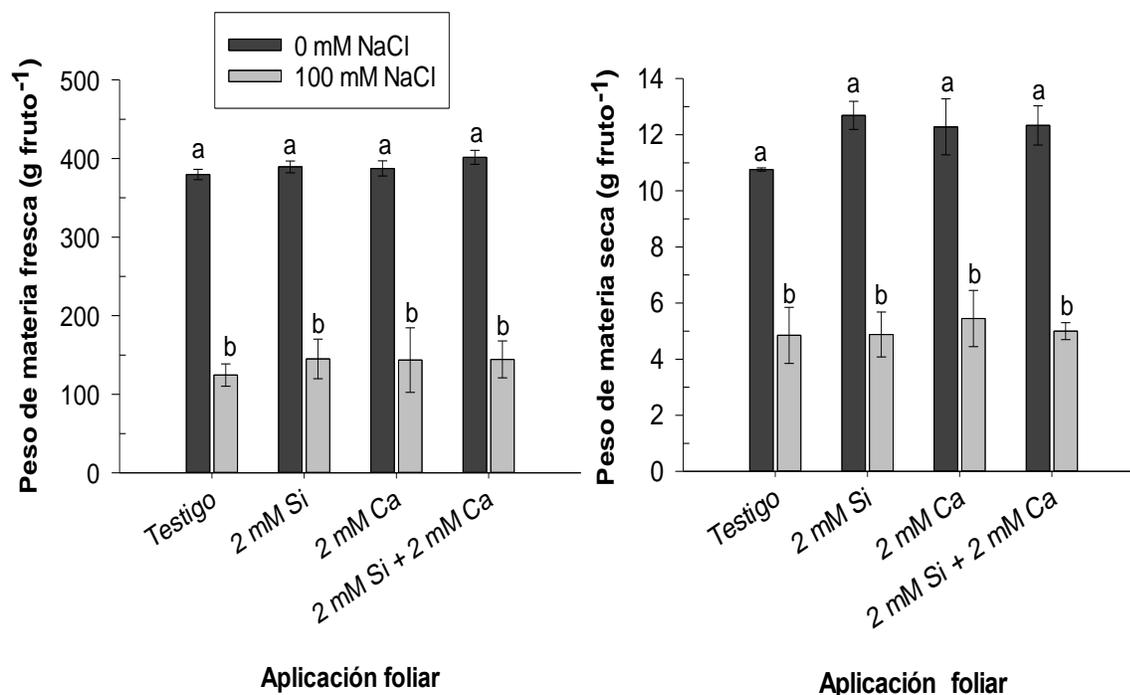


Figura 1.10. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el peso de materia fresca y seca de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

1.5.2. Variables de calidad de fruto

1.5.2.1. Longitud y diámetro de fruto

El factor salinidad afectó significativamente ($P \leq 0.05$) la longitud y el diámetro de frutos de plantas de pepino crecidas en sistema hidropónico, las cuales al crecer en condiciones normales (0 mM NaCl) lograron valores de 23.89 cm de longitud y 51.85 mm de diámetro y al ser sometidas a un estrés salino (100 mM NaCl) redujeron sus valores 35.24% y 19.17% respectivamente (**Cuadro 1.6**). El incremento de la salinidad en la zona radical afecta el crecimiento de los frutos, siendo esta cualidad el principal determinante en el precio (Magán *et al.*, 2008). Yurtseven *et al.* (2005) observaron esta misma tendencia, pues registraron un detrimento lineal del diámetro y largo de frutos con el incremento de la salinidad.

Cuadro 1.6. Efecto de la salinidad en la longitud y diámetro de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Longitud (cm)	Diámetro (mm)
0	23.89 ± 0.32 a ^z	51.85 ± 0.49 a
100	15.47 ± 1.13 b	41.91 ± 1.3 b
yDMS	0.79	0.68
Pr>F	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

En el crecimiento de fruto medido en longitud y diámetro, al igual que en las variables de crecimiento de la planta, fueron muy acentuados los efectos del NaCl (0 y 100 mM) (**Figura 1.11**), ya que en la prueba de comparación de medias para las combinaciones se encontró que la longitud y diámetro de fruto fueron afectados significativamente ($P \leq 0.05$) al compararse la condición normal y la salina, pero no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) con las aplicaciones foliares realizadas en cada condición. Con el nivel de 100 mM NaCl, la aplicación foliar de Ca incrementó el diámetro de frutos de forma apreciable aunque no significativa. De acuerdo a los resultados obtenidos, se ha reportado que la adición de 6 mM Ca en la solución nutritiva al cultivo de tomate bajo estrés salino, incrementa 60% el rendimiento, en comparación con la adición de 2 mM Ca, tal incremento se debe a un mayor tamaño de los frutos (Soria *et al.*, 2002). Por su parte el Si no mostró tener efectos significativos en el tamaño (longitud y diámetro) de frutos de chile (Jayawardana *et al.*, 2014).

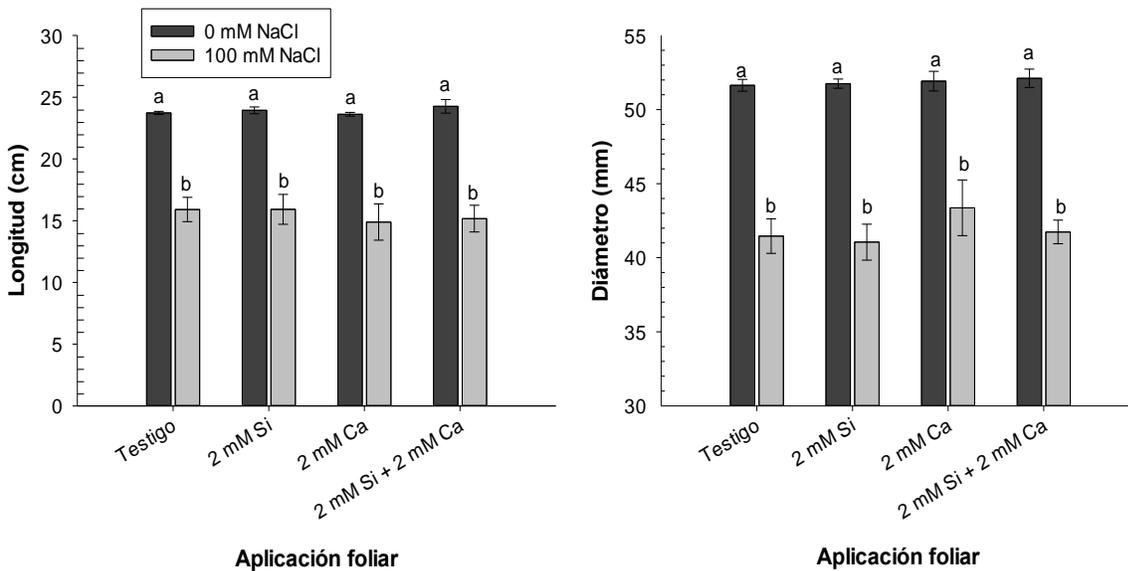


Figura 1.11. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la longitud y diámetro de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

1.5.2.2. Firmeza de frutos

En esta evaluación se determinó la resistencia que opone el fruto a ser penetrado por un puntal cónico, siendo registrada la fuerza aplicada para lograr penetrar el fruto con el puntal a la marca de 1 cm. La firmeza de frutos de plantas de pepino que fueron crecidas bajo condición salina (100 mM NaCl) fue afectada negativamente al ser comparada con los frutos de plantas crecidas bajo condiciones normales (0 mM NaCl). La firmeza medida en el extremo hacia el pedúnculo, en el punto medio y en el extremo hacia la flor fue reducida 34.8, 17.4 y 38.1% respectivamente (**Cuadro 1.7**).

Cuadro 1.7. Efecto de la salinidad en la firmeza de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Firmeza (N)		
	Extremo hacia el pedúnculo	Medio	Extremo hacia la flor
0	6.06 ± 0.20 a ^z	5.56 ± 0.21 a	5.56 ± 0.28 a
100	3.95 ± 0.15 b	4.59 ± 0.21 b	3.44 ± 0.30 b
^y DMS	0.33	0.30	0.24
Pr>F	<0.0001	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

En la prueba de comparación de medias para las combinaciones (pg*pp) se encontró que hubo diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) únicamente al comparar la condición salina (100 mM NaCl) y la no salina (0 mM NaCl), siendo no significativo el efecto de las aplicaciones foliares, esto para la firmeza medida en el punto medio ecuatorial y el punto extremo hacia la flor (**Figuras 1.12B y 1.12C**). En el caso de la medición realizada en el extremo hacia el pedúnculo, se observa que la aplicación foliar combinada de Si y Ca ocasionó una firmeza estadísticamente superior ($P \leq 0.05$) a la registrada con la aplicación individual de Ca en la condición normal (0 mM NaCl); asimismo, que sin aplicación foliar y con aplicación foliar de Si, aunque con estas últimas no hubo diferencia significativa (**Figura 1.12A**). En un estudio de la firmeza del fruto de mango, [Romero-Gomezcaña et al. \(2006\)](#) no encontraron diferencias estadísticas significativas al aplicar dosis crecientes de Ca vía foliar al cultivo. En el cultivo de melón, no hay un claro efecto entre la aplicación foliar de Ca y el incremento de la firmeza interna y externa de fruto, además no se encontró correlación entre la concentración de Ca en fruto y la firmeza ([Bouzo y Cortez, 2012](#)). [Jayawardana et al. \(2014\)](#) al tratar plantas de chile con Si tanto vía foliar como a la raíz, se tuvo como efecto el engrosamiento de la cutícula debido a la deposición de Si en las paredes celulares, lo cual se reflejó en un aumento significativo de la firmeza del fruto, en comparación con plantas no tratadas. [Bauer et al. \(2011\)](#) menciona que el sílice polimerizado es uno de los componentes más rígidos en el tejido vegetal y puede formar estructuras mucho más duras que aquellas presentes en paredes celulares no mineralizadas. El efecto nulo del Si en esta variable puede relacionarse con su concentración baja y no significativa de este elemento en frutos (**Cuadro 1.33**).

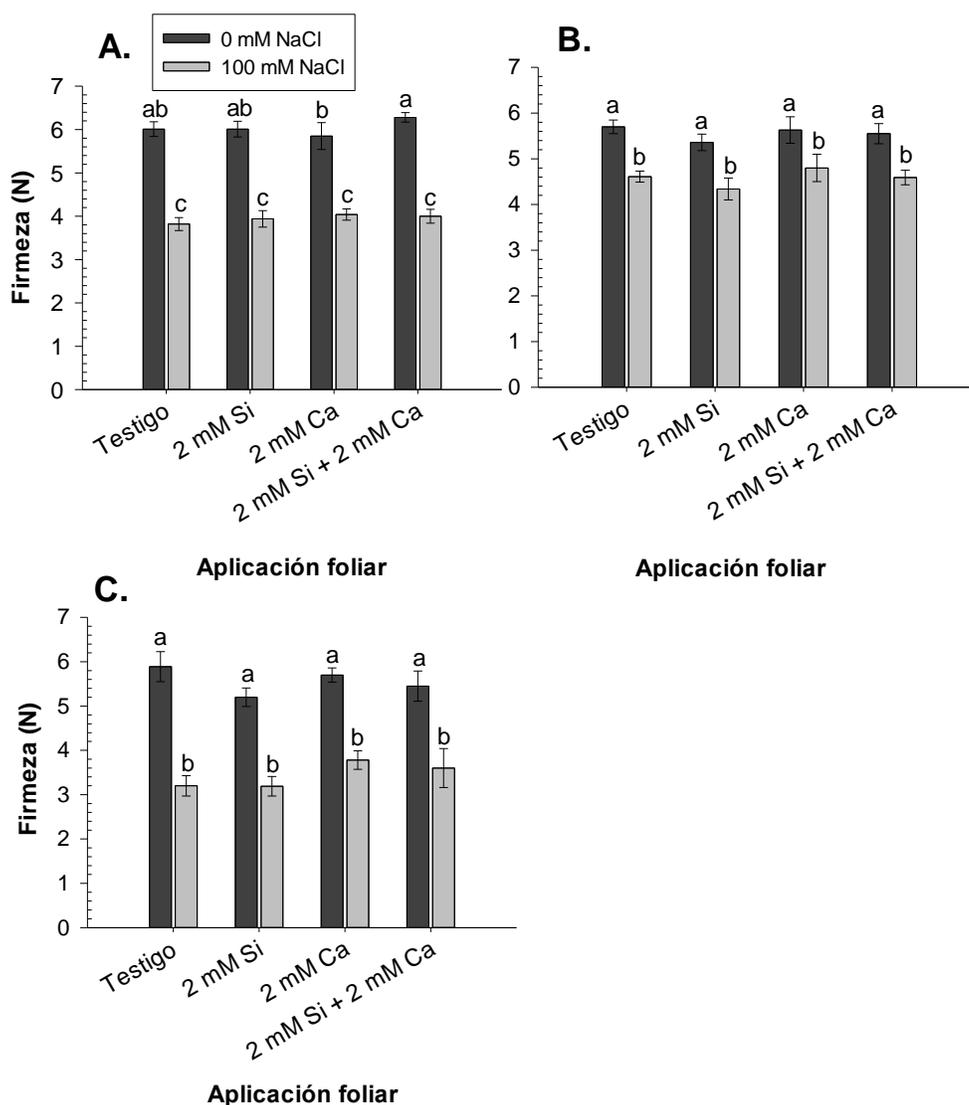


Figura 1.12. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la firmeza de frutos medida en tres puntos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico. **A.** Firmeza de fruto en el extremo hacia el pedúnculo; **B.** Firmeza del fruto en el punto medio ecuatorial; **C.** Firmeza del fruto en el extremo hacia la flor.

Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

1.5.2.3. Coloración en frutos

El factor salinidad (NaCl) tuvo efecto significativo ($P \leq 0.05$) en las variables de luminosidad e índice de saturación, que representan la claridad y la pureza de color, respectivamente (**Cuadro 1.8.**). Al añadir 100 mM NaCl a la solución nutritiva el

porcentaje de luminosidad disminuye, y el índice de saturación se incrementa. Dentro de los parámetros de aceptación de un alimento, la coloración es la propiedad óptica principal, pues si el producto no tiene una buena coloración, esto puede ser suficiente para ser rechazado, aunque en sus demás aspectos cumpla con los estándares (Domene y Segura, 2014). Por tanto el color de un fruto es un parámetro de suma importancia de calidad (Fahmy y Nakano, 2013).

Cuadro 1.8. Efecto de la salinidad en parámetros de color (luminosidad e índice de saturación) de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Color	
	Luminosidad (%)	Índice de saturación (croma)
0	15.50 ± 1.12 a ^z	19.03 ± 7.50 b
100	13.29 ± 0.95 b	37.60 ± 7.55 a
^y DMS	1.44	7.46
Pr>F	0.0072	0.0005

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

La luminosidad o claridad se refiere al componente blanco-negro con valores de 0 a 100 (Domene y Segura, 2014). La mayor luminosidad de fruto se presentó con la combinación de condición normal (0 mM NaCl) y aplicaciones foliares de Si, la cual fue estadísticamente superior ($P \leq 0.05$) a la aplicación conjunta de Si y Ca en la misma condición (0 mM NaCl) e igualmente lo fue para todos los tratamientos foliares a los que se añadió la condición salina (100 mM NaCl). Aunque con la aplicación conjunta de Si + Ca se obtuvo la menor luminosidad de los frutos en la condición no salina, también fue la que mayor valor en luminosidad tuvo en la condición salina (**Figura 1.13**). Por tanto bajo condiciones normales las aplicaciones foliares de silicio resulta en mayor luminosidad, mientras que, bajo estrés salino, la aplicación foliar conjunta de Si+Ca es la que ocasiona el mayor valor de luminosidad. La reducción de luminosidad causada por los tratamientos foliares en el nivel de 100 mM NaCl y la aplicación de Si+Ca en el nivel de 0 mM NaCl se traduce en una degradación sustancial de la apariencia del fruto de pepino (Fahmy y Nakano, 2013). Resultados similares fueron obtenidos por Montesano *et al.* (2016), quienes al añadir Si a la solución nutritiva no encontraron que

tuviese efecto en la luminosidad de color de vainas de frijol verde, en comparación con el color de aquellas que no fueron tratadas con Si.

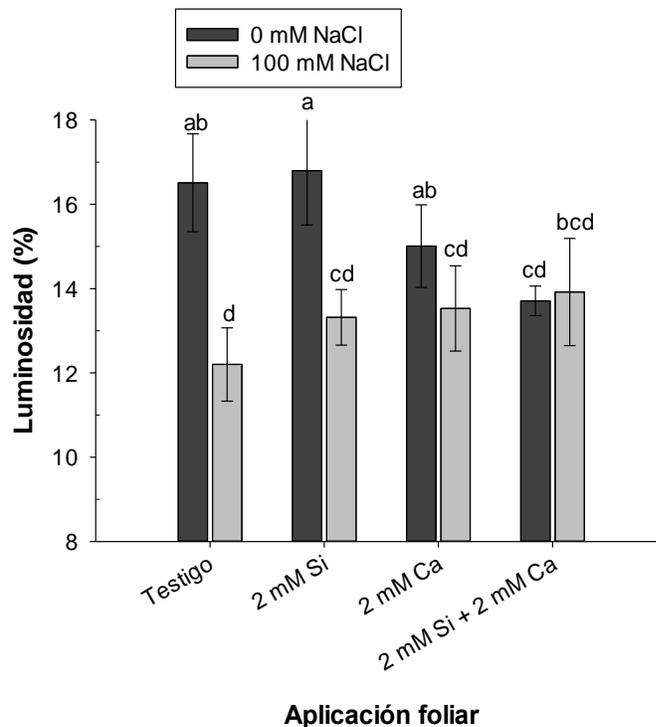


Figura 1.13. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el porcentaje de luminosidad de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

El ángulo hue (tono de color) es una escala compuesta de 100 tonos que varían de 0 a 360° y representa las variaciones que un solo color puede tener al combinarlo con otro (Domene y Segura, 2014). Esta variable no fue afectada ($P > 0.05$) por ninguna de las combinaciones; es decir, que ni la salinidad ni las aplicaciones foliares estudiadas tuvieron efecto significativo (Figura 1.14). Similar a estos resultados, Montesano *et al.* (2016) no encontraron efecto significativo con la adición de Si en el ángulo hue de vainas de frijol verde al compararlo con vainas de plantas no tratadas.

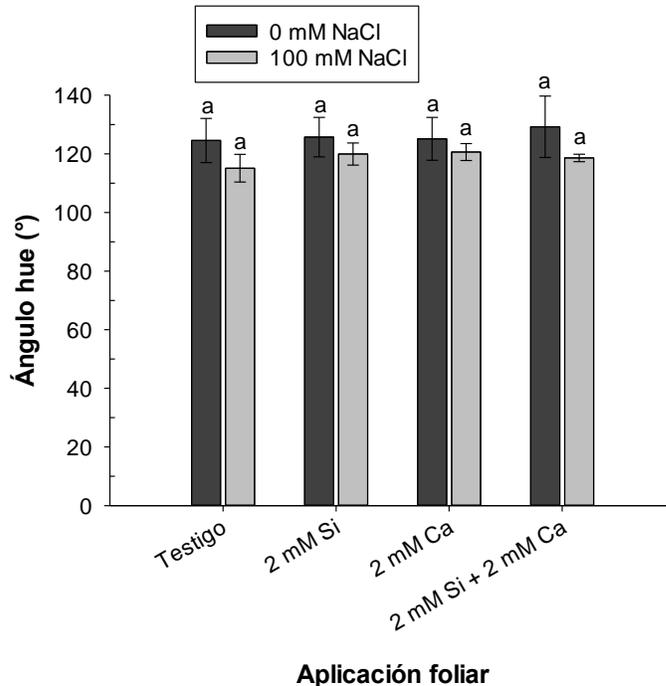
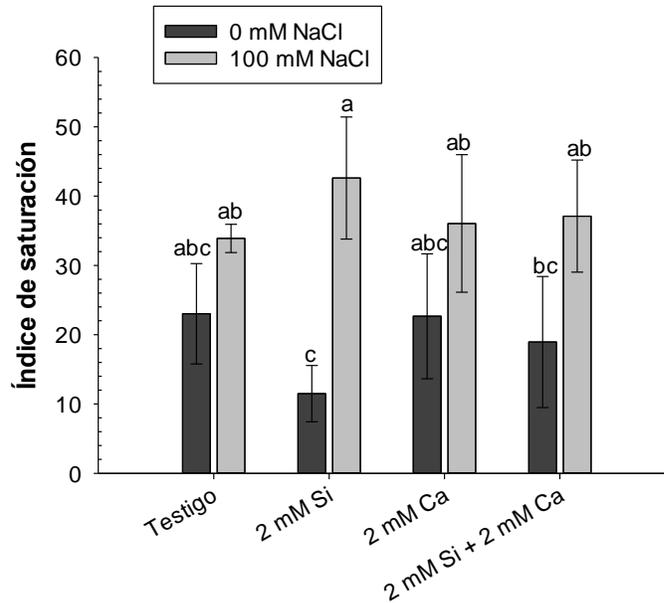


Figura 1.14. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el ángulo hue (tono de color) de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

El valor del croma puede ir desde 0 para estímulos acromáticos hasta 150 o más para monocromáticos (Domene y Segura, 2014). Los mayores índices de saturación (croma) en fruto, se presentaron en la condición de salinidad (100 mM NaCl); bajo estrés salino, la aplicación de Si incrementó ligeramente el croma en frutos, pero no fue estadísticamente diferente ($P > 0.05$) al resto de tratamientos foliares en esta condición (Figura 1.15). La aplicación de este mismo elemento (Si) tuvo un efecto contrario en la condición normal (sin salinidad), pues con su aplicación se disminuyeron los índices de saturación en fruto, aunque este efecto no fue estadísticamente diferente en comparación con los demás tratamientos foliares en la misma condición. Por tanto bajo una condición salina (100 mM NaCl) la aplicación foliar de Si muestra incrementar la intensidad del color y con ello la calidad visual de los frutos (Fahmy y Nakano, 2013). Por su parte, Jayawardana *et al.* (2014) no encontraron efecto significativo al hacer aplicaciones foliares o al suelo de Si en la cloración de frutos de chile, bajo una condición normal.



Aplicación foliar

Figura 1.15. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el índice de saturación (croma) de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

1.5.2.4. Calidad interna de frutos

Los parámetros que confieren calidad interna a los frutos son: los sólidos solubles totales, pH, conductividad eléctrica y acidez titulable, siendo los valores de todos estos atributos, incrementados significativamente ($P \leq 0.05$) al añadir 100 mM NaCl a la solución nutritiva (**Cuadro 1.9**). Los parámetros de calidad de fruto son los únicos que pueden ser mejorados por la salinidad (Zhang *et al.*, 2016). Resultados similares en acidez titulable fueron obtenidos por Huang *et al.* (2009), pues al someter a plantas de pepino a niveles crecientes de NaCl (0, 30 y 60 mM), se incrementó proporcionalmente esta variable y con ello se tuvo una mayor calidad de fruto. Asimismo, Soria *et al.* (2002) y Fernández-García *et al.* (2004) al someter un cultivo de tomate a salinidad, reportaron un incremento en la concentración de sólidos solubles totales en los frutos. Por su parte Zong *et al.* (2011), al experimentar con niveles crecientes de conductividad eléctrica en el agua de riego en plantas de melón y sandía, encontraron incrementos los sólidos solubles totales con el aumento de la conductividad eléctrica. El incremento en la CE en el jugo de frutos

en el nivel de 100 mM NaCl concuerda con [Colla et al. \(2006\)](#) quienes reportan que incrementos en la CE en el agua de riego tiene como efecto el aumento de la CE en el jugo de frutos de sandía.

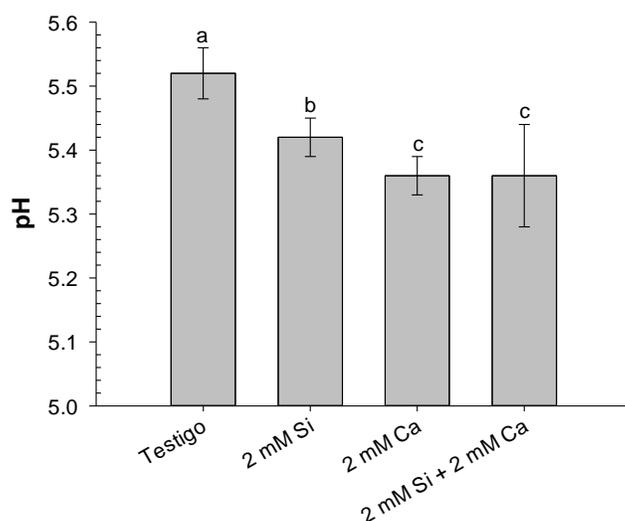
[Trajkova y Papadantonakis \(2006\)](#) reportan que el pH de frutos de pepino tiende a ser menos ácido cuando las plantas se someten a estrés salino, pudiendo esto deberse precisamente a la alta presencia de Na en frutos; mientras que en pimiento, [Navarro et al. \(2010\)](#) reportan que niveles crecientes de salinidad no tienen efecto significativo en el pH de fruto.

Cuadro 1.9. Efecto de la salinidad en parámetros de calidad interna (sólidos solubles totales, pH, conductividad eléctrica y acidez titulable) de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Sólidos solubles totales (°Brix)	pH	CE (dS m ⁻¹)	AT (g 100g ⁻¹)
0	3.09 ± 0.10 b ^z	5.38 ± 0.04 b	0.88 ± 0.03 b	0.657 ± 0.026 b
100	3.99 ± 0.20 a	5.45 ± 0.05 a	1.72 ± 0.05 a	0.856 ± 0.425 a
√DMS	0.24	0.04	0.07	0.044
Pr>F	<0.0001	0.0052	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); √DMS: diferencia mínima significativa; CE: conductividad eléctrica; AT: acidez titulable.

El efecto del factor aplicación foliar fue significativo ($P \leq 0.05$) en la variable de pH en fruto (**Figura 1.16**). En el testigo (sin aplicación foliar de Ca, Si o ambos), se presentaron los valores de pH más altos; por el contrario, con la aplicación de Si el pH disminuye significativamente con respecto al testigo; los valores de pH se ven aún más reducidos con las aplicaciones individuales de Ca y con la combinación Ca + Si, obteniéndose con estos últimos los valores más bajos y diferentes estadísticamente ($P \leq 0.05$) al resto. Las aplicaciones foliares de Si, Ca y Si + Ca mostraron disminuir el valor de pH en ambas condiciones con respecto al testigo. Puede deberse a que se disminuyó la exportación de Na al fruto. La disminución del pH se traduce en un incremento de la calidad de frutos ([Colla et al., 2006](#)).



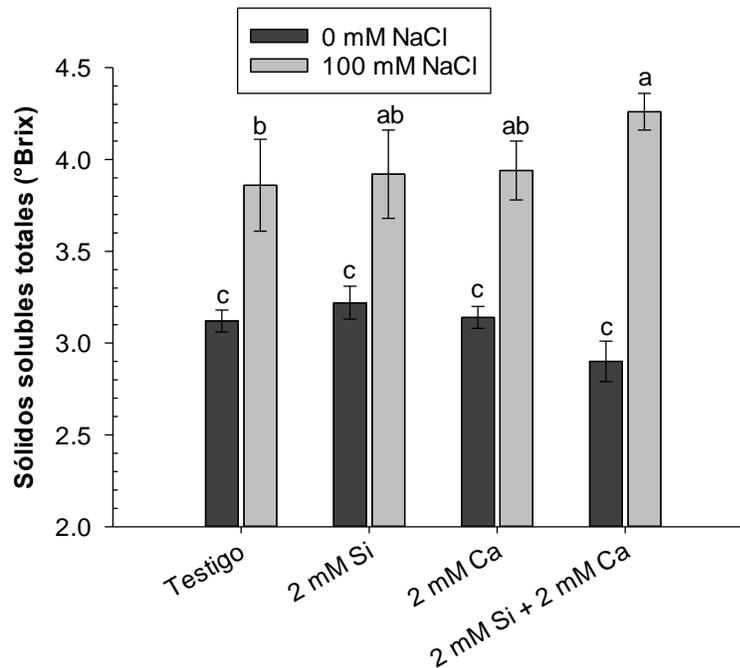
Aplicación foliar

Figura 1.16. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el pH de frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

El contenido de sólidos solubles totales fue mayor de manera general en los tratamientos estudiados en condición de salinidad (100 mM NaCl); dentro de tal condición, la aplicación conjunta de Si y Ca tuvo como efecto el mayor valor en esta variable y diferente estadísticamente ($P \leq 0.05$) al testigo. Bajo la condición normal (0 mM NaCl), el efecto de las aplicaciones foliares no fue diferente estadísticamente (**Figura 1.17**). Bajo una condición óptima (0 mM NaCl), la aplicación foliar conjunta de Si + Ca aumenta el contenido de °Brix, lo cual se traduce en un mayor porcentaje de sólidos solubles totales (azúcares y ácidos orgánicos), con lo que se propicia un aumento en la calidad interna de frutos (Domene y Segura, 2014). Al hacer aplicaciones foliares de calcio al cultivo de melón, no se encontraron efectos significativos en la concentración de sólidos solubles (Bouzo y Cortez, 2012). Por su parte Kaya *et al.* (2002), al aplicar en la solución nutritiva 5 mM Ca (CaCl_2), a plantas de fresa con estrés salino (35 mM NaCl) y sin él (0 mM NaCl), encontraron que este elemento incrementa en ambas condiciones los sólidos solubles. En frutos de chile, los sólidos solubles totales no mostraron ser afectados por las aplicaciones de Si, independientemente si fueron vía foliar o a la raíz (Jayawardana *et al.*, 2014). Por su parte, Ashraf *et al.* (2009) aunque encontraron un aumento en los

sólidos solubles en jugo de caña con la aplicación de Si, este incremento no fue tan importante como el que se obtuvo con la aplicación de K. En la presente investigación, los sólidos solubles totales en la condición de salinidad (100 mM NaCl) mostraron ser incrementados significativamente con la aplicación foliar de Si + Ca, en comparación con el testigo.



Aplicación foliar

Figura 1.17. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el contenido de sólidos solubles totales de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

En la prueba de medias de efecto de combinaciones, el mayor valor de pH en fruto fue obtenido con la aplicación foliar testigo en la condición salina (100 mM NaCl), valor que fue diferente estadísticamente ($P \leq 0.05$) a todas los demás tratamientos (**Figura 1.18**). Al comparar el efecto de los niveles 0 y 100 mM NaCl con la aplicación foliar testigo, se observa que el pH de fruto se incrementa con la salinidad, esta misma tendencia fue encontrada al hacer aplicaciones foliares de Ca + Si, pues al someter el cultivo a una condición de salinidad tiende a aumentar significativamente el pH en fruto. Caso contrario

se observa con las aplicaciones de Si, pues se encontró que al someter el cultivo a una condición salina el pH en fruto disminuye significativamente en comparación con aquellas plantas en condición normal. Las aplicaciones foliares de calcio mostraron mantener el pH igual en ambas condiciones (0 y 100 mM NaCl).

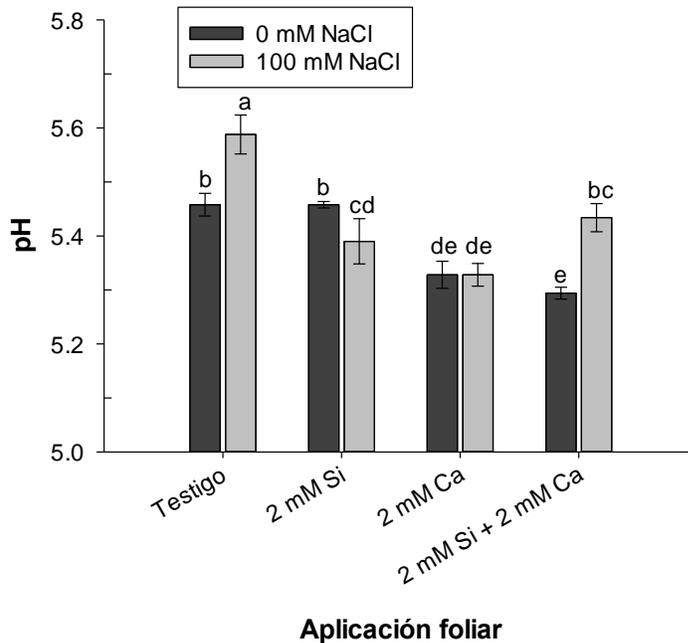


Figura 1.18. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en el pH de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

Al realizar la prueba de medias para el efecto de las combinaciones se obtuvo que la conductividad eléctrica en fruto fue altamente influenciada por el factor salinidad, pues esta variable incrementó 46.7% al añadir 100 mM NaCl a la solución nutritiva en la aplicación foliar testigo, y esta misma tendencia se observó en las demás aplicaciones foliares (**Figura 1.19**). Ninguno de los tratamientos foliares tuvo efectos significativos dentro de cada condición de salinidad.

