



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**SILICIO EN LA TOLERANCIA A
FACTORES DE ESTRÉS ABIÓTICO
EN MAÍZ**

DIEGO NAFARRATE RAMOS

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

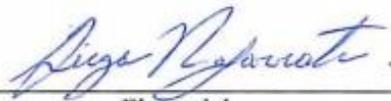
2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe DIEGO NAFARRATE RAMOS, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DRA. LIBIA I. TREJO TÉLLEZ, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis SILICIO EN LA TOLERANCIA A FACTORES DE ESTRÉS ABIÓTICO EN MAÍZ

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 26 de noviembre de 2018



Firma del
Alumno (a)



DRA. LIBIA I. TREJO TÉLLEZ
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada "**Silicio en la tolerancia a factores de estrés abiótico en maíz**", realizada por el alumno Diego Nafarrate Ramos, 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

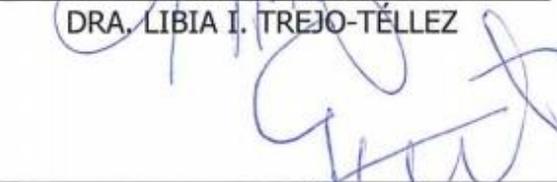
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



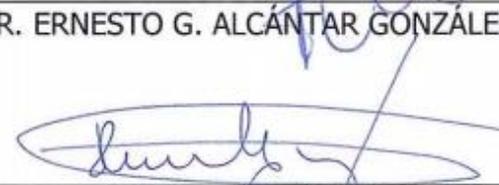
DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

ASESOR:



DR. ERNESTO G. ALCÁNTAR GONZALEZ

ASESOR:



DR. FERNANDO C. GÓMEZ MERINO

Montecillo, Texcoco, Estado de México. Diciembre de 2018.

Silicio en la tolerancia a factores de estrés abiótico en maíz

Diego Nafarrate Ramos, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es el tercer cereal más producido a nivel mundial, y en México el de mayor importancia debido a su alto consumo, pero los distintos agobios ambientales como lo son la salinidad y la sequía limitan su productividad. En este estudio se evaluó el efecto del silicio (Si) en la mitigación de estrés causado por sequía y salinidad en germinación, fase vegetativa y de producción, en maíz blanco híbrido SB-308. Se establecieron dos experimentos con sequía inducida, uno en germinación y otro en fase vegetativa, así como también, otros dos ensayos con salinidad, uno en germinación y otro en fase de producción. Dentro de los resultados más relevantes, encontramos que la salinidad retrasa severamente la germinación y en altas concentraciones esta se inhibe, presenta efectos negativos en la altura de plantas y disminuye la concentración y acumulación nutrimental. Asimismo, la sequía inhibe la germinación, disminuye la altura de plantas, longitud de raíz, variables de biomasa seca, conductancia estomática y tasa fotosintética. Por otra parte, la imbibición de semillas de maíz con 3.0 mM de SiO₂ incrementa el porcentaje de peso en semilla, así como también, la longitud de radícula, peso de biomasa seca de vástagos y raíces, altura, concentración y acumulación nutrimental sin condiciones de agobio. En condiciones de estrés por sequía y salinidad, la adición de Si mitiga los efectos negativos que estos agobios ocasionan en la altura de plantas de maíz.

Palabras clave: *Zea mays*, elementos benéficos, sequía, salinidad, mitigación de estrés.

Silicon on tolerance to abiotic stress factors in maize

Diego Nafarrate Ramos, M. Sc.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is the third most produced cereal in the world, and in Mexico the most important due to its high consumption, but the different environmental stresses such as salinity and drought limit its productivity. In this study we evaluated the effect of silicon (Si) in the mitigation of stress caused by drought and salinity in germination, vegetative and production phase, in white hybrid maize SB-308. Two experiments were established with induced drought, one in germination and another in vegetative phase, as well as two other tests with salinity, one in germination and another in production phase. Among the most relevant results, we found that salinity severely delays germination and at high concentrations it is inhibited, has negative effects on the height of plants and decreases concentration and nutritional accumulation. Likewise, drought inhibits germination, decreases plant height, root length, dry biomass variables, stomatal conductance and photosynthetic rate. On the other hand, the imbibition of maize seeds with 3.0 mM of SiO₂ increases the percentage of weight in seed, as well as the length of the radicle, weight of dry biomass of stems and roots, height, concentration and nutritional accumulation without stress conditions. Under conditions of stress due to drought and salinity, the addition of Si mitigates the negative effects that these cues cause on the height of maize plants.

Keywords: *Zea mays*, beneficial elements, drought, salinity, stress mitigation.

AGRADECIMIENTOS

Al **Colegio de Postgraduados** por haberme aceptado y brindado la oportunidad de estudiar este posgrado.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por haberme apoyado económicamente con la beca otorgada.

A la **Doctora Libia Iris Trejo-Téllez**, le agradezco todo el tiempo dedicado, sus enseñanzas, consejos y haber colaborado de manera vasta en la realización de este trabajo.

Al **Doctor Fernando Carlos Gómez Merino** por sus consejos y observaciones puntuales, que permitieron realizar de la mejor manera esta investigación.

Al **Doctor Gabriel Ernesto Alcántar González** por su colaboración en este trabajo y haber realizado observaciones que llevaron a la culminación del mismo.

A todos los doctores que tuve el gusto de conocer y aprender de ellos durante mi estadía en el Colegio de Postgraduados

DEDICATORIA

A mis padres

Sergio Nafarrate Castro y Carmen Ramos Beltrán por haberme otorgado su apoyo incondicional y por ser los pilares de mi formación.

A mis abuelas

Teresa Castro Ibarra e Isabela Beltrán Félix por apoyarme y aconsejarme en la vida.

A mis hermanos

Liliana Roció Nafarrate González (Que siempre estarás conmigo), Sergio Nafarrate Ramos, Alejandra Nafarrate Golarte, Perla Espinoza Ramos y Fabiola Espinoza Ramos por haberme motivado para seguir siempre adelante.

A mis amigos

Por qué ustedes están siempre ahí en las buenas y en las malas, por que pase lo que pase siempre me brindan su apoyo incondicional y por su sincera amistad.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
CONTENIDO.....	viii
LISTA DE CUADROS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
1. Situación global y nacional del maíz.....	1
2. Estrés en plantas	1
2.1. Estrés abiótico.....	1
2.1.1. Salinidad.....	3
2.1.2. Sequía.....	4
3. El Si como elemento benéfico.....	5
4. Absorción de Si en plantas.....	6
5. Tolerancia o mitigación de estrés.....	7
6. Literatura citada.....	11
CAPÍTULO I. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS POR SALINIDAD EN GERMINACIÓN Y PLÁNTULAS DE MAÍZ.....	17
RESUMEN.....	17
1.1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
1.2.1. Ubicación del experimento y material vegetal.....	18
1.2.2. Tratamientos y diseño experimental.....	19
1.2.3. Aplicación de tratamientos.....	19
1.2.4. Variables evaluadas.....	19
1.2.5. Análisis estadístico.....	21
1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21

1.3.1. Incremento porcentual de peso en semilla de maíz después de 12 h de imbibición.....	21
1.3.2. Longitud de radícula.....	22
1.3.3. Altura de plántula.....	24
1.3.4. Variables de germinación.....	26
1.3.4.1. Porcentaje total de germinación (PTG)	26
1.3.4.2. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG).....	27
1.3.4.3. Porcentaje de germinación relativa (PGR).....	28
1.3.4.4. Crecimiento relativo de radícula (CRR).....	29
1.3.4.5. Crecimiento relativo de vástago (CRV).....	30
1.3.4.6. Índice de germinación.....	31
1.3.5. Biomasa seca.....	33
1.3.5.1. Biomasa seca de vástago (BSV)	33
1.3.5.2. Biomasa seca de raíz y grano (BSRYG).....	34
1.3.5.3. Biomasa seca total (BSTOTAL).....	35
1.3.5.4. Relación biomasa seca de vástago y de raíz-grano (RELBSVSRYG).....	36
1.4. CONCLUSIÓN.....	37
1.5. LITERATURA CITADA.....	37
CÁPITULO II. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS POR SEQUÍA EN GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE MAÍZ.....	43
RESUMEN.....	43
2.1. INTRODUCCIÓN.....	43
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
2.2.1. Establecimiento del experimento y material vegetal.....	44
2.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental.....	44
2.2.3. Aplicación de tratamientos.....	45
2.2.4. Variables evaluadas.....	45
2.2.5. Análisis estadístico.....	47
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47

2.3.1.	Incremento porcentual de peso en semilla de maíz después de 12 h de imbibición.....	47
2.3.2.	Longitud de radícula.....	48
2.3.3.	Altura de plántula.....	50
2.3.4.	VARIABLES DE GERMINACIÓN.....	51
2.3.4.1.	Porcentaje de germinación total (PGT)	51
2.3.4.2.	Coeficiente de velocidad de germinación (CVG).....	54
2.3.4.3.	Porcentaje de germinación relativo (PGR).....	55
2.3.4.4.	Coeficiente relativo de raíz (CRR).....	56
2.3.4.5.	Coeficiente relativo de vástago (CRV).....	57
2.3.4.6.	Índice de germinación (IG).....	57
2.3.5.	Biomasa seca.....	58
2.3.5.1.	Biomasa seca de vástago (BSV).....	58
2.3.5.2.	Biomasa seca de raíz (BSR).....	60
2.3.5.3.	Biomasa seca de grano (BSG).....	61
2.3.5.4.	Biomasa seca total (BST).....	61
2.3.5.5.	Relación de biomasa seca de vástago y de raíz (RBSVBSR).....	62
2.4.	CONCLUSIÓN.....	63
2.5.	LITERATURA CITADA.....	64
 CAPÍTULO III. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS POR SEQUÍA EN FASE VEGETATIVA EN MAÍZ.....		69
RESUMEN.....		69
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	69
3.2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	70
3.2.1.	Ubicación del experimento y material vegetal.....	70
3.2.2.	Diseño de tratamientos y diseño experimental.....	70
3.2.3.	Producción de plántulas.....	71
3.2.4.	Aplicación de tratamientos.....	71
3.2.5.	VARIABLES EVALUADAS.....	71

3.2.6. Análisis estadístico.....	72
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
3.3.1. Altura de plantas.....	72
3.3.2. Variables fotosintéticas.....	73
3.3.3. Volumen de raíz.....	75
3.3.4. Biomasa seca de raíz y vástago.....	77
3.3.5. Concentración nutrimental.....	78
3.3.5.1. Raíz.....	78
3.3.5.2. Vástago.....	81
3.3.6. Acumulación nutrimental.....	84
3.3.6.1. Raíz.....	84
3.3.6.2. Vástago.....	87
3.4. CONCLUSIÓN.....	90
3.5. LITERATURA CITADA.....	90
CAPÍTULO IV. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS SALINO EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ.....	95
RESUMEN.....	95
4.1. INTRODUCCIÓN.....	95
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	96
4.2.1. Ubicación del experimento y material vegetal.....	96
4.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental.....	96
4.2.3. Producción de plántulas.....	97
4.2.4. Aplicación de tratamientos.....	97
4.2.5. Variables evaluadas.....	97
4.2.6. Análisis estadístico.....	98
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	98
4.3.1. Altura de plantas.....	98
4.3.2. Concentración nutrimental.....	99
4.3.2.1. Hojas.....	99
4.3.2.2. Tallos.....	102

4.3.2.3. Raíz.....	105
4.3.2.4. Espiga.....	108
4.3.2.5. Jilote.....	110
4.3.3. Acumulación nutrimental.....	112
4.3.3.1. Hojas.....	112
4.3.3.2. Tallos.....	115
4.3.3.3. Raíz.....	118
4.3.3.4. Espiga.....	121
4.3.3.5. Jilote.....	123
4.4. CONCLUSIÓN.....	125
4.5. LITERATURA CITADA.....	126
CONCLUSIONES GENERALES	130

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

	Página
Cuadro 1.1 Efecto de la interacción de los factores de estudio en la longitud de raíz de plántulas de maíz.....	24
Cuadro 1.2 Efecto de la interacción de los factores de estudio en la altura de plántulas de maíz.....	26
Cuadro 1.3 Interacción de semillas de maíz tratadas con silicio en imbibición y con NaCl en germinación en las variables de germinación.....	32
Cuadro 1.4 Efecto del NaCl en semillas de maíz imbibidas con Si en la biomasa seca de vástago, raíz-grano, total y su relación.....	34

CAPÍTULO II

Cuadro 2.1 Efecto de la interacción de los factores de estudio en la longitud de raíz de plántulas de maíz.....	49
Cuadro 2.2 Efecto de la interacción de los factores de estudio en la altura de plántulas de maíz.....	51
Cuadro 2.3 Interacción de semillas de maíz tratadas con silicio en imbibición y con PEG-8000 en germinación en las variables de germinación.....	53
Cuadro 2.4 Efecto del PEG-8000 en semillas de maíz imbibidas con Si en la biomasa seca de vástago, raíz, grano, total y en la relación de biomasa seca de vástago:raíz.....	60

CAPÍTULO II

Cuadro 3.1 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la altura de plantas de maíz.....	72
Cuadro 3.2 Altura de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	73

Cuadro 3.3	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en las variables fotosintéticas de plantas de maíz.....	74
Cuadro 3.4	Variables fotosintéticas de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	74
Cuadro 3.5	Volumen radicular de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de potencial osmótico (Ψ_o) y Si..	76
Cuadro 3.6	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la biomasa seca de raíz y vástago de plantas de maíz.....	77
Cuadro 3.7	Biomasa seca de raíz y vástago de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de potencial osmótico (Ψ_o) y Si.....	78
Cuadro 3.8	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de macronutrientes en raíces de maíz...	79
Cuadro 3.9	Concentración de macronutrientes en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	79
Cuadro 3.10	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de micronutrientes en raíces de maíz...	80
Cuadro 3.11	Concentración de micronutrientes en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	81
Cuadro 3.12	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de macronutrientes en vástagos de maíz.....	82
Cuadro 3.13	Concentración de macronutrientes en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si..	82
Cuadro 3.14	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de micronutrientes en vástagos de maíz.....	83
Cuadro 3.15	Concentración de micronutrientes en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si..	83
Cuadro 3.16	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de macronutrientes en raíces de maíz....	85

Cuadro 3.17	Acumulación de macronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	85
Cuadro 3.18	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de micronutrientos en raíces de maíz.....	86
Cuadro 3.19	Acumulación de micronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	87
Cuadro 3.20	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de macronutrientos en vástagos de maíz.	88
Cuadro 3.21	Acumulación de macronutrientos en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si..	88
Cuadro 3.22	Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de micronutrientos en vástagos de maíz..	89
Cuadro 3.23	Acumulación de micronutrientos en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.....	89

CAPÍTULO IV

Cuadro 4.1	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la altura de planta de maíz.....	98
Cuadro 4.2	Altura de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	99
Cuadro 4.3	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración foliar de macronutrientos en maíz.....	100
Cuadro 4.4	Concentración de macronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	100
Cuadro 4.5	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración foliar de micronutrientos en maíz.....	101
Cuadro 4.6	Concentración de micronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	102
Cuadro 4.7	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientos en tallos de maíz.....	103

Cuadro 4.8	Concentración de macronutrientos en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	103
Cuadro 4.9	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en tallos de maíz.....	104
Cuadro 4.10	Concentración de micronutrientos en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	104
Cuadro 4.11	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientos en raíces de maíz.....	105
Cuadro 4.12	Concentración de macronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	106
Cuadro 4.13	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en raíces de maíz.....	107
Cuadro 4.14	Concentración de micronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	107
Cuadro 4.15	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientos en raíces de maíz.....	108
Cuadro 4.16	Concentración de macronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	109
Cuadro 4.17	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en espigas de maíz.....	109
Cuadro 4.18	Concentración de micronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	109
Cuadro 4.19	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientos en jilotes de maíz.....	110
Cuadro 4.20	Concentración de macronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	111
Cuadro 4.21	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en jilotes de maíz.....	111
Cuadro 4.22	Concentración de micronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	111

Cuadro 4.23	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación foliar de macronutrientos en maíz.....	112
Cuadro 4.24	Acumulación de macronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	113
Cuadro 4.25	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación foliar de micronutrientos en maíz.....	114
Cuadro 4.26	Acumulación de micronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	114
Cuadro 4.27	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientos en tallos de maíz.....	115
Cuadro 4.28	Acumulación de macronutrientos en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	116
Cuadro 4.29	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en tallos de maíz.....	117
Cuadro 4.30	Acumulación de micronutrientos en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	117
Cuadro 4.31	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientos en raíces de maíz.....	118
Cuadro 4.32	Acumulación de macronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	119
Cuadro 4.33	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en raíces de maíz.....	120
Cuadro 4.34	Acumulación de micronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	120
Cuadro 4.35	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientos en espigas de maíz.....	121
Cuadro 4.36	Acumulación de macronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	122
Cuadro 4.37	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en espigas de maíz.....	122

Cuadro 4.38	Acumulación de micronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	123
Cuadro 4.39	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientos en jilotes de maíz.....	124
Cuadro 4.40	Acumulación de macronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	124
Cuadro 4.41	Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en jilotes de maíz.....	124
Cuadro 4.42	Acumulación de micronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.....	125

LISTA DE FIGURAS

MARCO TEÓRICO		Página
Figura 1	Complejidad de respuesta de la planta al estrés abiótico.....	2
Figura 2	Modelo bifásico de salinidad en el crecimiento de las plantas...	3
Figura 3	Descripción de los posibles mecanismos de reducción en el crecimiento bajo estrés por sequía.....	5
Figura 4	Diagrama de la absorción del Si en raíces de arroz.....	7
Figura 5	Modelo de la ruta de las SOS como respuesta al estrés por sales.....	8
Figura 6	Bases fisiológicas, bioquímicas y moleculares de tolerancia al estrés por sequía en plantas.....	9
Figura 7	Posibles mecanismos del silicio en la mejora del balance hídrico en las plantas bajo déficit hídrico.....	10
Figura 8	Bajo estrés por salinidad, se ha reportado que el Si mejora el funcionamiento de estomas y la conductancia hidráulica.....	11

CAPÍTULO I

Figura 1.1	Incremento porcentual del peso de semillas de maíz después de 12 h de imbibición en soluciones con diferentes concentraciones de Si.....	22
Figura 1.2	Longitud de radícula de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con NaCl durante la germinación (B).....	23
Figura 1.3	Efecto del silicio en el desarrollo temprano de plántulas de maíz sin estrés salino, cinco días después del periodo de imbibición..	23
Figura 1.4	Altura de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con NaCl durante la germinación (B).....	25

Figura 1.5	Porcentaje total de germinación (PTG) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con NaCl durante la germinación (B).....	27
Figura 1.6	Coeficiente de velocidad de germinación (CVG) de semillas de maíz imbibidas con distintas concentraciones de silicio por 12 h (A), y NaCl durante germinación (B).....	28
Figura 1.7	Porcentaje de germinación relativa (PGR) de semillas de maíz tratadas con diferentes concentraciones de silicio en imbibición (A) y con NaCl en germinación (B).....	29
Figura 1.8	Crecimiento relativo de raíz (CRR) de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de silicio en imbibición (A) y con NaCl en germinación.....	30
Figura 1.9	Crecimiento relativo de vástago (CRV) de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con distintas concentraciones de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B).....	31
Figura 1.10	Índice de germinación (IG) en semillas de maíz tratadas con distintas dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B).....	32
Figura 1.11	Biomasa seca de vástago (BSV) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B).....	33
Figura 1.12	Biomasa seca de raíz y grano (BSRYG) de plántulas de maíz proveniente de semillas tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B).....	35
Figura 1.13	Biomasa seca total (BSTOTAL) de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B).....	36

Figura 1.14	Relación biomasa seca de vástago y raíz-grano (RELBSVSRYG) en plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B).....	37
--------------------	--	----

CAPÍTULO II

Figura 2.1	Incremento porcentual del peso de semillas de maíz después de 12 h de imbibición en soluciones con diferentes concentraciones de Si.....	48
Figura 2.2	Longitud de radícula de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	49
Figura 2.3	Altura de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B).....	50
Figura 2.4	Porcentaje de germinación total (PGT) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	51
Figura 2.5	Coeficiente de velocidad de germinación (CVG) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	54
Figura 2.6	Porcentaje de germinación relativo (PGR) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	55

Figura 2.7	Coeficiente relativo de raíz (CRR) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	56
Figura 2.8	Coeficiente relativo de vástago (CRV) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	57
Figura 2.9	Índice de germinación (IG) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B)	58
Figura 2.10	Biomasa seca de vástago (BSV) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B).....	59
Figura 2.11	Biomasa seca de raíz (BSR) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B).....	60
Figura 2.12	Biomasa seca de grano (BSG) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B).....	61
Figura 2.13	Biomasa seca total (BST) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B).....	62

Figura 2.14 Relación de biomasa seca de vástago y raíz (RBSVBSR) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B) 63

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Volumen radical de plantas de maíz tratadas con distintos niveles de silicio (A) y sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante fase vegetativa (B)..... 76

INTRODUCCIÓN

1. Situación global y nacional del maíz

Los granos de los cereales son los frutos de las Poaceae (gramíneas); existen alrededor de una docena de cereales utilizados, pero solo el arroz, trigo y maíz son los de mayor importancia para la alimentación humana, formando el 94% del consumo de cereales (FAO, 2018a). Por otra parte, el maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor envergadura, debido a que se encuentra entre los cereales más cultivados a nivel mundial, y por su alto contenido nutricional (72% almidón, 10% proteínas y 4% lípidos), además es la fuente primordial de alimento en México (Nuss y Tanumihardjo, 2010).

A nivel mundial se cultivan 189 375 748 hectáreas de maíz, de las cuales 7 668 369 pertenecen a México (FAO, 2018b), por lo que es considerado uno de los países productores de mayor importancia en el mundo.

2. Estrés en plantas

El estrés en plantas se puede definir como cualquier factor externo que afecte el crecimiento de esta negativamente. Esto incluye una gran cantidad de factores, los cuales se dividen en dos grupos principales: estrés biótico y abiótico (Rhodes y Nadolska-Orczyk, 2001).

2.1. Estrés abiótico

El estrés abiótico es un agobio ambiental, en el cual la planta activa mecanismos a nivel molecular, bioquímico, fisiológico y morfológico (**Figura 1**), la activación de mecanismos puede resultar en el establecimiento de un nuevo estado fisiológico y restablecimiento de homeostasis (Jogaiah *et al.*, 2013).

Los tipos de estrés abiótico son: sequía, salinidad, heladas, golpes de calor, anegamiento (anoxia), contaminaciones ambientales, entre otros. Jogaiah *et al.* (2013) menciona que los efectos adversos de los estreses abióticos alteran el metabolismo de la planta, así como también su crecimiento y desarrollo, llevando a la muerte de la planta.

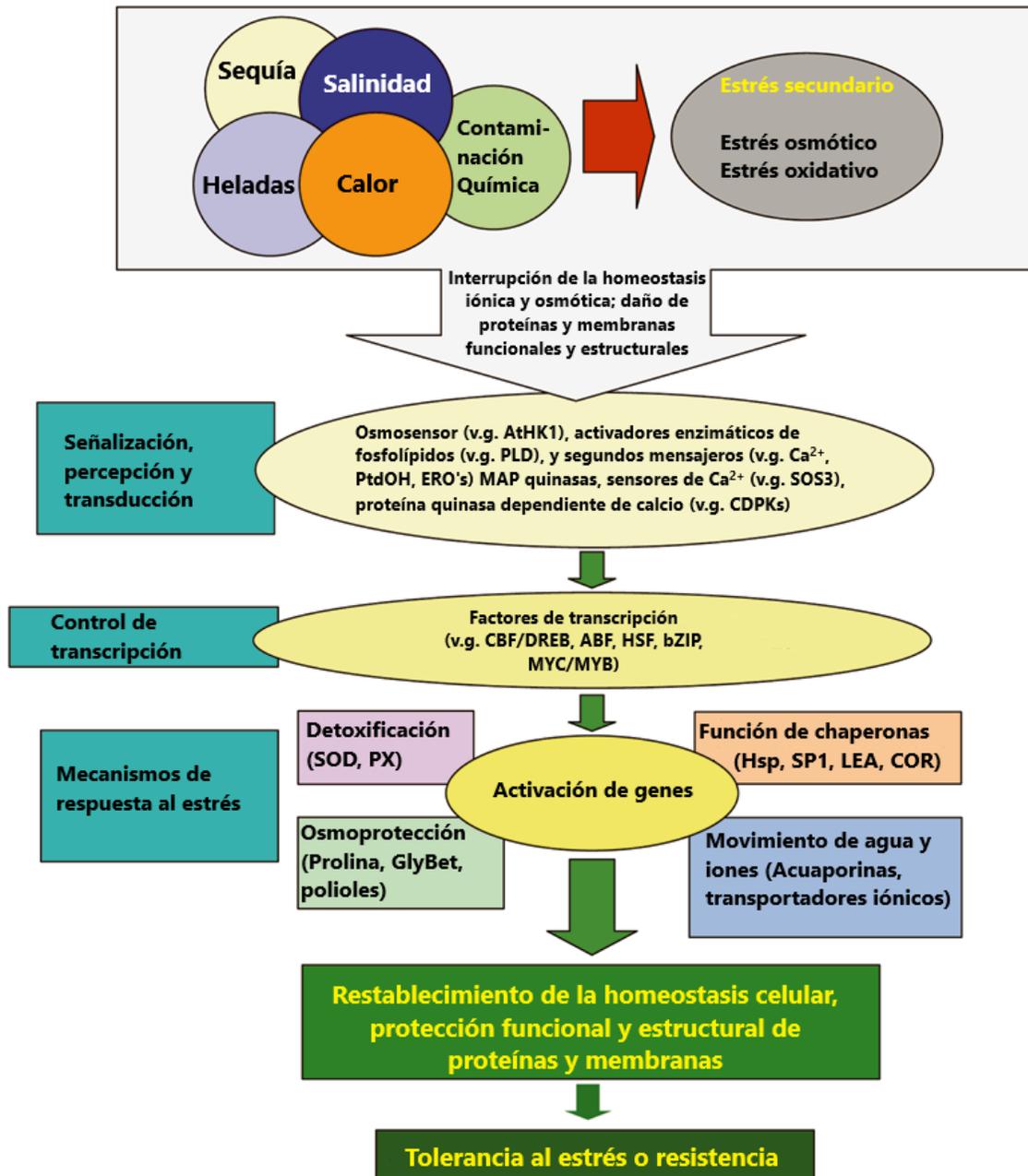


Figura 1. Complejidad de respuesta de la planta al estrés abiótico. Los principales estreses como la sequía, salinidad, heladas, calor y contaminación química están a menudo interconectados, causando daño celular y estreses secundarios, como el osmótico y oxidativo. Las señalizaciones iniciales de estrés (v.g. efectos iónicos y osmóticos, temperatura, cambios en la fluidez de la membrana) accionan una corriente de procesos de señalización y controles de transcripción, los cuales detonan mecanismos de respuesta al estrés, para restablecer la homeostasis, proteger y reparar proteínas y membranas dañadas. Respuestas inadecuadas en la señalización y activación de genes puede resultar en cambios irreversibles de homeostasis celular y en la destrucción de proteínas y membranas estructurales, llevando a la muerte celular ([Wang et al., 2003](#)).

2.1.1. Salinidad

El estrés por salinidad afecta el desarrollo y crecimiento del maíz, sin embargo, la respuesta de las plantas varía dependiendo del nivel de estrés y la etapa fenológica (Xue *et al.*, 2009). Un lapso de exposición de los cultivos a la salinidad por más corto que sea, afecta negativamente el crecimiento de la planta (**Figura 2**), debido al agobio osmótico en la primera fase de estrés por sales (Sümer *et al.*, 2004). Durante la fase inicial de salinidad, se disminuye la capacidad de absorción de agua del sistema radicular, y la pérdida de agua de las hojas se acelera debido al agobio osmótico que genera la alta acumulación de sales en el suelo y planta, es por eso que la salinidad es considerada un estrés hiperosmótico (Munns, 2005). En la segunda fase, se presenta el efecto específico de sales, conocido como daño por sales y esto se presenta en hojas viejas, las cuales mueren debido al rápido incremento en la concentración de sales en las paredes celulares o citoplasma, cuando las vacuolas ya no pueden secuestrar las sales entrantes (Munns, 1993). Además, presenta efectos adversos en la germinación de muchas especies de cultivos, puesto que, genera una disminución del potencial osmótico en el exterior de la semilla, inhibiendo la absorción de agua o por el efecto tóxico de Na^+ y Cl^- (Khajeh-Hosseini *et al.*, 2003).