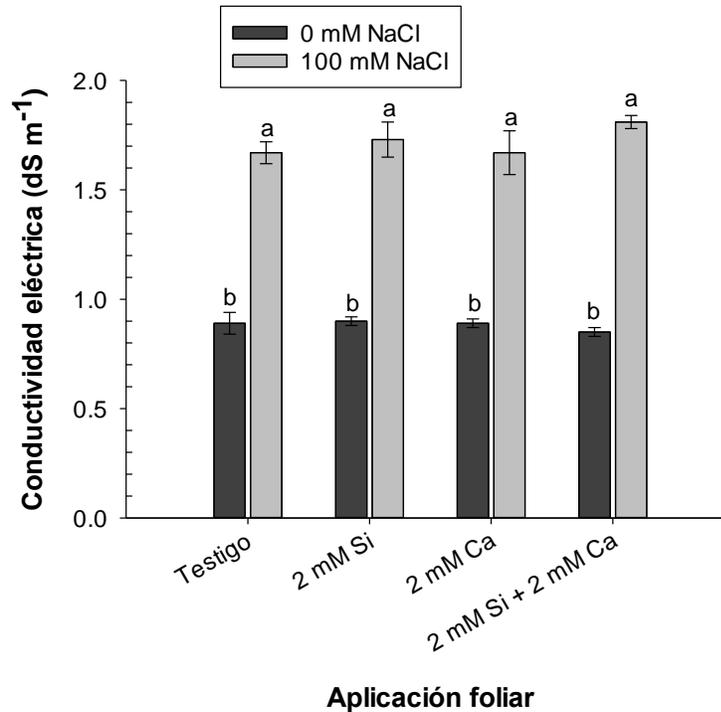
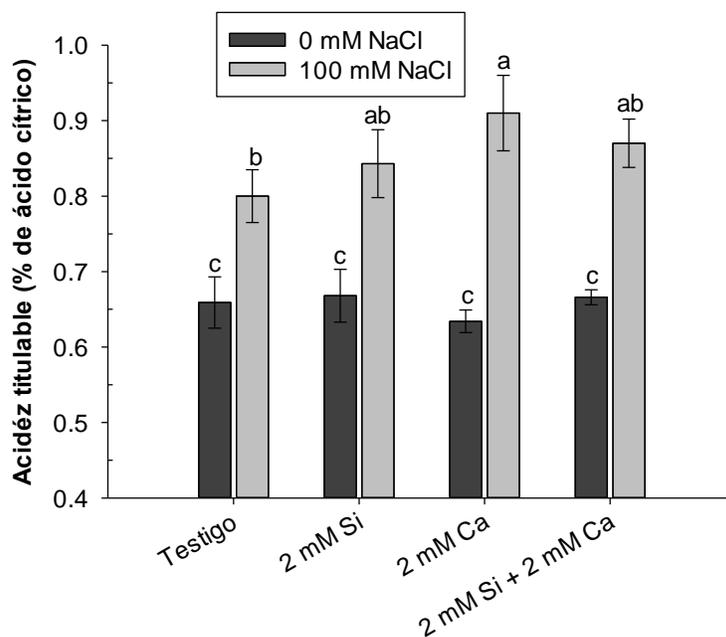


Figura 1.19. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la conductividad eléctrica de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

Bajo condición normal (0 mM NaCl) las aplicaciones foliares no mostraron efectos significativos ($P > 0.05$) en la variable de acidez titulable en fruto. Sin embargo, con la adición de 100 mM NaCl a la solución nutritiva, se incrementaron los valores de esta variable de manera significativa (**Figura 1.20**), siendo con la aplicación foliar de Ca con la que se obtiene un mayor incremento, el cual fue significativamente diferente al testigo en el mismo nivel de NaCl (100 mM). El contenido de ácidos en frutos tiene efecto en el sabor, color y calidad de conservación ([Domene y Segura, 2014](#)), y éstos se ven incrementados con la aplicación foliar de Ca en el cultivo de pepino bajo condición de salinidad (100 mM NaCl). En tomate la acidez titulable muestra ser disminuida con la adición de Si al follaje en 13.66% ([Xue et al., 2012](#)).



Aplicación foliar

Figura 1.20. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la acidez titulable de frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

1.5.3. Variables bioquímicas

1.5.3.1. Concentración de prolina

Al someter al cultivo de pepino a un nivel de 100 mM NaCl, éste mostró un decremento significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de prolina en comparación con las plantas en el nivel de 0 mM NaCl (**Cuadro 1.10**). Esto difiere con la mayoría de las investigaciones realizadas con cultivos sometidos a estrés salino, pues en todos ellos la concentración de prolina se incrementa bajo esta condición (Lee *et al.*, 2010; Pei *et al.*, 2010; Kafi y Rahimi, 2011; Yin *et al.*, 2013; Munir *et al.*, 2016).

Cuadro 1.10. Efecto de la salinidad en la concentración de prolina en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Prolina $\mu\text{m g}^{-1}$
0	4.98 ± 0.39 a ^z
100	3.37 ± 0.44 b
^y DMS	0.54
Pr>F	<0.0001

^zValores \pm DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

El efecto de las aplicaciones foliares no mostró diferencia estadística significativa en la concentración de prolina de hojas de plantas de pepino bajo el nivel de 0 mM NaCl (**Figura 1.21**). En el nivel de 100 mM NaCl la aplicación foliar de Si mostró incrementar la concentración de prolina, aunque de una manera no significativa. La prolina cumple con funciones de osmolito, fuente de energía, removedor de ROS ([Dar et al., 2016](#)), participa en el ajuste osmótico y protege las estructuras subcelulares ([Ashraf y Foolad, 2007](#)). [Pei et al. \(2010\)](#) mencionan que la acumulación de prolina es un síntoma de daño y la disminución de la acumulación de este osmolito, por la adición de Si, como una reducción del daño por estrés. [Yin et al. \(2013\)](#) obtuvieron resultados similares a los obtenidos en el presente trabajo, pues al aplicar Si a plantas sin estrés, éstas no mostraron diferencias en la concentración de prolina con respecto de aquellas no tratadas; pero, cuando las plantas son sometidas a un estrés salino, los resultados obtenidos por estos investigadores difieren considerablemente con los aquí obtenidos, pues encontraron que la condición salina tiene como efecto incrementar significativamente el contenido de prolina, siendo tal incremento disminuido hasta un 94% con la aplicación de Si, en comparación con aquellas plantas únicamente sometidas al estrés salino. Estos investigadores proponen que el gasto energético para la biosíntesis de prolina es demasiado alto, por lo que la reducción de producción de este osmolito permite un mejor uso de tal energía en otros procesos que ayuden a sobrellevar el estrés. De manera similar a estos investigadores, [Lee et al. \(2010\)](#) al adicionar Si a partir de Na_2SiO_3 a plantas de soya bajo estrés por NaCl tuvieron por respuesta la disminución del contenido de prolina en comparación con aquellas plantas únicamente tratadas con NaCl. En contraste con lo anteriormente mencionado, [Pilon et al. \(2014\)](#)

encontraron que las aplicaciones de Si tanto al suelo como vía foliar incrementan la concentración de prolina de plantas de papa sometidas a estrés hídrico, tal incremento de prolina por efecto del Si permite mantener la turgencia de la célula y por ende una mayor conservación de agua. Afirmando lo anterior, [Abdel-Hallem et al. \(2017\)](#) encontraron que la concentración de prolina en plantas de arroz sometidas a estrés por NaCl (100, 200, 400 y 800 mM) es incrementada significativamente en comparación con aquellas plantas no tratadas con NaCl (0 mM), también encontraron que con la aplicación de Si (iones de sílice) a las plantas bajo estrés, se incrementa aún más la concentración de prolina. Posiblemente actuando en el ajuste osmótico.

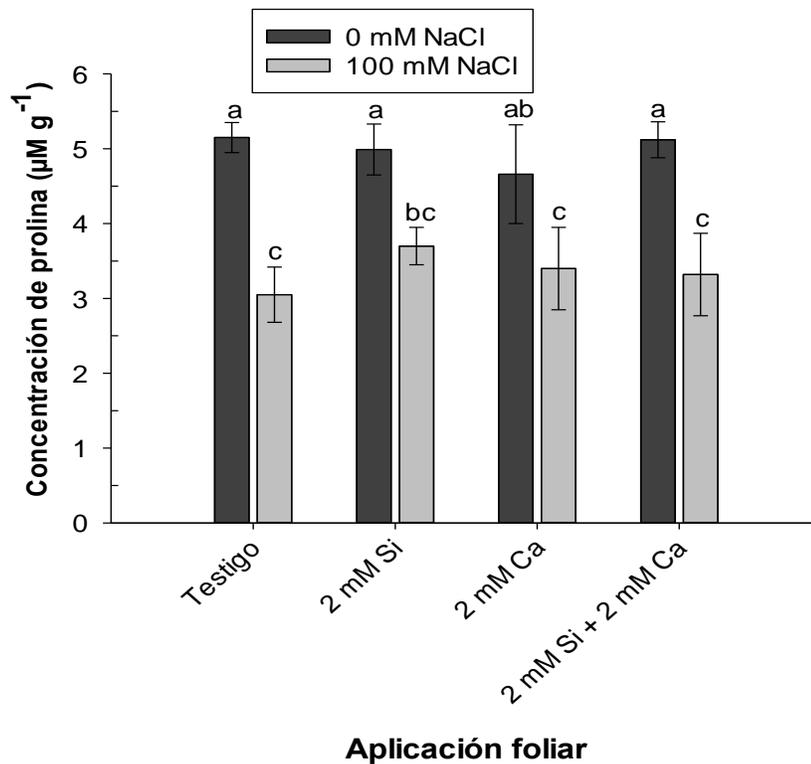


Figura 1.21. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de prolina en hojas del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$).

1.5.3.2. Concentración de macronutrientos

Concentración de nitrógeno total

El factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) mostró tener efectos estadísticos significativos ($P \leq 0.05$) en la concentración de N total en raíz, tallo, hojas y frutos; siendo tales concentraciones disminuidas en raíz, tallo y hojas al añadir a la solución nutritiva 100 mM NaCl; por el contrario, en frutos, donde la concentración de N fue incrementada (**Cuadro 1.11**). Es de notarse también que la concentración de N bajo una condición de 0 mM NaCl se concentra especialmente en hojas, y cuando el cultivo se somete a un estrés de 100 mM NaCl el N total se concentra principalmente en frutos, tal concentración puede ser el factor de la deformación de los frutos (**Figura 1.7**), que causa un detrimento en la calidad de éstos. La disminución en concentración de N en tejido foliar debido a la salinidad (100 mM NaCl) se debe a que altas concentraciones de Na^+ inhiben la absorción y asimilación de NO_3^- y NH_4^+ , incluso la reducción del NO_3^- tiene lugar en raíces en lugar de en las hojas (Ulrich, 2002). Además la acumulación de Cl^- inhibe la absorción de NO_3^- (Ali, 2011). Validando lo anterior, Kaya y Higgs (2002) encontraron que la concentración de N en hojas de pepino se ve significativamente disminuida con la presencia de un estrés salino por NaCl. El incremento en la concentración de N total en fruto con el nivel de 100 mM NaCl no coincide con lo reportado por Fernández-García *et al.* (2004), quien al someter al cultivo de tomate a estrés salino (30 y 60 mM NaCl) encontró una disminución en la concentración de NO_3^- en frutos. La reducción en concentración de N en tejido foliar causada por la salinidad rápidamente puede inhibir el crecimiento, debido a que este elemento es constituyente de muchos componentes celulares (Hu y Schmidhalter, 2005).

Cuadro 1.11. Efecto de la salinidad en la concentración de nitrógeno (N) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de N (% *BS)			
	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
0	1.94 ± 0.10 a ^z	2.39 ± 0.15 a	3.89 ± 0.13 a	2.48 ± 0.18 b
100	1.41 ± 0.17 b	1.81 ± 0.13 b	2.68 ± 0.12 b	3.32 ± 0.25 a
∇DMS	0.21	0.21	0.18	0.27
Pr>F	0.0004	0.0002	<0.0001	0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa. *BS: biomasa seca.

En la prueba de medias del efecto de combinaciones en la concentración de N total (**Cuadro 1.12**), se encontró la misma tendencia encontrada en el **Cuadro 1.11**, pues el factor que mayormente influyó esta variable fue la salinidad (0 y 100 mM NaCl). Bajo la condición normal (0 mM NaCl) el efecto de las aplicaciones foliares no fue significativo ($P > 0.05$) en raíz, tampoco lo fue en frutos. En el nivel de 100 mM NaCl, el efecto de las aplicaciones foliares no fue significativo en raíz, tallo y hojas, siendo en frutos la concentración de N total disminuida de manera significativa ($P \leq 0.05$) con la aplicación conjunta de Si + Ca, al ser comparado con el testigo. En tallo bajo condición normal (0 mM NaCl), el N se concentró de manera particular con la aplicación conjunta de Ca + Si, siendo diferente estadísticamente ($P \leq 0.05$) al efecto de la aplicación de Si individual. Caso contrario se observó en hojas bajo condición normal, donde la aplicación individual de Si tuvo como efecto la mayor concentración de N, tal efecto fue diferente estadísticamente a las demás aplicaciones foliares en la misma condición. Esto coincide con lo encontrado por [Shahzad et al. \(2013\)](#) quienes al aplicar Si al control (sin estrés salino) encontraron una mayor concentración de NO_3^- en la hoja, y al aplicarlo en una condición salina (100 mM NaCl) no tuvo efecto significativo, pues altos niveles de NaCl en la solución propician el antagonismo del Cl^- con NO_3^- . Otros investigadores ([Kaya et al., 2003](#)) han encontrado que aplicar Ca en la solución nutritiva a plantas de pepino bajo estrés salino muestra incrementar la concentración de N en tejido, esto se debe a que la fuente de Ca empleada es nitrato de calcio. Por tanto, en el cultivo de pepino bajo condición normal, la aplicación foliar de Si muestra incrementar la concentración de N en

hojas, y bajo una condición salina la aplicación conjunta de Si + Ca muestra disminuir la concentración de N en frutos.

Cuadro 1.12. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de nitrógeno (N) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de N (% *BS)					
0	Testigo	1.82 ± 0.09 ab ^z	2.42 ± 0.13 ab	3.79 ± 0.05 b	2.44 ± 0.06 d
	2 mM Si	1.93 ± 0.06 a	2.11 ± 0.12 bc	4.14 ± 0.07 a	2.41 ± 0.03 d
	2 mM Ca	1.98 ± 0.10 a	2.45 ± 0.10 ab	3.83 ± 0.12 b	2.37 ± 0.12 d
	2 mM Si + 2 mM Ca	2.05 ± 0.11 a	2.60 ± 0.17 a	3.82 ± 0.18 b	2.72 ± 0.34 d
100	Testigo	1.44 ± 0.18 bc	1.87 ± 0.09 cd	2.74 ± 0.18 c	3.72 ± 0.32 a
	2 mM Si	1.38 ± 0.19 c	1.81 ± 0.22 cd	2.56 ± 0.08 c	3.33 ± 0.15 ab
	2 mM Ca	1.46 ± 0.21 bc	1.75 ± 0.08 d	2.70 ± 0.09 c	3.21 ± 0.16 abc
	2 mM Si + 2 mM Ca	1.37 ± 0.19 c	1.81 ± 0.11 cd	2.75 ± 0.10 c	3.02 ± 0.27 bc
	∇DMS	0.39	0.35	0.30	0.54

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de fósforo

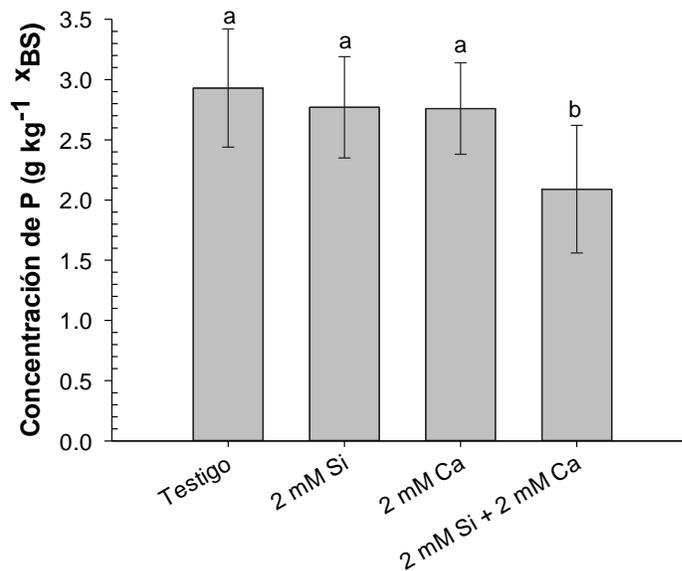
El factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) fue significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de fósforo (P) en tallos y frutos. Mientras que en tallo hubo una disminución en concentración de P de 26.4% debida a la adición de 100 mM NaCl a la solución nutritiva; en frutos, se aumentó 35.6% con la misma adición, en ambos casos en comparación con plantas en el nivel de 0 mM NaCl (**Cuadro 1.13**). En un cultivo de pepino hidropónico, [Savvas et al. \(2005\)](#) encontraron que alrededor de 30 mM NaCl en la raíz no afecta la concentración de P en hojas. En el presente trabajo la concentración de P pudo haber sido reducida debido a los altos niveles de Cl⁻ en el medio que redujeron la absorción de PO₄³⁻ ([Lamz y González, 2013](#)).

Cuadro 1.13. Efecto de la salinidad en la concentración de fósforo (P) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de P (g kg ⁻¹ *BS)	
	Tallo	Frutos
0	4.38 ± 0.35 a ^z	4.91 ± 0.15 b
100	3.22 ± 0.35 b	7.63 ± 0.46 a
∇DMS	0.60	0.27
Pr>F	0.0021	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

En la prueba de comparación de medias del efecto de las aplicaciones foliares en la concentración de fósforo se encontró que hubo diferencias estadísticas significativas en hojas ($P \leq 0.05$), registrándose las mayores concentraciones con las aplicaciones foliares de Si y Ca y en el testigo, tratamientos que no tuvieron diferencia estadística entre ellos, pero si la tuvieron en comparación con el efecto de la aplicación conjunta de Si + Ca (**Figura 1.22**). [Agostinho \(2016\)](#) no encontró efecto significativo al aplicar diferentes fuentes de Si, dosis diferentes y dos formas de aplicación (al suelo y al follaje) en el contenido y absorción de P. En contraste a lo anterior, ha sido reportado que el Si ayuda a sobrellevar el estrés provocado tanto por la deficiencia como por el exceso de P ([Sahebi et al., 2015](#)). Es evidente en la **Figura 1.22** que el efecto de la aplicación foliar individual de Si y Ca no es significativo, con respecto al testigo, pero su aplicación conjunta disminuye significativamente tal concentración.



Aplicación foliar

Figura 1.22. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de P en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico. Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$). *BS: biomasa seca.

En el **Cuadro 1.14** se muestra que el efecto de combinaciones no fue significativo en la concentración de P en raíz ($P > 0.05$). En fruto la diferencia fue significativa ($P \leq 0.05$) al comparar los efectos de las aplicaciones foliares en la condición normal (0 mM NaCl) y en la condición salina (100 mM NaCl); siendo el efecto de las aplicaciones foliares no significativo dentro de cada condición. En tallo se encontró la misma tendencia que en frutos, siendo el efecto salino (100 mM NaCl) contrario, pues tal condición disminuyó la concentración de P. En hojas por su parte en una condición normal (0 mM NaCl), la concentración de P mostró ser aumentada un 23.1% con la aplicación conjunta de Si + Ca, en comparación con la aplicación individual de Si, siendo tal diferencia no significativa; y al ser sometido el cultivo a una condición de salinidad con 100 mM NaCl la aplicación conjunta de Si + Ca mostró reducir significativamente la concentración de P con respecto al efecto de las demás aplicaciones foliares en la misma condición (**Cuadro 1.14**). Los resultados obtenidos difieren con [Dabuxilatu e Ikeda \(2005a\)](#), quienes encontraron que la aplicación de Ca a plantas de pepino bajo estrés salino muestra incrementar la concentración de P en tallos en comparación con aquellas plantas no

tratadas con Ca. [Pilon et al. \(2013\)](#), al comparar el efecto de hacer aplicaciones de Si al follaje y al suelo, encontraron que el suministro de Si al suelo incrementa significativamente la concentración de P en hojas de plantas de papa, con respecto al control, pero al hacer las aplicaciones al follaje, la concentración de P no muestra ser incrementada.

Cuadro 1.14. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de fósforo (P) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de P (g kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	2.75 ± 0.35 a	4.69 ± 0.35 a ^z	2.39 ± 0.59 bc	5.09 ± 0.13 b
	2 mM Si	2.45 ± 0.22 a	4.44 ± 0.58 ab	2.09 ± 0.31 cd	4.87 ± 0.12 b
	2 mM Ca	2.41 ± 0.20 a	4.18 ± 0.22 abc	2.44 ± 0.37 bc	4.80 ± 0.19 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	2.39 ± 0.06 a	4.24 ± 0.15 ab	2.72 ± 0.31 abc	4.89 ± 0.13 b
100	Testigo	2.48 ± 0.19 a	3.24 ± 0.29cd	3.47 ± 0.12 a	7.71 ± 0.57 a
	2 mM Si	2.26 ± 0.19 a	3.10 ± 0.38 d	3.42 ± 0.18 a	7.61 ± 0.56 a
	2 mM Ca	2.25 ± 0.41 a	3.48 ± 0.40 bcd	3.10 ± 0.35 ab	7.94 ± 0.31 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	2.71 ± 0.04 a	3.05 ± 0.41 d	1.46 ± 0.54 d	7.26 ± 0.41 a
γDMS		0.62	0.95	0.87	0.91

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); γDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de potasio

El efecto del factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) fue estadísticamente significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de potasio en raíz, tallo y hojas (**Cuadro 1.15**). Al comparar el efecto del nivel 100 mM con el de 0 mM NaCl en la solución nutritiva, en la concentración de K, se encontró un detrimento en raíz, tallo y hojas de 69.6, 75.4 y 73.6% respectivamente. De manera coincidente, [Savvas et al. \(2005\)](#) reportan que concentraciones de NaCl por arriba de 30 mM reducen considerablemente la concentración de K en hojas de pepino. La adición de 200 mM NaCl a la solución nutritiva en diferentes cultivares de olivo tuvo por efecto la disminución de la concentración de K

en proporciones hasta de 59% en raíz, 49% en tallos y 63% en hojas, esto debido principalmente al remplazo del K⁺ por el Na⁺ en exceso en el medio y/o por la pérdida de potasio desde la raíz (Kchaou *et al.*, 2010). Concentraciones altas de Na⁺ en el medio pueden reducir la absorción de K⁺ (Nedjimi, 2016). Una vez en la célula, el Na⁺ puede interrumpir la homeostasis del K⁺, pudiendo resultar en un eflujo de K⁺ y reduciendo su concentración en el citosol (Shabala y Cuin, 2008). Por tanto, la disminución de K⁺ se debe principalmente a dos factores que pueden actuar en conjunto o de forma individual; el primero, es la reducción en el influjo de K⁺ debido a la competencia con Na⁺, el segundo, el eflujo de K⁺ hacia la solución, debido a la pérdida de integridad de la membrana celular (Nedjimi, 2016). El Na⁺ debido a su radio iónico muy similar al del K⁺, compite por los sitios de unión que son esenciales para diversas funciones celulares (David *et al.*, 2010). Por lo anterior, bajo una condición de salinidad es importante mantener activa la absorción de K⁺ y la homeostasis K⁺/Na⁺, tarea en la cual los transportadores HKT y NHX juegan un papel importante (Arzani y Ashraf, 2016).

Cuadro 1.15. Efecto de la salinidad en la concentración de potasio (K) en raíz, tallo y hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de K (g kg ⁻¹ ×BS)		
	Raíz	Tallo	Hojas
0	2.57 ± 0.51 a ²	17.41 ± 1.57 a	10.73 ± 1.83 a
100	0.78 ± 0.16 b	4.28 ± 0.54 b	2.83 ± 0.5 b
∇DMS	1.24	2.08	2.3
Pr>F	0.0138	<0.0001	<0.0001

²Valores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa. ×BS: biomasa seca.

Se observa efecto significativo de las combinaciones en la concentración de K en raíz, tallo y hojas, pero no lo hubo en frutos (**Cuadro 1.16**). La concentración de K en raíz y tallo no fue afectada significativamente por las aplicaciones foliares dentro de la condición normal (0 mM NaCl) ni de la salina (100 mM NaCl). En tallo, todas las aplicaciones foliares bajo la condición normal fueron mayores y diferentes estadísticamente a aquellas que sea realizaron en la condición salina. Al añadir conjuntamente Si + Ca vía foliar a plantas de pepino en el nivel de 0 mM NaCl se incrementó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de K en hojas (36.98%) con

respecto a la aplicación testigo; por el contrario, bajo una condición salina la misma aplicación conjunta resulta en una disminución significativa de K, la cual es diferente estadísticamente a la aplicación foliar de Si, Ca y el testigo. Los resultados obtenidos no coinciden con los de algunos investigadores, pues las aplicaciones foliares de Ca no mostraron incrementar la concentración de K en la condición salina, pues se ha reportado que la pérdida de K desde el citosol es debida al detrimento de la integridad de la membrana, condición que puede ser mejorada con aplicaciones de Ca ([Nedjimi, 2016](#); [Shabala y Cuin, 2008](#)). Las aplicaciones foliares de Si mostraron de igual manera no incrementar las concentraciones de K bajo condición salina, lo cual difiere con algunas investigaciones ([Wang et al., 2015](#); [Xu et al., 2015](#)), pero concuerda con [Shahzad et al. \(2013\)](#) quienes reportaron que incrementos de NaCl en la solución nutritiva provocan un decremento marcado en la concentración de K en tallos, y tras la adición de Si (1 mM), tal detrimento no muestra ser-disminuido. Bajo una condición normal, las aplicaciones de Si no muestran tener efecto en la concentración de K ([Chen et al., 2016](#)). Por otra parte, el factor salinidad no tuvo efecto significativo en la concentración de K en frutos, lo que concuerda con [Colla et al. \(2006\)](#), quienes al incrementar la conductividad eléctrica en el agua de riego para el cultivo de sandía, no encontraron que esta condición afectara de forma significativa la concentración de K en frutos.

Cuadro 1.16. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de potasio (K) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de K (g kg ⁻¹ ^x BS)					
0	Testigo	3.15 ± 0.88 a ^z	16.99 ± 1.83 a	8.40 ± 1.01 b	13.79 ± 1.25 a
	2 mM Si	2.80 ± 0.16 a	18.07 ± 1.91 a	9.88 ± 1.84 ab	13.47 ± 0.51 a
	2 mM Ca	2.27 ± 0.34 ab	16.05 ± 0.90 a	11.62 ± 1.91 ab	12.96 ± 0.49 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	2.08 ± 0.33 abc	18.53 ± 1.63 a	13.33 ± 1.39 a	12.72 ± 0.85 a
100	Testigo	0.77 ± 0.02 cd	4.40 ± 0.16 b	3.33 ± 0.08 c	14.04 ± 1.28 a
	2 mM Si	0.56 ± 0.07 d	4.81 ± 0.60 b	3.53 ± 0.32 c	13.73 ± 1.08 a
	2 mM Ca	0.66 ± 0.21 cd	3.95 ± 0.85 b	3.34 ± 0.37 c	14.10 ± 0.32 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	1.14 ± 0.20 bcd	3.96 ± 0.33 b	1.41 ± 0.72 d	13.20 ± 0.88 a
	^y DMS	1.48	3.13	0.53	2.33

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

Concentración de calcio

La concentración de Ca en fruto fue afectada significativamente ($P \leq 0.05$) por el factor salinidad, donde el aumento de nivel de 0 a 100 mM NaCl propició incremento en la concentración de Ca (**Cuadro 1.17**). En contraste a lo aquí encontrado, [Savas et al. \(2005\)](#) afirman que la concentración de calcio en el cultivo de pepino sometido a concentraciones de 55 y 60 mM Na⁺ y Cl⁻ respectivamente, es disminuida significativamente debido a la baja tasa transpirativa. Lo cual coincide con [Isayenkov \(2012\)](#), quien afirma que uno de los elementos mayormente afectados por la salinidad es el Ca²⁺. Lo anterior es debido a que el acceso nutrimental del calcio es por flujo de masas, proceso que es dependiente de la tasa de transpiración ([Rodríguez et al., 2012](#)) y es afectado directamente por la acumulación de sales en el medio, pues disminuye el agua disponible provocando detrimento en la tasa transpirativa ([Horie et al., 2012](#)).

Cuadro 1.17. Efecto de la salinidad en la concentración de calcio (Ca) en frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Ca (g kg ⁻¹ *BS)	
	Fruto	
0	3.18 ± 0.19 b ^z	
100	3.81 ± 0.40 a	
^y DMS	0.37	
Pr>F	0.0047	

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa. *BS: biomasa seca.

El efecto de las combinaciones en la concentración de Ca fue significativo ($P \leq 0.05$) para tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.18**). La mayor concentración de Ca en tallo se obtuvo con la combinación 0 mM NaCl y la aplicación foliar de Si + Ca, al asperjar esta misma solución foliar y la aplicación testigo en la condición de 100 mM NaCl, se tuvo una disminución significativa ($P \leq 0.05$) en concentración de Ca 16.9 y 8.0% respectivamente. En hojas, el calcio también se concentró mayormente bajo la condición de 0 mM NaCl cuando se aplicó conjuntamente Si + Ca vía foliar, obteniéndose detrimentos significativos de 67.8 y 33.2% bajo la combinación del nivel de 100 mM NaCl y la aplicación de Si + Ca y Ca individual, respectivamente. En frutos se presentó la mayor concentración de Ca bajo la condición de salinidad (100 mM NaCl) y dentro de esta condición con la aplicación testigo, siendo disminuida significativamente ($P \leq 0.05$) con la aplicación individual de Si y Ca. Aunque las aplicaciones foliares de Si incrementaron la concentración de Ca en plantas bajo estrés salino, específicamente en raíz, tallos y hojas, en comparación con el efecto de las aplicaciones foliares testigo y de Ca, tal incremento no fue significativo, pudiendo deberse este incremento al efecto que tiene Si en propiciar, bajo estrés salino, una mayor conductividad hidráulica en raíz, una mayor tasa transpirativa, favoreciendo una mayor absorción de agua y mejorado el estado hídrico (Zhu *et al.*, 2015) y con ello pudo estimular una mayor absorción de Ca, pues este elemento se ve disminuido en tejido debido a una baja tasa transpirativa (Savvas *et al.*, 2005). Efectos similares le son atribuidos al Si en sorgo sometido a estrés hídrico, pues mostró incrementar la absorción de agua y el estado hídrico de hojas (Sonobe, 2009). En dos cultivares de pepino sometidos a estrés salino (50 mM NaCl) y adiciones de Si en a la solución (1 µM de Si, a partir de Na₂SiO₃), Khoshgoftarmanesh *et al.* (2014)

encontraron que mientras en un cultivar se incrementaba la concentración de Ca de una manera significativa, en el otro no mostraba diferencias significativas con respecto al testigo (sin Si). Aplicaciones al suelo de Si incrementan la concentración de Ca en la biomasa, una respuesta contraria se observa con las aplicaciones de Si al follaje (Agostinho, 2016). Por su parte, Cooke y Leishman (2016) mencionan que el Si no tiene efecto en la concentración de Ca en raíces ni en biomasa aérea. Gengmao *et al.* (2015) no encontraron diferencias estadísticas significativas en la concentración de Ca en hojas y tallos de plantas de madreSelva (*Lonicera japonicum* L.) sometidas a 100 mM NaCl al hacer aplicaciones crecientes de Si (0, 0.5 y 1 g L⁻¹ a partir de K₂SiO₃·nH₂O). Al aumentar el nivel de salinidad a 200 mM encontraron que el efecto del nivel de 1 g L⁻¹ es igual estadísticamente al testigo (0 g L⁻¹); mientras que, el nivel de 0.5 g L⁻¹ muestra disminuir significativamente la concentración de Ca en tallos y hojas, siendo la concentración en raíces no afectada significativamente. Al someter al cultivo de pistacho (*Pistacia vera* L.) a un nivel de 90 mM NaCl y hacer aplicaciones de Ca (0, 0.5 y 1 mM) en la solución nutritiva, Hojjatnooghi *et al.* (2014) encontraron la mayor concentración de Ca en parte aérea con el nivel de 0.5 mM, por su parte en raíz la mayor concentración de Ca se obtuvo con el nivel 0 mM Ca. Demostrando que la adición de niveles crecientes de Ca no son proporcionales a la concentración de Ca en tejido. Semejante al efecto de la aplicación foliar de Si + Ca en la condición salina, Dios-Delgado *et al.* (2006), al hacer aplicaciones foliares con dosis crecientes de Si y Ca, se registró la disminución significativa en la concentración de Ca en hojas de lechuga.