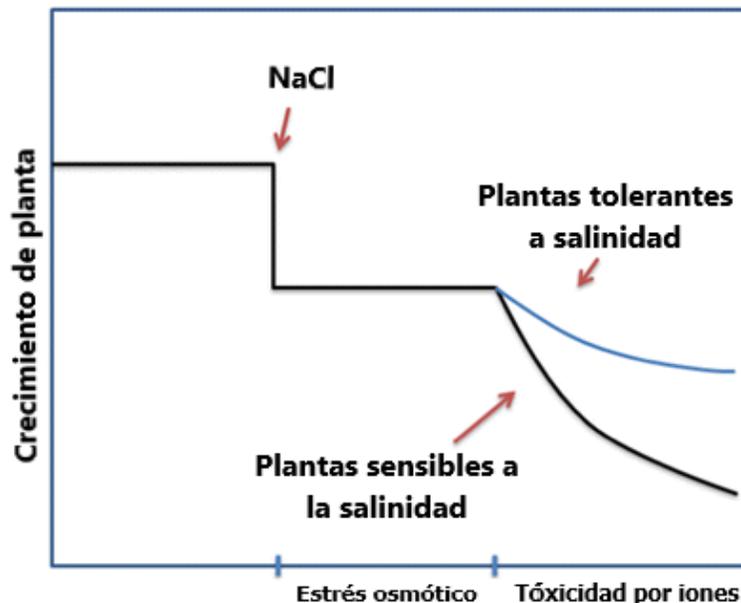


Figura 2. Modelo bifásico de salinidad en el crecimiento de las plantas (Munns, 1993).

Menezes-Banavente *et al.* (2004) mencionan que en un nivel de salinidad mayor a 0.25 M NaCl daña las plantas de maíz y puede disminuir o incluso inhibir su crecimiento, así como también, causa un severo marchitamiento. El Na⁺ es el principal ion tóxico, el cual interfiere con la absorción de K⁺ y, además perturba las ondulaciones estomáticas, causando pérdidas severas de agua y necrosis en maíz (Sümer *et al.*, 2004).

2.1.2. Sequía

La sequía es el principal estresor abiótico a nivel global, reduce drásticamente el rendimiento de los granos; influye devastadoramente en la capacidad de satisfacer las demandas alimentarias de una población mundial en constante crecimiento (Tester y Landridge, 2010). Este estrés es una de las mayores causas de pérdidas en cultivos a nivel mundial, reduciendo el rendimiento en un 50% o más (Wang *et al.*, 2003). La exposición de las plantas al estrés hídrico genera muchos cambios fisiológicos en las células, incluyendo cambios en el metabolismo hormonal y proteómicos (Davies, 2010); el maíz es muy susceptible a la sequía, debido a que las plantas requieren el agua para llevar a cabo la elongación y división celular, y por contraparte, su ausencia retrasa severamente el crecimiento vegetativo.

El crecimiento se lleva a cabo mediante la división, alargamiento y diferenciación celular, e involucra eventos genéticos, fisiológicos, ecológicos, morfológicos y su complejo de interacciones (Farooq *et al.*, 2008). La calidad y cantidad del crecimiento de las plantas dependerá de estos eventos, los cuales son afectados por la deficiencia de agua (**Figura 3**). El crecimiento celular es uno de los procesos fisiológicos más sensibles a la sequía, debido a la reducción en la presión de turgencia (Verslues y Juenger, 2011).

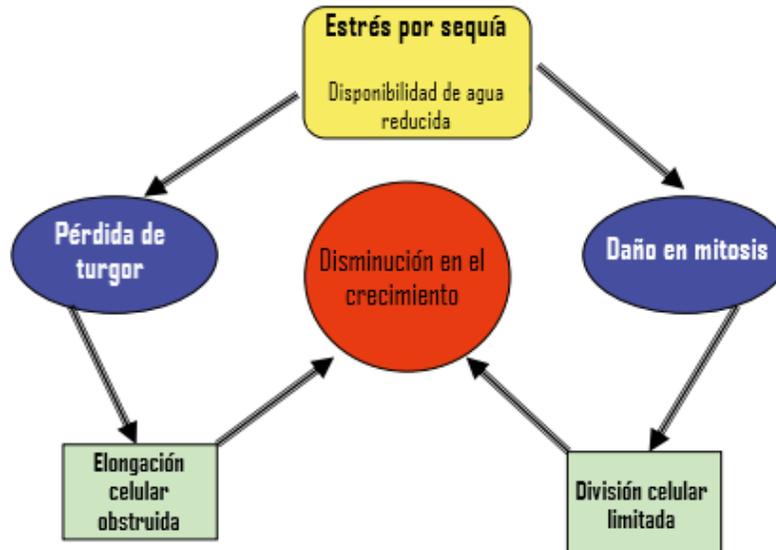


Figura 3. Descripción de los posibles mecanismos de reducción en el crecimiento bajo estrés por sequía. Bajo condiciones de este agobio, la elongación celular de las plantas superiores se ve inhibida por el decremento en la presión de turgencia. La reducción en la absorción de agua resulta en disminución en el contenido de agua de los tejidos, como resultado, la turgencia se pierde. Asimismo, el estrés por sequía también afecta negativamente en la fotoasimilación y en los metabolitos necesarios para la división celular, como consecuencia, alteración en la mitosis, la elongación y expansión celular dan como resultado un crecimiento reducido (Farooq *et al.*, 2008).

3. El silicio como elemento benéfico

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, pero su esencialidad en el crecimiento y desarrollo de las plantas continúa siendo debatido, debido a que las plantas difieren ampliamente en su capacidad para absorber el Si (Sommer *et al.*, 2006). Este elemento es considerado no esencial para el desarrollo de las plantas, pero algunos autores lo consideran como elemento cuasi-esencial para las plantas superiores, dado que el crecimiento de los cultivos puede verse estimulado con la adición de Si (Ma y Yamaji, 2008).

En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre el efecto que tiene el Si en la nutrición vegetal, en las funciones para mejorar la fertilidad de suelos y sobre su contribución a la resistencia de los cultivos a plagas, enfermedades, al estrés biótico y abiótico. Anualmente los cultivos extraen de 40 a 300 kg ha⁻¹ de silicio del suelo (Vallejo y Alvarado-Ochoa, 2011).

Los efectos benéficos del silicio (Si) se deben a su alta acumulación en tejidos vegetales (Carneiro *et al.*, 2010; Ma y Yamaji, 2015). Su acumulación es muy variable entre especies y familias vegetales, y es mediada por la habilidad de absorción de cada una de ellas (Yamaji *et al.*, 2012). La absorción 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 [Si(OH)₄] (Sahebi *et al.*, 2015). Su movimiento es a través del flujo transpirativo, también conocido como flujo de masas, y su acumulación es dependiente de la tasa transpirativa del órgano (Haynes, 2014). Se ha observado que algunas plantas como el arroz pueden ser bioacumuladoras de silicio (Yamamoto *et al.*, 2012) y otros miembros de la familia Poaceae comparten esta característica (Kido *et al.*, 2015; Van Bockhaven *et al.*, 2013); al parecer, el beneficio de la fertilización con silicio otorga un beneficio extra en la estructura de la planta y producción de biomasa, por lo que no se conoce hasta el momento que el silicio intervenga en funciones celulares y de regulación (Meharg y Meharg, 2015).

4. Absorción de Si en plantas

En el modelo de arroz, el transportador de influjo Lsi1 está localizado en la membrana plasmática en el lado distal de las células de exodermis y endodermis (**Figura 4**). El ácido monosilícico es transportado al exterior de las células a través de transportadores Lsi2, localizados en el lado proximal de estas células (Ma y Yamaji, 2008). La absorción de ácido monosilícico por el transportador Lsi1, es un proceso pasivo, mientras que la conducción realizada por los transportadores Lsi2 es un transporte activo facilitado por bombas de protones dependientes de ATP. Una vez asumido por Lsi1 en exodermis y liberado por Lsi2, el ácido monosilícico se difunde a través del apoplásto del aerénquima. Los transportadores Lsi1 en las células de la endodermis toman el ácido monosilícico del aerénquima y los transportadores Lsi2 realizan la carga a la estela. Una vez dentro del xilema, el ácido monosilícico [Si(OH)₄] se mueve en el flujo transpirativo y se deposita en formas de sílice amorfo, principalmente en el apoplásto de las células de las hojas (Deshmukh y Bélenger, 2016).

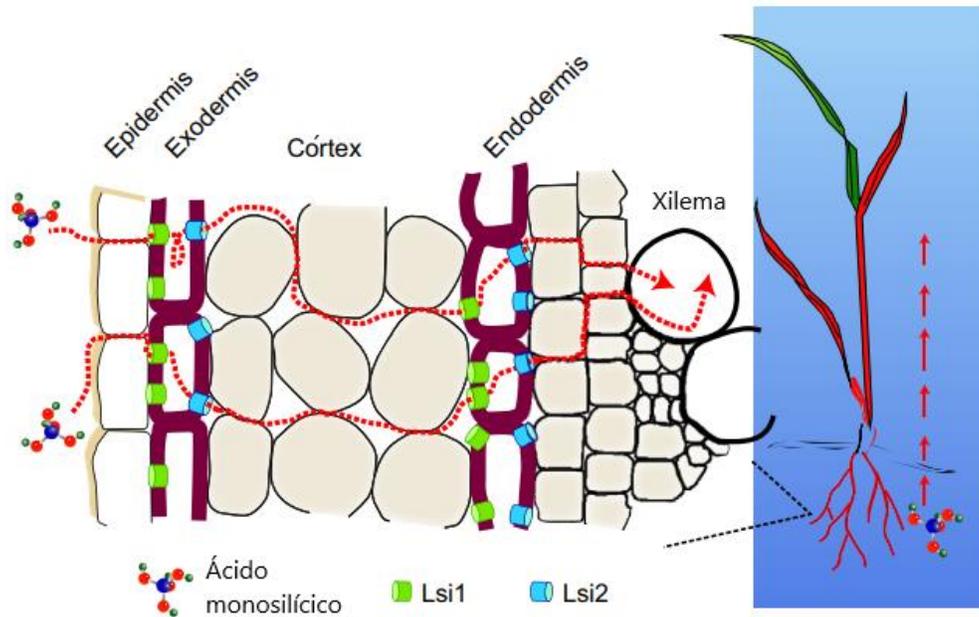


Figura 4. Diagrama de la absorción del Si en raíces de arroz. El silicio en forma de ácido monosilícico entra a las células de la exodermis de raíz a través de transportadores de influjo denominados Lsi1, y sale al córtex a través de transportadores activos denominados Lsi2. En el aerénquima el ácido monosilícico se mueve apoplásticamente hasta llegar a la endodermis, donde los transportadores Lsi1 y Lsi2 realizan la carga de ácido monosilícico a la estela. La línea roja indica el transporte del Si (Deshmukh y Bélenger, 2016).

5. Tolerancia o mitigación de estrés

La tolerancia de los cultivos al estrés se puede mejorar con el uso de distintas sustancias que actúan directamente mitigando estos agobios ya sean bióticos o abióticos; algunos de los biorreguladores importantes en las plantas actúan en bajas concentraciones, para inhibir, promover o modificar la morfología, fisiología y procesos bioquímicos (Olaiya, 2012).

Manteniendo la homeostasis iónica, por absorción de iones y compartimentalización no solo es crucial para el crecimiento normal de la planta, sino también para llevar a cabo procesos esenciales para que los cultivos puedan desarrollarse cuando existe estrés por salinidad (Hasegawa, 2013). Las plantas glicófitas y halófitas independientemente de su naturaleza, no pueden tolerar altas concentraciones de sales en su citoplasma. Por consiguiente, el exceso de sales es, ya sea transportado a la vacuola o secuestrado a tejidos viejos, que eventualmente son sacrificados, protegiendo a la planta del estrés por salinidad (Zhu, 2003).

El rol de las SOS (Salt Overly Sensitive) demuestran la ruta de señalización frente al estrés en la homeostasis iónica y tolerancia a las sales (Hasegawa *et al.*, 2000). La ruta de señalización de las SOS se muestra en la **Figura 5**, y consta principalmente de tres proteínas: SOS1, SOS2 y SOS3. La SOS1 codifica una membrana plasmática Na⁺/H⁺ antiporter, es esencial en la regulación del eflujo de Na⁺ a nivel celular. Esta además facilita el transporte de Na⁺ de raíz a vástago a larga distancia; la sobre expresión de esta proteína provee la tolerancia a sales en plantas (Shi *et al.*, 2002). El gen SOS2 codifica una serina/treonina proteína quinasa, es activado por señales de Ca⁺ en presencia de salinidad; esta proteína consiste en un dominio catalítico N-terminal y un dominio regulatorio C-terminal (Liu *et al.*, 2000). El tercer tipo de proteínas involucradas en la ruta de señalización frente al estrés salino es la SOS3, proteína con unión a Ca⁺ miristoilada la cual contiene un sitio de miristoilación en su extremo N-terminal; este sitio juega un papel esencial en el rol de tolerancia a la salinidad (Ishitani *et al.*, 2000).

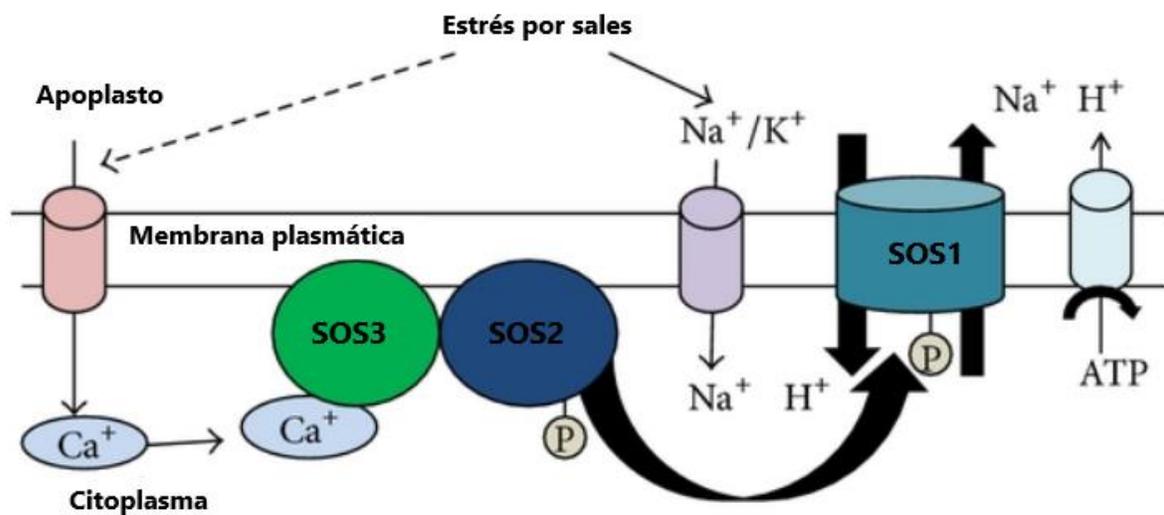


Figura 5. Modelo de la ruta de las SOS como respuesta al estrés por sales (Gupta y Huang, 2014).