Cuadro 1.18. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de calcio (Ca) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Ca (g kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	9.76 ± 0.65 a	7.29 ± 0.22 ab ^z	31.07 ± 6.72 ab	3.08 ± 0.09 c
	2 mM Si	9.12 ± 0.24 a	7.19 ± 0.46 ab	31.94 ± 5.57 ab	3.06 ± 0.07 c
	2 mM Ca	9.28 ± 0.22 a	7.37 ± 0.25 ab	37.24 ± 5.29 ab	3.06 ± 0.20 c
	2 mM Si + 2 mM Ca	9.88 ± 0.42 a	8.33 ± 0.25 a	42.14 ± 4.79 a	3.51 ± 0.27 bc
100	Testigo	9.06 ± 0.02 a	7.06 ± 0.58 b	34.67 ± 3.27 ab	4.48 ± 0.48 a
	2 mM Si	9.78 ± 0.66 a	8.09 ± 0.96 ab	38.17 ± 2.86 ab	3.69 ± 0.24 bc
	2 mM Ca	9.62 ± 0.17 a	7.37 ± 0.15 ab	28.11 ± 3.95 b	3.22 ± 0.17 bc
	2 mM Si + 2 mM Ca	8.89 ± 0.14 a	6.92 ± 0.47 b	13.53 ± 5.15 c	3.86 ± 0.45 ab
	^y DMS	1.3	1.26	12.57	0.74

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de magnesio

La concentración de magnesio en tallo y fruto es afectada significativamente ($P \leq 0.05$) por el factor salinidad (0 y 100 mM NaCl), mostrando un incremento en concentración de este elemento con la adición de 100 mM NaCl a la solución nutritiva (**Cuadro 1.19**). Tales resultados difieren con lo encontrado por [Shahzad et al. \(2013\)](#) quienes con un nivel similar de NaCl (100 mM), obtuvieron una reducción del 34% la concentración de Mg en hojas de plantas de haba. Mientras que, [Wang y Han \(2007\)](#) no encontraron diferencias en la concentración de Mg al someterlo a estrés por NaCl, en comparación con plantas sin estrés.

Cuadro 1.19. Efecto de la salinidad en la concentración de magnesio (Mg) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Mg (g kg ⁻¹ *BS)	
	Tallo	Frutos
0	1.10 ± 0.18 b ^z	2.87 ± 0.12 b
100	1.66 ± 0.63 a	4.22 ± 0.33 a
^y DMS	0.101	0.32
Pr>F	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

En la prueba de comparación de medias de efecto de combinaciones en la concentración de magnesio se encontró que hubo efectos estadísticamente significativos ($P \leq 0.05$) para tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.20**). Se encontraron las mayores concentraciones de este elemento en el nivel de 100 mM NaCl. Bajo esta condición de salinidad (100 mM NaCl) la aplicación foliar de Si aumentó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de Mg en tallo en comparación con las demás aplicaciones foliares en el mismo nivel y aquellas bajo el nivel de 0 mM NaCl. La concentración de Mg en hojas de pepino bajo estrés se comportó de igual manera que en tallos, pues la mayor concentración se encontró aplicando Si foliar, pero en este caso hubo una disminución significativa cuando se asperjó el Si en conjunto con Ca, pues redujo la concentración de Mg en 62.9%. Asimismo, la aplicación conjunta de Si + Ca vía foliar bajo una condición normal (0 mM NaCl), muestra aumentar las concentraciones de Mg aunque no de manera significativa. En plantas crecidas bajo condiciones normales (0 mM NaCl), las aplicaciones foliares no tuvieron efectos significativos en la concentración de Mg en fruto, pero si los tuvieron en la condición salina (100 mM NaCl), donde la aplicación foliar de Ca muestra disminuir la concentración de Mg con respecto al testigo (**Cuadro 1.20**). Aplicar 1 mM Ca (en la solución nutritiva) al cultivo de pistacho bajo estrés salino tiene como efecto la disminución de la concentración de Mg en la parte aérea, en comparación al testigo (0 mM Ca). Mismo efecto se encontró en raíz, pero con el nivel de 0.5 mM Ca ([Hojjatnooghi et al., 2014](#)). De forma congruente a lo aquí encontrado, [Mehrabanjoubani et al. \(2015\)](#) al hacer aplicaciones de Si (1.5 mM) en la solución nutritiva a cultivos de algodón, canola y trigo reportaron que no afecta la concentración de Mg en raíces de ninguno de los cultivos, al compararlo en plantas no tratadas con Si.

Cuadro 1.20. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Magnesio (Mg) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

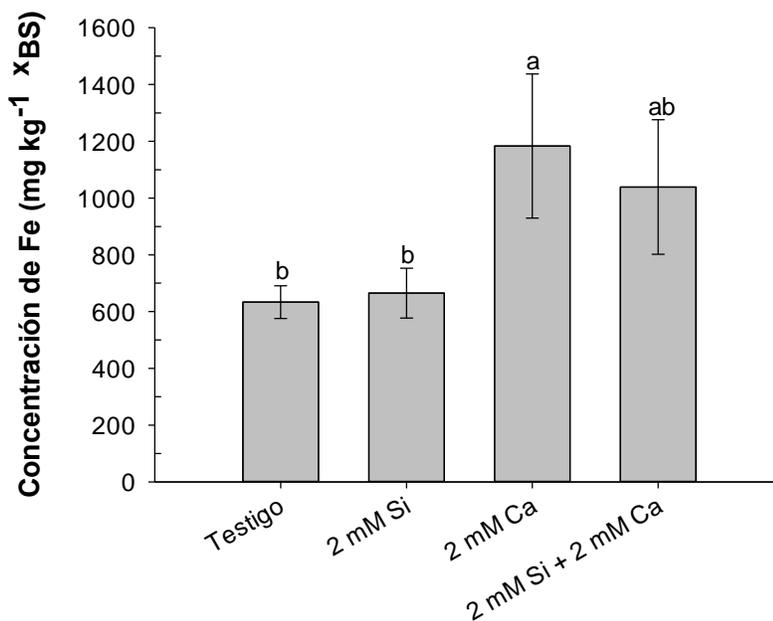
NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Mg (g kg ⁻¹ ×BS)					
0	Testigo	4.03 ± 0.25 a	2.74 ± 0.07 c ^z	11.00 ± 2.43 bc	2.89 ± 0.15 c
	2 mM Si	3.78 ± 0.07 a	3.01 ± 0.21 c	11.54 ± 2.47 bc	2.85 ± 0.05 c
	2 mM Ca	4.24 ± 0.19 a	3.05 ± 0.14 c	13.07 ± 2.00 b	2.73 ± 0.13 c
	2 mM Si + 2 mM Ca	4.42 ± 0.41 a	3.31 ± 0.19 c	15.05 ± 1.72 ab	3.02 ± 0.14 c
100	Testigo	4.41 ± 0.00 a	5.01 ± 0.44 b	16.24 ± 0.84 ab	4.69 ± 0.42 a
	2 mM Si	4.11 ± 0.15 a	6.48 ± 0.88 a	18.51 ± 1.27 a	4.12 ± 0.25 ab
	2 mM Ca	4.47 ± 0.97 a	4.82 ± 0.38 b	13.34 ± 1.81 ab	3.92 ± 0.18 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	4.02 ± 0.10 a	4.93 ± 0.31 b	6.85 ± 2.99 c	4.14 ± 0.37 ab
	∇DMS	1.13	0.46	5.31	0.64

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; ×BS: biomasa seca.

1.5.3.3. Concentración de micronutrientos, Na, Cl⁻ y Si

Concentración de hierro

La concentración de Fe en raíz fue afectada de manera significativa ($P \leq 0.05$) por el factor aplicación foliar, obteniéndose la mayor concentración de este elemento con la aplicación foliar de Ca y de Si + Ca. Por el contrario, la aplicación foliar de Si no incrementa la concentración de Fe en raíz (**Figura 1.23**). Se ha demostrado que el tratamiento a plantas con Si disminuye la absorción de Fe (Ma, 2004). Es evidente en la **Figura 1.23** que el incremento en concentración de Fe obtenido con el tratamiento con Ca, fue ligeramente disminuido cuando el Ca se aplicó conjuntamente con Si, siendo tal reducción no significativa estadísticamente. Cabe mencionar que el factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) no afectó de forma significativa la concentración de Fe en ninguno de los órganos (datos no publicados).



Aplicación foliar

Figura 1.23. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Fe en raíz del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$). *BS: biomasa seca.

En la prueba de efecto de combinaciones se encontró que hubo diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en la concentración de Fe en raíz, tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.21**). En raíz las mayores concentraciones de Fe se encontraron al hacer aplicaciones foliares de Ca y de la combinación Si + Ca en ambas condiciones (0 y 100 mM NaCl), tales aplicaciones foliares no tuvieron efectos estadísticamente diferentes entre ellas, únicamente los hubo al comparar la aplicación de calcio en el nivel 100 mM NaCl con las aplicaciones foliares de Si y testigo en ambos niveles de salinidad. En plantas de pepino crecidas bajo condición normal (0 mM NaCl), la mayor concentración de Fe en tallo se encontró con la aplicación de conjunta de Si + Ca, la cual no fue diferente estadísticamente a las combinaciones bajo estrés salino (100 mM NaCl) y las aplicaciones foliares de Si + Ca y de Ca individual. Por su parte en hojas con la aplicación de Si + Ca en la condición normal se obtuvo 47.1% más Fe en comparación con la aplicación testigo, siendo esta diferencia no significativa ($P > 0.05$). Una respuesta contraria se tuvo en la concentración de Fe en hojas de las plantas bajo la condición

salina, pues con la aplicación conjunta de Si + Ca se disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración en 54.4% en comparación con la aplicación testigo. Los frutos muestran un aumento significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de Fe al ser sometido a una condición salina y al hacer aplicaciones foliares de Si + Ca, si se compara con las aplicaciones testigo y de Ca, bajo la misma condición; por su parte en la condición normal la aplicación de Ca muestra aumentar la concentración de Fe aunque este incremento no es significativo. Se ha reportado que tratar plantas de soya con Si bajo deficiencia de Fe ayuda a prevenir la degradación de clorofila y mantener este micronutriente en hojas, disminuyendo de esta manera los síntomas de clorosis férrica; al evaluar lo anterior en el cultivo de pepino, los mismos investigadores, encontraron que la clorosis no fue disminuida (Gonzalo *et al.*, 2013). Se ha encontrado que el Cl^- disminuye significativamente la tasa fotosintética, pues propicia la degradación de clorofila (Tavakkoli *et al.*, 2011). Bajo deficiencia de Fe la aplicación de Si a plantas de pepino tiene como efecto la removilización de Fe de hojas viejas a hojas nuevas (Pavlovic *et al.*, 2016). En plantas bajo condiciones normales (0 mM NaCl), Farshidi *et al.* (2012) reportan tendencias similares en la concentración de Fe en raíces y parte aérea a las obtenidas en el presente trabajo, pues no encontraron efecto significativo del Si en la concentración de este micronutriente, siendo en una condición de salinidad (100 mM NaCl) su reporte completamente diferente a los resultados aquí mostrados, pues encontraron que el Si tiene como efecto incrementar la concentración de Fe, mientras que el efecto del Si en el presente trabajo no fue diferente al testigo desde el punto de vista estadístico. Los efectos del Si en la deficiencia de Fe son dependiente de la dosis de Si utilizada y de la especie vegetal estudiada (Savvas y Ntatsi, 2015).

Cuadro 1.21. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de hierro (Fe) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Fe (mg kg ⁻¹ ×BS)					
0	Testigo	671.5 ± 52.07 b ^z	110.04 ± 17.40 b	162.53 ± 27.30 ab	76.02 ± 13.10 b
	2 mM Si	600.8 ± 72.66 b	110.15 ± 19.35 b	215.04 ± 71.49 ab	71.71 ± 6.18 b
	2 mM Ca	1035.2 ± 161.60 ab	138.60 ± 8.07 b	279.07 ± 45.13 ab	107.21 ± 29.15 ab
	2 mM Si + 2 mM Ca	1059.0 ± 280.52 ab	220.10 ± 63.38 a	307.56 ± 55.96 a	74.99 ± 10.95 b
100	Testigo	537.5 ± 50.42 b	143.40 ± 13.33 b	296.15 ± 43.33 a	72.83 ± 9.56 b
	2 mM Si	825.4 ± 87.03 b	137.56 ± 15.22 b	231.44 ± 12.65 ab	79.91 ± 8.72 ab
	2 mM Ca	1554.5 ± 430.71 a	165.05 ± 20.03 ab	214.89 ± 74.65 ab	72.62 ± 4.61 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	989.1 ± 141.86 ab	150.43 ± 17.15 ab	134.79 ± 92.07 b	120.48 ± 25.05 a
	^y DMS	689	80.92	150.84	40.75

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

Concentración de cobre

El factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) tuvo un significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de Cu en tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.22**), donde el nivel de 100 mM NaCl propicia un aumento en su concentración en 60.5, 70.0 y 21.3%, respectivamente. Estos resultados difieren a los encontrados por [Wang y Han \(2007\)](#), quienes en alfalfa obtuvieron como respuesta al estrés por sales un reducción de la concentración de Cu en raíces, tallos y hojas. También difieren a lo reportado por [Parida y Das \(2005\)](#), quienes encontraron que la disminución en la concentración de Cu en tejido es proporcional al incremento de la salinidad.

Cuadro 1.22. Efecto de la salinidad en la concentración de cobre (Cu) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Cu (mg kg ⁻¹ *BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
0	37.93 ± 4.15 b ^z	53.52 ± 10.30 b	8.56 ± 1.27 b
100	96.15 ± 10.70 a	178.82 ± 42.76 a	10.88 ± 2.94 a
√DMS	13.73	26.02	2.94
Pr>F	<0.0001	<0.0001	0.024

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); [√]DMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

El factor aplicación foliar tuvo efectos significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) en la concentración de Cu en hojas (**Figura 1.24**). Las mayores concentraciones de Cu fueron obtenidas con la aplicación individual de Si y de Ca, siendo el efecto de estas aplicaciones diferentes estadísticamente a la aplicación testigo y a la aplicación conjunta de Si + Ca. Los resultados obtenidos difieren con [Pilon *et al.* \(2013\)](#) quienes al hacer aplicaciones de Si vía foliar encontraron que la concentración de Cu en hojas se disminuye, aunque no de una manera significativa. Coincidiendo con los resultados anteriores, [Wang y Han \(2007\)](#) al hacer aplicaciones de Si a plantas de alfalfa bajo estrés por NaCl, encontraron que la concentración de Cu se disminuye significativamente en tallos y hojas.

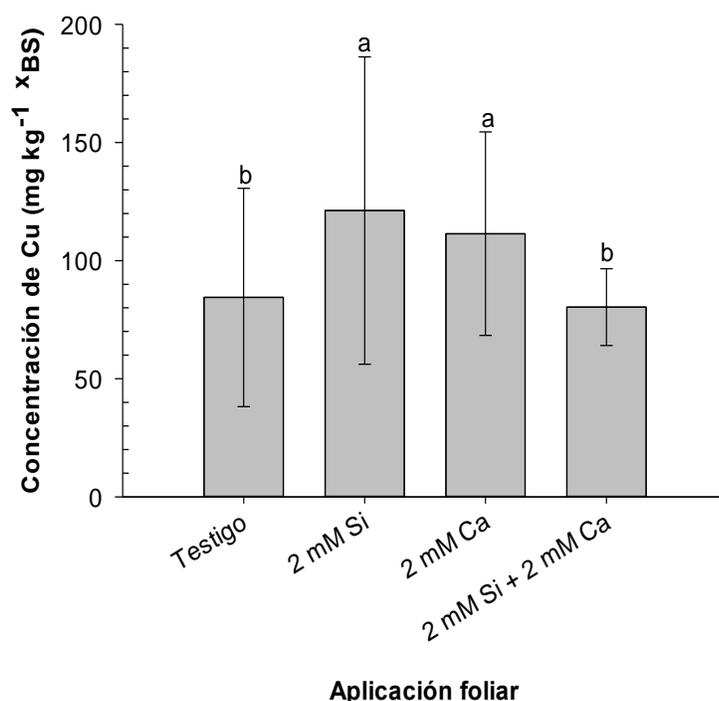


Figura 1.24. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Cu en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico. Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$). *BS: biomasa seca.

En la prueba de medias para el efecto de combinaciones en la concentración de Cu, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en tallo, hojas y frutos. Como se presentó en el **Cuadro 1.22**, el nivel de salinidad de 100 mM NaCl tiene un efecto manifiesto de incrementar la concentración de Cu en tallos, hojas y frutos, tal tendencia es muy marcada en el efecto de las combinaciones (**Cuadro 1.23**). Bajo el nivel de 0 mM NaCl, la aplicación conjunta de Si + Ca al follaje mostró incrementar significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de Cu en tallo con respecto a la aplicación individual de Si; por el contrario, en el tratamiento con la dosis de 100 mM NaCl, las aplicaciones foliares no tuvieron efecto significativo ($P > 0.05$). Al analizar las concentraciones de Cu en hojas, se encontró que de igual manera que en tallo, la aplicación de Si + Ca en el nivel de 0 mM NaCl incrementa su concentración significativamente (43.1%), esta vez con respecto al testigo. En el nivel de 100 mM NaCl, fue la aplicación foliar de Si con la que se incrementó la concentración de Cu

significativamente ($P \leq 0.05$) en 38.1 y 68.1% con respecto a las aplicaciones del testigo y las de Si + Ca, respectivamente. En frutos la mayor concentración de Cu se encontró en el nivel de 100 mM NaCl y la aplicación foliar de Si + Ca, la cual no mostró diferencias estadísticas significativas con la aplicación foliar testigo en el mismo nivel de NaCl, ni con la combinación 0 mM NaCl en la SN y Si + Ca vía foliar.

Cuadro 1.23. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de cobre (Cu) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Cu (mg kg ⁻¹ × BS)					
0	Testigo	49.44 ± 0.51 a	37.99 ± 3.55 bc ^z	39.63 ± 12.50 e	8.43 ± 0.37 b
	2 mM Si	49.59 ± 3.31 a	31.89 ± 3.60 c	50.56 ± 8.47 de	8.08 ± 0.36 b
	2 mM Ca	52.32 ± 2.31 a	38.20 ± 4.77 bc	58.76 ± 8.00 d	7.97 ± 0.88 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	48.60 ± 6.98 a	44.72 ± 3.00 b	69.66 ± 9.48 cd	9.89 ± 2.31 ab
100	Testigo	40.86 ± 2.14 a	102.02 ± 5.61 a	179.84 ± 37.09 b	11.09 ± 1.48 ab
	2 mM Si	46.77 ± 10.34 a	98.48 ± 15.95 a	290.55 ± 20.86 a	9.46 ± 0.94 b
	2 mM Ca	51.11 ± 5.96 a	95.47 ± 1.20 a	211.30 ± 20.62 ab	9.45 ± 0.46 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	53.89 ± 2.82 a	89.11 ± 13.05 a	92.60 ± 20.01 c	14.15 ± 5.24 a
	∇DMS	15.6	19.6	52.02	5.74

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; ×BS: biomasa seca.

Concentración de zinc

En el **Cuadro 1.24** se muestra el efecto significativo ($P \leq 0.05$) del factor salinidad en la concentración de Zn en tallo y frutos del cultivo de pepino en hidroponía, donde el nivel de 100 mM NaCl tiende a reducir la concentración en tallo, pero en frutos la incrementa. La salinidad no afecta la concentración de Zn en raíz, tallos y hojas en el cultivo de alfalfa (Wang y Han, 2007), pero muestra un decremento en el cultivo de papaya (Parés y Basso, 2013).

Cuadro 1.24. Efecto de la salinidad en la concentración de zinc (Zn) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Zn (mg kg ⁻¹ ×BS)	
	Tallo	Frutos
0	38.18 ± 2.70 a ^z	28.79 ± 2.49 b
100	27.56 ± 1.54 b	32.50 ± 2.45 a
^y DMS	2.41	3.5
Pr>F	<0.0001	0.04

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ×BS: biomasa seca.

El efecto de las combinaciones fue significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de Zn en tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.25**). La concentración de Zn en tallo fue diferente estadísticamente ($P \leq 0.05$) dentro del nivel de 0 mM NaCl al hacer aplicaciones foliares de Ca con respecto a las aplicaciones testigo, pues el Ca mostró disminuir la concentración de este micronutriente; en el nivel de 100 mM NaCl, la aplicación foliar de Si mostró incrementar significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de Zn con respecto al testigo. Sin condición salina (0 mM NaCl), las aplicaciones foliares no tienen efecto significativo en la concentración de Zn en hojas; bajo el nivel de 100 mM NaCl la aplicación de Si + Ca mostró reducir significativamente la concentración de Zn con respecto a las demás aplicaciones foliares, mientras que las aplicaciones individuales de Si tuvieron como efecto la mayor concentración de Zn en hojas de las plantas bajo estrés, coincidiendo con [Mehrabanjoubani et al. \(2015\)](#) quienes encontraron que el tratar con Si a plantas de trigo, canola y algodón, incrementa el contenido de Zn en el tejido. En frutos la concentración de Zn con el nivel de 100 mM NaCl y la aplicación foliar de Ca fue incrementado de manera significativa ($P \leq 0.05$) en comparación con el nivel 0 mM NaCl y la aplicación foliar testigo.

Cuadro 1.25. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de zinc (Zn) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Zn (mg kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	70.03 ± 2.35 a	41.26 ± 2.98 a ^z	34.74 ± 5.15 bc	26.90 ± 0.57 b
	2 mM Si	71.68 ± 3.15 a	37.26 ± 2.04 ab	32.32 ± 4.81 bc	31.56 ± 1.17 ab
	2 mM Ca	72.60 ± 5.12 a	35.05 ± 1.33 bc	38.99 ± 6.69 ab	28.94 ± 4.33 ab
	2 mM Si + 2 mM Ca	64.27 ± 1.99 a	39.17 ± 3.64 ab	40.65 ± 5.17 ab	27.77 ± 2.30 ab
100	Testigo	64.66 ± 2.05 a	24.69 ± 1.30 e	43.76 ± 1.19 ab	32.82 ± 2.41 ab
	2 mM Si	62.73 ± 4.71 a	30.66 ± 1.18 cd	49.54 ± 2.85 a	32.36 ± 1.49 ab
	2 mM Ca	60.89 ± 8.47 a	28.23 ± 1.17 de	38.99 ± 5.61 ab	34.10 ± 3.19 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	68.95 ± 0.53 a	26.66 ± 0.93 de	23.57 ± 5.30 c	30.74 ± 2.92 ab
	^y DMS	24.74	5.29	12.62	6.61

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de manganeso

La concentración de Mn fue afectada significativamente ($P \leq 0.05$) en tallo, hojas y frutos por el factor salinidad (0 y 100 mM NaCl), tal concentración fue disminuida en tallos y hojas al incrementar los niveles de NaCl de 0 a 100 mM, una tendencia contraria se observó en frutos (**Cuadro 1.26**). De manera similar a los resultados aquí expuestos, [Wu et al. \(2013\)](#) al someter a tres cultivares de cebada a dosis crecientes de NaCl observaron disminución en la acumulación de Mn en la parte aérea.

Cuadro 1.26. Efecto de la salinidad en la concentración de manganeso (Mn) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Mn (mg kg ⁻¹ *BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
0	63.74 ± 4.45 a ^z	153.95 ± 24.48 a	19.44 ± 0.62 b
100	53.13 ± 2.86 b	93.43 ± 19.57 b	22.35 ± 1.83 a
	^y DMS	4.14	36.48
	Pr>F	0.0004	0.0051
			1.45
			0.0016

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

El efecto de las combinaciones fue significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de Mn en tallo, hojas y frutos. En el nivel de 0 mM NaCl la concentración de Mn en tallo y hojas se incrementó significativamente con la aplicación conjunta de Si + Ca, con respecto al testigo; mientras que, en el nivel 100 mM NaCl la aplicación conjunta de Si + Ca indujo una disminución en concentración, aunque en tallo tal disminución no fue significativa con respecto a las demás aplicaciones en el mismo nivel, en hojas el efecto sí fue significativo con respecto a la aplicación foliar de Si. En frutos las aplicaciones foliares se comportaron sin diferencias significativas dentro de cada nivel de salinidad (0 y 100 mM NaCl). En un análisis del efecto de Si en diversos cultivos, incluyendo cucurbitáceas, sometidos a diferentes condiciones de estrés, [Cooke y Leishman \(2016\)](#), encontraron que la aplicación de tal elemento no afecta la concentración de Mn en raíces, tampoco en parte aérea, lo cual coincide con [Hernández-Apaolaza \(2014\)](#), quien al experimentar con plantas de pepino y aplicaciones de Si no encontró efectos definidos del Si en la concentración de Mn, en ambas investigaciones se coincide con los resultados aquí obtenidos. Resulta evidente que el combinar Si y Ca en aspersiones foliares sobre plantas bajo estrés salino tiene como efecto disminuir la concentración de Mn en hojas de una manera significativa ($P \leq 0.05$) (60.8%), en comparación con la aplicación individual de Si.

Cuadro 1.27. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de manganeso (Mn) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Mn (mg kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	212.70 ± 31.39 a	57.20 ± 3.97 bcd ^z	126.44 ± 25.10 bc	19.14 ± 0.37 b
	2 mM Si	222.35 ± 26.71 a	61.03 ± 3.05 bc	136.06 ± 20.59 abc	19.05 ± 0.33 b
	2 mM Ca	250.91 ± 16.63 a	65.10 ± 3.51 ab	166.37 ± 21.71 ab	19.21 ± 0.57 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	288.04 ± 45.46 a	71.62 ± 4.58 a	185.95 ± 25.06 a	20.39 ± 0.86 ab
100	Testigo	231.50 ± 5.63 a	54.42 ± 3.36 cd	115.54 ± 15.42cd	23.18 ± 1.74 a
	2 mM Si	252.61 ± 16.60 a	52.32 ± 1.55 cd	117.07 ± 13.14 bc	20.89 ± 1.42 ab
	2 mM Ca	318.45 ± 40.24 a	55.55 ± 1.36 cd	95.21 ± 1.19 cd	22.02 ± 1.04 ab
	2 mM Si + 2 mM Ca	293.51 ± 4.33 a	50.25 ± 4.27 d	45.89 ± 15.25 d	23.36 ± 2.88 a
	^y DMS	112.23	8.76	49.74	2.61

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de boro

El factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) mostró tener efectos estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$) en la concentración de B en tallo y en frutos, siendo en ambos órganos incrementada con el nivel de 100 mM NaCl (**Cuadro 1.28**).

Cuadro 1.28. Efecto de la salinidad en la concentración de boro (B) en tallo y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de B (mg kg ⁻¹ *BS)	
	Tallo	Frutos
0	36.02 ± 1.20 b ^z	27.75 ± 0.60 b
100	39.67 ± 1.11 a	34.28 ± 2.26 a
^y DMS	1.19	2.08
Pr>F	0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

El efecto de las combinaciones fue significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de B en raíz, tallo, hojas y frutos. En la condición normal (0 mM NaCl), las aplicaciones foliares

no mostraron tener efecto significativo en la concentración de B en raíz, tallo, hojas y frutos. En la condición salina (100 mM NaCl) la aplicación foliar de Ca disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de B en raíz con respecto a las aplicaciones de Si, Ca + Si y el testigo. Bajo la misma condición, las aplicaciones foliares no tuvieron efecto significativo en tallos, por su parte en hojas la aplicación foliar de Si + Ca mostró reducir significativamente la concentración de B, y en frutos tal concentración fue reducida significativamente con la aplicación foliar de Si todo esto con respecto a las demás aplicaciones foliares (**Cuadro 1.29**). Los resultados coinciden con [Pilon *et al.* \(2013\)](#), quienes reportaron que el Si aplicado al suelo o al follaje, no tiene efecto en la concentración foliar de B. Reafirmando lo anterior, pero en una condición salina, [Farshidi *et al.* \(2012\)](#) encontraron que la adición de Si a la solución nutritiva no muestra tener efectos significativos en la concentración de B en el tejido de plantas de canola. También ha sido reportado que la aplicación de Si en la solución nutritiva puede disminuir la concentración de B, debido a que emplean transportadores similares y pueden competir por su absorción ([Mehrabanjoubani *et al.*, 2015](#)).