Para tratar con la sequía, las plantas superiores involucran distintas estrategias a nivel fisiológico, bioquímico y molecular (Fathi y Tari, 2016), como se muestra en la **Figura 6**. A nivel bioquímico, producen solutos compatibles (v.g. aminoácidos, aminas o glúcidos) para mantener la turgencia de las células, y con esto estabilizar proteínas y la estructura celular (Krasensky y Jonak, 2012). Asimismo, las plantas han desarrollado mecanismos

antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos como defensa para evitar el daño oxidativo y mantener la homeostasis redox (Fang y Xiong, 2015). A nivel molecular, los genes relacionados con la síntesis de osmoprotectantes, enzimas y transportadores detoxificantes, factores de transcripción, proteínas quinasas y fosfatasa son inducidas bajo estrés por sequía (Shinozaki y Yamaguchi-Shinozaki, 2007).

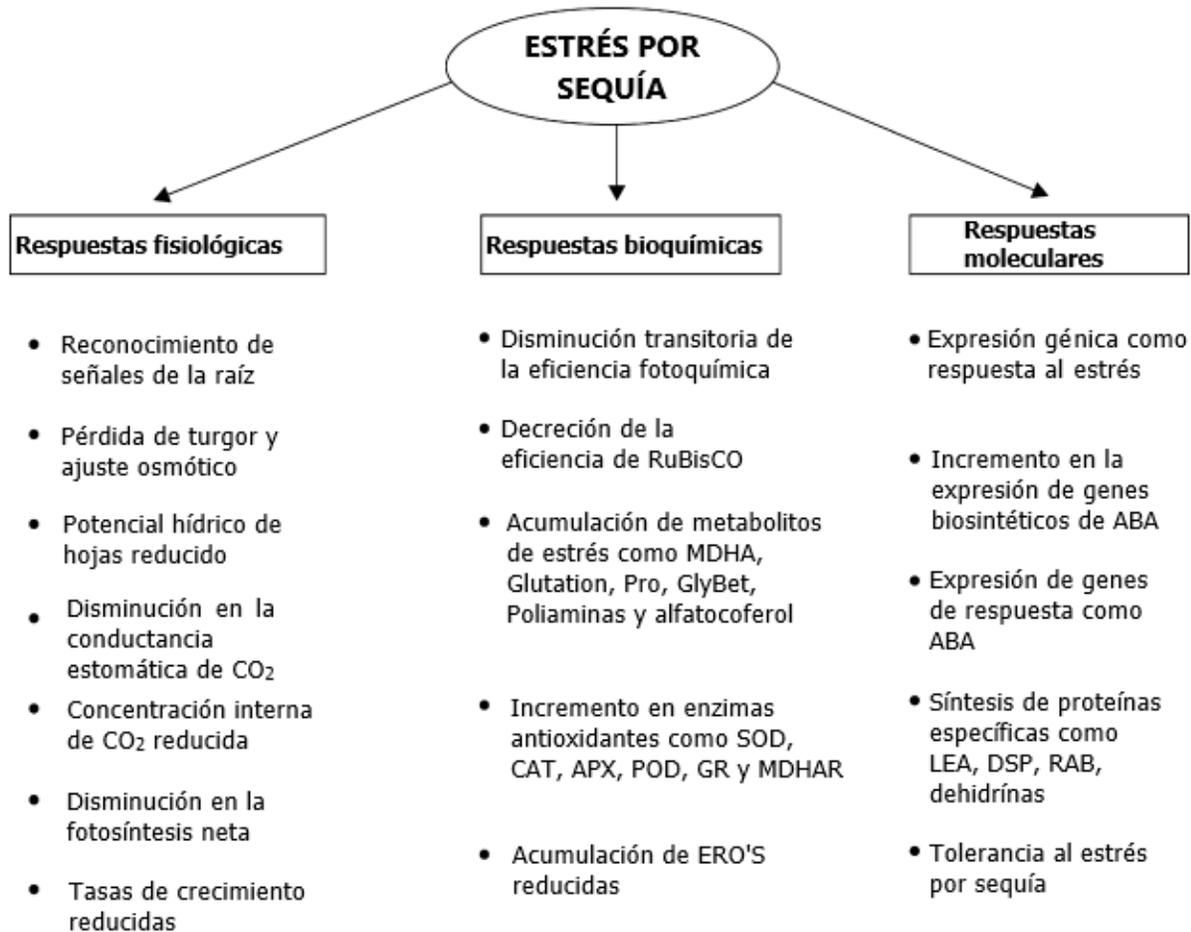


Figura 6. Bases fisiológicas, bioquímicas y moleculares de tolerancia al estrés por sequía en plantas (Shao *et al.*, 2008).

La sequía es uno de los principales factores ambientales que limitan la producción de los cultivos. Las investigaciones describen que la aplicación de Si puede mejorar las propiedades hidráulicas de la planta, incrementando la absorción de agua, pero no disminuyendo la pérdida de agua bajo condiciones de estrés por sequía. En la **Figura 7** se muestran los mecanismos clave involucrados en mejora mediada por Si de la

absorción de agua por la raíz bajo déficit hídrico: (1) mejora en la fuerza motriz osmótica a través del ajuste osmótico activo; (2) mejora en el transporte activo por acuaporinas a nivel transcripcional y postranscripcional; (3) modificación del crecimiento radicular e incremento en la relación vástago/raíz (Chen *et al.*, 2018).

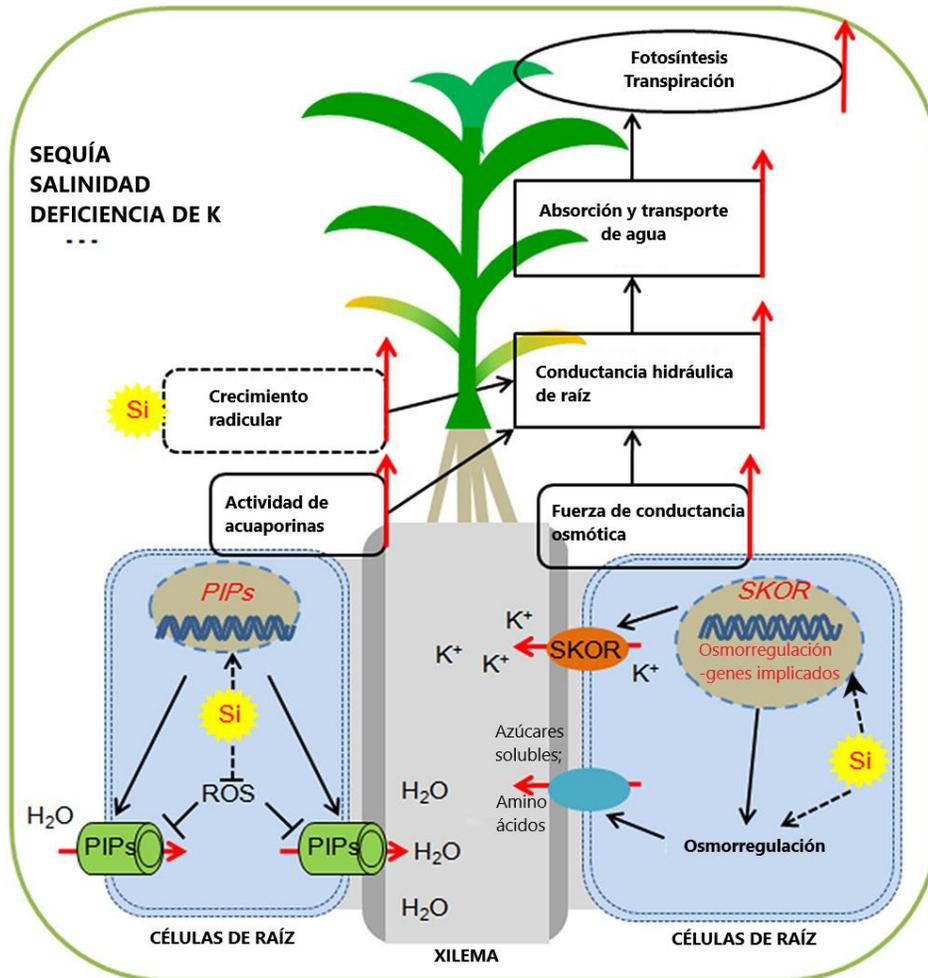


Figura 7. Posibles mecanismos del silicio en la mejora del balance hídrico en las plantas bajo déficit hídrico. (1) El Si mejora la actividad de las acuaporinas regulando positivamente la expresión de los genes de acuaporinas PIP (Plasma membrane Intrinsic Protein), mitigando las especies reactivas de oxígeno (ERO), las cuales inhiben la actividad de acuaporinas. (2) El Si mejora la acumulación de azúcares solubles y/o aminoácidos en la savia del xilema por osmorregulación; además, activa la translocación de K⁺ a la savia del xilema mediante la expresión del gen SKOR (Stelar K⁺ Outward Rectifier). La acumulación de osmolitos en la savia del xilema incrementan la fuerza motriz osmótica. (3) El Si puede ajustar el crecimiento de la raíz e incrementar la relación vástago/raíz, que junto con la mejora en la actividad de acuaporinas y la fuerza motriz osmótica contribuyen a la mejora de la conductancia hidráulica de la raíz. Una alta conductancia hidráulica de raíz tiene como resultado el incremento en la absorción y transporte de agua, lo cual ayuda a mantener una alta tasa fotosintética y mejorar la resistencia de la planta al déficit hídrico (Chen *et al.*, 2018).

Shi *et al.* (2016) mencionan que los efectos del Si no solo incrementan la conductancia estomática, sino también mantiene la integridad de membrana y la protege contra el daño oxidativo, debido a que se incrementa el metabolismo antioxidante. Sin embargo, aunque todavía no se han reportado datos sobre su mecanismo de acción, el hecho que diversos autores han mencionado que las relaciones de agua en planta se mejoran con la adición de Si, respalda la noción de que las acuaporinas y las señales hidráulicas están involucradas (Rios *et al.*, 2017), como se muestra en la **Figura 8**.

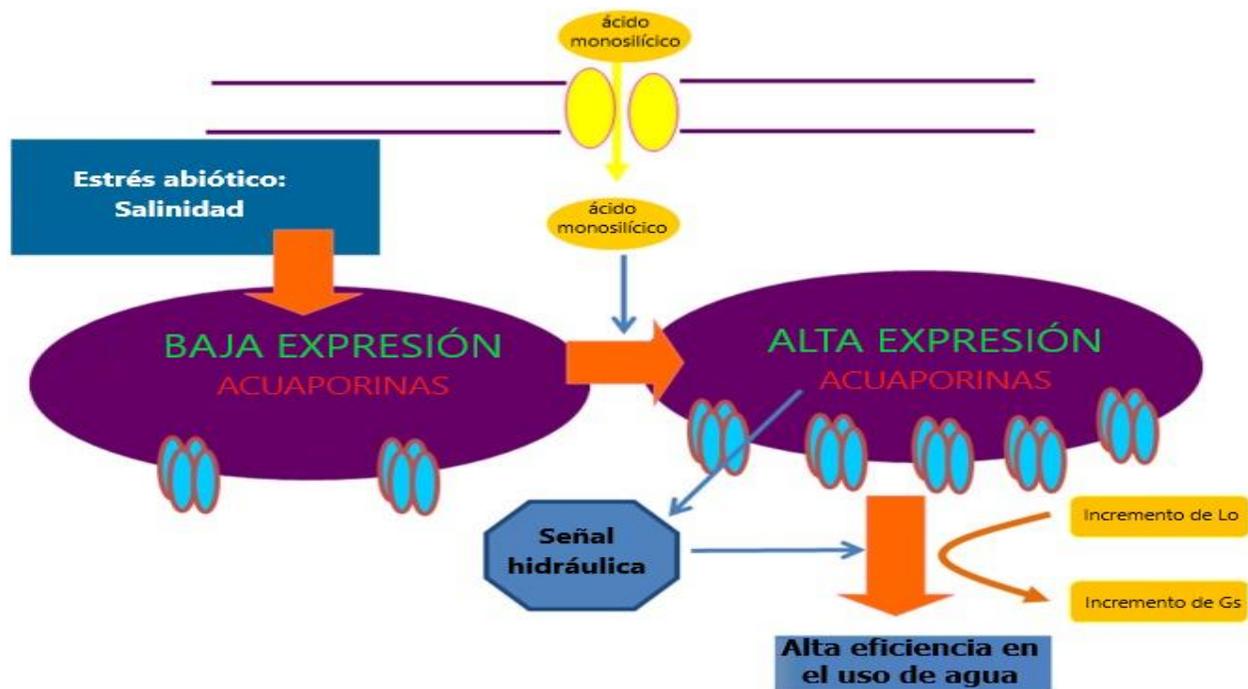


Figura 8. Bajo estrés por salinidad, se ha reportado que el Si mejora el funcionamiento de estomas y la conductancia hidráulica. El mecanismo fisiológico puede involucrar señalización hidráulica a través de expresión de acuaporinas, llevando a una alta eficiencia en el uso del agua. Lo: conductancia hidráulica de raíz; Gs: conductancia estomática (Rios *et al.*, 2017).