Cuadro 1.29. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de boro (B) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de B (mg kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	40.13 ± 1.98 abc ^z	35.31 ± 1.10 c	57.82 ± 10.26 bc	28.17 ± 0.79 c
	2 mM Si	38.31 ± 0.57 c	35.74 ± 1.54 bc	55.75 ± 13.33 bc	27.32 ± 0.23 c
	2 mM Ca	37.53 ± 1.00 c	35.95 ± 1.28 bc	66.78 ± 10.28 ab	27.48 ± 0.52 c
	2 mM Si + 2 mM Ca	38.49 ± 1.09 bc	37.10 ± 1.03 abc	78.74 ± 7.23 ab	28.04 ± 0.76 c
100	Testigo	42.63 ± 0.26 ab	40.13 ± 1.08 a	83.24 ± 3.77 a	37.43 ± 3.68 a
	2 mM Si	43.60 ± 1.22 a	40.23 ± 1.05 a	91.20 ± 6.79 a	32.79 ± 1.41 b
	2 mM Ca	37.90 ± 0.97 c	39.66 ± 1.07 a	70.90 ± 8.19 ab	33.24 ± 1.47 ab
	2 mM Si + 2 mM Ca	43.60 ± 2.41 a	38.67 ± 1.42 ab	38.89 ± 13.32 c	33.67 ± 1.50 ab
	^y DMS	4.28	3.14	24.98	4.23

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de sodio

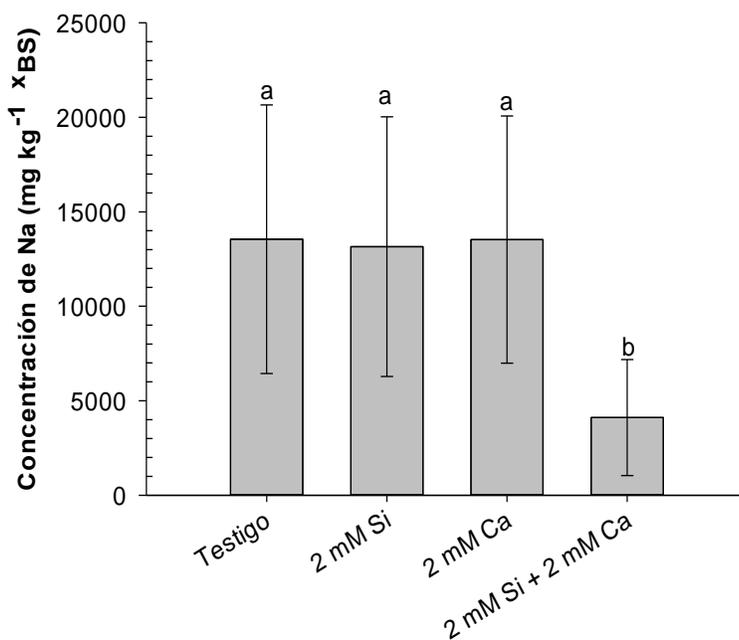
La concentración de Na en raíz, tallo, hojas y frutos fue significativamente incrementada con el nivel de 100 mM NaCl (**Cuadro 1.30**), tal incremento fue del orden de 65.1%, 92.3, 95.8 y 95.4% respectivamente. Estos incrementos muestran que el cultivar utilizado no presenta mecanismos que le permitan excluir la entrada de este ion, siendo por tanto estos altos incrementos, los principales causantes de la reducción de las variables de crecimiento y de rendimiento, pues la razón de que este ion sea el mayormente estudiado en las investigaciones de salinidad se debe a que es el más perjudicial ([Isayenkov, 2012](#)). La entrada excesiva de iones sodio a la célula vegetal además del desbalance iónico provoca desórdenes en procesos fisiológicos, dado que ya sea una planta tolerante o sensible a la salinidad, altas concentraciones de sales en el citoplasma resultan ser tóxicas, es pues entonces donde procesos de exclusión y compartimentalización son importantes en la tolerancia al estrés ([Gupta y Huang, 2014](#)). En el nivel de 0 mM NaCl se puede apreciar que el Na (proveniente del agua de riego) se concentró mayormente en tallos, seguido por la raíz, siendo en hojas y frutos donde se concentró en menor proporción. Estas tendencias de acumulación de Na en tejido de pepino bajo condiciones normales fue consistente con lo encontrado por [Grewal et al. \(2011\)](#), quienes encontraron que la concentración de Na en hojas de pepino crecido en hidroponía comercial fue de 1,150 mg kg⁻¹ en base a biomasa seca (BS), en tallos la concentración fue de 2,600 mg kg⁻¹ BS, mientras que en frutos fue de 1,765 mg kg⁻¹ BS, siendo la tendencia de acumulación: tallos > frutos > hojas. En el nivel de 100 mM NaCl, el Na se concentró mayormente en tallos, seguido por hojas y frutos, siendo la raíz el órgano donde menos se concentró este elemento. La mayor parte de Na que llega al tallo se queda ahí, una mínima proporción puede ser transportada vía floema a la raíz, pero es la lámina foliar el sitio donde el Na es tóxico para la mayoría de las plantas ([Munns, 2002](#); [Munns y Tester, 2008](#)). En los resultados obtenidos se observa que bajo una condición normal las plantas de pepino mostraron acumular el Na en tallos, evitando su exportación a hojas; al someterse al nivel de 100 mM NaCl igual se presenta la mayor concentración en tallos, pero en este caso se mostró que el órgano que concentró en menor proporción este elemento tóxico fue la raíz, siendo notable que el órgano que este cultivar utiliza para almacenar sales y evitar un mayor daño es el tallo.

Cuadro 1.30. Efecto de la salinidad en la concentración de sodio (Na) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Na (mg kg ⁻¹ ×BS)			
	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
0	2747.92 ± 299.50 b ^z	3162.94 ± 156.34 b	816.15 ± 115.57 b	843.7 ± 100.04 b
100	7878.55 ± 1193.12 a	41083.01 ± 3322.21 a	19598.33 ± 4738.50 a	18641.8 ± 1231.44 a
^y DMS	894.06	3078.6	3558.8	1299.8
Pr>F	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

En la **Figura 1.24** se observa que la aplicación conjunta de Si + Ca vía foliar tiene efecto significativo ($P \leq 0.05$) en la disminución de la concentración de Na en hojas (69.6% con respecto al testigo) de pepino, siendo el efecto de las aplicaciones individuales de Si y Ca iguales estadísticamente al testigo. [Kchaou et al. \(2010\)](#) encontraron que al comparar la tolerancia a la salinidad de cinco cultivares diferentes de olivo (*Olea europaea* L.), el mejor fue aquel con mayor capacidad de excluir Na y Cl de la parte aérea. [Deinlein et al. \(2014\)](#) mencionan que la clave para desarrollar tolerancia de las plantas cultivadas al estrés salino es el establecimiento de la homeostasis de las sales en lo que juega un papel importante los transportadores de Na⁺ (HKT_s y NHX_s). La absorción de Si por plantas, incrementa la actividad de las PPasas y ATPasas en vacuolas, con lo que se reduce la absorción de Na⁺ y por tanto se disminuye su efecto tóxico en hojas ([Shaebi et al., 2015](#)). Ha sido ampliamente reportado que la aplicación de Si, a diferentes dosis y con diferentes fuentes, a plantas tratadas con NaCl tiene como efecto la disminución de la concentración de Na en tejido ([Khoshgoftarmanesh et al., 2014](#); [Zhu y Gong, 2014](#); [Yin et al., 2013](#); [Kafi y Rahimi, 2011](#)). Lo mismo se ha reportado para Ca, pero [Chondraki et al. \(2012\)](#) mencionan que bajo niveles de salinidad altos, las aplicaciones foliares de Ca no muestran disminuir significativamente la concentración de Na en el tejido. Es evidente en los resultados obtenidos que la aplicación individual de Si o Ca no muestran disminuir la concentración de Na en hojas de pepino, pero su aplicación conjunta muestra disminuir significativamente tal concentración.



Aplicación foliar

Figura 1.25. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Na en hojas del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$). *BS: biomasa seca.

En la prueba de comparación de medias del efecto de combinaciones en la concentración de sodio se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en raíz, tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.31**). En el nivel 0 mM NaCl las aplicaciones foliares no tuvieron diferencias estadísticas en la concentración de Na en raíces, tallos y hojas. Dentro del nivel de 100 mM NaCl el efecto de las aplicaciones foliares fueron significativas en raíz y hojas. En raíz la concentración de Na mostró ser reducida de manera significativa ($P \leq 0.05$) con las aplicaciones foliares individuales de Si (38.0%) y de Ca (35.4%) en comparación con la aplicación conjunta de Si + Ca, pero no fueron diferentes al testigo, lo cual concuerda con [Wang et al. \(2015\)](#) quienes encontraron que el contenido de Na⁺ en tallos y raíces del cultivo de pepino sometido a estrés salino (65 mM NaCl) no es afectado significativamente con la adición de Si (0.8 mM H₂SiO₃), e incluso se presenta una ligera mayor acumulación de Na⁺ en raíces con la adición de Si. Bajo esta misma condición (100 mM NaCl) la aplicación conjunta de Si + Ca mostró reducir

significativamente la concentración de Na en hojas en comparación con las aplicaciones foliares del testigo (58.8%), Si (57.7%) y de Ca (53.2%). Por tanto al someter al cultivo de pepino a una condición salina, la aplicación vía foliar Si + Ca tiende a acumular Na⁺ en raíces, disminuyendo su exportación a hojas, pudiéndosele atribuir a la exclusión de iones, que es un proceso de transporte de Na⁺ que se da en raíces y previene la acumulación de niveles tóxicos de este ion en hojas (Roy *et al.*, 2014). Esto concuerda con Bojórquez-Quintal *et al.* (2014) quienes en un cultivar de chile tolerante a la salinidad sometido a estrés salino, encontraron que el Na es restringido a raíces para evitar su transporte a hojas, y dentro de raíces es compartimentalizado en estructuras del tipo vacuolas (vacuole-like) y otros compartimentos pequeños que actúan como osmolitos. Shahzad *et al.* (2013) al experimentar con haba encontraron que el nivel de 100 mM NaCl incrementaba la concentración de Na en la hoja, tal incremento se vio disminuido en 22% con la adición de Si (1 mM). En plantas de madreSelva sometidas a un nivel de 100 mM NaCl y aplicaciones de Si (en la solución nutritiva) en niveles crecientes (0, 0.5 y 1 g L⁻¹ a partir de K₂SiO₃·nH₂O), se encontró una disminución de la concentración de Na en hojas, tallos y raíces con la aplicación de 0.5 g L⁻¹; al aplicar 0 y 1 g L⁻¹ se obtienen las mayores concentraciones de Na y al aumentar el nivel de salinidad a 200 mM NaCl se encontró que los niveles de Si aplicados no tuvieron efecto significativo en la concentración de Na en hojas y tallos (Gengmao *et al.*, 2015). El principal mecanismo que involucra al Si en la reducción de acumulación de elementos nocivos es el mantenimiento de la permeabilidad de la membrana plasmática, manteniendo la selectividad de membrana para el influjo y eflujo de iones, lo cual se logra mediante la estimulación de la actividad de enzimas antioxidantes por parte del Si (Savvas y Ntatsi, 2015). La adición de Ca en el medio de crecimiento del cultivo de pepino y de soya sometidos a estrés por NaCl, muestra reducir la concentración de Na en el tejido (Dabuxilatu e Ikeda, 2005a). Mismos resultados fueron encontrados en olivo, donde la aplicación de Ca tuvo como efecto una disminución en concentración de Na en tejido (Lolaei *et al.*, 2012). Al igual que al Si, al Ca también se le ha incluido una función de decremento de la permeabilidad de la membrana, pues el NaCl muestra incrementar tal permeabilidad, y de igual manera se le ha atribuido que tiene efecto de disminuir la concentración de Na en hojas y raíces (Kaya *et al.*, 2002). La respuesta a la adición de

Ca bajo condiciones de estrés por Na es muy variable y dependiente del genotipo del cultivar estudiado (Cramer, 2002). Aunque la aplicación de Ca y Si de forma individual no muestran reducir la concentración de Na en hojas de un cultivo de pepino bajo estrés salino (100 mM NaCl), en la presente investigación se demuestra que su aplicación conjunta si disminuye tal concentración.

Cuadro 1.31. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de sodio (Na) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Na (mg kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	2820.02 ± 501.04 c ^z	2895.14 ± 75.90 b	844.71 ± 51.11 c	842 ± 108.94 b
	2 mM Si	2991.11 ± 128.81 c	3180.58 ± 189.49 b	763.79 ± 167.89 c	869 ± 31.32 b
	2 mM Ca	2887.36 ± 215.72 c	3379.82 ± 123.28 b	894.44 ± 138.53 c	739 ± 42.98 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	2341 ± 170.74 c	3215.79 ± 142.40 b	768.85 ± 99.81 c	924 ± 164.79 b
100	Testigo	8185.34 ± 125.31 ab	39343.65 ± 3859.43 a	25432.92 ± 3594.64 a	18932 ± 1776.59 a
	2 mM Si	6544.62 ± 641.46 b	43436.26 ± 3743.55 a	24772.76 ± 3317.88 a	18815 ± 1494.20 a
	2 mM Ca	6811.72 ± 1622.91 b	42033.82 ± 3536.69 a	22379.48 ± 3915.25 a	18786 ± 799.58 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	10557.58 ± 1381.19 a	39343.65 ± 2702.72 a	10461.94 ± 5779.66 b	18035 ± 1008.73 a
	^y DMS	2155.4	6731.2	8311.5	2428.2

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de cloruro

El nivel de 100 mM NaCl incrementó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de cloro en raíz, tallo y frutos, en comparación con el nivel de 0 mM NaCl (Cuadro 1.32). La concentración de cloruro no fue tan significativa como la de Na. Altas concentraciones de Cl⁻ en las raíces propician su posterior acumulación en otros tejidos vegetales, teniendo como efecto principal la reducción del crecimiento de las raíces (Ali, 2011). Altas concentraciones de Cl⁻ en tejido reduce la capacidad fotosintética debido a la degradación de clorofila y una disminución del rendimiento cuántico real del transporte de electrones del fotosistema II (Tavakkoli et al., 2011). La alta acumulación de Cl⁻ en

tejido y la disminución de la fotosíntesis neta reducen el crecimiento de plantas (Del Amor *et al.*, 2000).

Cuadro 1.32. Efecto de la salinidad en la concentración de cloro (Cl) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Cl (mg kg ⁻¹ *BS)		
	Raíz	Tallo	Frutos
0	333.30 ± 28.58 b ^z	290.26 ± 19.73 b	312.96 ± 28.86 b
100	585.54 ± 91.35 a	376.35 ± 40.93 a	395.91 ± 29.64 a
∇DMS	109.02	26.95	46
Pr>F	0.0019	<0.0001	0.0041

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

El efecto de las combinaciones fue significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de cloruro en raíz, tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.33**).

Cuadro 1.33. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de cloro (Cl) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
0	Testigo	381.04 ± 49.34 c ^z	305.91 ± 26.30 cd	384.17 ± 32.07 b	296.52 ± 13.55 c
	2 mM Si	305.91 ± 8.92 c	290.26 ± 13.09 cd	365.39 ± 32.07 b	249.00 ± 12.62 c
	2 mM Ca	293.39 ± 21.71 c	299.65 ± 23.08 cd	449.92 ± 15.51 ab	343.48 ± 46.95 abc
	2 mM Si + 2 mM Ca	352.87 ± 13.09 c	265.21 ± 12.37 d	428.00 ± 43.43 ab	343.48 ± 22.81 abc
100	Testigo	390.44 ± 11.06 c	349.74 ± 25.72 bc	418.61 ± 50.23 ab	399.83 ± 25.71 ab
	2 mM Si	577.83 ± 143.57 b	431.13 ± 60.01 a	459.31 ± 44.13 ab	337.21 ± 17.14 bc
	2 mM Ca	749.56 ± 0.00 a	324.69 ± 26.76 bcd	415.48 ± 21.85 ab	434.26 ± 26.19 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	624.34 ± 66.41 b	399.83 ± 28.54 ab	515.66 ± 58.56 a	412.35 ± 30.10 ab
	∇DMS	114.23	78.5	105.01	95.48

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

En raíz, las aplicaciones foliares no mostraron tener efectos significativos en el nivel 0 mM NaCl, pero en el nivel de 100 mM NaCl se encontró que las aplicaciones foliares de Si, Ca y Si + Ca incrementan significativamente la concentración de cloruro con respecto al testigo, siendo la aplicación de Ca la que incrementó en mayor proporción la concentración de Cl⁻ con respecto a las aplicaciones de Si y de Si + Ca. Al igual que en raíz, en tallo el efecto de las aplicaciones foliares no fue significativo en el nivel de 0 mM NaCl, siendo en el nivel de 100 mM NaCl la aplicación foliar de Si con la que la concentración de Cl⁻ se incrementó significativamente en comparación con la aplicación foliar de Ca y el testigo. En hojas, el efecto de las aplicaciones foliares dentro del nivel 0 mM y del nivel 100 mM NaCl no fueron significativos. En frutos por su parte, la aplicación foliar de Si en la condición de salinidad mostró reducir estadísticamente ($P \leq 0.05$) la concentración de Cl⁻ con respecto a lo encontrado con la aplicación foliar de Ca. [Shahzad et al. \(2013\)](#) coincidieron con los resultados obtenidos en el presente trabajo, pues encontraron que bajo una condición de 100 mM NaCl las aplicaciones foliares de Si no muestran disminuir significativamente la concentración de Cl⁻ en la hoja. Coincidentes con lo anterior, son los resultados obtenidos en la presente investigación. [Romero-Aranda et al. \(2006\)](#) en plantas de tomate sometidas a estrés salino y tratadas con Si (0 o 2.5 mM) encontraron que con el nivel de 2.5 mM Si se incrementa el contenido de Na⁺ y Cl⁻ en hojas, aunque no de una manera significativa. [Dabuxilatu e Ikeda \(2005b\)](#) al suplementar con Ca un cultivar de pepino bajo estrés salino, le atribuyeron una función de estimulante de la translocación de Cl⁻, pudiendo ser esta razón por la que este elemento se acumuló, con la aplicación foliar de Ca, en frutos (**Cuadro 1.33**). [Liu et al. \(2014\)](#) afirman que aplicaciones de Si tienen como efecto en respuesta al estrés osmótico, el incremento de la actividad de acuaporinas, con lo que se propicia un mejoramiento de absorción de agua. Resultados semejantes fueron encontrados por [Zhu et al. \(2015\)](#) en dos cultivares de pepino sometidos a estrés salino, en los cuales mediante la adición de Si se expresaron genes de acuaporinas de membrana plasmática que incrementaron la absorción de agua. En arroz sometido a estrés salino, las aplicaciones de Si muestran incrementar la concentración de Cl⁻ en raíces de dos cultivares de tres estudiados ([Shi et al., 2013](#)). El mejoramiento de absorción de agua por efecto del Si ([Wang et al., 2015](#); [Zhu et al., 2015](#); [Liu et al., 2014](#)), pudo en el presente

trabajo también incrementar la absorción de sales presentes en la solución. Esto en conjunto con el posible efecto estimulante del Ca en la translocación de Cl⁻, pudo incrementar la acumulación de Cl⁻ en raíces, tallos y en hojas con la aplicación de Si + Ca.

Concentración de silicio

El factor salinidad (0 y 100 mM NaCl) afectó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de Si en hojas y frutos; el nivel de 100 mM NaCl disminuyó la concentración de Si en hojas y en frutos la incrementó (**Cuadro 1.34**). Estos resultados coinciden con lo reportado por [Gengmao *et al.* \(2015\)](#), quienes al someter plantas de madreSelva a niveles de 0, 100 y 200 mM NaCl y hacer aplicaciones crecientes de Si en la solución, encontraron que no importa la dosis de Si aplicada, conforme el nivel de salinidad incrementa la concentración de Si disminuye en el tejido. Por su parte, [Cooke y Leishman \(2016\)](#), afirman que no existe una correlación entre el factor de estrés y la absorción de Si.

Cuadro 1.34. Efecto de la salinidad en la concentración de silicio (Si) en hojas y frutos del cultivo de pepino en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Concentración de Si (mg kg ⁻¹ *BS)	
	Hojas	Frutos
0	56.41 ± 22.90 a ^z	11.31 ± 0.75 b
100	35.25 ± 9.08 b	12.65 ± 1.35 a
^y DMS	19.04	1.15
Pr>F	0.041	0.028

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

En la **Figura 1.26** se aprecia que las aplicaciones foliares de Si incrementaron significativamente ($P \leq 0.05$) su concentración en tallo, en comparación con el testigo y las aplicaciones foliares de Ca y de Si + Ca.

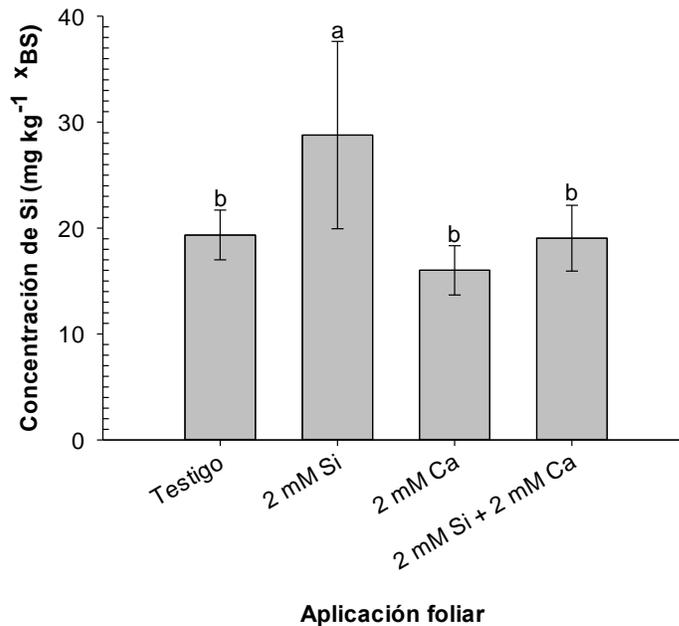


Figura 1.26. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de Si en tallo del cultivo de pepino en sistema hidropónico. Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$). *BS: biomasa seca.

El efecto de las combinaciones en la concentración de silicio fue significativo para raíz, tallo, hojas y frutos (**Cuadro 1.35**). En raíz únicamente se encontró diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$) en el nivel 100 mM NaCl con la aplicación conjunta de Si + Ca, con tal combinación se incrementó significativamente la concentración de Si con respecto a todas las demás combinaciones. Resulta evidente como esta misma combinación en hojas tuvo efecto contrario, pues mostró disminuir significativamente la concentración de Si en comparación con la aplicación individual de Si. [Ma y Yamaji \(2006\)](#) mencionan que la deposición de Si en raíces reduce el flujo de agua y crea sitios de unión para metales, lo que decanta en la reducción de absorción y translocación de Na de las raíces a la parte aérea, tal efecto es visible en la concentración foliar de Na (**Figura 1.25**), pues la acumulación de Si en raíces con la aplicación de Si + Ca (**Cuadro 1.35**) permitió la acumulación de Na en raíces y disminuyó su concentración en hojas. Al comparar el efecto de las aplicaciones foliares de Si en el nivel de 0 mM NaCl y en el de 100 mM NaCl en la concentración de Si en raíz, se aprecia que el factor salinidad no tuvo efecto significativo, lo cual coincide con [Liu et al. \(2014\)](#), quienes añadieron 0 o 1.67 mM

Na_2SiO_3 a la solución nutritiva, a plantas de sorgo bajo estrés y sin estrés osmótico, y al analizar la concentración de Si, encontraron que la condición de estrés no afectó la concentración de Si. La aplicación foliar de Si en el nivel 0 mM NaCl incrementó significativamente la concentración de Si en tallo, siendo diferente estadísticamente a todas las demás combinaciones. En hojas la mayor concentración de silicio se encontró con la combinación del nivel 0 de NaCl y la aplicación foliar conjunta de Si + Ca, tal combinación fue diferente estadísticamente a todas las demás, además se puede observar que con la aplicación de Si + Ca en el nivel de 100 mM NaCl se propicia una disminución significativa de la concentración de Si comparada con la aplicación individual de Si. Por tanto, bajo una condición normal (0 mM NaCl) el Si se concentra mayormente en hojas con la aplicación conjunta de Si + Ca, y bajo una condición de salinidad (100 mM NaCl) se incrementa con la aplicación individual de Si. En frutos la mayor concentración de Si se encontró con la combinación del nivel de 100 mM NaCl y la aplicación foliar de Ca, la cual no mostró ser diferente estadísticamente con la aplicación de Si + Ca en el mismo nivel de NaCl, pero si con todas las demás combinaciones (**Cuadro 1.35**). Las mayores concentraciones de Si se encontraron en hojas, lo cual coincide con [Haynes \(2014\)](#) quien afirma que el Si se acumula en mayor proporción en los órganos con mayor transpiración, aunado a esto, las aplicaciones de este elemento fueron al follaje y según [Ma y Yamaji \(2006\)](#), el Si es un elemento no móvil. Las concentraciones de Si en los diferentes órganos fueron demasiado bajas, [Guntzer et al. \(2012\)](#) mencionan que las plantas dicotiledóneas que acumulan menos de 5000 mg kg^{-1} en base a peso seco son plantas de rechazo o que excluyen Si, siendo la mayor concentración obtenida en el presente experimento de $104.59 \text{ mg kg}^{-1}$. Pudiendo ser esta la razón por la cual los efectos benéficos del Si no fueron visibles en la presente investigación, pues los efectos benéficos del silicio se deben a su alta acumulación en tejidos vegetales ([Carneiro et al., 2010](#); [Ma y Yamaji, 2015](#)). Por su parte, [Agostinho \(2016\)](#) hizo aplicaciones foliares de Si en dosis crecientes a un cultivo de arroz, posteriormente analizó la acumulación de este elemento, coincidiendo sus resultados con los de la presente investigación, pues las aplicaciones foliares no tuvieron efecto significativo en la acumulación de Si en hojas en comparación con el testigo. [Cooke y Leishman \(2016\)](#) al estudiar diferentes familias de plantas encontraron que el suministro

de Si no muestra incrementar su concentración en raíces, pero se puede apreciar en los resultados obtenidos que al aplicar el Si en conjunto con Ca hay un incremento en la concentración de Si en este órgano. [Sun et al. \(2016\)](#) aislaron y caracterizaron el transportador CsLsi1 en pepino, el cual es un transportador de influjo de silicio ubicado en raíz, al ser sobre expresado en las mismas plantas se observó que incrementó considerablemente la concentración de Si en hojas. El Si muestra acumularse mayormente en tallos y raíces de papa cuando se hacen aplicaciones de este elemento a la raíz, en comparación con aplicaciones foliares, mientras que la concentración de Si en tubérculos no muestra incrementarse con las aplicaciones de este elemento, independientemente de la forma de aplicación ([Pilon et al., 2013](#)). En dos cultivares de calabaza que sirven de patrón, sobre estos se injerta pepino, se encontró un transportador de influjo de Si en raíces, mostrando diferente comportamiento, pues mientras que un cultivar mostró ser eficiente para acumular Si, el otro no, la razón es la mutación de un aminoácido en las posición 242 del transportador, lo cual afectó la localización sub-celular de tal transportador, pues el que permite el influjo de Si se encuentra en la membrana plasmática y el que presenta una menor capacidad de transportar Si de la solución a las células de la raíz se expresa en el retículo endoplásmico ([Mitani et al., 2011](#)). Cientos de investigaciones en diferentes especies vegetales han demostrado el efecto positivo del Si para ayudar a sobrellevar diversos tipos de estrés, pero aún hacen falta bases sólidas, pues no se sabe con certeza si el uso predecible del Si para sobrellevar condiciones de estrés, está delimitado para cierto grupo de plantas bajo situaciones específicas, pues es sabido que la habilidad para usar este elemento por la gran diversidad filogenética es muy extenso ([Cooke y Leishman, 2016](#)). Al crecer tres cultivares diferentes de soya con la misma actividad de la proteína NIP2s (proteínas transportadoras de Si) en un sistema hidropónico con dos niveles de Si, [Deshmukh et al. \(2013\)](#) encontraron que los tres cultivares tenían diferente capacidad de concentrar Si en el tejido, hubiese Si en el medio o no. A la fecha existen contradicciones acerca de las propiedades del Si, sobre todo al experimentar con especies diferentes, lo que ha detenido su integración en las prácticas agronómicas ([Deshmukh y Bélanger, 2015](#)). Otro posible efecto de la baja acumulación de Si en el tejido vegetal, es por la baja solubilidad del reactivo utilizado, pues [Savvas y Ntatsi \(2015\)](#)

mencionan que las fuentes de Si que se deben utilizar para su aplicación al follaje son aquellas altamente solubles, tales como silicato de potasio, silicato de sodio y ácido silícico. Al comparar el efecto del Si (silicato de potasio) en aplicaciones foliares o en la solución nutritiva en el cultivo de melón [Dallagnol *et al.* \(2012\)](#) encontraron los mayores efectos con la aplicación en la solución nutritiva, pues el aplicado vía foliar se quedó sólo en la superficie externa de la hoja, estos resultados fueron contundentes al repetir el experimento ([Dallagnol *et al.*, 2015](#)).

Cuadro 1.35. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la concentración de silicio (Si) en raíz, tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino bajo condición de salinidad en sistema hidropónico.

NaCl (mM)	Aplicación foliar	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Concentración de Si (mg kg ⁻¹ *BS)					
0	Testigo	17.65 ± 2.55 b ^z	20.34 ± 2.24 b	26.34 ± 2.79 cd	11.96 ± 0.37 b
	2 mM Si	13.34 ± 0.90 b	36.05 ± 11.63 a	26.00 ± 12.50 cd	10.72 ± 1.09 b
	2 mM Ca	15.88 ± 1.61 b	15.12 ± 1.86 b	63.73 ± 16.18 b	10.52 ± 0.55 b
	2 mM Si + 2 mM Ca	17.29 ± 3.45 b	21.10 ± 3.05 b	104.59 ± 28.39 a	12.05 ± 0.70 b
100	Testigo	14.56 ± 0.84 b	18.56 ± 2.61 b	38.73 ± 7.37 bcd	11.49 ± 1.33 b
	2 mM Si	13.88 ± 0.98 b	21.50 ± 2.79 b	52.71 ± 9.41 bc	11.57 ± 0.48 b
	2 mM Ca	17.56 ± 4.11 b	16.91 ± 2.87 b	31.08 ± 7.12 bcd	14.87 ± 1.97 a
	2 mM Si + 2 mM Ca	29.58 ± 5.94 a	17.00 ± 3.14 b	18.49 ± 2.47 d	12.67 ± 0.71 ab
yDMS		10.88	12.46	33.78	2.67

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

1.6. CONCLUSIONES

El nivel de 100 mM NaCl redujo la longitud, diámetro de tallo, biomasa seca de raíz, tallo, hojas y área total; el rendimiento, peso de materia fresca y seca de frutos, longitud y diámetro de frutos, en todos los casos comparado con el nivel de 0 mM NaCl.

Los efectos adversos en la condición de salinidad (100 mM NaCl) no fueron mejorados por las aplicaciones foliares de Si, Ca o Si + Ca.

En el nivel de 0 mM NaCl se incrementó 14.9% el rendimiento y 10.5% el número de frutos con la aplicación foliar de Si + Ca.

La firmeza de frutos crecidos en el nivel de 0 mM NaCl muestra ser incrementada 6.8% con la aplicación de Si + Ca, en comparación con la aplicación individual de Ca.

La aplicación foliar de Si incrementa la luminosidad y el índice de saturación en frutos de pepino crecidos en el nivel de 0 mM NaCl, la aplicación conjunta de Si + Ca incrementa la luminosidad en frutos crecidos bajo estrés salino.

En el nivel de 100 mM NaCl se incrementan los valores de sólidos solubles totales, pH, CE y acidez titulable en frutos. Mientras que aplicaciones foliares de Si, Ca y Si + Ca disminuyen valores de pH en fruto.

En plantas sometidas a 100 mM NaCl y aplicación foliar de Si + Ca se incrementa los sólidos solubles totales y con la aplicación de Ca se incrementa la acidez titulable.

La concentración de prolina en hojas de pepino bajo estrés salino se disminuye en 32.3% en comparación con el nivel de 0 mM NaCl, y muestra ser incrementada con la aplicación foliar de Si.

Someter plantas de pepino a estrés por NaCl (100 mM) disminuye la concentración en tejido de N, P, K, Zn y Mn; mostrando incrementar la de Mg, Cu y B.

La concentración de N en hojas muestra ser incrementada con la aplicación foliar de Si en el nivel de 0 mM NaCl.

La concentración de P disminuyó en hojas con la aplicación foliar de Si + Ca.

La aplicación foliar de Si + Ca incrementa la concentración de K, Ca, Mg, Fe, Mn en hojas del cultivo de pepino en el nivel de 0 mM NaCl, mientras que con 100 mM NaCl la misma aplicación foliar disminuye la concentración de K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B.

La aplicación foliar de Si incrementa la concentración de Cu, Zn y B en hojas del cultivo de pepino bajo estrés salino.

La concentración de Na se incrementó en raíces, tallo, hojas y frutos en valores de 65.1%, 92.3%, 95.8% y 95.4% respectivamente, con el nivel de 100 mM NaCl.

La aplicación foliar de Si + Ca incrementó la concentración de Na en raíz (22.4%) y la disminuyó 69.6% en hojas, con respecto al testigo.

El Si se concentra mayormente en hojas (56.41 mg kg⁻¹) en ausencia de estrés salino; mientras que disminuye 37.5% bajo salinidad.

La aplicación foliar de Si + Ca incrementa la concentración de Si en hojas de pepino sin estrés salino.