6. Literatura citada

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

- Chen D, Wang S, Yin L, Deng X. 2018. How Does Silicon Mediate Plant Water Uptake and Loss Under Water Deficiency? *Front Plant Sci* 9:281. DOI: 10.3389/fpls.2018.00281
- Davies PJ. 2010. The plant hormones: their nature, occurrence, and functions. *Plant Hormones* 1-15. DOI: 10.1007/978-1-4020-2686-7_1
- Deshmukh R, Bélanger RR. 2016. Molecular evolution of aquaporins and silicon influx in plants. *Funct Ecol* 30: 1277-1285. DOI: 10.1111/1365-2435.12570
- Fang Y, Xiong L. 2015. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cell Mol Life Sci: CMLS* 72: 673-689. DOI: 10.1007/s00018-014-1767-0
- FAO. 2018a. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT, Food Supply-2013. Consultado: 15 agosto de 2018. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CC>
- FAO. 2018b. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT, Crops-2016. Consultado: 17 agosto de 2018. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron Sustain Dev* 29: 185-212. DOI: 10.1051/agro:2008021
- Fathi A, Tari DB. 2016. Effect of drought stress and its mechanism in plants. *Int J Life Sci* 10: 1-6. DOI: 10.3126/ijls.v10i1.14509
- Gupta B, Huang B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *Int J Genomics*. ID: 701596, 18p. DOI: 10.1155/2014/701596
- Hasegawa PM, Bressan RA, Zhu JK, Bohnert HJ. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 51: 463-499. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.463
- Hasegawa PM. 2013. Sodium (Na⁺) homeostasis and salt tolerance of plants. *Environ Exp Bot* 92: 19-31. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2013.03.001
- Haynes R. 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *J. Plant Nutr Soil Sci* 177: 831–844. DOI: 10.1002/jpln.201400202

- Ishitani M, Liu J, Halfter U, Kim CS, Shi W, Zhu JK. 2000. SOS3 function in plant salt tolerance requires N-myristoylation and calcium binding. *Plant Cell* 12: 1667-1677.
- Jogaiah S, Govind SR, Tran LSP. 2013. Systems biology-based approaches toward understanding drought tolerance in food crops. *Crit Rev Biotech* 33: 23-29. DOI: 10.3109/07388551.2012.659174
- Khajeh-Hosseini M, Powell AA, Bingham IJ. 2003. The interaction between salinity stress and seed vigor during germination of soybean seeds. *Seed Sci Technol* 31: 715-725. DOI: 10.15258/sst.2003.31.3.20
- Kido N, Yokoyama R, Yamamoto T, Furukawa J, Iwai H, Satoh S, Nishitani K. 2015. The matrix polysaccharide (1;3,1;4)-beta-D-glucan is involved in silicon-dependent strengthening of rice cell wall. *Plant Cell Physiol* 56: 268-276 DOI:10.1093/pcp/pcu162
- Krasensky J, Jonak C. 2012. Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks. *J Exp Bot* 63: 1593-1608. DOI: 10.1093/jxb/err460
- Liu J, Ishitani M, Halfter U, Kim CS, Zhu JK. 2000. The *Arabidopsis thaliana* SOS2 gene encodes a protein kinase that is required for salt tolerance. *Proc Natl Acad Sci U S A* 97: 3730-3734. DOI: 10.1073/pnas.060034197
- Ma J, Yamaji N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cell Mol Life Sci* 65: 3049-3057. DOI: 10.1007/s00018-008-7580-x
- Ma JF, Yamaji N. 2015. A cooperated system of silicon transport in plants. *Trends Plant Sci* 20:1-8. DOI: 10.1016/j.tplants.2015.04.007
- Mano Y, Nakazumi H, Takeda K. 1996. Varietal variation in effects of some major genes on salt tolerance at the germination stage in barley. *Breed Sci* 46: 227-233.
- Meharg C, Meharg AA. 2015. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? *Env Exp Bot* 120: 8-17. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.07.001 0098-8472/ã 2015
- Menezes-Benavente L, Kernodle SP, Margis-Pinheiro M, Scandalios JG. 2004. Salt-induced antioxidant metabolism defenses in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Redox Rep* 9:29-36. DOI: 10.1179/135100004225003888

- Munns R. 1993. Physiological processes limiting growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ* 16:15-24. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1993.tb00840.x
- Munns R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytol* 167: 645-663. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x
- Nuss ET, Tanumihardjo SA. 2010. Maize: a paramount staple crop in the context of global nutrition. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 9: 417-436. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00117.x
- Olaiya CO. 2010. Presowing Bioregulator Seed Treatments Increase the Seedling Growth and Yield of Tomato (*Solanum lycopersicon*). *J Plant Growth Regul* 29: 349-356. DOI: 10.1007/s00344-010-9142-3
- Rhodes D, Nadolska-Orczyk. 2001. Plant stress physiology. eLS Nature publishing group. 1-7. DOI: 10.1038/npg.els.0001297
- Rios JJ, Martínez-Ballesta MC, Ruiz JM, Blasco B, Carvajal M. 2017. Silicon-mediated improvement in plant salinity tolerance: the role of aquaporins. *Front Plant Sci* 8: 948. DOI: 10.3389/fpls.2017.00948
- 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
- Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, Zhao CX. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C R Biol* 331: 215-225. DOI: 10.1016/j.crv.2008.01.002
- Shi H, Quintero FJ, Pardo JM, Zhu JK. 2002. The putative plasma membrane Na⁺/H⁺ antiporter SOS1 controls long-distance Na⁺ transport in plants. *Plant Cell* 14: 465-477. DOI: 10.1105/tpc.010371
- Shi Y, Zhang Y, Han W, Feng R, Hu Y, Guo J, Gong H. 2016. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Front Plant Sci* 7:196 DOI: 10.3389/fpls.2016.00196
- Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. 2007. Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *J Exp Bot* 58: 221-227. DOI: 10.1093/jxb/erl164

- Sommer M, Kaczorek D, Kuzyakov Y, Breuer J. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes-a review. *J Plant Nutr Soil Sci* 169: 310-329. DOI: 10.1002/jpln.200521981
- Sümer A, Zörb C, Yan F, Schubert S. 2004. Evidence of sodium toxicity for the vegetative growth of maize (*Zea mays* L.) during the first phase of salt stress. *J Appl Bot* 78:135-139.
- Sümer A, Zörb C, Yan F, Schubert S. 2004. Evidence of sodium toxicity for the vegetative growth of maize (*Zea mays* L.) during the first phase of salt stress. *J Appl Bot* 78:135-139.
- Tester M, Langridge P. 2010. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Sci* 327: 818-822. DOI: 10.1126/science.1183700
- Vallejo B, Alvarado-Ochoa SP. 2011. Rol del silicio en la fertilidad de los suelos y la nutrición vegetal. <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2499/1/iniapscR2011p1-14.pdf>
- Van Bockhaven J, De Vleeschauwer D, Hofte M. 2013. Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. *J Exp Bot* 64: 1281-1293. DOI: 10.1093/jxb/ers329
- Verslues PE, Juenger TE. 2011. Drought, metabolites, and *Arabidopsis* natural variation: a promising combination for understanding adaptation to water-limited environments. *Curr Opin Plant Biol* 14: 240-245. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.04.006
- Wang W, Vinocur B, Altman A. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta* 218: 1-14. DOI: 10.1007/s00425-003-1105-5
- Xue D, Huang Y, Zhang X, Wei K, Westcott S, Li C, Chen M, Zhang G, Lance R. 2009. Identification of QTL associated with salinity tolerance at late growth stage in barley. *Euphytica* 169: 187-196. DOI: 10.1007/s10681-009-9919-2
- 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

- Yamamoto T, Nakamura A, Iwai H, Ishii T, Ma JF. 2012. Effect of silicon deficiency on secondary cell wall synthesis in rice leaf. *J Plant Res* 125: 771-779. DOI: 10.1007/s10265-012-0489-3
- Zhu JK. 2003. Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Curr Opin Plant Biol* 6: 441-445. DOI: 10.1016/S1369-5266(03)00085-2

CAPÍTULO I. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS POR SALINIDAD EN GERMINACIÓN Y PLÁNTULAS DE MAÍZ

RESUMEN

La salinidad del suelo es uno de los principales factores que restringen la producción agrícola, dado que retrasa el crecimiento y desarrollo de los cultivos. El silicio (Si) es un elemento “cuasi-esencial” que puede detonar mecanismos de tolerancia a la salinidad. En este estudio se evaluó el uso del silicio en la mitigación de los efectos negativos que causa la salinidad en la germinación de semillas de maíz y crecimiento inicial de plántulas. Se establecieron 12 tratamientos con 4 repeticiones cada uno y 10 semillas por repetición. La semilla de maíz se sometió a imbibición con 0.0, 1.5 y 3.0 mM de dióxido de silicio (SiO_2) por 12 h. Posteriormente las semillas se colocaron sobre papel filtro en un contenedor de plástico (12 x 11 x 7 cm), y se suministraron los niveles de NaCl: 0, 80, 160 y 240 mM. Los contenedores se incubaron en una cámara de germinación en oscuridad a 25 °C durante 5 días y en intervalos de 24 h se midieron las variables: porcentaje de peso ganado en la semilla en la imbibición, altura, longitud de raíz, variables de germinación y biomasa seca. La imbibición con 3 mM Si incrementó el porcentaje en el peso de la semilla de manera significativa, respecto al testigo. El tratamiento 1.5 mM Si aumentó el coeficiente de velocidad de germinación en semillas tratadas con 80 y 160 mM NaCl. El Si redujo el impacto negativo de los niveles de NaCl 80 y 160 mM en el crecimiento de la radícula. Con 0 y 80 mM NaCl, el Si (1.5 y 3 mM) incrementó significativamente el crecimiento del vástago. El tratamiento con 1.5 y 3 mM Si en la imbibición, redujo el impacto negativo en la biomasa seca de vástago causado por 80 mM NaCl.

Palabras clave: *Zea mays* L.; Dióxido de silicio; Salinidad; Elementos benéficos

1.1. INTRODUCCIÓN

El inicio del siglo XXI está caracterizado por la escasez global del recurso agua, contaminación ambiental y un incremento en la salinización de los suelos y del agua (Shahbaz y Ashraf, 2013). La salinidad del suelo es uno de los factores abióticos que

restringen severamente el crecimiento de los cultivos y comprometen el desarrollo de la agricultura sustentable a nivel mundial (Zhu y Gong, 2014), dado que incrementa el potencial osmótico de las plantas e interfiere con la nutrición de las mismas. Una alta concentración de sales en la solución del suelo reduce la capacidad de las plantas para absorber agua (Munns *et al.*, 2002). Por otra parte, el silicio es un elemento “cuasi-esencial” que ejerce efectos benéficos en el desarrollo y producción de las plantas mitigando los efectos negativos causados por factores de estrés biótico y abiótico, entre ellos la salinidad (Ma y Yamaji, 2008). El silicio aumenta de manera significativa el crecimiento de muchas especies de plantas a través del incremento de la actividad fotosintética, área foliar y contenido de clorofila, y mejora la estructura del cloroplasto en plantas que presentan estrés por sales (Soundararajan *et al.*, 2013). El maíz es un cultivo que se siembra en una gran diversidad de tipos de suelo, así como también en distintas condiciones climáticas. Este cultivo es moderadamente sensible a la salinidad, aunque altas concentraciones de sales en los suelos son un grave problema a nivel mundial (Farooq *et al.*, 2015). En el año 2016, en el país se sembraron 7,761,216 hectáreas de maíz durante los dos ciclos de producción que corresponden a primavera-verano y otoño-invierno, generando un valor de producción de 99,737 millones de pesos (SIAP, 2017). En contexto, esta investigación tuvo por objetivo evaluar el efecto del Si en la mitigación de los efectos negativos causados por la salinidad durante la fase de germinación en maíz blanco híbrido SB-308.

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1. Ubicación del experimento y material vegetal

El presente estudio se realizó en condiciones controladas usando una cámara de crecimiento (Thermo Scientific, Prevision, USA), a una temperatura de 25 °C. Se emplearon semillas de maíz (*Zea mays* L.) blanco híbrido SB-308 de la casa comercial Berentsen. Este híbrido es de los más utilizados por productores del Estado de México, debido a que tiene un buen desarrollo en valles altos, y además tiene un bajo costo de adquisición en el mercado.

1.2.2. Tratamientos y diseño experimental

Se realizó un experimento factorial 3 x 4, donde los factores fueron el Si y la salinidad. La fuente de Si fue el SiO₂ (Sigma-Aldrich®) y los niveles de éste fueron 0.0, 1.5 y 3.0 mM. Es pertinente indicar que, en este caso, se obtuvieron suspensiones y no soluciones, dada la baja solubilidad del SiO₂. La salinidad fue representada como la concentración de NaCl (Reactivos Química Meyer®) en los niveles: 0, 80, 160 y 240 mM. Los 12 tratamientos resultantes fueron distribuidos completamente al azar dentro de la cámara de crecimiento (Thermo Scientific, Prevision, USA). Las unidades experimentales fueron cajas de polietileno (PET) de 12 x 11 x 7 cm, se utilizaron 10 semillas por repetición y cada tratamiento tuvo 4 repeticiones.

1.2.3. Aplicación de tratamientos

Las semillas divididas en tres grupos se sometieron a imbibición en las diferentes concentraciones de SiO₂ por 12 h. Debido a que el SiO₂ presenta una baja solubilidad, durante la imbibición las suspensiones se mantuvieron en parrillas con agitación magnética (Corning, PC-620D, México). Transcurrido el tiempo de imbibición las semillas se colocaron en grupos de 10 sobre papel filtro dentro de cada caja Petri. En cada unidad experimental se adicionaron 20 mL de las soluciones correspondientes a los tratamientos con NaCl y se introdujeron en una cámara de germinación antes indicada, a 25 °C en oscuridad. Transcurridas 48 h se adicionaron 5 mL más de las soluciones salinas; así, las cajas Petri se sacaron de la cámara de germinación y se mantuvieron a temperatura ambiente.

1.2.4. Variables evaluadas

Una de las variables evaluadas, fue el incremento del peso de la semilla durante imbibición; para el cual, se registró el peso de la semilla antes y después de someterse a imbibición.

Las evaluaciones de germinación se realizaron cada 24 h durante 5 días (120 h), transcurridos los 5 días se midió altura de planta y longitud de raíz utilizando un programa de análisis de imágenes "Imagej" ([Imagej, 2017](#)).

Dentro de los parámetros relacionados con la germinación se evaluaron:

Cinética de germinación. La germinación de las semillas se registró cada 24 h y hasta que el valor de ésta fue constante en cada tratamiento. Las semillas fueron consideradas germinadas cuando la radícula emergió aproximadamente 2 mm (Sharma y Sharma 2010).

Porcentaje de germinación total (PGT). El porcentaje de germinación total (PGT) consideró al valor máximo de germinación alcanzado en la cinética (valor constante), fórmula empleada por Al-Mudrais (1998) de la siguiente manera:

$$PGT = \frac{\text{Semillas germinadas}}{\text{Semillas totales}} \times 100$$

Coefficiente de velocidad de germinación (CVG). El coeficiente de velocidad de germinación (CVG) se estimó empleando la fórmula descrita por Maguire (1962):

$$CVG = \frac{\text{Número total de semillas germinadas por caja}}{A_1T_1 + A_2T_2 + A_xT_x}$$

Donde A= El número de semillas emergidas en un número de días en particular, los números 1, 2,.....x son el número respectivo de semillas germinadas por cada respectivo día después del inicio de la incubación.

Índice de germinación (IG). El índice de germinación se calculó utilizando la fórmula descrita por Maguire (1962):

$$IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

Dónde: PRG es el porcentaje de semillas germinadas en el tratamiento con respecto al control; CRR es el crecimiento relativo de radícula.

El porcentaje de germinación relativo (PGR), crecimiento relativo de radícula (CRR) y crecimiento relativo de vástago (CRV) de calcularon utilizando las fórmulas empleadas por Tam y Tiquia (1994).