1.7. LITERATURA CITADA

- Abdel-Haliem MEF, Hegazy HS, Hassan NS, Naguib DM. 2017. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. *Ecological Engineering* 99: 282-289. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.060
- Abu-Zinada IA. 2015. Effect of salinity levels and application stage on cucumber and soil under greenhouse condition. *International Journal of Agriculture and Crop Science* 8(1): 73-80.
- Agostinho FB. 2016. Evaluation of absorption and uptake of soil- and foliar-applied silicon in rice and its accumulation under different phosphorus rates. LSU Master's Theses. 3519.
- Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial No. 10. Chapingo, México.
- Ali MH. 2011. Management of Salt-Affected Soils *In: Practices of Irrigation and On-farm Water Management* Vol. 2. Ali MH (ed.). Springer. NY, USA. pp. 271-325. Doi: 10.1007/978-1-4419-7637-6_8
- Al-Sadi AM, Al-Masoudi RS, Al-Habsi N, Al-Said FA, Al-Rawahy SA, Ahmed M, Deadman ML. 2010. Effect of salinity on pythium damping-off of cucumber and on the tolerance of *Pythium aphanidermatum*. *Plant Pathology* 59: 112-120. Doi: 10.1111/j.1365-3059.2009.02176.x
- Arzani A, Ashraf M. 2016. Smart Engineering of Genetic Resources for Enhanced Salinity Tolerance in Crop Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 35(3): 146-189. Doi: 10.1080/07352689.2016.1245056
- Ashraf M, Foolad MR. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany* 59: 206-216. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.006
- Ashraf M, Rahmatullah, Ahmad R, Afzal M, Tahir MA, Kanwal S, Maqsood MA. 2009. Potassium and Silicon Improve Yield and Juice Quality in Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under Salt Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195: 284-291. Doi: 10.1111/j.1439-037X.2009.00364.x

- Bae MJ, Park YG and Jeong BR. 2010. Effect of a silicate fertilizer supplemented to the medium on rooting and subsequent growth of potted plants. *Flower Research Journal* 18: 50-56.
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39(1): 205-207. Doi: 10.1007/BF00018060
- Bauer P, Elbaum R, Weiss IM. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: Transport, structure and function. *Plant Science* 180: 746-756. Doi: /10.1016/j.plantsci.2011.01.019
- Bezborodov GA, Shadmanov DK, Mirhashimov RT, Yuldashev T, Qureshid AS, Noble AD y Qadir M. 2010. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia. *Agriculture Ecosystem and Environment* 138: 95-102. Doi: 10.1016/j.agee.2010.04.005
- Bojórquez-Quintal E, Velarde-Buendía A, Ku-González A, Carillo-Pech M, Ortega-Camacho D, Echeverría-Machado I, Porrosin I, Martínez-Estévez M. 2014. Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jacq.): Proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation. *Frontiers in Plant Science*. 5: 605. Doi: 10.3389/fpls.2014.00605
- Boland FE. 1990. Fruits and fruit products. *In: Official methods of analysis of the association of analytical methods (AOAC)*. Helrich, K (ed.). Virginia, USA. pp. 910-911.
- Bouzo CA, Cortez SB. 2012. Efecto de la aplicación foliar de calcio sobre algunos atributos de calidad en frutos de melón. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 38(3): 257-262.
- Bowler C, Flurh R. 2000. The role of calcium and activated oxygen's as signals for controlling cross-tolerance. *Trends and Plant Science* 5: 241-246. Doi: 10.1016/S1360-1385(00)01628-9
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *Methods of soil analysis*. Part 2. *Agronomy* 9. American Society of agronomy. Madison, Wisconsin.
- Carneiro JMT, Oliveira LA, Rossete ALRM, Abreu CH, Bendassolli JA. 2010. Accumulation and translocation of silicon in rice and bean plants using the ³⁰Si stable isotope. *Journal of Plant Nutrition* 33: 1374-1383. Doi: 10.1080/01904167.2010.484097
- Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S. 2016. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. *Sci. Reports* 6: 22882. Doi: 10.1038/srep22882
- Chondraki S, Tzerakis C, Tzortzakis N. 2012. Influence of sodium chloride and calcium foliar spray on hydroponically grown parsley in nutrient film technique system, *Journal of Plant Nutrition* 35(10): 1457-1467. Doi: 10.1080/01904167.2012.689906

- Colla G, Roupahel Y, Cardarelli M. 2006. Effect of salinity on yield, fruit quality, leaf gas exchange, and mineral composition of grafted watermelon plants. *HortScience* 41(3): 622-627.
- Cooke J, Leishman MR. 2016. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Functional Ecology* 30: 1340-1357. Doi: 10.1111/1365-2435.12713
- Cramer GR. 2002. Sodium-calcium interactions under salinity stress. *In: Salinity: Environment - Plants – Molecules*. Laüchli A, Lütgge U (eds.) Springer Netherlands. pp. 205-227.
- Dabuxilatu, Ikeda, M. 2005a. Interactive effect of salinity and supplemental calcium application on growth and ionic concentration of soybean and cucumber plants. *Soil Science Plant Nutrition* 61(4): 549-555. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00063.x
- Dabuxilatu, Ikeda, M. 2005b. Distribution of K, Na and Cl in Root and Leaf Cells of Soybean and Cucumber Plants Grown under Salinity Conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 51(7): 1053-1057. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00144.x
- Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Pascholati SF, Fortunato AA, Camargo LEA. 2015. Comparison of root and foliar applications of potassium silicate in potentiating post-infection defences of melon against powdery mildew. *Plant Pathology* 64: 1085-1093. Doi: 10.1111/ppa.12346
- Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Pascholati SF, Fortunato AA, Camargo LEA. 2015. Comparison of root and foliar applications of potassium silicate in potentiating post-infection defences of melon against powdery mildew. *Plant Pathology* 64: 1085-1093.
- Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Tanaka FAO, Amorim L, Camargo LEA. 2012. Effect of potassium silicate on epidemic components of powdery mildew on melon. *Plant Pathology* 61: 323-330. Doi: 10.1111/j.1365-3059.2011.02518.x
- Dar MI, Naikoo MI, Rehman F, Naushin F, Khan FA. 2016. Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development. *In: Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies*. Iqbal N, Nazar R, Khan NA (eds.). Springer India. Doi: 10.1007/978-81-322-2616-1. pp. 155-166.
- David A, Yadav S, Bhatla SC. 2010. Sodium chloride stress induces nitric oxid accumulation in root tips and oil body surface accompanying slower oleosin degradation in sunflower seedlings. *Physiologia Plantarum* 140: 342-354. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2010.01408.x
- Deinlein U, Stephan AB, Horie T, Luo W, Xu G y Schroeder JI. 2014. Plant salt-tolerance mechanisms. *Trends in Plant Science* 19(6): 371-379. Doi: 10.1016/j.tplants.2014.02.001
- Del Amor FM, Ruiz-Sánchez MC, Martínez V, Cerdá A. 2000. Gas exchange, water relations, and ion concentrations of salt-stressed tomato and melon plants. *Journal of Plant Nutrition* 23(9): 1315-1325. Doi: 10.1080/01904160009382102

- Deshmukh R, Bélanger RR. 2015. Molecular evolution of aquaporins and silicon influx in plants. *Functional Ecology* 30: 1277-1285. Doi: 10.1111/1365-2435.12570
- Deshmukh RK, Vivancos J, Ramakrishnan G, Guérin V, Carpentier G, Sonah H, Labbé C, Isenring P, Belzile FJ and Bélanger RR. 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. Doi: 10.1007/s11103-013-0087-3
- Detmann KC, Araújo L, Martins SCV, Sanglard LMVP, Reis JV, Detmann E, Rodrigues FÁ, Nunes-Nesi A, Femie AR, DaMatta FA. 2012. Silicon nutrition increase grain yield, which, in turn, exerts a feedforward simulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytology* 196: 752-762. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04299.x
- Dios-Delgado I, Sandoval-Villa M, Rodríguez-Mendoza MN, Cárdenas-Soriano E. 2006. Aplicaciones foliares de calcio y silicio en la incidencia de mildiu en lechuga. *Terra Latinoamericana* 24(1): 91-98.
- Domene RMA, Segura RM. 2014. Parámetros de calidad externa en la industria agroalimentaria. Cajamar. Negocio Agroalimentario y Cooperativo. Ficha de Transferencia. No. 003.
- Fahmy K, Nakano K. 2013. Influence of relative humidity on development of chilling injury of cucumber fruits during low temperature storage. *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture Food and Energy* 1(1): 1-5.
- FAO. 2012. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- FAO. 2016. AQUASTAT, el sistema de información global sobre el agua de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en línea en: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm>. Consultado: junio 1, 2017.
- Farshidi M, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR. 2012. Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Physiol Plantarum* 34: 1779-1788. Doi: 10.1007/s11738-012-0975-1
- Fernández-García N, Martínez V, Cerdá A, Carvajal M. 2004. Fruit quality of grafted tomato plants grown under saline conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79(6): 995-1001. Doi: 10.1080/14620316.2004.11511880
- 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. *Science Reports* 5: 12696. Doi: 10.1038/srep12696

- Gonzalo MJ, Lucena JJ, Hernández- Apaolaza L. 2013. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry* 70: 455-461. Doi: 10.1016/j.plaphy.2013.06.007
- Grewal HS, Maheshwari B, Parks SE. 2011. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. *Agricultural Water Management* 98: 841-846. Doi: 10.1016/j.agwat.2010.12.010
- Guntzer F, Keller C, Meunier JD. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy Sustainable Development* 32: 201-213. Doi: 10.1007/s13593-011-0039-8
- Gupta B, Huang B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics* 2014: 1-18. Doi: 10.1155/2014/701596
- Gurmani AR, Bano A, Khan SU, Din J, Zhang JL. 2011. Alleviation of salt stress by seed treatment with abscisic acid (ABA), 6-benzylaminopurine (BA) and chlormequat chloride (CCC) optimizes ion and organic matter accumulation and increases yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture Food and Energy* 5(10): 1278-1285.
- Habibi G. 2015. Effects of soil- and foliar-applied silicon on the resistance of grapevine plants to freezing stress. *Acta Biologica Szegediensis* 59(2): 109-117.
- Han Y, Yin S, Huang L. 2015. Towards plant salinity tolerance-implications from ion transporters and biochemical regulation. *Plant Growth Regulation* 76: 13-23. Doi: 10.1007/s10725-014-9997-6
- Hashemi A, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 56: 244-253. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2009.00443.x
- Haynes RJ. 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177: 831-844. Doi: 10.1002/jpln.201400202
- He L, Li B, Lu X, Yuan L, Yang Y, Yuan Y, Du J, Guo S. 2015. The effect of exogenous calcium on mitochondria, respiratory metabolism enzymes and ion transport in cucumber roots under hypoxia. *Scientific Reports* 5: 11391. Doi: 10.1038/srep11391
- Hernandez-Apaolaza L. 2014. Can Silicon Partially Alleviate Micronutrient Deficiency in Plants? A Review. *Planta* 240(3): 447-458. Doi: 10.1007/s00425-014-2119-x
- Hernández-González Z, Sahagún-Castellanos J, Espinosa-Robles P, Colinas-León, MT, Rodríguez-Pérez JE. 2014. Efecto del patrón en el rendimiento y tamaño de fruto en pepino injertado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(1): 41-47.

- Hojjatnooghi F, Mozafari V, Tajabadipour A, Hokmabadi H. 2014. Effects of salinity and calcium on the growth and chemical composition of pistachio seedlings. *Journal of Plant Nutrition* 37(6): 928-941. Doi: 10.1080/01904167.2014.888737
- Horie T, Karahara I, Katsuhara M. 2012. Salinity tolerance mechanisms in glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice* 5: 11. Doi: 10.1186/1939-8433-5-11
- Hu DG, Ma QJ, Sun CH, Sun MH, You CX, Hao YJ. 2016. Overexpression of MdSOS2L1, a CIPK protein kinase, increases the antioxidant metabolites to enhance salt tolerance in apple and tomato. *Physiologia Plantarum* 156: 201-214. Doi: 10.1111/ppl.12354
- Hu Y, Schmidhalter U. 2005. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168: 541-549. Doi: 10.1002/jpln.200420516
- Huang Y, Tang R, Cao Q, Bie Z. 2009. Improving the fruit yield and quality of cucumber by grafting onto the salt tolerant rootstock under NaCl stress. *Scientia Horticulturae* 122: 26-31. Doi: 10.1016/j.scienta.2009.04.004
- Isayenkov SV. 2012. Physiological and Molecular Aspects of Salt Stress in Plants. *Cytology and Genetics* 46(5): 302-318. Doi: 10.3103/S0095452712050040
- Jana S, Ryong JB. 2014. Silicon: The most under-appreciated element in horticultural crops. *Trends in Horticultural Research* 4: 1-19. Doi: 10.3923/thr.2014.1.19
- Jayakannan M, Bose J, Babourina O, Rengel Z, Shabala S. 2015. Salicylic acid in plant salinity stress signalling and tolerance. *Plant Growth Regulation* 76: 25-40. Doi: 10.1007/s10725-015-0028-z
- Jayawardana HAR, Weerahewa KHL, Saparamadu MDJS. 2014. Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of capsicum. *Tropical Agricultural Research* 26(1): 74-81.
- Jiménez B JL. 2011. Producción de hortalizas en ambientes protegidos, 2da edición, Editorial Laserlogo, Culiacán Sinaloa, México. 165 p.
- Kafi M, Rahimi Z. 2011. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Soil Science and Plant Nutrition* 57: 341-347. Doi: 10.1080/00380768.2011.567398
- Kaya C, Higgs D, Kirnak H, Tas I. 2003. Ameliorative effect of calcium nitrate on cucumber and melon plants drip irrigated with saline water. *Journal of Plant Nutrition* 26(8): 1665-1681. Doi: 10.1081/PLN-120022379
- Kaya C, Higgs D. 2002. Calcium nitrate as a remedy for salt-stressed cucumber plants. *Journal of Plant Nutrition* 25(4): 861-871. Doi: 10.1081/PLN-120002965
- Kaya C, Kirnak H, Higgs D, Saltali K. 2002. Supplementary calcium enhances plant growth and fruit yield in strawberry cultivars grown at high (NaCl) salinity. *Scientia Horticulturae* 93(1): 65-74. Doi: 10.1016/S0304-4238(01)00313-2

- Kchaou H, Larbi A, Gargouri K, Chaieb M, Morales F, Msallem M. 2010. Assessment of tolerance to NaCl salinity of five olive cultivars based on growth characteristics and Na⁺ and Cl⁻ exclusion mechanisms. *Scientia Horticulturae*. 124(3): 306-315. Doi: 10.1016/j.scienta.2010.01.007
- Khoshgoftarmanesh AH, 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. Doi: 10.1080/03650340.2013.822487
- Lamz PA, González CMC. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales* 34(4): 31-42.
- Lee SK, Sohn EY, Hamayun M, Yoon JY, Lee IJ. 2010. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry Systems* 80: 333-340. Doi: 10.1007/s10457-010-9299-6
- Liu P, Yin L, Deng X, Wang S, Tanaka K, Zhang S. 2014. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Journal of Experimental Botany* 65: 4747-4756. Doi: 10.1093/jxb/eru220
- Lolaei A, Ali RM, Khorrami RM, Kaviani B. 2012. Effects of salinity and calcium on the growth, ion concentration and yield of Olive (*Olea europea* L.) trees. *Annals of Biological Research* 3(10): 4675-4679.
- Ma JF, Yamaji N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science* 11(8): 392-397. Doi: 10.1016/j.tplants.2006.06.007
- Ma JF, Yamaji N. 2015. A cooperated system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science* 20(7): 1-8. Doi: 10.1016/j.tplants.2015.04.007
- Ma JF. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science Plant Nutrition* 50(1): 11-18. Doi: 10.1080/00380768.2004.10408447
- Magán JJ, Gallardo M, Thompson RB, Lorenzo P. 2008. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management* 95(9): 1041-1055. Doi: 10.1016/j.agwat.2008.03.011
- Mahajan S, Pandey GK, Tuteja N. 2008. Calcium- and salt-stress signaling in plants: Shedding light on SOS pathway. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 471: 146-158. Doi: 10.1016/j.abb.2008.01.01
- Manivannan A, Soundararajan P, Muneer S, Ko CH, Jeong BR. 2016. Silicon Mitigates Salinity stress by regulating the physiology, antioxidant enzyme activities, and protein expression in *Capsicum annuum* 'Bugwang'. *BioMed Research International* 2016: 3076357. Doi: 10.1155/2016/3076357
- Mateo-Sagasta J, Burke J. 2010. Agriculture and water quality interactions: a global overview. FAO. SOLAW Background Thematic Report - TR08.

- Matlou MC. 2006. A comparison of soil and foliar applied silicon on nutrient availability and plant growth and soil-applied silicon on phosphorus availability. MSc thesis. University of KwaZulu-Natal. South Africa.
- Mehrabanjoubani P, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR, Aghdasi M. 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere* 25(2): 192-201. Doi: 10.1016/S1002-0160(15)60004-2
- Mitani N, Yamaji N, Ago Y, Iwasaki K, Ma JF. 2011. Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation. *The Plant Journal* 66(2): 231-240. Doi: 10.1111/j.1365-313X.2011.04483.x
- Montesano FF, D'Imperio M, Parente A, Cardinali A, Renna M, Serio F. 2016. Green bean biofortification for Si through soilless cultivation: plant response and Si bioaccessibility in pods. *Scientific Reports* 6: 31662. Doi: 10.1038/srep31662
- Montpetit J, Vivancos J, Mitani-Ueno N, Yamaji N, Rémus-Borel W, Belzile F, Ma JF, Bélanger RR. 2012. Cloning, functional characterization and heterologous expression of *TaLsi1*, a wheat silicon transporter gene. *Plant Molecular Biology* 79(1-2): 35-46. Doi: 10.1007/s11103-012-9892-3
- Morgan SH, Maity PJ, Geilfus ChM, Lindberg S, Mühling KH. 2014. Leaf ion homeostasis and plasma membrane H⁺-ATPase activity in *Vicia faba* change after extra calcium and potassium supply under salinity. *Plant Physiology and Biochemistry* 82: 244-253. Doi: 10.1016/j.plaphy.2014.06.010
- Munir S, Liu H, Xing Y, Hussain S, Ouyang B, Zhang Y, Li H, Ye Z. 2016. Overexpression of calmodulin like (*ShCML44*) stress-responsive gene from *Solanum habrochaites* enhances tolerance to multiple abiotic stresses. *Scientific Reports* 6: 31772. Doi: 10.1038/srep31772
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59: 651-681. Doi: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
- Munns R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment* 25: 239-250. Doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x
- Navarro JM, Garrido C, Flores P, Martínez V. 2010. The effect of salinity on yield and fruit quality of pepper grown in perlite. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(1): 142-150.
- Nedjimi B. 2016. Salinity tolerance: growth, mineral nutrients, and roles of organic osmolytes, case of *Lygeum spartum* L., a review. *In: Osmolytes and plants acclimation to changing environment: emerging omics technologies*. Iqbal N, Nazar R, Khan NA (eds.). Springer India. pp. 27-36.
- Negrão S, Schmöckel SM, Tester M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany* 119: 1-11. Doi: 10.1093/aob/mcw191

- Nxele X, Kleinb A, Ndimba BK. 2017. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African Journal of Botany* 108: 261-266. Doi: 10.1016/j.sajb.2016.11.003
- Parés J, Basso C. 2013. Efecto del cloruro de sodio sobre el crecimiento y estado nutricional de plantas de papaya. *Bioagro* 25(2): 109-116.
- Parida A, Das AB. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60(3): 324-349. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2004.06.010
- Pavlovic J, Zamardzic J, Kostic L, Laursen KH, Natic M, Timotijevic G, Schjoerring JK, Nikolic M. 2016. Silicon enhances leaf remobilization of iron in cucumber under limited iron conditions. *Annals of Botany* 118: 271-280. Doi: 10.1093/aob/mcw105
- Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou WJ. 2010. Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation* 29: 106-115. Doi: 10.1007/s00344-009-9120-9
- Pereira A. 2016. Plant abiotic stress challenges from the changing environment. *Frontiers in Plant Science* 7: 1123. Doi: 10.3389/fpls.2016.01123.
- Pilon C, Soratto RP, Broetto F, Fernandes AM. 2014. Foliar or soil applications of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants. *Agronomy Journal* 106: 2325-2334. Doi: 10.2134/agronj14.0176
- Pilon C, Soratto RP, Moreno LA. 2013. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. *Crop Science* 53: 1605-1614. Doi: 10.2135/cropsci2012.10.0580
- Pisinaras V, Tsihrintzis VA, Petalas C, Ouzounis K. 2010. Soil salinization in the agricultural lands of Rhodope District, northeastern Greece. *Environmental Monitoring and Assessment* 166: 79-94. Doi: 10.1007/s10661-009-0986-6
- Qadir M, Oster JD. 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agricultura. *Science of the Total Environment* 323: 1-19. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2003.10.012
- Rijk Swaan. 2017. Productos y servicios. Disponible en línea en: [http://www.rijkszwaan.es/wps/wcm/connect/RZ+ES/Rijk+Zwaan/Products_and_Services/Products/Crops/Pepino?pcpage=3&frm=1&varname=MODAN%20RZ%20F1%20\(22951\)&his=c293LHVuZGVmaW5lZCwwO2hhcnYsdW5kZWZpbmVkJDA7cGxhbnQsdW5kZWZpbmVkJDA7cmFkaW9zY2hlZCxoYXJ2LDA7](http://www.rijkszwaan.es/wps/wcm/connect/RZ+ES/Rijk+Zwaan/Products_and_Services/Products/Crops/Pepino?pcpage=3&frm=1&varname=MODAN%20RZ%20F1%20(22951)&his=c293LHVuZGVmaW5lZCwwO2hhcnYsdW5kZWZpbmVkJDA7cGxhbnQsdW5kZWZpbmVkJDA7cmFkaW9zY2hlZCxoYXJ2LDA7). Consultado: marzo 07, 2017.
- Rizwan M, Ali S, Ibrahim M, Farid M, Adrees M, Bharwana SA, Zia-urRehman M, Qayyum MF, Abbas F. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22: 15416-15431. Doi: 10.1007/s11356-015-5305-x

- Rodríguez MMN, Trejo-Téllez LI, Alcántar GG. 2012 Acceso absorción y transporte nutrimental. *In: Nutrición de cultivos*. Alcántar GG, Trejo-Téllez LI (eds.). Biblioteca Básica de Agricultura. México. pp. 159-199.
- Romero-Aranda MR, Jurado O, Cuartero J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology* 163(8): 847-855. Doi: 10.1016/j.jplph.2005.05.010
- Romero-Gomezcaña NR, Sánchez-García P, Alcázar JR, Saucedo-Veloz C. Aplicación foliar de calcio y su relación con la calidad en frutos de mango cv. Haden. *Agricultura Técnica en México* 32(1): 5-15.
- Rosegrant MW, Ringler C, Zhu T. 2009. Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity. *Annual Review of Environment Resources* 34: 205-222. Doi: 10.1146/annurev.environ.030308.090351
- Roy SJ, Negrão S, Tester M. 2014. Salt resistant crop plants. *Current Opinion in Biotechnology* 26: 115-124. Doi: 10.1016/j.copbio.2013.12.004
- Sahebi M, Hanafi MM, Siti Nor AA, Rafii MY, Azizi P, Tengoua FF, Mayzaitul AJN, Shabanimofrad M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International* 2015: 1-16. Doi: 10.1155/2015/396010
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Savvas D, Ntatsi G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196: 66-81. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.010
- Savvas D, Giotis D, Chatzieustratiouc E, Bakeab M, Patakioutas G. 2009. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environmental and Experimental Botany* 65: 11-17. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2008.07.004
- Savvas D, Meletiou G, Margariti S, Tsirogiannis I. 2005. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *HortScience* 40(30): 802-807.
- Shabala S, Cuin TA. 2008. Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiologia Plantarum* 133(4): 651-669. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x
- Sahebi M, Hanafi MM, Siti Nor AA, Rafii MY, Azizi P, Tengoua FF, Mayzaitul AJN, Shabanimofrad M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International* 2015: 1-16. Doi: 10.1155/2015/396010
- Shahzad M, Zörb C, Geilfus C-M, Mühling KH. 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: 161-170. Doi: 10.1111/jac.12003

- Shi Y, Wang Y, Flowers TJ, Gong H. 2013. Silicon decrease chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. *Journal of Plant Physiology* 170(9): 847-853. Doi: 10.1016/j.jplph.2013.01.018
- SIAP. 2017. Producción agrícola: OI+PV 2016. Disponible en línea en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/. Consultado: junio 01, 2017.
- Sonneveld C, de Kreij C. 1999. Response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to an unequal distribution of salts in the root environment. *Plant and Soil* 209: 47-56. Doi: 10.1023/A:1004563102358
- Sonobe K, Hattori T, An P, Tsuji W, Eneji E, Ttanaka K, Inanaga S. 2009. Diurnal variations in photosynthesis, stomatal conductance and leafwater relation in sorghum grown with or without silicon underwater stress. *Journal of Plant Nutrition* 32(3): 433-442. Doi: 10.1080/01904160802660743
- Soria T, Cuartero J, Romero-Aranda R. 2002. Yield and fruit quality of salinised tomato plants with enhanced Ca fertilization. *Acta Horticulturae* 573: 35-41. Doi: 10.17660/ActaHortic.2002.573.3
- Soundararajan P, Manivannan A, Park YG, Muneer S, Jeong BR. 2015. Silicon Alleviates Salt stress by Modulating Antioxidant Enzyme Activities in *Dianthus caryophyllus* 'Tula'. *Hort. Environ. Biotechnol.* 56(2): 233-239.
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. 6th international congress on soilless culture. Wageningen, Holanda. pp. 633-650.
- Sun H, Guo J, Duan Y, Zhang T, Huo H, Gong H. 2016. Isolation and functional characterization of *CsLsi1*, a silicon transporter gene in *Cucumis sativus*. *Physiologia Plantarum* 159(2): 201-214. Doi: 10.1111/ppl.12515
- Tavakkoli E, Fatehi F, Coventry S, Rengasamy P, McDonald GK. 2011. Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on barley growth under salinity stress. *Journal of Experimental Botany* 62(6): 2189-2203. Doi: 10.1093/jxb/erq422
- Trajkova F, Papadantonakis N. 2006. Comparative effects of NaCl and CaCl₂ salinity on cucumber grown in a closed hydroponic system. *HortScience* 41(2): 437-441.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar GG. 2012. Elementos benéficos. *In: Nutrición de cultivos*. Alcántar GG, Trejo-Téllez LI (eds.). Biblioteca Básica de Agricultura. México. pp. 50-91.
- Tuteja N. 2009. Integrated calcium signaling in plants. *In: Signaling in Plants*. Baluška F, Mancuso S (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 29-49. Doi: 10.1007/978-3-540-89228-1
- Tzortzakis NG. 2009. Influence of NaCl and calcium foliar spray on lettuce and endive growth using nutrient film technique. *International Journal of Vegetable Science* 15(1): 44-56. Doi: 10.1080/19315260802446419
- Tzortzakis NG. 2010. Potassium and calcium enrichment alleviate salinity-induced stress in hydroponically grown endives. *Horticultural Science (Prague)* 37(4): 155-162.

- Ulrich WR. 2002. Salinity and nitrogen nutrition. *In: Salinity: Environment–Plants–Molecules*. Läuchli A (ed.). Springer. pp. 229-248.
- Vázquez, C.M.G., Santiago R.D. 2013. Características fisicoquímicas y calidad del pozole del maíz cacahuacintle procesado mediante tres métodos. *Rev. Fitotec. Mex.* 36(3): 357-366.
- Voogt W, Sonneveld C. 2001. Silicon in horticultural crops grown in soilless culture. *In: Silicon in Agriculture*. Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (eds). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp. 115-131.
- 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. Doi: 10.3389/fpls.2015.00759
- Wang XS, Han JG. 2007. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. *Soil Science and Plant Nutrition* 53: 278-285. Doi: 10.1111/j.17470765.2007.00135.x
- Wilkins KA, Matthus E, Swarbreck SM, Davies JM. 2016. Calcium-Mediated Abiotic Stress Signaling in Roots. *Frontiers in Plant Science* 7: 1296. Doi: 10.3389/fpls.2016.01296
- Wu D, Shen Q, Cai S, Chen ZH, Dai F, Zhang G. 2013. Ionic responses and correlations between elements and metabolites under salt stress in wild and cultivated barley. *Plant and Cell Physiology* 54(12): 1976-1988. Doi: 10.1093/pcp/pct134
- Xu CX, Ma YP, Liu YL. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany* 98: 26-36. Doi: 10.1016/j.sajb.2015.01.008
- Xue G, Zhang G, Sun Y, Liao S, Chen Y. 2012. Influences of spraying two different forms of silicon on plant growth and quality of tomato in solar greenhouse. *Chinese Agriculture Science Bulletin* 28(16): 272-276.
- Yamaguchi T, Blumwald E. 2005. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends in Plant Science* 10(12): 615-620. Doi: 10.1016/j.tplants.2005.10.002
- Yamaji N, Chiba Y, Mitani-Ueno N, Ma JF. 2012. Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley. *Plant Physiology* 160: 1491-1497. Doi: 10.1104/pp.112.204578
- Yeo AR, Flowers SA, Rao G, Welfare K, Senanayake N, Flowers TJ. 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant Cell and Environment* 22: 559-565. Doi: 10.1046/j.1365-3040.1999.00418.x
- Yin L, Wang S, Li W, Tanaka K, Oka M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol. Plantarum* 35: 3099-3107. Doi: 10.1007/s11738-013-1343-5

- Yurtseven E, Kesmez GD, Ünlükara A. 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central Anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*). *Agricultural Water Management* 78: 128-135. Doi: 10.1016/j.agwat.2005.04.018
- Zhang P, Senge M, Dai Y. 2016. Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. *Reviews in Agricultural Science* 4: 46-55. Doi: 10.7831/ras.4.46
- Zhu Z, Wei G, Li G, Quian Q, Yu J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science* 162: 527-533. Doi: 10.1016/j.plantsci.2004.04.020
- Zhu YX, Xu XB, Hu YH, Han WH, Yin JL, Li HL, Gong HJ. 2015. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Reports* 34: 1629-1646. Doi: 10.1007/s00299-015-1814-9
- Zong L, Tedeschi A, Xue X, Wang T, Menenti M, Huang C. 2011. Effect of different irrigation water salinities on some yield and quality components of two field-grown Cucurbit species. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 35: 297-307. Doi: 10.3906/tar-0908-5

CAPÍTULO II. SILICIO Y CALCIO EN LA TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN PEPINO EN CONDICIONES DE SUELO SÓDICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones en la productividad de los cultivos es el estrés abiótico (Batth *et al.*, 2017). Siendo la salinidad el factor principal causante de estrés de los suelos agrícolas, pues ha llevado a pérdidas considerables en el rendimiento de los cultivos (Jha *et al.*, 2010).

La aplicación de enmiendas, fertilizantes y el uso de aguas de mala calidad para la irrigación son labores culturales que se practican en la producción de cultivos y que dan paso a la salinización de los suelos (Rengasamy, 2010). Asimismo la sodificación es el proceso de salinización al que se le ha prestado poca atención y por tanto es el menos comprendido en el desarrollo de suelos salinos (Pla, 2014). Los niveles de sodio en las tierras agrícolas están en incremento y se convierten en una seria amenaza para la agricultura mundial (Horie *et al.*, 2012). Los mecanismos por medio de los cuales las sales afectan a las plantas superiores varían ampliamente en función del sistema en el que éstas fueron crecidas, existiendo vastas diferencias en el efecto de la salinidad en cultivos en suelo y en hidroponía (Tavakkoli *et al.*, 2011).

La utilización de la ingeniería genética si bien ha mostrado tener un gran impacto en la producción de cultivos en condiciones de estrés salino, también ha incrementado el pánico social a la aceptación y consumo de tales productos, convirtiéndose en un obstáculo (Zuccarini, 2010). Por tanto, el incremento de los rendimientos de los cultivos en suelos afectados por sales, utilizando como estrategia la nutrición mineral, ha mostrado tener efectos positivos en asegurar la seguridad alimentaria (Khan *et al.*, 2017).