Porcentaje de germinación relativo (PGR). El porcentaje de germinación relativo se estimó con la siguiente fórmula:

$$PGR = \frac{\text{Semillas germinadas en el tratamiento}}{\text{Semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

Crecimiento relativo de radícula (CRR). El crecimiento relativo de radícula se calculó con la siguiente fórmula:

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en semillas tratadas}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}} \times 100$$

Crecimiento relativo de vástago (CRV). El crecimiento relativo del vástago se evaluó utilizando la siguiente fórmula:

$$CRV = \frac{\text{Longitud de vástago en semillas tratadas}}{\text{Longitud de vástago en el testigo}} \times 100$$

Pesos de raíz y vástagos secos. Transcurridos 5 días se separaron vástagos y raíces de cada caja en grupos de 10. Se colocaron en bolsas de papel y se secaron a 70 °C durante 48 h y posteriormente se determinó el peso en una balanza analítica. Para la toma de pesos se incluyó el grano en el peso de la raíz, y el peso del vástago se tomó por separado.

1.2.5. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de la diferencia mínima significativa (LSD) al nivel de probabilidad 0.05 para cada parámetro con el paquete estadístico SAS Institute Inc. (SAS, 2011).

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.3.1. Incremento porcentual de peso en semilla de maíz después de 12 h de imbibición

La primera fase en el proceso de germinación es la imbibición, la cual comprende el proceso inicial de absorción de agua por la semilla (Jorgensen y Chesser, 2000), mismo que ocurre debido al gradiente de potencial hídrico entre la semilla sin humedad y el ambiente exterior (Nonogaki *et al.*, 2010). Transcurrido el tiempo de imbibición, el

incremento porcentual en el peso de las semillas fue estadísticamente diferentes entre los tratamientos con Si (LSD \leq 0.05). El tratamiento con 3 mM Si registró el mayor porcentaje de peso, con respecto al testigo, como se puede observar en la **Figura 1.1**. Esta mayor absorción de agua durante la imbibición se debe particularmente a las acuaporinas (proteínas intrínsecas de membrana), las cuales regulan positivamente la entrada de agua a la célula (Liu *et al.*, 2013). Rios *et al.* (2017) mencionan que el silicio puede participar en la señalización hidráulica mediante la expresión de acuaporinas logrando un mayor uso eficiente del agua.

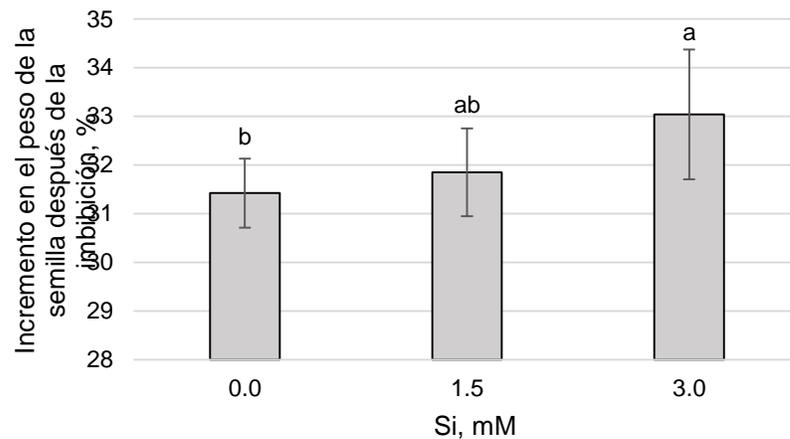


Figura 1.1. Incremento porcentual del peso de semillas de maíz después de 12 h de imbibición en soluciones con diferentes concentraciones de Si. Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.2. Longitud de radícula

La longitud de radícula tuvo diferencias significativas (LSD \leq 0.05) entre los tratamientos. En la **Figura 1.2A** se muestra que el tratamiento con 3.0 mM Si incrementó en 13.6% la longitud de radícula, en comparación con el testigo. En *Borage officinalis* L. dosis de silicio mayores a 1.5 mM redujeron la longitud radicular (Torabi *et al.*, 2012). En la **Figura 1.3** es evidente el efecto positivo del Si en el crecimiento de la radícula. Por otra parte, se observa que la longitud de la radícula guarda una relación negativa con los niveles de NaCl (**Figura 1.2B**). La reducción en la longitud de la radícula de las plántulas de maíz bajo condiciones de estrés salino, se relaciona con diversos factores fisiológicos, como lo son el estrés osmótico y toxicidad por iones, causados por la acumulación de sales en la planta (Sidari *et al.*, 2007).

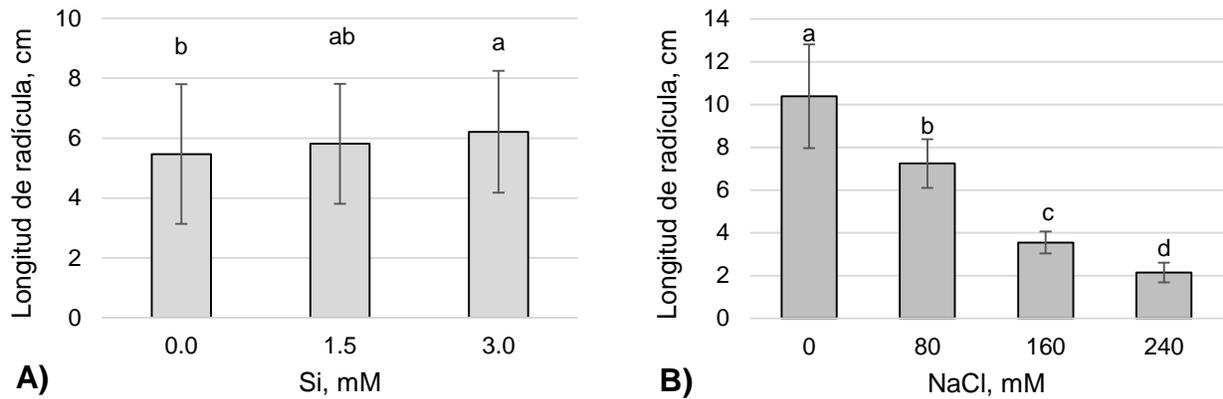


Figura 1.2. Longitud de radícula de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con NaCl durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

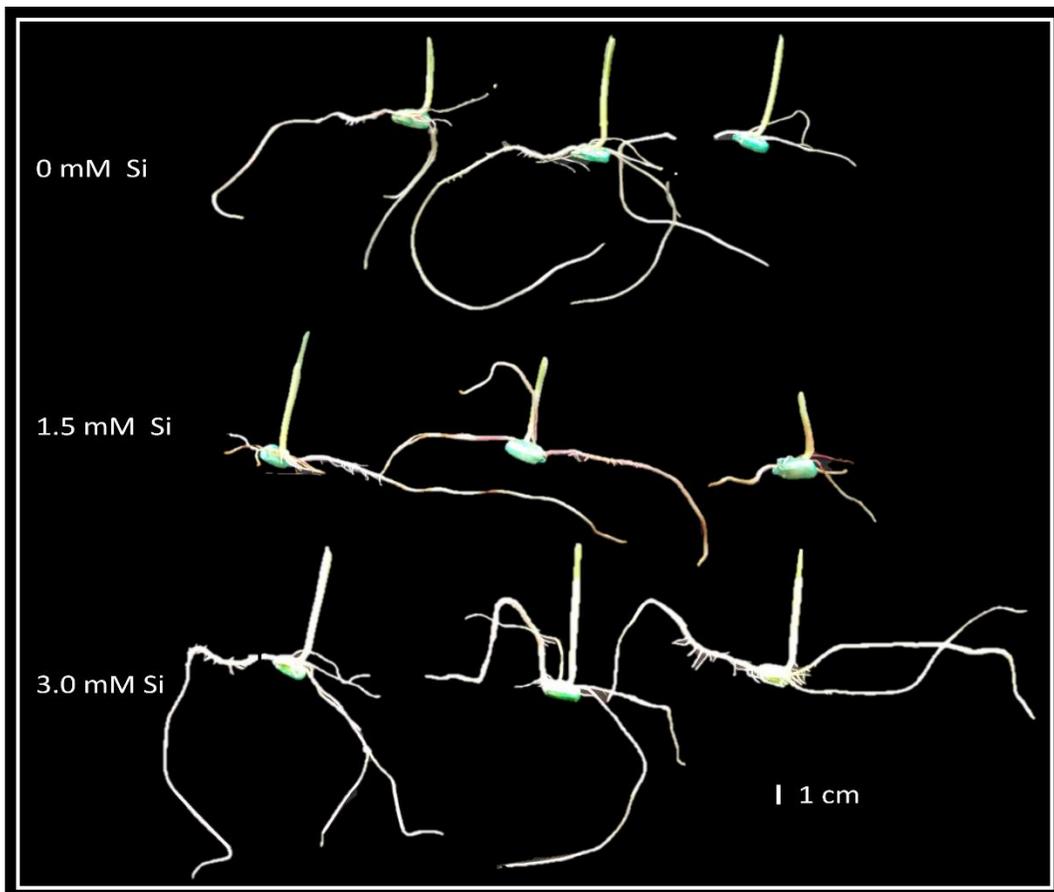


Figura 1.3. Efecto del silicio en el desarrollo temprano de plántulas de maíz sin estrés salino, cinco días después del periodo de imbibición.

Los efectos de la interacción de los factores de estudio (Si y NaCl) en la longitud de radícula se muestran en el **Cuadro 1.1**. La longitud de radícula aumentó conforme se incrementó la dosis de Si en los niveles de 0 a 160 mM de NaCl; sin embargo, no hay diferencias estadísticas significativas entre niveles iguales de salinidad con diferente dosis de Si. [Lee et al. \(2010\)](#) realizaron un estudio en soya (*Glycine max* L.) y encontraron que el Si aumenta el tamaño de la radícula, pero conforme se le va suministrando las dosis de salinidad, el crecimiento de la radícula se inhibe.

Cuadro 1.1. Efecto de la interacción de los factores de estudio en la longitud de raíz de plántulas de maíz.

Si, mM (durante la imbibición)	NaCl, mM (durante la germinación)	Longitud de radícula, cm
0.0	0	9.69 ± 3.36 a
0.0	80	6.78 ± 1.18 b
0.0	160	3.18 ± 0.59 c
0.0	240	2.22 ± 0.63 c
1.5	0	9.97 ± 2.29 a
1.5	80	7.40 ± 1.06 b
1.5	160	3.75 ± 0.53 c
1.5	240	2.12 ± 0.39 c
3.0	0	11.51 ± 1.20 a
3.0	80	7.56 ± 1.21 b
3.0	160	3.71 ± 0.40 c
3.0	240	2.07 ± 0.31 c

Medias ± DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.3. Altura de plántula

La altura de las plántulas de maíz no tuvo diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) entre tratamientos de Si (**Figuras 1.3 y 1.4A**). Por el contrario, el efecto principal del NaCl fue significativo (**Figura 1.4B**), observándose inhibición del crecimiento a medida que la concentración de NaCl incrementa. [Munns y Teser \(2008\)](#) argumentan que la reducción obtenida en la altura de las plántulas de maíz bajo condiciones de salinidad se atribuye a la baja disponibilidad de agua y/o toxicidad por cloruro de sodio. El estrés por salinidad afecta el desarrollo de las plantas de maíz, aunque la respuesta de las plantas varía según el nivel de estrés y la etapa del cultivo, siendo las etapas tempranas más susceptibles a daños por salinidad ([Sümer et al., 2004](#)). [Farsiani y Ghobadi \(2009\)](#)

evaluaron el efecto de la salinidad en el cultivo de maíz y obtuvieron una disminución significativa en la altura de la plántula bajo estrés salino, por lo que argumentan que el maíz es un cultivo sensible a la salinidad.

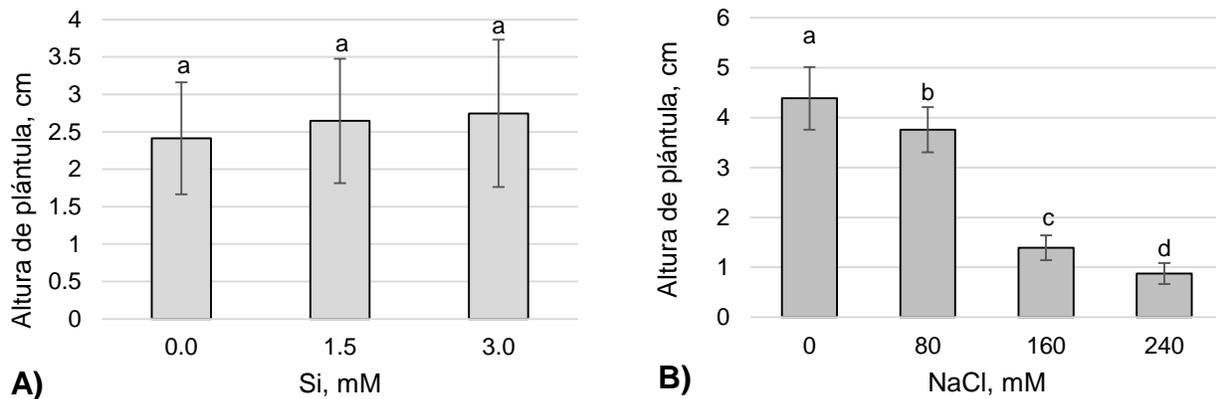


Figura 1.4. Altura de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con NaCl durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

La mayor altura de plántula fue registrada en el tratamiento con 3 mM Si sin estrés salino; mientras que las menores en los tres tratamientos con 240 mM NaCl, independientemente de la dosis de Si (**Cuadro 1.2**). [Haghighi et al. \(2012\)](#) realizaron un estudio en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y obtuvieron un decremento en el tamaño del vástago bajo influencia de salinidad y silicio. Estos resultados coinciden con los aquí obtenidos, el efecto conjunto de Si y NaCl no fue positivo para la altura de la plántula. [Epstein \(1999\)](#) menciona que el incremento en la altura de la plántula lo atribuye a que el silicio realiza cambios bioquímicos y morfológicos en la planta, lo cual se relaciona a su efecto positivo suministrado sin condiciones de estrés.

Cuadro 1.2. Efecto de la interacción de los factores de estudio en la altura de plántulas de maíz.