La aplicación de elementos, tales como silicio (Si), abre una línea de investigación de interés, pues ha mostrado incrementar la tolerancia al estrés en plantas, además que no se han encontrado inconvenientes por su acumulación en suelos (Zuccarini, 2010). Este elemento actúa mejorando el sistema antioxidante (Savvas y Ntatsi, 2015; Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2014), permitiendo que se reduzca la

permeabilidad de la membrana plasmática y la peroxidación de lípidos de ésta, manteniendo la integridad y funcionalidad de ésta (Zhu *et al.*, 2004). También previene la absorción de Na⁺ y/o su transporte desde las raíces al tallo (Zhu y Gong, 2014) y a las hojas (Yin *et al.*, 2013; Kafi y Rahimi, 2011); y a su vez incrementa el contenido de K⁺ en tejido (Xu *et al.*, 2015; Hellal *et al.*, 2012; Kafi y Rahimi, 2011). El calcio (Ca) por su parte, además de ser un elemento esencial para las plantas, que cumple con funciones estructurales importantes en la pared celular y membranas (Bauer *et al.*, 2011), se ha demostrado que participa en mecanismos regulatorios en las plantas en condiciones adversas de estrés salino (Melgar *et al.*, 2007) y es un factor importante en la resistencia de las plantas a la salinidad (Mozaffari y Malakouti, 2006). En pepino (He *et al.*, 2015) bajo estrés por hipoxia y tomate (Hu *et al.*, 2016) bajo estrés salino, el calcio mejora el sistema antioxidante, disminuye los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS) y ayuda al mantenimiento de homeostasis de iones.

El efecto del tratamiento conjunto con Si y Ca vía foliar ha sido positivo, coadyuvando a sobrellevar condiciones de estrés biótico (Dios-Delgado *et al.*, 2006).

Aunque el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) es moderadamente sensible a las sales, también es un cultivo que tiene importancia económica, pues es un producto que se consume en muchas regiones alrededor del mundo, lo cual lo hace un producto de exportación y que genera empleos en el campo mexicano (Hernández-González *et al.*, 2014). De las 17,236.33 hectáreas sembradas en México en el año 2016, 811.15 corresponden a pepino bajo condiciones de invernadero (SIAP, 2017). Por lo anteriormente expuesto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación foliar de Si y Ca de forma individual y conjunta en variables agronómicas y fisiológicas y de calidad de fruto en el cultivo de pepino establecido en un suelo sódico.

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de silicio y calcio en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

2.2.2. Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto principal del silicio aplicado vía foliar en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.
2. Evaluar el efecto principal del calcio aplicado vía foliar en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.
3. Evaluar el suministro de la combinación de silicio y calcio vía foliar en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

2.3. HIPÓTESIS

2.3.1. Hipótesis general

El suministro de calcio y el silicio vía foliar a plantas de pepino establecidas bajo condiciones de suelo sódico mitiga los efectos negativos de la salinidad. La aplicación conjunta de Ca y Si tienen un efecto positivo mayor en la tolerancia a la salinidad, que su aplicación individual.

2.3.2. Hipótesis específicas

1. La aplicación de silicio vía foliar mejora parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos del cultivo de pepino crecido en condiciones de suelo sódico.
2. La aplicación de calcio vía foliar mejora parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos del cultivo de pepino crecido en condiciones de suelo sódico.
3. La aplicación conjunta de silicio y de calcio vía foliar, tiene mayor eficacia que su aplicación individual, en parámetros bioquímicos, agronómicos y de calidad de frutos del cultivo de pepino crecido en condiciones de suelo sódico.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Ubicación y condiciones del experimento

El experimento se condujo en bolsas con suelo (sódico) mezclado con agrolita, bajo condiciones de invernadero, para ello se utilizó un invernadero tipo tropical asimétrico con plástico blanco lechoso, perteneciente al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, el cual se sitúa en Texcoco, Estado de México, en las coordenadas 19° 27' 47.9" LN 98° 54' 12.8" LO a 2250 m de altitud. El periodo de experimentación tuvo lugar en primavera-verano del año 2016, durante el cual la temperatura promedio durante el día y noche fue de 30 °C y 15 °C, respectivamente. La humedad relativa promedio fue de 31% durante el día y 86% durante la noche. La intensidad luminosa promedio durante el día fue de 137 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

2.4.2. Material vegetal

Semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) variedad Modan de la casa comercial Rijk Swaan fueron utilizadas. Es una variedad partenocárpica de pepino francés, cuyos frutos presentan espinas, coloración verde oscuro y una longitud promedio de 22 cm, variedad recomendable para ciclos de primavera y otoño ([Rijk Swaan, 2017](#)).

2.4.3. Producción de plántulas

Se utilizaron charolas de poliestireno de 128 cavidades y turba como sustrato (Kekkilä®). Después de la emergencia se le aplicaron riegos alternos entre días con agua corriente, siendo hasta la segunda semana (presencia la primera hoja verdadera desarrollada) cuando se inició con la aplicación de solución nutritiva Steiner ([Steiner, 1984](#)) al 50% hasta su trasplante. En esta etapa se aplicó como fungicida preventivo Previcur® N (i. a. propamocarb clorhidrato) a una dosis de 2 mL L⁻¹ directamente al sustrato y cuello del tallo de la plántula.

2.4.4. Diseño de tratamientos

Se estudió el efecto principal de los factores aplicación foliar de silicio y aplicación foliar de calcio, ambos a niveles de 0 y 2 mM; así mismo el efecto de la interacción entre factores de estudio, que originó los siguiente cuatro tratamientos: 1) testigo, consistente en la aspersión de agua destilada (0 mM Ca y 0 mM Si); 2) 2 mM Si y 0 mM Ca; 3) 0 mM Si y 2 mM Ca; y 4) 2 mM Si y 2 mM Ca.

La fuente de silicio utilizada fue dióxido de silicio (SiO_2) (Sigma-Aldrich®) y la fuente de calcio fue óxido de calcio (CaO) (Merck®). El testigo consistió en utilizar únicamente agua destilada. La preparación de estas soluciones consistió en disolver lo correspondiente de cada reactivo en vasos de precipitado con agua destilada y Tween® 20 al 0.05% como surfactante en una agitación constante, utilizando un magneto, durante 1 h. Posteriormente el pH fue regulado a 4 con H_2SO_4 0.5 N, incluyendo al testigo. Una vez iniciados los tratamientos foliares se repitieron semanalmente a las 6:00 pm hasta la culminación del experimento, en total se hicieron 5 aplicaciones.

2.4.5. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 2^2 en 6 repeticiones, resultando en 4 tratamientos aplicados a un total de 24 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo representada por una planta de pepino por bolsa.

2.4.6. Instalación del experimento

Plántulas de 28 días fueron trasplantadas a bolsas de polietileno de 35 x 35 cm (10 L), las cuales contenían una mezcla de suelo con agrolita en proporción 3:1 (v:v). Las propiedades del suelo una vez mezclado, presentes en el **Cuadro 2.1**, permitieron clasificarlo como suelo sódico.

Cuadro 2.1. Características químicas del suelo empleado en esta investigación.

Características	Valores
pH	8.59
CE (dS m ⁻¹)	0.95
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.98
Materia orgánica (%)	4.58
Nitrógeno total (%)	0.18
Fósforo Bray (mg kg ⁻¹)	2.60
Potasio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	1.81
Calcio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	20.10
Magnesio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	14.06
Sodio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	7.63
CIC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	46.12
Bicarbonato (mg kg ⁻¹)	9.75
Carbonato (mg kg ⁻¹)	1.50
Cloro (mg kg ⁻¹)	403.81
Cobre (mg kg ⁻¹)	0.26
Hierro (mg kg ⁻¹)	0.82
Manganeso (mg kg ⁻¹)	14.43
Zinc (mg kg ⁻¹)	1.20
Boro (mg kg ⁻¹)	2.38
PSI (%)	18.71

CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; PSI: porcentaje de sodio intercambiable

La distancia entre el punto medio de maceta a maceta fue de 0.40 m y entre parcelas fue de 0.80 m, obteniendo así una densidad de 3.1 plantas m⁻². Pasados 24 días después del trasplante se hicieron cinco aplicaciones foliares en intervalos semanales, repetidos a la misma hora de la tarde (18:00 h).

2.4.7. Manejo agronómico del cultivo

Después del trasplante las unidades experimentales se regaron durante todo el periodo que duró el experimento con la solución nutritiva de Steiner al 50% (Steiner, 1984). El pH de la solución nutritiva fue regulado a 5.0 utilizando H₂SO₄.

Desde el trasplante hasta la formación de los primeros frutos se proporcionaron riegos de 1 L cada tercer día de forma manual, utilizando un recipiente aforado de 0.5 L, siendo los riegos alternados entre la solución nutritiva descrita y agua acidulada con pH 5. Desde la formación de los primeros frutos, hasta la finalización

del experimento se proporcionaron riegos diarios de 1 L, siendo 0.5 L de solución nutritiva al 50% y 0.5 L de agua acidulada con pH 5.

El tutorado del cultivo se realizó con rafia, misma que fue anudada en la parte basal del tallo y el extremo opuesto en el alambre tensor a 3 m sobre la línea de plantación, de esta manera se tuvo la planta erguida, permitiendo ventilación y luminosidad óptima, además de facilitando las labores culturales.

Dentro de las labores culturales realizadas se suprimieron los primeros tres frutos para la formación de la planta y para mejorar el sistema radicular antes de entrar en producción (Jiménez, 2011), también se eliminaron los zarcillos periódicamente.

Se mantuvo un manejo preventivo contra hongos utilizando aplicaciones de Cupravit® (i. a. oxiclورو de cobre) a razón de 2.5 g L⁻¹ en los días nublados y lluviosos. A pesar del manejo preventivo se presentó Cenicilla (*Erysiphe cichoracearum*), por lo cual se implementó un método curativo a partir de aplicaciones de Amistar® (i. a. azoxistrobin) a dosis de 0.5 g L⁻¹ y Rally® (i. a. myclobutanil) a dosis de 0.23 g L⁻¹ en intervalos de acuerdo a ficha técnica. Debido a la presencia de pulgones y mosca blanca se utilizó Actara 25 WG (i. a. tiametoxam) a dosis de 2 g L⁻¹.

2.4.8. Variables estudiadas

2.4.8.1. Variables agronómicas y de crecimiento

Longitud de tallo (cm). Con una cinta métrica se midió la longitud de tallo a los 58 días después del trasplante.

Diámetro de tallo (mm). Al final del cultivo se midió el diámetro basal, medio y apical de tallo utilizando un calibrador digital (Truper® 14388, CALDI-6MP).

Peso de biomasa seca de tallo, hojas y total (g). Se separaron las hojas del tallo y de esta forma se sometieron a secado en una estufa de circulación forzada de aire a 72 °C durante 48 horas. Posteriormente el tallo y las hojas fueron pesados de manera individual en una balanza analítica.

Rendimiento (g planta⁻¹). Al alcanzar la madurez fisiológica los frutos fueron cosechados y pesados en una balanza analítica (PCE-BSH 6000 con capacidad de 6,000 g). Al realizar la cosecha final se sumó el peso total de frutos cosechados por planta, para determinar el rendimiento.

Peso de materia fresca de fruto (g). Al promediar el peso de todos los frutos cosechados por planta se obtuvo el peso medio de materia fresca de fruto por planta.

Peso de materia seca de fruto (g). Frutos de la segunda cosecha se rebanaron en rodajas de manera individual, posteriormente fueron sometidos a secado en una estufa de circulación forzada de aire a 72 °C hasta que la totalidad de frutos tuvieron un secado uniforme. Una vez los frutos estuvieron secos se pesaron en una balanza analítica.

2.4.8.2. Variables de calidad de fruto

Longitud de fruto (cm). Cada fruto cosechado fue medido en longitud con una regla metálica graduada a 30 cm.

Diámetro de fruto (mm). Se midió el diámetro ecuatorial de cada fruto cosechado con un calibrador digital (Truper[®] 14388, CALDI-6MP).

Firmeza de fruto (N). Los frutos de la tercera cosecha fueron evaluados en firmeza en tres puntos, correspondientes al extremo hacia el pedúnculo, punto medio y en el extremo hacia la flor, para lo cual la cáscara fue removida. La medición se realizó con un texturómetro Chatillon (FDV-30 Greenwich, CT 06836, USA), con puntal cónico de 0.7 cm de base, el cuál fue introducido 1 cm en cada una de las posiciones y se registró la fuerza aplicada para tal penetración.

Sólidos solubles totales en jugo de fruto (°Brix). Se determinó al colocar una muestra del jugo de la parte ecuatorial del fruto en la celada de un refractómetro digital (Atargo N1). El refractómetro está graduado con una escala Brix, siendo un grado Brix la densidad de una disolución de sacarosa al 1% en peso, a la cual le corresponde un determinado índice de refracción, de tal manera que los grados Brix expresan la concentración de sólidos solubles totales (azúcares y ácidos orgánicos)

y es uno de los índices de calidad interna de frutos que más se utiliza (Domene y Segura, 2014).

Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) y pH en jugo de frutos. Se pesaron 10 g de pulpa de pepino sin cáscara de la parte ecuatorial, se pasó al extractor de jugos (Hamilton Beach Big Mouth®, 67606-MX) y se licuó con 50 mL de agua destilada, a la mezcla resultante se le midió directamente la CE y el pH con equipo portátil (Conductronic PC-18).

Acidez titulable en jugo de frutos. Del extracto obtenido para CE y pH se midió el volumen, se tomaron muestras filtradas de 10 mL y se tituló con NaOH 0.01 N, para lo cual se utilizó fenolftaleína como indicador, según la metodología de la AOAC (Boland, 1990). La medición de acidez titulable se realizó con base al porcentaje de ácido cítrico, tal como se muestra en la fórmula siguiente:

$$\% \text{ ácido} = \frac{(\text{mL de NaOH gastados})(N \text{ NaOH})(\text{meq del ácido})(V)(100)}{(\text{peso de la muestra})(\text{alícuota})}$$

Donde:

N = normalidad del NaOH.

meq = miliequivalentes del ácido que se encuentra en mayor proporción en el fruto (ácido cítrico = 0.064)

V = volumen total (mililitros de agua más gramos de fruto)

Coloración de fruto. Se obtuvieron los valores L, a y b con un colorímetro (Hunter Lab D25-PC2, Reston, Virginia, USA). Las mediciones se realizaron en ambos lados ecuatoriales del fruto. La luminosidad corresponde al valor L, que representa la claridad y toma valores desde 0 (negro) hasta 100 (blanco), este valor se obtuvo directamente del colorímetro. El valor “a” que representa el componente rojo-verde, donde el rojo presenta valores positivos y el verde valores negativos. El valor “b” define el componente amarillo-azul. Se estimó el valor del ángulo de tono (Hue) con la fórmula: $\text{Hue} (^{\circ}) = \arctan(b/a)$ y la pureza de color con la fórmula: $\text{croma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$ (Vázquez y Santiago, 2013; Domene y Segura, 2014).

2.4.8.3. Variables bioquímicas

Concentración de prolina. Para esta determinación se utilizaron 0.05 g de tejido seco de hojas obtenidas en la fase experimental final, siguiendo la metodología propuesta por [Bates et al. \(1973\)](#) y utilizando tolueno como blanco. Cabe señalar que la metodología propone utilizar material fresco liofilizado. La curva de calibración se presenta en la **Figura 2.1**.

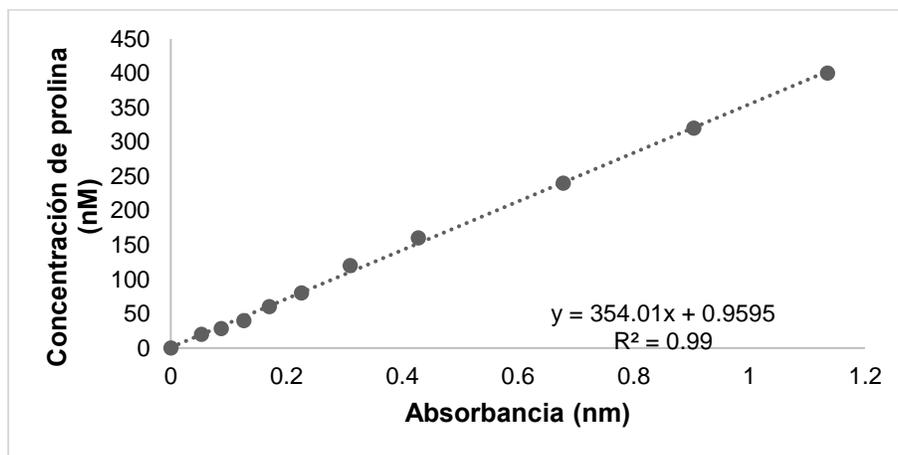


Figura 2.1. Curva de calibración empleada en la determinación de prolina en hojas secas.

Concentración de N, P, K, Ca, Mg, Na, Si, Cl y micronutrientos en tallo, hojas y frutos. En el tejido seco de cada órgano se determinó nitrógeno total mediante la metodología de Semimicro-Kjeldahl descrita por [Bremner \(1965\)](#), la cual utiliza una digestión húmeda con H_2SO_4 y $C_7H_6O_3$. Para la determinación de P, K, Ca, Mg, micronutrientos (excepto Cl), Na y Si, utilizó otra digestión húmeda con HNO_3 y $HClO_4$ ([Alcántar y Sandoval, 1999](#)), permitiendo poner en solución los elementos a determinar, los cuáles fueron cuantificados con un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES 725 Series, Agilent). Por su parte la determinación de cloruro se realizó mediante el método por turbidimetría, que consiste en tomar una muestra de 0.5 g del material seco y someterla a una digestión húmeda utilizando 4 mL de HNO_3 en un matraz Kjeldahl colocado en

plancha de calentamiento a 120 °C y utilizando H₂O₂ al 30% hasta su digestión total. Se utilizó AgNO₃ al 10% como acomplejante, para su medición un colorímetro a 400 nm de absorbancia y para su cuantificación se utilizó una curva de calibración de 0 a 10 mg L⁻¹ (**Figura 2.2**), utilizando NaCl grado reactivo.

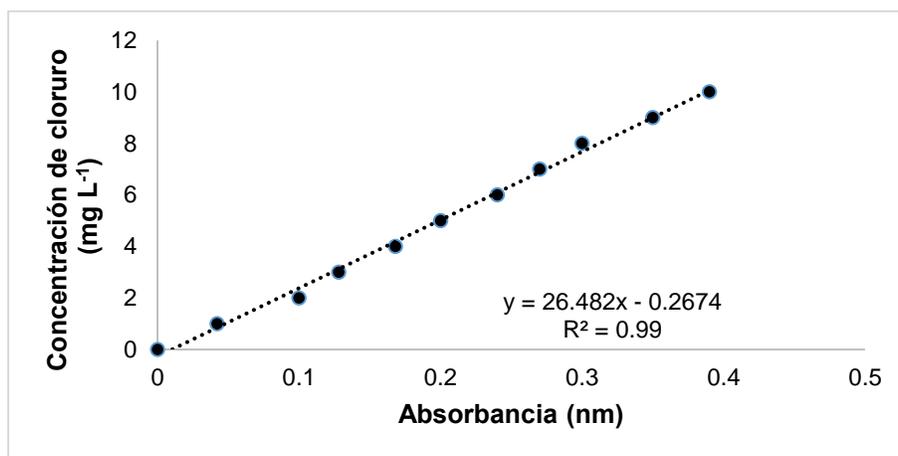


Figura 2.2. Curva de calibración para determinar la concentración de cloruro en tejido vegetal de pepino bajo condiciones de suelo sódico.

2.4.9. Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias para evaluar los efectos principales de los factores de estudio y de su interacción (tratamientos), con la prueba de LSD utilizando el procedimiento PROC ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas. En las pruebas estadísticas aplicadas se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. En estos análisis se usó el software SAS (SAS, 2011).

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Variables de crecimiento y agronómicas

2.5.1.1. Crecimiento de tallo

Diámetro y longitud de tallo. El factor aplicación foliar de Ca mostró tener efecto significativo ($P \leq 0.05$) en el diámetro basal de tallo del cultivo de pepino crecido en el suelo sódico, donde el nivel de 2 mM Ca incrementó en un 13.2% esta variable,

en comparación con el nivel de 0 mM Ca (**Cuadro 2.2**). La reducción de la tasa de crecimiento es uno de los efectos principales causados por la salinidad; una de las causas principales de la inhibición del crecimiento es la disminución de la tasa fotosintética (Munns y Tester, 2008). Bajo condiciones de altos niveles de Na⁺, la adición de Ca ha mostrado incrementar la tasa fotosintética y disminuir de esta manera el efecto negativo del Na⁺ en el detrimento del crecimiento en el cultivo de pepino (Dabuxilatu e Ikeda, 2005).

Cuadro 2.2. Efecto principal de la aplicación foliar de Ca en el diámetro basal de tallo en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles del factor aplicación foliar de Ca	Diámetro basal de tallo mm
Ca (0 mM)	6.07 ± 0.31 b ^z
Ca (2 mM)	7.00 ± 0.46 a
√DMS	0.763
Pr>F	0.019

^zValores ± DE con letras distintas dentro de la columna indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba DMS ($P \leq 0.05$); √DMS: diferencia mínima significativa.

El efecto principal de la aplicación foliar de Si en los diámetros de tallo evaluados no fue significativo ($P > 0.05$; datos no mostrados).

En la prueba de comparación de medias se observa que el efecto de los tratamientos fue significativo ($P \leq 0.05$) únicamente en el diámetro basal (**Cuadro 2.3**). El diámetro basal mostró ser incrementado significativamente (15.5%) con la aplicación foliar de 2 mM Ca en ausencia de Si (tratamiento 3), en comparación con el testigo. Además los diámetros medio y apical también fueron incrementados 4.49% y 8.19%, respetivamente, en este mismo tratamiento. Por el contrario, en este tratamiento la longitud de tallo fue menor 7.83%, en comparación con el testigo; pero esta reducción no fue significativa. Como ya se mencionó anteriormente, el efecto principal de la aplicación foliar de Si no fue significativo en las variables de crecimiento de tallo. Por otra parte, la aplicación conjunta de Si + Ca (tratamiento 4), si bien mostró incrementar de manera ligera el diámetro de tallo en los tres puntos medidos respecto al testigo, ocasionó una reducción en la longitud de tallo también respecto al testigo; en ambos casos las diferencias registradas no fueron

significativas. La inhibición del crecimiento de tallo es uno de los principales efectos de la salinidad en las plantas (Shahzad *et al.*, 2013), debido a la acumulación inicial de las sales en la parte externa de la raíz (efecto osmótico), para posteriormente acumularse en el interior de la célula vegetal (efecto tóxico) (Horie *et al.*, 2012). Aunado a lo anterior, se observa la disminución en las concentraciones de elementos esenciales (N, P, K, Ca, Mg, Cu, entre otros) en tejido vegetal, que propician también el detrimento en el crecimiento (Savvas *et al.*, 2005; Wang y Han, 2007; Tavakkoli *et al.*, 2011; Chondraki *et al.*, 2012; Shahzad *et al.*, 2013). Aunque ha sido reportado que la aplicación exógena de Ca (He *et al.*, 2015; Hojjatnooghi *et al.*, 2014; Chondraki *et al.*, 2012) y de Si (Savvas y Ntatsi, 2015; Manivannan *et al.*, 2016; Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2014) muestra ser una práctica efectiva para disminuir el efecto negativo causado por el estrés salino, en la presente investigación no se encontraron efectos positivos de estos elementos, suministrados tanto de manera individual como en forma conjunta, en la longitud de tallo y en los diámetros medio y apical de tallo. Ha sido reportado en plantas de gerbera (*Gerbera hybrida* L. 'Acapella'), que tanto la fuente de Si como la forma de aplicación (incorporada, aplicaciones a la raíz y vía foliar) y la dosis, pueden tener efectos diferenciales en el crecimiento, pudiendo una dosis de Si a partir de NaSiO_3 de 150 mg L^{-1} tener efectos negativos, al propiciar un menor crecimiento y deformación de la flor, posiblemente debido al efecto del Si como anti-transpirante (Kamenidou *et al.*, 2010).

Cuadro 2.3. Efecto de los tratamientos en las variables de crecimiento de tallo (longitud, diámetro basal, diámetro medio y diámetro apical) en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Variables de crecimiento de tallo			
	Diámetro basal (mm)	Diámetro medio (mm)	Diámetro apical (mm)	Longitud (cm)
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	6.02 ± 0.05 b ^z	7.22 ± 0.37 a	5.15 ± 0.66 a	131.4 ± 1.8 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	6.11 ± 0.47 ab	6.96 ± 0.26 a	5.38 ± 0.59 a	128.0 ± 5.4 a
Si (0 mM) + Ca (2 mM)	7.13 ± 0.51 a	7.56 ± 0.34 a	5.61 ± 0.50 a	121.1 ± 6.9 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	6.87 ± 0.44 ab	7.48 ± 0.55 a	5.66 ± 0.71 a	123.6 ± 7.5 a
^y DMS	1.079	1.037	1.705	15.3

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

2.5.1.2. Biomasa seca

Los tratamientos foliares evaluados no influyeron de manera significativa ($P \leq 0.05$) la biomasa seca de hojas, tallos y en la biomasa seca total (**Cuadro 2.4**). El tratamiento 4, suministro foliar 2 mM Si y 2 mM Ca, mostró incrementar de manera significativa ($P \leq 0.05$), los valores de biomasa seca de hojas, tallos y total en valores de 20.9, 22.8 y 21.2%, respectivamente, en comparación con el testigo. Por otra parte, en el tratamiento foliar con 2 mM Si y sin Ca, se logró un incremento del 14.95% de la biomasa total, con respecto al testigo, pero tal incremento no fue estadísticamente significativo (**Cuadro 2.4**). [Pavlovic et al. \(2016\)](#) reportaron un incremento mayor al 30% en la biomasa seca de hojas de plantas de pepino tratadas con 1.5 mM Si(OH)₄ añadido a la solución nutritiva. Resultados similares fueron reportados por [Gunes et al. \(2007\)](#) en plantas de tomate y espinaca crecidas en un suelo sódico-B (exceso de Na y B), donde al añadir 2.5 o 5 mM Si al suelo, se incrementó la biomasa seca de la parte aérea; esta respuesta puede explicarse al mecanismo de exclusión de Na, Cl y B activado por el Si. Las aplicaciones foliares de Si (silicato de sodio) en plantas de trigo, incrementan la producción de biomasa tanto en plantas sometidas a estrés por sequía, como aquellas crecidas bajo condiciones normales, esto debido al aumento en el contenido de clorofila y al decremento de la pérdida electrolítica ([Maghsoudi et al., 2016](#)). En plantas de maíz sometidas a estrés salino (60 mM NaCl), [Khan et al. \(2017\)](#) reportan un detrimento en la biomasa seca de hojas y tallos, el cual se ve reducido al añadir Si al medio de crecimiento; en esta investigación el Si mostró incrementar el contenido de clorofila, lo cual permitió una mayor eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII), permitiendo un mejor crecimiento de las plantas bajo estrés. [Xie et al. \(2015\)](#) al crecer plantas de maíz en un suelo salino-alcálico reportan que la adición edáfica de Si puede ayudar a mejorar el crecimiento y el rendimiento de las plantas, mediante mecanismos tales como el incremento de la tasa fotosintética y la conductancia estomática, así como la disminución de la transpiración, y enfatizan en que encontrar la dosis apropiada es clave para lograr obtener resultados positivos. Dentro de los mecanismos que ayudan a sobrellevar el estrés donde se involucra el Si destacan: los cambios anatómicos en las hojas principalmente causados por la deposición de este elemento, propiciando rigidez de membranas y modulando la entrada de agua y nutrimentos; la mejora del sistema antioxidante; y

la participación en procesos de señalización que desencadenan la modulación en la expresión de genes específicos (Savvas y Ntatsi, 2015). Los resultados aquí presentados muestran que la aplicación individual de Ca incrementó la biomasa total en 19.50%, con respecto al testigo, pero tal incremento al igual que el propiciado por Si, no fue estadísticamente significativo. La adición de CaSO₄ (2.5 o 5 mM) a la solución nutritiva empleada para el riego de plantas de tomate sometidas a estrés salino, incrementa el peso de la biomasa seca, mismo que es proporcional al aumento de la dosis de CaSO₄; el Ca al reducir la permeabilidad de la membrana, ayuda a mantener las concentraciones de Ca²⁺, N y K⁺ y reduce la de Na⁺ (Tuna *et al.*, 2007). He *et al.* (2015) reportan que el Ca aplicado a plantas de pepino bajo estrés, tiene como efecto mejorar el sistema antioxidante en mitocondria, disminuir los niveles de ROS, además de incrementar la acumulación de enzimas involucradas en la glicólisis y en el ciclo de los ácidos tricarbónicos. En contraste con lo encontrado en el presente trabajo, Dios-Delgado *et al.* (2006) reportan una disminución proporcional en la biomasa fresca del cultivo de lechuga al hacer aplicaciones foliares de Si en forma creciente (0, 2 y 4 mg L⁻¹), y cuando las aplicaciones de Si se combinan con aplicaciones foliares de Ca (Ca(NO₃)₂ 1%), se obtiene una reducción del peso fresco aún mayor, lo cual se observó al final como pérdida de biomasa seca. En la presente investigación se puede observar un efecto aumentado con el tratamiento 4 (2 mM Si y 2 mM Ca), en comparación con los tratamientos 2 y 3 (tratamiento solo con Si y tratamiento solo con Ca, respectivamente), pues con estos últimos se incrementa ligeramente el peso de la biomasa total, pero no es diferente estadísticamente al peso registrado en el testigo (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Efecto de los tratamientos foliares en la biomasa seca de hojas, tallo y total en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Biomasa seca		
	Hojas	Tallo	Total
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	20.643 ± 1.438 b ^z	3.977 ± 0.215 b	24.620 ± 1.653 b
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	24.256 ± 1.45 ab	4.702 ± 0.460 ab	28.958 ± 2.398 ab
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	25.619 ± 2.17 a	4.731 ± 0.650 ab	30.586 ± 2.848 ab
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	26.110 ± 1.64 a	5.152 ± 0.320 a	31.263 ± 1.941 a
^y DMS	4.896	1.163	6.025

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

2.5.1.3. Rendimiento y número de frutos

Tal como se observa en el **Cuadro 2.5**, el rendimiento y el número de frutos por planta no fueron afectados de manera significativa ($P > 0.05$) por los tratamientos con aplicaciones foliares. Si bien los efectos no son significativos, la aplicación foliar de 2 mM Si y 2 mM Ca (tratamientos 4), mostró incrementar 6.3% el rendimiento; por otra parte, la aplicación foliar de 2 mM Ca (sin Si), incrementó 11.6% el número de frutos, en ambos casos en comparación con el testigo. Por su parte, la aplicación foliar de Si en ausencia de Ca (tratamientos 2), redujo de manera ligera tanto el rendimiento como el número de frutos.

Cuadro 2.5. Efecto de los tratamientos foliares en el rendimiento y el número de frutos por planta, en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Rendimiento	Número de frutos
	g planta ⁻¹	frutos planta ⁻¹
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	995.7 ± 124.7 a ^z	2.50 ± 0.41 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	897.9 ± 42.4 a	2.16 ± 0.37 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	1060.9 ± 66.3 a	2.83 ± 0.37 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	1063.1 ± 167.0 a	2.50 ± 0.41 a
^y DMS	298.83	0.95

^zValores ± DE con las mismas letras dentro de columnas indican que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba DMS ($P > 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

Los resultados obtenidos difieren con lo reportado por [Savvas et al. \(2009\)](#), quienes indicaron que la disminución en el rendimiento de calabaza tipo Zucchini por efecto de la salinidad se debe principalmente a la disminución del número de frutos y del peso individual de frutos causado por la restricción de la fotosíntesis neta; bajo tal condición de salinidad, la adición de 1 mM Si a la solución nutritiva, tuvo como efecto el aumento en el número de frutos, lo cual se reflejó en el incremento significativo del rendimiento. De la misma manera, [Tabatabaei \(2016\)](#) reportó que el Si incrementa el rendimiento en el cultivo de fresa bajo estrés salino, mediante la reducción del área foliar con necrosis causado por las sales y el incremento en la biomasa aérea, con lo que se aumenta la tasa de transporte de fotoasimilados a los órganos de demanda, además de que el Si mostró incrementar la relación K^+/Na^+ y la tasa fotosintética. [Yaghubi et al. \(2016\)](#) al tratar a dos cultivares de fresa bajo estrés salino (0 y 50 mM NaCl) con Si (1000 o 1500 ppm K_2O_3Si) en dos estudios realizados en diferentes años (2014 y 2015), reportan que aunque entre la dosis y el año de estudio existen diferencias en la respuesta, de manera general la adición de Si al medio incrementa el rendimiento, siendo tal incremento significativo sólo para una variedad. [Kaya et al. \(2002\)](#) encontraron en cultivo de fresa sometido a estrés salino (35 mM NaCl) respuestas positivas significativas con la adición de Ca (5 mM $CaCl_2$) en la solución nutritiva, pues con tal adición se incrementó el rendimiento y el número de frutos. Por su parte [Tuna et al. \(2007\)](#), al someter a un cultivo de tomate a 75 mM NaCl y añadir 0, 2.5 o 5 mM $CaSO_4$, reportan que no hubo diferencias estadísticas significativas en el número de frutos; por otro lado con el incremento de la dosis de $CaSO_4$, encontraron que se aumenta de una forma proporcional y significativa el rendimiento, debido a que este elemento reduce la permeabilidad de la membrana plasmática a Na^+ e incrementa la absorción de K^+ , reduciendo los posibles efectos negativos del Na^+ , pues este elemento una vez en la planta puede competir con Ca^{2+} por los sitios de unión en la membrana.