Si, mM (durante imbibición)	NaCl, mM (durante la germinación)	Altura de plántula, cm
0.0	0	3.83 ± 0.54 bc
0.0	80	3.51 ± 0.47 c
0.0	160	1.40 ± 0.24 d
0.0	240	0.90 ± 0.23 de
1.5	0	4.31 ± 0.42 b
1.5	80	4.01 ± 0.30 bc
1.5	160	1.44 ± 0.27 d
1.5	240	0.81 ± 0.20 e
3.0	0	5.01 ± 0.76 a
3.0	80	3.73 ± 0.55 c
3.0	160	1.32 ± 0.23 de
3.0	240	0.90 ± 0.22 de

Medias ± DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.4. Variables de germinación

1.3.4.1. Porcentaje total de germinación (PTG)

El porcentaje total de germinación no fue influenciado por los niveles de Si evaluados (**Figura 1.5A**), ni por los niveles de NaCl (**Figura 1.5B**). [Shi et al. \(2014\)](#) estudiaron el porcentaje total de germinación en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) con aplicación de metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) a una concentración de 0.5 mM y no obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, lo cual concuerda con los obtenidos en este estudio. Por otra parte, [Wang et al. \(2010\)](#) reportaron una disminución en el porcentaje total de germinación, ya que conforme aumentó el nivel de NaCl en melón amargo (*Momordica charantia*), dentro de sus tratamientos de salinidad, se observó un aumento en porcentaje total de germinación con la dosis de silicio 2 mM. La interacción de los factores de estudio en el porcentaje de germinación total se muestra en el **Cuadro 1.3**. Se observa que hay decremento significativo (LSD, 0.05) en el porcentaje total de germinación, en la dosis 3 mM de silicio con los niveles 160 y 240 mM de salinidad. [Zhang et al. \(2015\)](#) encontraron beneficios en la aplicación de Si, bajo estrés por salinidad en germinación en *Glycyrrhiza uralensis*, y mencionan que los efectos positivos se presentan, en distintas dosis de silicio en los diferentes niveles de salinidad.

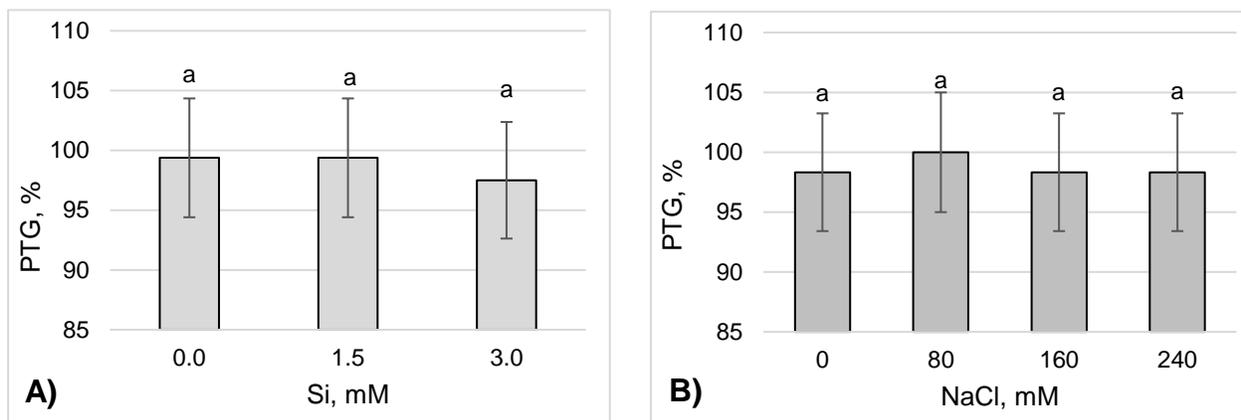


Figura 1.5. Porcentaje total de germinación (PTG) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con NaCl durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.4.2. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)

El coeficiente de velocidad de germinación se encuentra estrechamente relacionado con la energía de germinación, la cual es un parámetro que indica el vigor de la semilla (Ahmad, 2001). De acuerdo con Kotowski (1926), el valor del CVG aumenta cuando el número de plántulas se incrementa.

En el CVG no se registraron diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) en las distintas dosis de silicio, como se puede observar en la **Figura 1.6A**. En los distintos niveles de NaCl se encontró que conforme aumenta el nivel de salinidad la germinación de la semilla se retarda (**Figura 1.6B**). Aliu *et al.* (2015) reportaron un retraso en la germinación de semillas de maíz conforme el nivel de salinidad va aumentando. Machado y Serralheiro (2017) atribuyen este retraso en la germinación a que la salinidad aumenta la presión osmótica y por consecuencia la semilla tarda más tiempo en absorber agua. Liu *et al.* (2013) mencionan que el silicio participa en la expresión de acuaporinas, las cuales regulan positivamente la absorción de agua a la planta.

Bajo condiciones salinas a niveles de 80 y 160 mM NaCl, el coeficiente de velocidad de germinación fue significativamente mayor ($LSD, 0.05$) en semillas tratadas previamente con Si, tanto con 1.5 como con 3 mM; en comparación con aquellas no tratadas con Si

(Cuadro 1.3). Misra y Dwivedi (2004), mencionan que la salinidad afecta severamente la germinación, retrasándola más aun conforme se aumenta el nivel de NaCl.

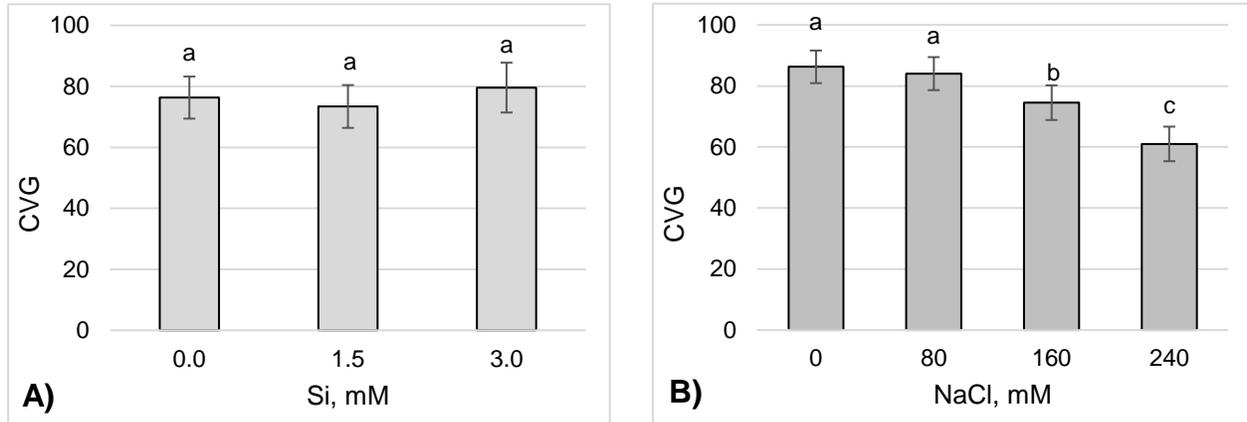


Figura 1.6. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG) de semillas de maíz imbibidas con distintas concentraciones de silicio por 12 h (A), y NaCl durante germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.4.3. Porcentaje de germinación relativa (PGR)

El porcentaje de germinación relativa no tuvo diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) entre tratamientos de Si (Figura 1.7A). De la misma manera, entre los niveles de NaCl tampoco registró diferencias significativas (Figura 1.7B). Li (2008) al evaluar seis niveles de NaCl (0, 50, 100, 200, 400 y 600 mM) en tres plantas tolerantes a salinidad, registraron un decremento a medida que se incrementa el nivel de salinidad. Estos resultados difieren a los obtenidos en nuestro estudio debido a que no se observó disminución en el porcentaje de germinación relativa conforme aumenta el nivel de salinidad.

Niveles altos de salinidad (160 y 240 mM NaCl) redujeron significativamente el porcentaje de germinación relativa en semillas tratadas con 3 mM Si, respecto a las no tratadas y a aquellas tratadas con 1.5 mM Si (Cuadro 1.3). Ali *et al.* (2009) indican que los beneficios de la aplicación de Si bajo estrés salino, se presentan, en distintas dosis para cada una de las diferentes especies.

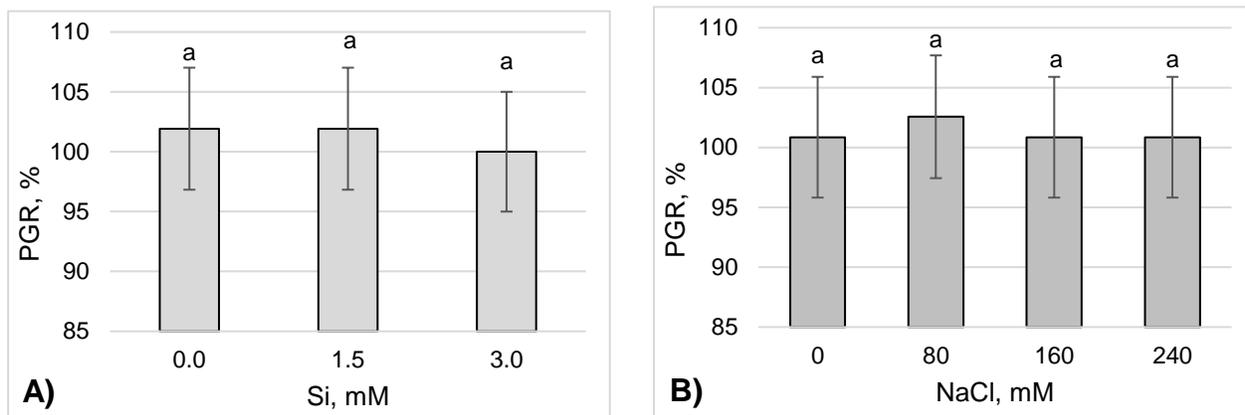


Figura 1.7. Porcentaje de germinación relativa (PGR) de semillas de maíz tratadas con diferentes concentraciones de silicio en imbibición (A) y con NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.4.4. Crecimiento relativo de radícula (CRR)

El crecimiento relativo de radícula no presentó diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) en los tratamientos con Si (**Figura 1.8A**), pero sí mostró un decremento significativo conforme la concentración de NaCl se incrementó (**Figura 1.8B**). El crecimiento de la raíz en fase de germinación, es drásticamente inhibido conforme se eleva el nivel de salinidad (Parvaiz y Satyawati, 2008). Andreu *et al.* (2011) reportan una disminución en el crecimiento relativo de raíz en presencia de salinidad en distintas especies de *Prunus*. Munns *et al.* (1993) reportan un modelo bifásico de salinidad el cual se basa en una reducción del crecimiento de las plantas; inicia con un estrés osmótico en la primera fase, seguido de una toxicidad por iones durante la segunda; estos dos periodos son los responsables del decremento en el desarrollo de los cultivos, específicamente en cereales.

El tratamiento de las semillas con Si durante la imbibición, no mitigó los efectos negativos de las concentraciones de NaCl en el crecimiento de la raíz (**Cuadro 1.3**). Vaculik *et al.* (2012) realizaron un estudio en maíz, y evaluaron el efecto del silicio en la mitigación de estrés por cadmio (Cd), obtuvieron que el Si efectivamente reduce el estrés por Cd y en ausencia de Cd el silicio incrementa de manera significativa el crecimiento de raíz. Sin embargo, en nuestro estudio el silicio no afectó esta variable.

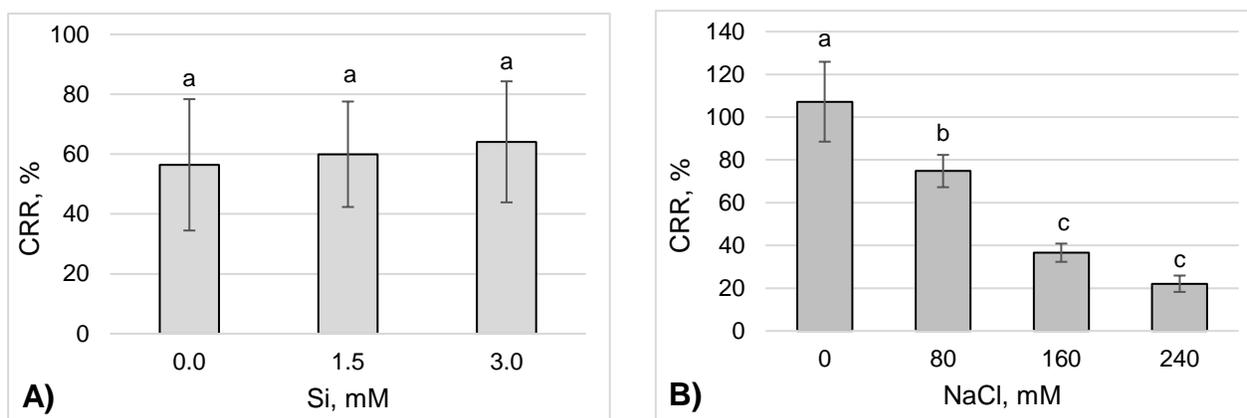


Figura 1.8. Crecimiento relativo de raíz (CRR) de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de silicio en imbibición (A) y con NaCl en germinación. Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.4.5. Crecimiento relativo de vástago (CRV)

El crecimiento relativo de vástago no presentó diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) en ninguno de los distintos tratamientos de silicio (**Figura 1.9A**), lo cual es contrario a lo observado en los tratamientos de NaCl (**Figura 1.9B**), donde conforme incrementó el nivel de salinidad disminuyó el CRV. [Sharma \(2015\)](#) realizó un estudio sobre la influencia de la salinidad en 42 variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.), y encontró que el decremento en esta variable se debe principalmente a la disminución del potencial osmótico inducido por el NaCl. [Munns \(2005\)](#) menciona que la disminución del potencial osmótico reduce la capacidad de la planta para absorber agua, lo cual conlleva a una disminución en el crecimiento.

Al igual que en el caso del crecimiento de la radícula, en el crecimiento del vástago el Si no mitigó los efectos negativos de la salinidad (**Cuadro 1.3**), aunque sí se encontraron efectos positivos del Si en el crecimiento del vástago en ausencia de salinidad.

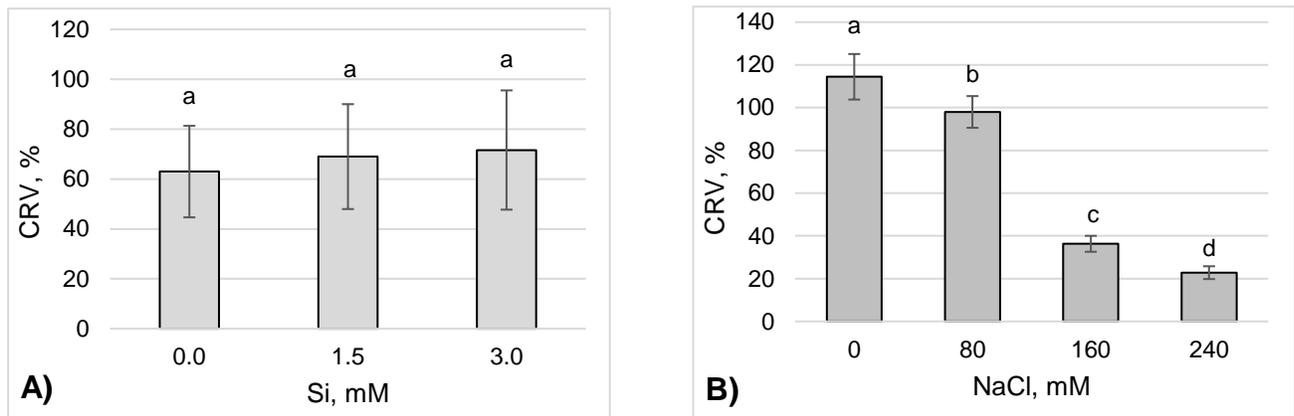


Figura 1.9. Crecimiento relativo de vástago (CRV) de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con distintas concentraciones de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.4.6. Índice de germinación (IG)

El índice de germinación es un indicador de los factores que promueven o inhiben la germinación y el crecimiento de radícula; el IG precisa el porcentaje de semillas germinadas, así como el porcentaje de crecimiento que alcanza la radícula durante el experimento (Rodríguez-Romero *et al.*, 2014).