2.5.2. Variables de calidad de fruto

2.5.2.1. Longitud y diámetro de fruto

La prueba de medias indicó que el efecto de los tratamientos evaluados no muestran diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en la longitud y en el diámetro de fruto, aunque ambas variables, de manera respectiva, mostraron ser incrementadas con la aplicación foliar de 2 mM Si en ausencia de Ca, 4.0% y 5.2%, en comparación con el testigo (**Cuadro 2.6**). [Samuels et al. \(1993\)](#) reportan que la longitud del fruto de pepino no se ve afectado por la adición de Si a la solución nutritiva, en comparación con el testigo. En un cultivo de chile [Jayawardana et al. \(2014\)](#) reportaron un incremento mayor en el largo y ancho de frutos con la aplicación de Si a la raíz en comparación con la aplicación de este elemento vía foliar, siendo el efecto del Si con ambos métodos de aplicación no diferente estadísticamente al testigo.

Cuadro 2.6. Efecto de aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en peso fresco, peso seco, longitud y diámetro de frutos de un cultivo pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Longitud de fruto	Diámetro de fruto
	cm	mm
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	22.15 ± 1.06 a	49.77 ± 1.56 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	23.09 ± 0.90 a	52.50 ± 1.89 a
Si (0 mM) + Ca (2 mM)	22.71 ± 1.21 a	50.78 ± 2.29 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	22.48 ± 1.38 a	52.07 ± 2.39 a
[∇] DMS	2.78	4.87

[∇]Valores ± DE con las mismas letras dentro de columnas indican que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba DMS ($P > 0.05$); [∇]DMS: diferencia mínima significativa.

2.5.2.2. Peso fresco y seco de frutos

El peso fresco de fruto no fue estadísticamente diferente entre tratamientos ($P > 0.05$). Aunque el efecto de los tratamientos no fue significativo en el peso fresco de fruto, el tratamiento 2 (2 mM Si sin Ca), incrementó 13.8% esta variable, con respecto al testigo (**Cuadro 2.7**).

Cuadro 2.7. Efecto de los tratamientos foliares en peso fresco, peso seco, longitud y diámetro de frutos de un cultivo pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Peso fresco de fruto	Peso seco de fruto
	g fruto ⁻¹	g fruto ⁻¹
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	329.26 ± 38.67 a ^z	14.03 ± 1.12 ab
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	382.41 ± 37.04 a	16.03 ± 1.53 a
Si (0 mM) + Ca (2 mM)	357.56 ± 45.12 a	15.48 ± 0.81 ab
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	373.78 ± 52.13 a	12.57 ± 1.51 b
^y DMS	105.15	3.09

^zValores ± DE con las mismas letras dentro de columnas indican que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba MS ($P > 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

Por el contrario, el peso seco de fruto fue influenciado de manera significativa por los tratamientos ($P \leq 0.05$), donde el mayor valor fue obtenido en el tratamiento 2 mM Si y 0 mM Ca, mismo que superó solo al tratamiento 2 mM Si y 2 mM Ca (**Cuadro 2.7**). El incremento en peso fresco y seco de frutos obtenido con la aplicación de Si, puede relacionarse con el incremento propiciado por este elemento en el crecimiento de frutos (longitud y diámetro, **Cuadro 2.6**). En calabaza tipo Zucchini, [Savvas et al. \(2009\)](#) reportan que la aplicación de Si (1 mM) en la solución nutritiva en dos condiciones de salinidad (0.8 y 35 mM NaCl), incrementa el peso seco de frutos. Resultados similares a los obtenidos en el peso fresco de frutos fueron reportados por [Singh et al. \(2007\)](#) quienes al hacer aplicaciones foliares de Ca no encontraron efecto en el peso fresco de fresas.

2.5.2.3. Firmeza de frutos

La aplicación foliar de 2 mM Si en ausencia de Ca (tratamiento 2), incrementó la firmeza de frutos de pepino medida en las tres posiciones con respecto al testigo. El incremento en firmeza en el extremo hacia el pedúnculo fue de 13.9%, en el punto medio de 10.2%, y en el extremo hacia la flor de 14.7%, siendo únicamente significativo ($P \leq 0.05$) el incremento en el extremo hacia el pedúnculo. El tratamiento con aplicación de 2 mM Ca (tratamiento 3) aumentó la firmeza de frutos en 6.15% y 6.55% en el extremo hacia el pedúnculo y en el punto medio

respectivamente, en comparación con el testigo, sin mostrar diferencias estadísticas significativas (**Cuadro 2.8**).

Cuadro 2.8. Efecto de las aplicaciones foliares de Si, Ca y su combinación, en la firmeza de frutos, en el cultivo pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Firmeza de fruto, Newton (N)		
	Extremo hacia el pedúnculo	Medio	Extremo hacia la flor
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	5.49 ± 0.30 b ^z	5.42 ± 0.38 a	5.09 ± 0.18 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	6.38 ± 0.34 a	6.04 ± 0.24 a	5.97 ± 0.38 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	5.85 ± 0.35 ab	5.80 ± 0.38 a	5.36 ± 0.24 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	5.63 ± 0.34 ab	5.57 ± 0.18 a	5.08 ± 0.50 a
^y DMS	0.859	0.792	0.913

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

[Singh et al. \(2007\)](#) obtuvieron un incremento en la firmeza de frutos de fresa de 28.34% con la aplicación foliar de Ca (CaCl_2), quienes le atribuyen tal efecto a la función del Ca en la lamela media como agente cementante entre paredes celulares. Por su parte, [Raese y Drake \(2000\)](#) encontraron que las aplicaciones foliares de Ca individual y acompañado de un surfactante incrementan ligeramente la firmeza de frutos de pera, no mostrando ser diferentes estadísticamente al testigo. En ciruela, [Alcaraz-Lopez et al. \(2003\)](#) reportan que las aplicaciones foliares de Ca (0.100 mM Ca soluble) no tienen efecto significativo en la firmeza de la pulpa de los frutos; al combinar la aplicación foliar de Ca con titanio (0.042 mM Ti^{4+}) se observó un incremento significativo en ésta. Este efecto positivo del Ti en la firmeza de frutos, se atribuye a que los tratamientos con este elemento incrementaron significativamente la concentración de Ca en el fruto. [Jayawardana et al. \(2014\)](#) reportaron un incremento significativo en la firmeza de frutos de chile al ser tratados vía foliar o vía raíz con Si, en comparación con el testigo, lo cual se puede relacionar con el incremento de más del 50% del grosor de la cutícula.

2.5.2.4. Coloración en frutos

La concentración de clorofila, carotenoides y antocianinas dan como resultados la presencia del color característico de los vegetales (Lancaster y Lister, 1997). El efecto principal del factor aplicación foliar de Ca fue significativo ($P \leq 0.05$) en el ángulo hue de frutos de pepino, donde el nivel de 2 mM Ca mostró incrementar esta variable, en comparación con el efecto del nivel de 0 mM Ca (**Cuadro 2.9**).

Cuadro 2.9. Efecto principal de la aplicación foliar de calcio en el ángulo hue de frutos, en el cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles del factor aplicación foliar de Ca	Ángulo hue (°)
Ca (0 mM)	118.80 ± 2.27 b ^z
Ca (2 mM)	124.24 ± 1.99 a
^y DMS	5.25
Pr>F	0.040

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

El ángulo hue hace referencia al tono de color, se representa en grados en una escala de 0 a 360 y expresa las variaciones que un solo color puede tener al combinarlo con otro (Domene y Segura, 2014). Siller-Cepeda *et al.* (2003) reportan en frutos de carambola en su estado de coloración verde valores de ángulo hue de 111.5° y conforme fue madurando (verde-amarillo) tales valores disminuyeron a 100.2°. Jasso-Chaverria *et al.* (2005) afirma lo anterior, pues reporta que entre mayor es el valor de ángulo hue, mayor verdor del fruto de pepino. Por tanto, aplicar vía foliar Ca a una concentración 2 mM, intensifica el color verde de frutos de pepino crecidos en suelo (**Cuadro 2.9**). El verdor en frutos de pepino (ángulo hue) está relacionado con la acumulación de clorofila (Hurr *et al.*, 2009), mientras que Lancaster y Lister (1997) reportan una alta correlación entre la concentración de antocianinas y el incremento del ángulo hue.

Cuadro 2.10. Efecto de los tratamientos foliares en parámetros de color (luminosidad, ángulo hue e índice de saturación) en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Color		
	Luminosidad (%)	Ángulo hue (°)	Índice de saturación (croma)
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	17.23 ± 0.27 a ^z	117.03 ± 2.78 b	75.11 ± 1.62 b
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	17.95 ± 0.75 a	120.57 ± 1.66 ab	96.79 ± 3.03 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	17.50 ± 0.63 a	125.22 ± 2.99 a	78.82 ± 3.45 ab
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	17.95 ± 0.54 a	123.65 ± 1.46 ab	88.32 ± 7.51 ab
^y DMS	1.984	7.538	21.466

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

La prueba de comparación de medias del efecto de las interacciones de los factores de estudio (tratamientos) mostró que dentro de los atributos de color medidos, únicamente el ángulo hue y el índice de saturación fueron afectados de manera significativa ($P \leq 0.05$). Mientras que, el ángulo hue fue incrementado significativamente con la aplicación de 2 mM Ca sin suministro de Si; por otra parte, el índice de saturación (croma) lo fue con la adición de 2 mM Si en ausencia de Ca, en ambos casos en comparación con el testigo. Por su parte el tratamiento 4 (2 mM Si + 2 mM Ca), incrementó ligeramente la luminosidad (4.0%), el ángulo hue (5.3%) y el índice de saturación (14.9%) respecto al testigo, sin que estos incrementos fueran significativos (**Cuadro 2.10**). El incremento en el valor de índice de saturación (croma) se traduce en coloraciones más oscuras o saturadas (coloraciones monocromáticas) (Domene y Segura, 2014), o bien que la coloración dominante es más intensa (Lancaster y Lister, 1997); por tanto, con la adición de Si vía foliar se obtienen frutos de coloración verde oscuro. Montesano *et al.* (2016) no encontraron efectos significativos al añadir Si en la solución nutritiva para un cultivo de frijol verde, donde se midió la luminosidad, ángulo hue y croma en las vainas. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Alcaraz-Lopez *et al.* (2003), quienes al hacer aplicaciones foliares con Ca, no encontraron que éste tuviera efecto significativo en la luminosidad (L) de frutos de ciruela a la cosecha, ni después de 5 días de almacenamiento. Pero discrepan con lo obtenido por Raese

y Drake (2000), quienes reportan un incremento significativo en la luminosidad (L) de frutos de pera al ser tratadas vía foliar con CaCl₂ y un surfactante.

2.5.2.5. Calidad interna de frutos

Los efectos principales de los factores de estudio afectaron de manera significativa la concentración de sólidos solubles totales en frutos de pepino ($P \leq 0.05$). La aplicación de 2 mM Si disminuyó los sólidos solubles totales; por el contrario, el suministro vía foliar de 2 mM Ca, incrementó significativamente el valor de esta variable (**Cuadro 2.11**). Kaya *et al.* (2002) reportan una disminución en los sólidos solubles de frutos al someter a plantas de fresa a estrés salino (35 mM NaCl); al tratar tales plantas con Ca (5 mM CaCl₂) en la solución nutritiva, reportan incrementos significativos de los sólidos solubles. Por su parte Jayawardana *et al.* (2014) hicieron aplicaciones de Si a la raíz y vía foliar a plantas de chile, al medir los sólidos solubles totales no encontraron diferencias estadísticas significativas entre ambas formas de aplicación y el testigo.

Cuadro 2.11. Efectos principales de los factores de estudio (aplicación foliar de Si y aplicación foliar de Ca) en la concentración sólidos solubles totales en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles de los factores de estudio	Sólidos solubles totales (°Brix)
Si (0 mM)	4.03 ± 0.33 a ^z
Si (2 mM)	3.75 ± 0.14 b
^y DMS	0.27
Pr>F	0.047
Ca (0 mM)	3.55 ± 0.16 b
Ca (2 mM)	4.23 ± 0.22 a
^y DMS	0.27
Pr>F	<0.0001

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

El factor de estudio aplicación foliar de Si tuvo efecto significativo ($P \leq 0.05$) en la conductividad eléctrica de frutos de pepino, donde en el nivel de 2 mM de éste, disminuye la CE en comparación con el nivel de 0 mM (testigo) (**Cuadro 2.12**).

Cuadro 2.12. Efecto principal del factor aplicación foliar de Si en la conductividad eléctrica en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles del factor aplicación foliar de Si	Conductividad eléctrica
	dS m ⁻¹
Si (0 mM)	1.13 ± 0.04 a ^z
Si (2 mM)	1.03 ± 0.04 b
^y DMS	0.007
Pr>F	0.017

^zValores con letras diferentes dentro de columnas indican que hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

Los tratamientos foliares (interacción de los factores de estudio), influyeron de manera significativa la calidad interna de frutos ($P \leq 0.05$); particularmente las variables de sólidos solubles totales (°Brix) y conductividad eléctrica (CE). Con la aplicación foliar de 2 mM Ca en ausencia de Si, los frutos tuvieron incrementos significativos ($P \leq 0.05$) en los valores de concentración de sólidos soluble totales en 14.47, 21.05 y 23.24%, en comparación con los tratamientos 2 mM Si + 2 mM Ca, 2 mM Si sin calcio y el testigo, respectivamente. Este mismo tratamiento aumentó también la conductividad eléctrica del jugo de fruto, sin embargo, solo superó de manera significativa al tratamiento consistente en la aplicación foliar de 2 mM Si y sin aplicación de Ca (tratamiento 2). El incremento de sólidos solubles totales, conductividad eléctrica y acidez titulable; así como la disminución en el valor del pH, son parámetros que le confieren calidad a los frutos, y los cuales se ven mejorados con la aplicación foliar de 2 mM Ca (**Cuadro 2.13**). A diferencia a lo encontrado en el presente trabajo, [Tabatabaei \(2016\)](#) reporta un incremento significativo en la acidez titulable en frutos de fresa debido al incremento de los niveles del factor salinidad (0, 20 y 40 mM NaCl) y del factor Si (0, 1 y 2 mM Si), a partir de Si(OH)₄; sin embargo, es congruente con los datos obtenidos en las variables de sólidos solubles totales y de conductividad eléctrica.

Cuadro 2.13. Efecto de los tratamientos foliares en variables de calidad interna de frutos (SST, pH, CE, AT) del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	SST (°Brix)	pH	CE (dS m ⁻¹)	AT (g 100g ⁻¹)
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	3.50 ± 0.17 c ^z	5.22 ± 0.02 a	1.08 ± 0.00 ab	0.635 ± 0.014 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	3.60 ± 0.16 bc	5.23 ± 0.09 a	1.01 ± 0.03 b	0.663 ± 0.051 a
Si (0 mM) + Ca (2 mM)	4.56 ± 0.21 a	5.21 ± 0.02 a	1.17 ± 0.06 a	0.739 ± 0.004 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	3.90 ± 0.05 b	5.23 ± 0.05 a	1.05 ± 0.05 ab	0.714 ± 0.051 a
∧DMS	0.39	0.13	0.10	0.126

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∧DMS: diferencia mínima significativa; SST: sólidos solubles totales; CE: conductividad eléctrica; AT: acidez titulable.

2.5.3. Variables bioquímicas

2.5.3.1. Concentración de prolina

El factor de estudio aplicación foliar de Si (0 y 2 mM) tuvo efecto significativo en la concentración de prolina; la concentración 2 mM Si incrementó significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de prolina en hojas de pepino crecido en suelo sódico (**Cuadro 2.14**). La acumulación de prolina en plantas bajo condiciones de estrés cumple funciones como osmolito, fuente de energía, como removedor de ROS ([Dar et al., 2016](#)), y juega un papel importante mediando el ajuste osmótico y protegiendo las estructuras subcelulares ([Ashraf y Foolad, 2007](#)). Ha sido reportado en trigo sometido a estrés hídrico, que el incremento en el contenido de prolina tiene una correlación negativa con el peso seco de la parte aérea y con la concentración de clorofila; por el contrario, tiene una correlación positiva en el contenido de H₂O₂ y la pérdida electrolítica, siendo entonces tal acumulación un síntoma de daño, el cual muestra ser aminorado con la adición de Si, pues este elemento disminuyó la acumulación de prolina ([Pei et al., 2010](#)). Con respecto a lo anterior [Yin et al. \(2013\)](#) y [Gunes et al. \(2007\)](#) también reportan una disminución en el contenido de prolina de plantas sometidas a estrés salino con la adición de Si, a lo cual [Yin et al. \(2013\)](#) atribuyen que el efecto positivo del Si al disminuir el contenido de prolina se debe a que la biosíntesis de este osmolito requiere de energía que puede ser utilizada en otros procesos de tolerancia al estrés. Por su parte [Pilon et al. \(2014\)](#) y [Abdel-Halim](#)

et al. (2017) reportan incrementos en la concentración de prolina tanto por condiciones de estrés, como por adición de Si, independientemente si tal adición es vía foliar o a la raíz; resultados concordantes con los aquí obtenidos.

Cuadro 2.14. Efecto principal del factor aplicación foliar Si en la concentración de prolina en hojas del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles del factor aplicación foliar de Si	Concentración de prolina $\mu\text{M g}^{-1}$
Si (0 mM)	1.34 \pm 0.07 b ^z
Si (2 mM)	1.66 \pm 0.11 a
^y DMS	0.169
Pr>F	0.0009

^zValores \pm DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

La prueba de comparación de medias del efecto de los tratamientos mostró que la aplicación de 2 mM Si sin Ca, incrementa significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de prolina en hojas, en comparación con el efecto de la aplicación foliar de 2 mM Ca sin Si (24.85%) y del testigo (23.72%) (**Cuadro 2.15**).

Cuadro 2.15. Efecto de los tratamientos en la concentración de prolina de hojas del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de prolina $\mu\text{M g}^{-1}$
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	1.35 \pm 0.05 b ^z
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	1.77 \pm 0.12 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	1.33 \pm 0.08 b
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	1.56 \pm 0.08 ab
^y DMS	0.24

^zValores \pm DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa.

En trigo, la concentración de prolina muestra ser incrementada de forma proporcional con la condición de salinidad (20, 60 y 100 mM NaCl) y con la adición de Si (0, 2 y 4 mM) (Bybordi, 2014). El incremento en la concentración de prolina por efecto del Si, puede estar involucrado en el ajuste osmótico, pues ayuda a mantener la presión osmótica de la célula más alta que la del medio exterior,

permitiendo la absorción de agua bajo condiciones de estrés salino ([Abdel-Halim et al., 2017](#)).

2.5.3.2. Concentración de macronutrientos

Concentración de nitrógeno. Los tratamientos foliares no tuvieron efectos significativos ($P > 0.05$) en la concentración de nitrógeno en tallo, hojas y frutos (**Cuadro 2.16**).

Cuadro 2.16. Efecto de la aplicación foliar de Si, Ca y su combinación en la concentración de nitrógeno (N) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido en un suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de N (% de ^x BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	1.17 ± 0.09 a ^z	2.53 ± 0.30 a	1.85 ± 0.05 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	1.13 ± 0.04 a	2.10 ± 0.20 a	1.89 ± 0.14 a
Si (0 mM) + Ca (2 mM)	1.11 ± 0.10 a	2.22 ± 0.16 a	1.87 ± 0.09 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	1.18 ± 0.07 a	2.71 ± 0.44 a	1.86 ± 0.21 a
^y DMS	0.21	0.77	0.35

^zValores ± DE con misma letra dentro de columnas indica que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P > 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

Efectos similares a los aquí registrados fueron reportados por [Shahzad et al. \(2013\)](#) al someter a plantas de haba a dosis crecientes de salinidad por NaCl y aplicar tratamientos con Si (0 o 1 mM Na₂SiO₃), pues no encontraron efectos significativos con la adición de Si en la concentración de NO₃⁻ en la parte aérea de las plantas. Por el contrario, [Tuna et al. \(2007\)](#) al someter a un cultivo de tomate a estrés salino (75 mM NaCl), encontraron que tiene como efecto la disminución de la concentración de N en hojas y al ser suministrado Ca a partir de CaSO₄, en la solución nutritiva, la concentración de N se ve incrementada de forma significativa.

Concentración de fósforo. El efecto de los tratamientos no fue estadísticamente significativo ($P > 0.05$) en la concentración de fósforo en tallos, hojas y frutos. La mayor concentración de P en tallo se obtuvo con la aplicación foliar de 2 mM Si sin suministro de Ca; mientras que en hojas, se obtuvo en el testigo. Destaca que el P

se acumuló en mayor proporción en frutos (**Cuadro 2.17**). El efecto del Si no es claro en la concentración de P, [Agostinho \(2016\)](#) en plantas de arroz no encontró efectos significativos al aplicar diferentes dosis, fuentes distintas y dos formas de aplicación de Si (foliar y al suelo) en la concentración de P en la paja y grano, esto coincide con lo encontrado por [Kamenidou *et al.* \(2010\)](#), quienes al tratar plantas de gerbera con diferentes fuentes y dosis de Si, no encontraron efectos en la concentración de P en hojas. Por su parte [Sahebi *et al.* \(2015\)](#), reportan que el Si ayuda a sobrellevar el estrés provocado tanto por la deficiencia como por el exceso de P.

Cuadro 2.17. Efecto de la aplicación foliar de Si, Ca y su combinación en la concentración de fósforo (P) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de P (g kg ⁻¹ ×BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	4.99 ± 0.58 a ^z	3.14 ± 0.63 a	6.12 ± 0.39 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	5.53 ± 0.30 a	2.22 ± 0.68 a	5.98 ± 0.52 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	4.68 ± 0.72 a	2.79 ± 0.34 a	5.36 ± 0.26 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	5.00 ± 0.46 a	3.11 ± 0.62 a	6.18 ± 0.25 a
^y DMS	1.39	1.5	0.93

^zValores ± DE con misma letra dentro de columnas indica que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P > 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

Concentración de potasio. La concentración de K en tallos incrementó de manera significativa ($P \leq 0.05$) con la adición de Si (2 mM) al follaje, en comparación con el efecto de las plantas no tratadas con Si (0 mM) (**Cuadro 2.18**). Debido a la alta acumulación de sales en la zona radicular, principalmente cationes, tiende a ser disminuida la absorción de K⁺, reduciendo su concentración en tallos hasta 49% ([Kchaou *et al.*, 2010](#)). [Wang *et al.* \(2015\)](#) y [Xu *et al.* \(2015\)](#) reportan que el Si incrementa significativamente la absorción y por ende la concentración de K⁺ en tejido de plantas sometidas a estrés salino.

Cuadro 2.18. Efecto principal del factor aplicación foliar de Si en la concentración de potasio (K) en tallos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles del factor aplicación foliar de Si	Concentración de K (g kg ⁻¹ ^x BS)	
	Tallo	
Si (0 mM)	13.20 ± 1.18 b ^z	
Si (2 mM)	15.45 ± 1.28 a	
^y DMS	2.22	
Pr>F	0.041	

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

El efecto de los tratamientos fue significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de K en tallos, pero no lo fue en la concentración de K en hojas y frutos. La mayor concentración de K en tallos se obtuvo con la aplicación foliar de Si sin calcio (tratamiento 2), efecto que fue diferente estadísticamente al propiciado por la tratamiento testigo y el tratamiento 2 mM Ca sin Si, pues con estos tratamientos se redujo tal concentración 20.21% y 20.45%, respectivamente (**Cuadro 2.19**).

Cuadro 2.19. Efecto de los tratamientos en la concentración de potasio (K) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de K (g kg ⁻¹ ^x BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	13.22 ± 1.01 b ^z	9.09 ± 0.40 a	15.86 ± 2.10 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	16.57 ± 1.55 a	9.17 ± 0.76 a	15.45 ± 1.96 a
Si (0 mM) + Ca (2 mM)	13.18 ± 1.41 b	9.42 ± 0.69 a	13.22 ± 1.58 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	14.52 ± 0.89 ab	9.72 ± 0.39 a	13.71 ± 2.05 a
DMS	3.15	1.82	4.77

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

Ha sido ampliamente puntualizado que uno de los efectos negativos principales de altos niveles de Na⁺, es el desbalance iónico, que propicia la acumulación de altos niveles de este catión en el tejido y disminuye drásticamente los de K⁺ (Kchaou *et al.*, 2010; Savvas *et al.*, 2005). La aplicación foliar de Ca (tratamiento 3), no mostró tener efecto significativo en la concentración de K, lo que coincide con Murillo-Amador *et al.* (2006), quienes reportaron que aplicaciones foliares de nitrato de

calcio a plantas bajo estrés salino por NaCl, no tienen efecto significativo en la concentración de K en tejido vegetal aéreo. Por el contrario, la aplicación foliar de 2 mM Si (tratamiento 2), incrementa 20.2% la concentración de K en tallo; por otra parte, al combinar Si con Ca (tratamiento 4), la concentración foliar de K aumenta 6.4%. Ha si reportado, en sorgo, que el Si puede actuar en células de las raíces activando la expresión de genes de acuaporinas (PIPs), permitiendo una mayor absorción de agua (Chen *et al.*, 2016); de igual manera, en pepino la adición de Si permite activar la expresión de genes que codifican para acuaporinas que incrementan la absorción de agua en plantas sometidas a estrés salino (Zhu *et al.*, 2015). Además en estos mecanismos, el Si actúa en la activación del gen *SKOR* (que media la secreción de K⁺ de las células del córtex de la raíz al xilema); el Si también puede estar involucrado en la desactivación del gen *HAK5*, inhibiendo la translocación de K⁺ fuera del xilema, con estas estrategias se incrementa la conductancia hidráulica contribuyendo a un incremento en la absorción y transporte de agua (Chen *et al.*, 2016), así como una mejora del estatus de K⁺ en la parte aérea.

Concentración de calcio. En la concentración de Ca, el efecto de los tratamientos únicamente fueron significativos ($P \leq 0.05$) en frutos, observándose tendencias negativas de las aplicaciones foliares de Si y Ca. La mayor concentración de Ca en tallos se obtuvo en el tratamiento 2 (2 mM Si sin suministro de Ca), mientras que en hojas se obtuvo con la aplicación foliar de Ca sin silicio, en ambos casos el incremento no fue significativo (**Cuadro 2.20**). Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) reportan que aplicaciones foliares de 5 g L⁻¹ de nitrato de calcio disminuyen, aunque no de manera significativa, la concentración de Ca en frutos de mango, dosis mayores a ésta incrementan tal concentración, pero sin ser estadísticamente significativo este efecto. Por su parte Alcaraz-Lopez *et al.* (2003) no encontraron efecto significativo de la aplicación foliar de Ca (0.100 mM Ca soluble) en la concentración de Ca en cáscara y pulpa de frutos de ciruela. Los resultados obtenidos concuerdan con los de Pilon *et al.* (2013), quienes al comparar el efecto

del Si vía foliar o al suelo con el control, no encontraron diferencias estadísticas en la concentración de Ca en hojas de plantas de papa.

Cuadro 2.20. Efecto de los tratamientos en la concentración de calcio (Ca) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de Ca (g kg ⁻¹ *BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	6.80 ± 0.58 a	29.19 ± 2.15 a	3.20 ± 0.19 a ^z
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	7.26 ± 0.55 a	28.63 ± 2.23 a	2.97 ± 0.14 ab
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	6.53 ± 0.45 a	30.61 ± 1.89 a	2.77 ± 0.16 b
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	5.95 ± 0.38 a	29.55 ± 1.34 a	2.99 ± 0.09 ab
^y DMS	0.28	5.93	0.38

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Concentración de magnesio. La prueba de medias mostró que no hubo diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en la concentración de Mg en tallos, hojas y frutos, entre tratamientos. A pesar de ello, se puede observar en el **Cuadro 2.21** que el suministro foliar de 2 mM Ca sin silicio, incrementa en 15.8% la concentración de Mg en tallo; mientras que con la aplicación foliar conjunta de Si + Ca (tratamiento 4), se incrementa 5.0% la concentración de Mg en hojas.

Cuadro 2.21. Efecto de los tratamientos en la concentración de calcio (Mg) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de Mg (g kg ⁻¹ *BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	5.47 ± 0.37 a ^z	18.62 ± 1.01 a	4.02 ± 0.25 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	6.03 ± 0.44 a	18.33 ± 1.46 a	3.97 ± 0.27 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	6.50 ± 0.74 a	18.93 ± 1.12 a	3.56 ± 0.14 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	6.19 ± 0.42 a	19.61 ± 1.28 a	3.93 ± 0.12 a
^y DMS	1.34	3.76	0.51

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

Romero-Gomezcaña *et al.* (2006) al aplicar dosis crecientes de Ca vía foliar (0, 5, 10, 15 y 20 g L⁻¹) a plantas de mango encontraron el Ca reduce la concentración de

Mg en frutos, aunque no de manera significativa. Mehrabanjoubani *et al.* (2015) al estudiar el efecto del Si en la concentración de Mg en la parte aérea de algodón, canola y trigo, reportaron que en algodón no hay cambios en la concentración de Mg con o sin la aplicación de Si. En canola, el Mg incrementó con la adición de Si, y en trigo la concentración de Mg tiende a disminuir con la aplicación de Si.

2.5.3.3. Concentración de micronutrientos, Na, Cl y Si

Concentración de micronutrientos. La concentración de Cu en frutos fue afectada de forma significativa ($P \leq 0.05$) por el factor aplicación foliar de Si (0 y 2 mM), donde la concentración 2 mM este elemento propició el detrimento de la concentración de este micronutriente 19.8% (**Cuadro 2.22**). Pilon *et al.* (2013) encontraron resultados similares, pues al estudiar el efecto de aplicar Si vía foliar o al suelo, reportan que la concentración de Cu en hojas de papa tiende a ser disminuida con la aplicación foliar de Si, aunque tal detrimento no fue estadísticamente significativo.

Cuadro 2.22. Efecto principal del factor aplicación foliar de Si en la concentración de cobre (Cu) en frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Niveles del factor aplicación foliar de Si	Concentración de Cu (mg kg ⁻¹ ×BS)
	Frutos
Si (0 mM)	7.95 ± a ^z
Si (2 mM)	6.37 ± b
√DMS	0.87
Pr>F	0.031

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); √DMS: diferencia mínima significativa; ×BS: biomasa seca.

La concentración de Fe fue afectada significativamente ($P \leq 0.05$) por los tratamientos únicamente en tallos. La mayor concentración de Fe en tallo se obtuvo en el tratamiento 3 (0 mM Si y 2 mM Ca), siendo ésta solo estadísticamente diferente a la concentración de Fe en tallos registrada en el tratamiento 4 (2 mM Si + 2 mM Ca) (**Cuadro 2.23**).

Cuadro 2.23. Efecto de los tratamientos foliares en la concentración de micronutrientos en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tejido	Tratamientos foliares	Concentración (mg kg ⁻¹ *BS)				
		Fe	Cu	Zn	Mn	B
Tallos	Si (0 mM) + Ca (0 mM)	77.86 ± 5.90 ab ^z	56.02 ± 7.81 a	17.18 ± 1.37 a	11.27 ± 0.55 a	50.85 ± 2.28 b
	Si (2 mM) + Ca (0 mM)	95.39 ± 9.25 ab	63.67 ± 8.29 a	14.60 ± 1.01 ab	15.13 ± 4.05 a	59.43 ± 4.76 a
	Si (0 mM) +Ca (2 mM)	105.30 ± 16.20 a	57.20 ± 5.96 a	14.08 ± 1.17 b	12.44 ± 1.88 a	56.49 ± 2.79 ab
	Si (2 mM) + Ca (2 mM)	69.69 ± 8.64 b	50.44 ± 5.62 a	17.02 ± 0.45 a	12.10 ± 1.24 a	52.41 ± 2.41 ab
	∇DMS	27.92	17.53	2.66	5.80	8.36
Hojas	Si (0 mM) + Ca (0 mM)	105.75 ± 21.45 a	43.92 ± 9.78 b	24.67 ± 1.17 a	24.33 ± 1.50 ab	286.39 ± 17.49 a
	Si (2 mM) + Ca (0 mM)	113.39 ± 8.32 a	80.47 ± 26.41 ab	22.38 ± 0.46 a	19.82 ± 1.37 c	247.34 ± 27.14 a
	Si (0 mM) +Ca (2 mM)	103.71 ± 16.63 a	115.58. ± 27.68 a	22.38 ± 2.31 a	22.04 ± 0.53 bc	254.68 ± 25.81 a
	Si (2 mM) + Ca (2 mM)	99.86 ± 8.61 a	52.62 ± 7.17 b	23.11 ± 1.49 a	26.44 ± 1.94 a	312.79 ± 24.48 a
	∇DMS	33.85	61.93	5.23	4.33	73.49
Frutos	Si (0 mM) + Ca (0 mM)	49.21 ± 4.85 a	10.55 ± 1.85 a	21.64 ± 0.78 a	8.16 ± 0.33 a	59.63 ± 3.04 a
	Si (2 mM) + Ca (0 mM)	54.35 ± 7.04 a	6.04 ± 0.43 b	22.74 ± 0.32 a	9.18 ± 1.72 a	54.90 ± 2.63 a
	Si (0 mM) +Ca (2 mM)	57.85 ± 4.54 a	6.31 ± 0.88 b	23.59 ± 1.23 a	7.52 ± 0.29 a	52.90 ± 3.32 a
	Si (2 mM) + Ca (2 mM)	56.73 ± 7.28 a	6.77 ± 0.61 b	20.98 ± 1.46 a	9.04 ± 0.57 a	59.35 ± 2.00 a
	∇DMS	16.77	2.57	2.76	2.37	6.89

^zValores ± DE con letras distintas dentro de columnas, separadas por órgano, indican diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P \leq 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; *BS: biomasa seca.

La concentración de Cu fue afectada significativamente por efecto de los tratamientos en hojas y frutos, mostrando en hojas la mayor concentración con la aplicación foliar de Ca sin Si (tratamiento 3), la cual fue disminuida significativamente ($P \leq 0.05$) con la aplicación conjunta de Ca + Si y con el testigo. En frutos las aplicaciones foliares de Si, Ca y Si + Ca tuvieron como efecto la disminución de la concentración de Cu en comparación con el testigo. Las aplicaciones foliares también tuvieron efecto significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de Zn en tallos, siendo el tratamiento 3 (2 mM Ca en ausencia de Si) con el que se disminuyó significativamente tal concentración, en comparación con el testigo y la aplicación foliar conjunta de Si y Ca (tratamiento 4). Las aplicaciones foliares afectaron significativamente ($P \leq 0.05$) la concentración de Mn en hojas, obteniéndose un detrimento significativo en ésta con la aplicación foliar de Si sin Ca (25.03%) y de Ca sin Si (16.64%), en comparación con la aplicación conjunta de Si + Ca. La concentración de B fue afectada significativamente ($P \leq 0.05$) por las aplicaciones foliares únicamente en tallo, donde la aplicación foliar solo de Si incrementó significativamente la concentración de este metaloide esencial, en comparación con el testigo (**Cuadro 2.23**).

Cuando los niveles de Fe en tejido vegetal se encuentran deficientes, éste puede ser removilizado desde hojas viejas a las hojas jóvenes, mediante la adición de Si, lo que disminuye en consecuencia la clorosis férrica ([Pavlovic et al., 2016](#)), este efecto del Si no fue apreciable en esta investigación. [Mali y Aery \(2009\)](#) al experimentar con dosis creciente de Si aplicadas al suelo (0, 50, 100, 200, 400 y 800 mg kg⁻¹) encontraron que las dosis entre 400 y 800 mg kg⁻¹, disminuyen las concentraciones de Fe en hojas y raíces de frijol caupí (*Vigna unguiculata*), teniendo síntomas de clorosis y disminución significativa de la biomasa seca. En la presente investigación se obtuvo que al hacer aplicaciones de 2 mM Ca sin Si al follaje de plantas de pepino creciendo en un suelo sódico, se incrementa la concentración de Cu 62% y al hacer aplicaciones foliares de 2 mM Si en ausencia de Ca, se incrementa 45.4%, ambos en comparación con el testigo (**Cuadro 2.23**). Resultados contrarios fueron reportados por [Wang y Hang \(2007\)](#), quienes al aplicar Si a plantas de alfalfa bajo estrés salino, encontraron que la concentración de Cu en tallo y hojas

se ve disminuida significativamente. [Pilon *et al.* \(2013\)](#) estudiaron el efecto de aplicar Si vía foliar a plantas de papa, y reportan que no hubo efecto significativo en la concentración de Fe, Cu, B y Zn en hojas, coincidiendo con lo encontrado en el presente trabajo, excepto en los efectos registrados en la concentración de B. [Kamenidou *et al.* \(2010\)](#) al evaluar en gerbera los efectos de diferentes fuentes y dosis de Si, así como de formas de aplicación, reportan incrementos en la concentración foliar de B; siendo la concentración de Mn incrementada con una fuente (KSiO₃ hidratado e incorporado al sustrato) y disminuida con otra (KSiO₃ aplicado a la raíz). La concentración de micronutrientos en la parte aérea puede incrementarse, disminuir, o no tener efecto, dependiendo del cultivar, el tejido, nivel de salinidad, el contenido de micronutrientos y las condiciones medioambientales; es decir, la concentración de Zn, Fe, Cu y Mn es afectada de forma muy variable bajo condiciones de salinidad ([Grattan y Grieve, 1992](#)).

Concentración de sodio y cloruro. La concentración de Na y Cl en tallos, hojas y frutos no fue afectada significativamente ($P > 0.05$) por los tratamientos evaluados. A pesar de que no hubo significancia, la aplicación conjunta de Si y Ca (tratamiento 4), disminuye la concentración de Cl 18.04% hojas, en comparación con el testigo (**Cuadro 2.24**). No ha sido reportado el efecto de la aplicación conjunta de Si y Ca en la tolerancia a la salinidad, pero sí se ha encontrado que de manera individual el Si disminuye la absorción de Cl⁻ ([Shi *et al.*, 2013](#)). Por lo general, el aumento en la concentración de sales en la zona radical resulta en un incremento en concentración de Na⁺ y Cl⁻ en el tejido, que son los iones más perjudiciales, y decrece la concentración de ciertos nutrientes como N, P, K, Ca y Cu ([Wang y Han, 2007](#); [Tavakkoli *et al.*, 2011](#); [Chondraki *et al.*, 2012](#)). [Savvas *et al.* \(2009\)](#) encontraron que el suministro de Si en la solución nutritiva a plantas de calabaza bajo dos condiciones de salinidad (0.8 y 35 mM NaCl), disminuye de manera significativa ($P \leq 0.05$) la concentración de Cl y Na en tallos, hojas jóvenes, hojas viejas y frutos, mismos resultados han sido encontrados en aloe (*Aloe vera* L.) ([Xu *et al.*, 2015](#)). Por otro lado, [Wang y Hang \(2007\)](#) al realizar aplicaciones de Si en la solución nutritiva en dos cultivares de alfalfa (uno tolerante y otro sensible) sometidos a salinidad (NaCl), encontraron que tales adiciones de Si no tuvieron efecto

significativo en la concentración de Na en tallos y hojas. [Murillo-Amador et al. \(2006\)](#) al hacer aplicaciones foliares de Ca a partir de nitrato de calcio, a plantas sometidas a estrés por NaCl, reportaron que tales aplicaciones foliares no tuvieron efecto significativo en la concentración de Na⁺ y Cl⁻ en raíz ni en parte aérea. En frutos, la concentración de Na es disminuida ligeramente con la aplicación individual de Si y Ca, y la de Cl⁻ se redujo con la aplicación foliar de Si y Si + Ca; [Zhang y Blumwald \(2001\)](#) afirman que la exclusión de Na⁺ de frutos de plantas de crecidas bajo niveles altos de salinidad es un parámetro importante a considerar en la calidad y producción de frutos que puedan ser comestibles. [Murillo-Amador et al. \(2006\)](#) reportaron que las aplicaciones de Ca suplementario vía foliar no ayuda a sobrellevar los efectos adversos provocados por el NaCl, dado que no incrementó la absorción de nutrimentos (Ca, Mg, K) y tampoco ayuda a disminuir la concentración en tejido de Na y Cl, proponiendo que los efectos positivos del Ca se limitan a ciertos cultivares.

Cuadro 2.24. Efecto de los tratamientos en la concentración de sodio (Na) y cloro (Cl) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tejido	Tratamientos foliares	Concentración (mg kg ⁻¹ ^x BS)	
		Na	Cl
Tallos	Si (0 mM) + Ca (0 mM)	12875 ± 988 a ^z	443.22 ± 46.88 a
	Si (2 mM) + Ca (0 mM)	14098 ± 1986 a	494.37 ± 47.08 a
	Si (0 mM) +Ca (2 mM)	14673 ± 1595 a	458.65 ± 54.00 a
	Si (2 mM) + Ca (2 mM)	14427 ± 1151 a	436.33 ± 33.65 a
	∇DMS	3747.7	116.76
Hojas	Si (0 mM) + Ca (0 mM)	2924.5 ± 322.5 a	440.79 ± 25.97 a
	Si (2 mM) Ca (0 mM)	2891.9 ± 491.5 a	418.87 ± 15.87 a
	Si (0 mM) +Ca (2 mM)	3233.4 ± 482.8 a	434.30 ± 35.63 a
	Si (2 mM) + Ca (2 mM)	3237.85 ± 287.2 a	361.24 ± 39.76 a
	∇DMS	1270.8	80.38
Frutos	Si (0 mM) + Ca (0 mM)	3896.5 ± 354.9 a	377.47 ± 20.19 a
	Si (2 mM) Ca (0 mM)	3371.3 ± 270.1 a	340.94 ± 39.26 a
	Si (0 mM) +Ca (2 mM)	3370.1 ± 293.1 a	377.47 ± 34.86 a
	Si (2 mM) + Ca (2 mM)	3892.1 ± 141.1 a	318.62 ± 30.42 a
	∇DMS	671.81	80.44

^zValores ± DE con la misma letra dentro de columnas, separadas por orégano, indica que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P > 0.05$); ∇DMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

Concentración de silicio. El efecto de los tratamientos foliares no fue significativo ($P > 0.05$) en la concentración de Si en tallos y frutos, pero si lo fue en hojas ($P > 0.05$), donde tal concentración disminuyó de manera significativa con respecto al testigo, en los tres tratamiento conteniendo Si, Ca y ambos elementos. En tallos, aunque no en forma significativa, la concentración de Si incrementó con la aplicación foliar de Si sin Ca (63.32%) y con el tratamiento 4 consistente en la aplicación conjunta de Si + Ca (40.15%), ambos en comparación con el testigo. En frutos la concentración de Si no fue afectada de forma significativa por los tratamientos foliares, y las tendencias no fueron claras (**Cuadro 2.25**). Resultados similares fueron reportados por [Pilon *et al.* \(2013\)](#) en un cultivo de papa, pues no encontraron diferencias estadísticas significativas en la concentración de Si en los tubérculos al probar dos formas de aplicación de Si (vía suelo y vía foliar) y comparar su efecto con un control; por su parte, la concentración de Si en tallos aunque fue incrementada con las aplicaciones foliares de Si, fue únicamente incrementada significativamente ($P \leq 0.05$) con la aplicación de Si al suelo. Al probar los mismo tratamientos y someter al cultivo de papa a estrés hídrico, [Pilon *et al.* \(2014\)](#) encontraron la misma tendencia en tallos, pues solo fue incrementada significativamente la concentración de Si con la aplicación de Si al suelo. [Dallagnol *et al.* \(2012\)](#) y [Dallagnol *et al.* \(2015\)](#) al hacer aplicaciones de Si (silicato de potasio) a la raíz o vía foliar a un cultivo de melón encontraron que únicamente con la aplicación de Si a la raíz se incrementa de forma significativa la concentración de Si en hojas, posiblemente porque el Si únicamente se deposita en la superficie externa de la hoja. Con respecto a lo anterior, [Kamenidou *et al.* \(2010\)](#) mencionan que la aplicación foliar de Si propicia su deposición en la superficie y al hacer el análisis elemental se obtiene una sobrestimación de la concentración de Si. [Tabatabaei \(2016\)](#) reporta que aplicar 0, 1 o 2 mM Si en la solución nutritiva no tuvo diferencias significativas en la concentración de Si en frutos de fresa.

Cuadro 2.25. Efecto de los tratamientos en la concentración de silicio (Si) en tallo, hojas y frutos del cultivo de pepino establecido bajo condiciones de suelo sódico.

Tratamientos foliares	Concentración de Si (mg kg ⁻¹ BS)		
	Tallo	Hojas	Frutos
Si (0 mM) + Ca (0 mM)	12.28 ± 1.70 a	24.74 ± 2.98 a ^z	12.53 ± 0.73 a
Si (2 mM) + Ca (0 mM)	33.48 ± 22.38 a	15.89 ± 2.10 b	11.95 ± 1.25 a
Si (0 mM) +Ca (2 mM)	18.33 ± 6.31 a	19.10 ± 1.27 b	11.98 ± 1.69 a
Si (2 mM) + Ca (2 mM)	20.52 ± 3.85 a	18.93 ± 1.36 b	12.12 ± 1.81 a
DMS	28.69	5.53	3.63

^zValores ± DE con la misma letra dentro de columnas, separadas por orégano, indica que no hubo diferencias estadísticas significativas con base en la prueba de DMS ($P > 0.05$); ^yDMS: diferencia mínima significativa; ^xBS: biomasa seca.

2.6. CONCLUSIONES

La aplicación foliar de Ca a plantas de pepino crecidas en un suelo sódico incrementa el diámetro basal de tallo (15.5%), el diámetro medio (4.49%) y el diámetro apical (8.19%).

La biomasa seca de hojas, tallo y total muestra ser incrementada con la aplicación foliar de Si + Ca en valores de 20.9, 22.8 y 21.2% respectivamente. Mientras que la biomasa total se ve incrementada con la aplicación foliar individual de Si y Ca en 14.95% y 19.50% respectivamente.

El rendimiento por planta muestra ser incrementado 6.3% con la aplicación foliar de Si + Ca, mientras que el número de frutos fue incrementado 11.6% con la aplicación foliar individual de Ca.

La longitud y diámetro de frutos se incrementaron 4.0% y 5.2% con la aplicación foliar individual de Si. Lo cual se reflejó en el incremento en el peso fresco (13.8%) y pesos seco de fruto (12.47%).

La aplicación foliar de Si confiere una mayor firmeza a los frutos de pepino, incrementándola en el extremo hacia el pedúnculo (13.9%), en el punto medio (10.2%) y en el extremo hacia la flor (14.7%) del fruto.

La aplicación foliar de Ca confiere un mayor ángulo hue de la cáscara de frutos de pepino y la aplicación foliar de Si incrementa el índice de saturación y la luminosidad.

La aplicación foliar de Ca muestra incrementar los sólidos solubles totales (°Brix), la conductividad eléctrica y la acidez titulable del jugo de frutos de pepino. La aplicación foliar de Si disminuye la conductividad eléctrica del fruto.

La concentración de prolina de hojas de las plantas de pepino crecidas en un suelo sódico fue incrementada con la aplicación foliar de Si.

La aplicación conjunta de Si y Ca incrementó la concentración de N en tallos y hojas; la de P en frutos; la de K, Mg, Mn y B en hojas. También muestra disminuir la de Cl⁻ en hojas y frutos.

La aplicación foliar de Si incrementó la concentración nutrimental de P, K, Ca, Mn, B y Si en tallos; y la de Fe en hojas.

La aplicación foliar de Ca incrementa la concentración nutrimental de Ca y Cu en hojas, la de Mg y Fe en tallos; también disminuye la concentración de Zn en tallos.

La aplicación individual de Si y Ca disminuye la concentración de Na en frutos.

2.7. LITERATURA CITADA

Abdel-Haliem MEF, Hegazy HS, Hassan NS, Naguib DM. 2017. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. *Ecological Engineering* 99: 282-289. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.060

Agostinho FB. 2016. Evaluation of absorption and uptake of soil- and foliar-applied silicon in rice and its accumulation under different phosphorus rates. LSU Master's Theses. 3519.

Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial No. 10. Chapingo, México.

Alcaraz-Lopez C, Botia M, Alcaraz CF, Riquelme F. 2003. Effects of foliar sprays containing calcium, magnesium and titanium on plum (*Prunus domestica* L.) fruit quality. *Journal of Plant Physiology* 160(2): 1441-1446. Doi: 10.1078/0176-1617-00999

Ashraf M, Foolad MR. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany* 59: 206-216. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.006

Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39(1): 205-207. Doi: 10.1007/BF00018060

- Bauer P, Elbaum R, Weiss IM. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: Transport, structure and function. *Plant Science* 180: 746-756. Doi: /10.1016/j.plantsci.2011.01.019
- Boland FE. 1990. Fruits and fruit products. *In: Official methods of analysis of the association of analytical methods (AOAC)*. Helrich, K (ed.). Virginia, USA. pp. 910-911.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9*. American Society of agronomy. Madison, Wisconsin.
- Bybordi A. 2014. Interactive effects of silicon and potassium nitrate in improving salt tolerance of wheat. *Journal of Integrative Agriculture* 13(9): 1889-1899. Doi: 10.1016/S2095-3119(13)60639-5
- Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S. 2016. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. *Scientific Reports* 6: 22882. Doi: 10.1038/srep22882
- Chondraki S, Tzerakis C, Tzortzakis N. 2012. Influence of sodium chloride and calcium foliar spray on hydroponically grown parsley in nutrient film technique system. *Journal of Plant Nutrition* 35(10): 1457-1467. Doi: 10.1080/01904167.2012.689906
- Dabuxilat, Ikeda, M. 2005b. Distribution of K, Na and Cl in Root and Leaf Cells of Soybean and Cucumber Plants Grown under Salinity Conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 51(7): 1053-1057. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00144.x
- Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Pascholati SF, Fortunato AA, Camargo LEA. 2015. Comparison of root and foliar applications of potassium silicate in potentiating post-infection defenses of melon against powdery mildew. *Plant Pathology* 64: 1085-1093. Doi: 10.1111/ppa.12346
- Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Tanaka FAO, Amorim L, Camargo LEA. 2012. Effect of potassium silicate on epidemic components of powdery mildew on melon. *Plant Pathology* 61: 323-330. Doi: 10.1111/j.1365-3059.2011.02518.x
- Dar MI, Naikoo MI, Rehman F, Naushin F, Khan FA. 2016. Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development. *In: Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies*. Iqbal N, Nazar R, Khan NA (eds.). Springer India. pp. 155-166. Doi: 10.1007/978-81-322-2616-1
- Dios-Delgado I, Sandoval-Villa M, Rodríguez-Mendoza MN, Cárdenas-Soriano E. 2006. Aplicaciones foliares de calcio y silicio en la incidencia de mildiu en lechuga. *Terra Latinoamericana* 24(1): 91-98.
- Domene RMA, Segura RM. 2014. Parámetros de calidad externa en la industria agroalimentaria. Cajamar. Negocio Agroalimentario y Cooperativo. Ficha de Transferencia. No. 003.

- Grattan SR, Grieve CM. 1992. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 38: 275-300. Doi: 10.1016/0167-8809(92)90151-Z
- Gunes A, Inal A, Bagei EG, Pilbeam DJ. 2007. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. *Plant and Soil* 290: 103-114. Doi: 10.1007/s11104-006-9137-9
- He L, Li B, Lu X, Yuan L, Yang Y, Yuan Y, Du J, Guo S. 2015. The effect of exogenous calcium on mitochondria, respiratory metabolism enzymes and ion transport in cucumber roots under hypoxia. *Scientific Reports* 5: 11391. Doi: 10.1038/srep11391
- Hellal FA, Abdelhamid MT, Abo-Basha DM, Zewainy RM. 2012. Alleviation Of The Adverse Effects Of Soil Salinity Stress By Foliar Application Of Silicon On Faba bean (*Vicia faba* L.). *J. Appl. Sci. Res.* 8(8): 4428-4433.
- Hernández-González Z, Sahagún-Castellanos J, Espinosa-Robles P, Colinas-León, MT, Rodríguez-Pérez JE. 2014. Efecto del patrón en el rendimiento y tamaño de fruto en pepino injertado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(1): 41-47.
- Hojjatnooghi F, Mozafari V, Tajabadipour A, Hokmabadi H. 2014. Effects of salinity and calcium on the growth and chemical composition of pistachio seedlings. *Journal of Plant Nutrition* 37(6): 928-941. Doi: 10.1080/01904167.2014.888737
- Horie T, Karahara I, Katsuhara M. 2012. Salinity tolerance mechanisms in glicophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice* 5: 11. Doi: 10.1186/1939-8433-5-11
- Hu DG, Ma QJ, Sun CH, Sun MH You CX, Hao YJ. 2016. Overexpression of MdSOS2L1, a CIPK protein kinase, increases the antioxidant metabolites to enhance salt tolerance in apple and tomato. *Physiologia Plantarum* 156: 201-214. Doi: 10.1111/ppl.12354
- Hurr BM, Huber DJ, Vallejos CE, Talcott ST. 2009. Developmentally dependent responses of detached cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruit to exogenous ethylene. *Postharvest Biology and Technology* 52: 207-215. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.12.006
- Jasso-Chaverria C, Hochmuth GJ, Hochmuth RC, Sargent SA. 2005. Fruit yield, size, and color responses of two greenhouse cucumber types to nitrogen fertilization in perlite soilless culture. *HortTechnology* 15 (3): 422-424.
- Jayawardana HAR, Weerahewa KHL, Saparamadu MDJS. 2014. Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of capsicum. *Tropical Agricultural Research* 26(1): 74-81.

- Jha D, Shirley N, Tester M, Roy SJ. 2010. Variation in salinity tolerance and shoot sodium accumulation in *Arabidopsis* ecotypes linked to differences in the natural expression levels of transporters involved in sodium transport. *Plant, Cell and Environment* 33: 793-804.
- Jiménez BJL. 2011. Producción de hortalizas en ambientes protegidos, 2da edición, Editorial Laserlogo, Culiacán Sinaloa, México. 165 p.
- Kafi M y Rahimi Z. 2011. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Soil Science and Plant Nutrition* 57: 341-347.
- Kamenidou S, Cavins TJ, Marek S. 2010. Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. *Scientia Horticulturae* 123(3): 390-394. Doi: 10.1016/j.scienta.2009.09.008
- Kaya C, Kirnak H, Higgs D, Saltali K. 2002. Supplementary calcium enhances plant growth and fruit yield in strawberry cultivars grown at high (NaCl) salinity. *Scientia Horticulturae* 93(1): 65-74. Doi: 10.1016/S0304-4238(01)00313-2
- Kchaou H, Larbi A, Gargouri K, Chaieb M, Morales F, Msallem M. 2010. Assessment of tolerance to NaCl salinity of five olive cultivars based on growth characteristics and Na⁺ and Cl⁻ exclusion mechanisms. *Scientia Horticulturae* 124(3): 306-315. Doi: 10.1016/j.scienta.2010.01.007
- Khan WD, Aziz T, Hussain I, Ramzani PMA, Reichenauer TG. 2017. Silicon: a beneficial nutrient for maize crop to enhance photochemical efficiency of photosystem II under salt stress. *Journal of Agronomy and Soil Science* 63(5): 599-611. Doi: 10.1080/03650340.2016.1233322
- Khoshgoftarmanesh AH, Khodarahmi S, Haghighi 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. Doi: 10.1080/03650340.2013.822487
- Lancaster JE, Lister CE. 1997. Influence of pigment composition on skin color in a wide range of fruit and vegetables. *Journal of American Society of Horticultural Science* 122(4): 594-598.
- Maghsoudi K, Emam Y, Ashraf M. 2016. Foliar application of silicon at different growth stages alters growth and yield of selected wheat cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 39(8): 1194-1203. Doi: 10.1080/01904167.2015.1115876
- Mali M, Aery NC. 2009. Effect of silicon on growth, biochemical constituents, and mineral nutrition of cowpea. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40(7-8): 1041-1052. Doi: 10.1080/00103620902753590

- Manivannan A, Soundararajan P, Muneer S, Ko CH, Jeong BR. 2016. Silicon Mitigates Salinity stress by regulating the physiology, antioxidant enzyme activities, and protein expression in *Capsicum annuum* 'Bugwang'. *BioMed Research International* 2016: 3076357. Doi: 10.1155/2016/3076357
- Mehrabanjoubani P, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR, Aghdasi M. 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere* 25(2): 192-201. Doi: 10.1016/S1002-0160(15)60004-2
- Melgar JC, Benlloch M, Fernandez-Escobar R. 2007. Calcium starvation increase salts susceptibility to water stress. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 82: 622-626.
- Montesano FF, D'Imperio M, Parente A, Cardinali A, Renna M, Serio F. 2016. Green bean biofortification for Si through soilless cultivation: plant response and Si bioaccessibility in pods. *Scientific Reports* 6: 31662. Doi: 10.1038/srep31662
- Mozaffari V, Malakouti MJ. 2006. An investigation of some causes of die-back disorder of pistachio trees and its control through balanced fertilization in Iran. *Acta Horticulturae* 276: 301-305.
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59: 651-681. Doi: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
- Murillo-Amador B, Jones HG, Kaya C, López AR, García-Hernández JL, Troyo-Diéquez E, Ávila-Serrano NY, Rueda-Puente E. 2006. Effects of foliar application of calcium nitrate on growth and physiological attributes of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) grown under salt stress. *Environmental and Experimental Botany* 58(1-3): 188-196. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.08.003
- Pavlovic J, Zamardzic J, Kostic L, Laursen KH, Natic M, Timotijevic G, Schjoerring JK, Nikolic M. 2016. Silicon enhances leaf remobilization of iron in cucumber under limited iron conditions. *Annals of Botany* 118(2): 271-280. Doi: 10.1093/aob/mcw105
- Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou WJ. 2010. Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation* 29: 106-115. Doi: 10.1007/s00344-009-9120-9
- Pilon C, Soratto RP, Broetto F, Fernandes AM. 2014. Foliar or soil applications of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants. *Agronomy Journal* 106: 2325-2334. Doi: 10.2134/agronj14.0176
- Pilon C, Soratto RP, Moreno LA. 2013. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. *Crop Science* 53: 1605-1614. Doi: 10.2135/cropsci2012.10.0580
- Pla SI. 2014. Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland irrigated conditions. *International Soil and Water Conservation Research* 2: 50-63. Doi: 10.1016/S2095-6339(15)30058-7

- Raese JT, Drake SR. 2000. Effect of calcium sprays, time of harvest, cold storage, and ripeness on fruit quality of 'anjou' pears. *Journal of Plant Nutrition* 23(6): 843-853. Doi: 10.1080/01904160009382065
- Rengasamy P. 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology* 37: 613-620.
- Romero-Gomezcaña NR, Sánchez-García P, Alcázar JR, Saucedo-Veloz C. Aplicación foliar de calcio y su relación con la calidad en frutos de mango cv. Haden. *Agricultura Técnica en México* 32(1): 5-15.
- Sahebi M, Hanafi MM, Siti Nor AA, Rafii MY, Azizi P, Tengoua FF, Mayzaitul AJN, Shabanimofrad M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International* 2015: 1-16. Doi: 10.1155/2015/396010
- Samuels AL, Glass ADM, Ehret DL, Menzies JG. 1993. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: changes in Surface characteristics. *Annals of Botany* 72(5): 433-440. Doi: 10.1006/anbo.1993.1129
- Savvas D, Giotis D, Chatzieustratiouc E, Bakeab M, Patakioutas G. 2009. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environmental and Experimental Botany* 65: 11-17. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2008.07.004
- Savvas D, Meletiou G, Margariti S, Tsirogiannis I. 2005. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *HortScience* 40(30): 802-807
- Savvas D, Ntatsi G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196: 66-81. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.010
- Shazad M, Zörb C, Geilfus C-M, Mühling KH. 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: 161-170. Doi: 10.1111/jac.12003
- Shi Y, Wang Y, Flowers TJ, Gong H. 2013. Silicon decrease chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. *Journal of Plant Physiology* 170(9): 847-853. Doi: 10.1016/j.jplph.2013.01.018
- SIAP. 2017. Producción agrícola: OI+PV 2016. Disponible en línea en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/. Consultado: junio 01, 2017.
- Siller-Cepeda J, Muy-Rangel D, Báez-Sañudo M, García-Estrada R, Araiza-Lizarde E. 2003. Calidad en frutos de carambola (*Averrhoa carambola* L.) cosechada en cuatro estados de madurez. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 10(1): 23-29.
- Singh R, Sharma RR, Tyagi SK. 2007. Pre-harvest foliar application of calcium and boron influences physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae* 112(2): 215-220. Doi: 10.1016/j.scienta.2006.12.019

- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. *In*: 6th international congress on soilless culture. Wageningen, Holanda. pp. 633-650.
- Tabatabaei SJ. 2016. Interactive Effects of Si and NaCl on Growth, Yield, Photosynthesis and Ions Content in Strawberry (*Fragaria x ananassa* var. Camarosa). *Journal of Plant Nutrition* 39(11): 1524-1535. Doi: 10.1080/01904167.2016.1161771
- Tavakkoli E, Fatehi F, Coventry S, Rengasamy P, McDonald GK. 2011. Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on barley growth under salinity stress. *Journal of Experimental Botany* 62(6): 2189-2203. Doi: 10.1093/jxb/erq422
- Tuna AL, Kaya C, Ashraf M, Altunlu H, Yokas I, Yagmur B. 2007. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. *Environmental and Experimental Botany* 59(2): 173-178. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.007
- Vázquez, C.M.G., Santiago R.D. 2013. Características fisicoquímicas y calidad del pozole del maíz cacahuacintle procesado mediante tres métodos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(3): 357-366.
- 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. Doi: 10.3389/fpls.2015.00759
- Wang XS, Han JG. 2007. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. *Soil Science and Plant Nutrition* 53: 278-285. Doi: 10.1111/j.17470765.2007.00135.x
- Xie Z, Song R, Shao H, Song F, Xu H, Lu Y. 2015. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. *The Scientific World Journal*. 2015: 245074. Doi: 10.1155/2015/245072
- Xu CX, Ma YP, Liu YL. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany* 98: 26-36. Doi: 10.1016/j.sajb.2015.01.008
- Yaghubi K, Ghaderi N, Vafae Y, Javadi T. 2016. Potassium silicate alleviates deleterious effects of salinity on two strawberry cultivars grown under soilless pot culture. *Scientia Horticulturae* 213: 87-95. Doi: 10.1016/j.scienta.2016.10.012
- Yin L, Wang S, Li W, Tanaka K, Oka M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiologia Plantarum* 35: 3099-3107. Doi: 10.1007/s11738-013-1343-5
- Zhang HX, Blumwald E. 2001. Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulate salt in foliage but not in fruit. *Nature Biotechnology* 19(8): 765-768. Doi: 10.1038/90824

- Zhu Y, Gong H. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron Sustain Dev.* 34: 455-472.
- Zhu YX, Xu XB, Hu YH, Han WH, Yin JL, Li HL, Gong HJ. 2015. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Reports* 34: 1629-1646. Doi: 10.1007/s00299-015-1814-9
- Zhu Z, Wei G, Li G, Quian Q, Yu J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science* 162: 527-533.
- Zuccarini P. 2010. Biological and technological strategies against soil and water salinization II—plant. *Journal of Plant Nutrition* 33(10): 1489-1505.