El IG no presentó diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) en los tratamientos de silicio (**Figura 1.10A**), pero sí en los de salinidad, donde, a mayor concentración de salinidad disminuye el índice de germinación (**Figura 1.10B**). Kaya *et al.* (2008) realizaron un experimento con tres variedades de garbanzo (*Cicer arietinum* L.), y obtuvieron una disminución en el índice de germinación conforme aumenta el nivel de NaCl, el descenso en esta variable se le atribuye de igual manera al decremento en el potencial osmótico y toxicidad por sales.

El efecto de la interacción de los factores de estudio silicio y salinidad se muestra en el **Cuadro 1.3**, en el que se aprecia que el Si no mitigó los efectos negativos de la salinidad. La concentración de sodio afecta severamente la germinación y el crecimiento de la plántula, debido a que disminuye el potencial osmótico y genera toxicidad por sales (Al-Aghabary *et al.*, 2004).

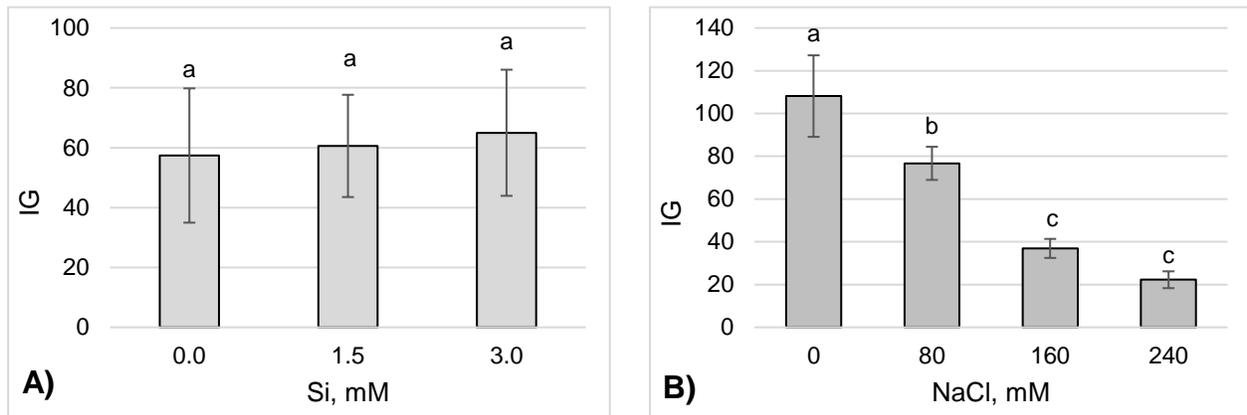


Figura 1.10. Índice de germinación (IG) en semillas de maíz tratadas con distintas dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Cuadro 1.3. Interacción de semillas de maíz tratadas con silicio en imbibición y con NaCl en germinación en las variables de germinación.

Si	NaCl	Variables					
		PTG (%)	CVG	PGR (%)	CRR (%)	CRV (%)	IG
0	0	97.5 \pm 2.5ab	93.56 \pm 4.0a	100.0 \pm 2.6ab	100.0 \pm 31.9abc	100.0 \pm 9.5bc	100.7 \pm 33.4ab
0	80	100.0 \pm 0a	76.30 \pm 4.8bc	102.6 \pm 0a	70.0 \pm 7.7cd	91.6 \pm 9.3c	71.8 \pm 7.9bc
0	160	100.0 \pm 0a	66.45 \pm 4.3cde	102.6 \pm 0a	32.8 \pm 5.5e	36.7 \pm 4.6d	33.7 \pm 5.7d
0	240	100.0 \pm 0a	69.02 \pm 5.4bcd	102.6 \pm 0a	22.9 \pm 6.3e	23.6 \pm 2.0d	23.5 \pm 6.5d
1.5	0	97.5 \pm 2.5ab	82.32 \pm 4.8ab	100.0 \pm 2.5ab	102.9 \pm 12.2ab	112.5 \pm 3.8ab	102.0 \pm 9.3ab
1.5	80	100.0 \pm 0a	82.25 \pm 4.0ab	102.6 \pm 0a	76.4 \pm 6.0bc	104.8 \pm 4.1bc	78.3 \pm 6.2b
1.5	160	100.0 \pm 0a	75.55 \pm 1.3bc	102.6 \pm 0a	38.7 \pm 4.3de	37.7 \pm 4.4d	39.6 \pm 4.4cd
1.5	240	100.0 \pm 0a	53.57 \pm 4.4e	102.6 \pm 0a	21.9 \pm 2.8e	21.1 \pm 3.3d	22.5 \pm 2.9d
3.0	0	100.0 \pm 0a	82.92 \pm 6.1ab	102.6 \pm 0a	118.8 \pm 6.0a	130.8 \pm 12.2a	121.8 \pm 6.2a
3.0	80	100.0 \pm 0a	93.56 \pm 4.0a	102.6 \pm 0a	78.0 \pm 10.0bc	97.5 \pm 8.1bc	80.0 \pm 10.3b
3.0	160	95.0 \pm 2.8b	81.53 \pm 7.6ab	97.4 \pm 2.9b	38.3 \pm 3.2de	34.5 \pm 2.7d	37.4 \pm 3.8d
3.0	240	95.0 \pm 2.8b	60.41 \pm 5.3de	97.4 \pm 2.9b	21.4 \pm 2.1e	23.7 \pm 4.0d	20.8 \pm 2.2d

Medias \pm DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05). PTG = Porcentaje total de germinación, CVG = Coeficiente de variación de germinación, PGR = Porcentaje de germinación relativa, CRR = Crecimiento relativo de radícula, CRV = Crecimiento relativo de vástago, IG = Índice de germinación.

1.3.5. Biomasa seca

1.3.5.1. Biomasa seca de vástago (BSV)

La biomasa seca de vástago no fue afectada por el Si (LSD \leq 0.05; **Figura 1.11A**), pero sí por los niveles de NaCl (**Figura 1.11B**), teniendo un decremento, conforme aumenta el nivel de estrés salino. [Li et al. \(2015\)](#) reportan resultados similares a los obtenidos en este estudio, no obtuvieron diferencias significativas en la biomasa seca de vástago en la adición de silicio, pero sí tuvieron un decremento en la adición de NaCl. [Craine \(2005\)](#) menciona que la biomasa seca disminuye al incremento de la salinidad, como resultado de un disturbio fisiológico y bioquímico.

Los efectos de la interacción de los factores de estudio Si y salinidad en las variables de biomasa seca se muestran en el **Cuadro 1.4**. La biomasa seca de vástago aumentó con las dosis de silicio 3 y 1.5 mM con niveles de salinidad iguales o menores a 80 mM; en comparación con los tratamientos con Si, aunque estos incrementos no fueron significativos. [Sonobe et al. \(2011\)](#) reporta que el suministro de Si en sorgo, bajo condiciones de estrés salino, ayuda a tener un menor decremento en la biomasa seca con respecto al control.

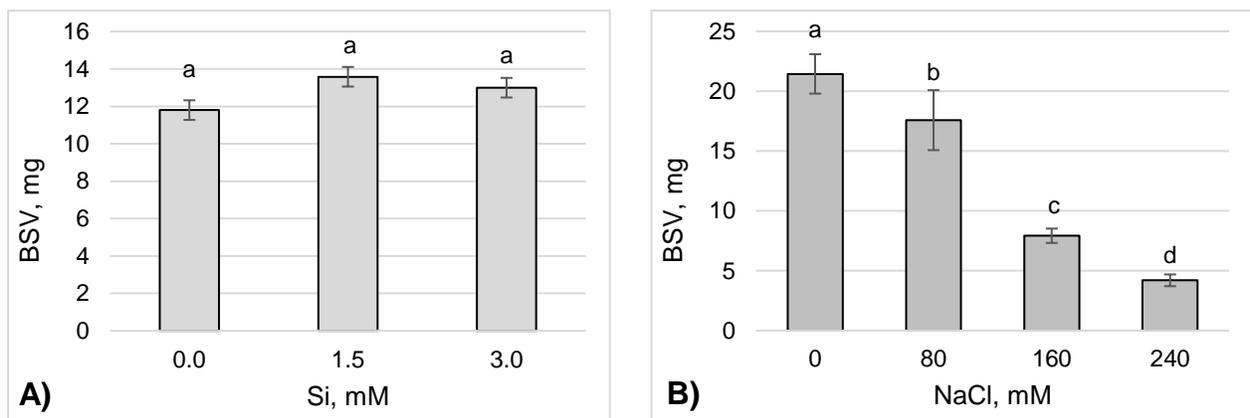


Figura 1.11. Biomasa seca de vástago (BSV) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Cuadro 1.4. Efecto del NaCl en semillas de maíz imbibidas con Si en la biomasa seca de vástago, raíz-grano, total y su relación.

Si	NaCl	Variables			
		BSV, mg	BSRYG, mg	BSTOTAL, mg	RELBSVSRRYG
0	0	19.4±1.6abc	308.2±7.5de	327.7±8.5cd	0.06±0.005bc
0	80	15.3±2.3c	315.3±3.5cd	330.6±3.4bc	0.05±0.008c
0	160	7.9±0.3de	319.5±5.9cd	327.4±5.8cd	0.02±0.001d
0	240	4.6±0.3de	331.2±5.3bc	335.8±5.3bc	0.01±0.001d
1.5	0	23.3±1.2a	298.3±7.8ef	321.6±8.8cd	0.08±0.003a
1.5	80	18.9±2.6abc	311.5±2.3de	330.4±3.6bc	0.06±0.008bc
1.5	160	8.4±1.0d	338.0±4.1ab	346.4±4.1ab	0.02±0.003d
1.5	240	3.7±0.7e	329.0±2.7bc	332.7±2.3bc	0.01±0.002d
3.0	0	21.6±1.9ab	290.8±4.5f	312.4±3.4d	0.07±0.007ab
3.0	80	18.6±2.8bc	310.7±3.7de	329.3±3.6bcd	0.06±0.009bc
3.0	160	7.5±0.4de	349.2±10.4a	356.7±10.6a	0.02±0.001d
3.0	240	4.4±0.4de	353.7±7.4a	358.1±7.2a	0.01±0.001d

Medias ± DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05). BSV = Biomasa seca del vástago individual, BSRYG = Biomasa seca de raíz y grano individual, BSTOTAL = Biomasa seca total individual, RELBSVSRRYG = Relación de biomasa seca de vástago y de raíz-grano individual.

1.3.5.2. Biomasa seca de raíz y grano (BSRYG)

En la biomasa seca de raíz y grano no se obtuvieron diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) en los tratamientos donde se suministró Si (**Figura 1.12A**), pero si las hubo en los distintos niveles de salinidad (**Figura 1.12B**), dando lugar con mayor peso a los tratamientos de mayor contenido de NaCl, debido a que se tomó en cuenta la semilla, misma que pierde peso debido al proceso de movilización de reservas después de la germinación. Después de que ocurre el proceso de hidratación de la semilla (imbibición) las reservas que se encuentran en la semilla se empiezan a movilizar para proveer nutrientes a la plántula (Bewley, 2001). La baja biomasa seca bajo estrés salino se le atribuye a la inhibición de la formación y translocación de carbohidratos, inhibición de algunos procesos metabólicos, inhibición de la formación de cloroplastos, producción de etileno y ácido abscísico y disminución en la absorción de agua y nutrimentos (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2012).

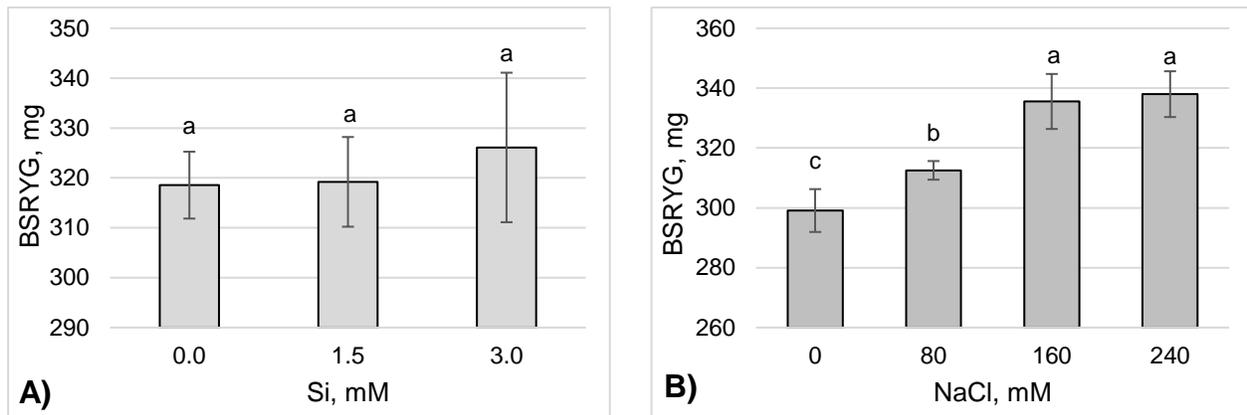


Figura 1.12. Biomasa seca de raíz y grano (BSRYG) de plántulas de maíz proveniente de semillas tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

En la variable de biomasa seca de raíz y grano, se registró un incremento al aumentar el nivel de salinidad aplicado, debido a que se tomó en cuenta la semilla, aun cuando ésta no había germinado y la semilla al momento de germinar, pierde peso debido al proceso de movilización de reservas (Pritchard *et al.*, 2002).

1.3.5.3. Biomasa seca total (BSTOTAL)

La biomasa seca total presentó un incremento significativo en el tratamiento 3 mM Si, respecto al testigo (LSD \leq 0.05) (**Figura 1.13A**). En los tratamientos de salinidad también se registró un aumento conforme incrementaba el nivel de NaCl (**Figura 1.13B**). Esto sucede, porque al igual que en la variable anterior, se tomó en cuenta la semilla, aun cuando ésta no había germinado y la semilla al momento de germinar, pierde peso debido al proceso de movilización de reservas. Al igual que en la biomasa seca de raíz y grano, la variable de biomasa seca total registró un incremento con el aumento de salinidad debido a que se tomó en cuenta la semilla, aun cuando ésta no había germinado.

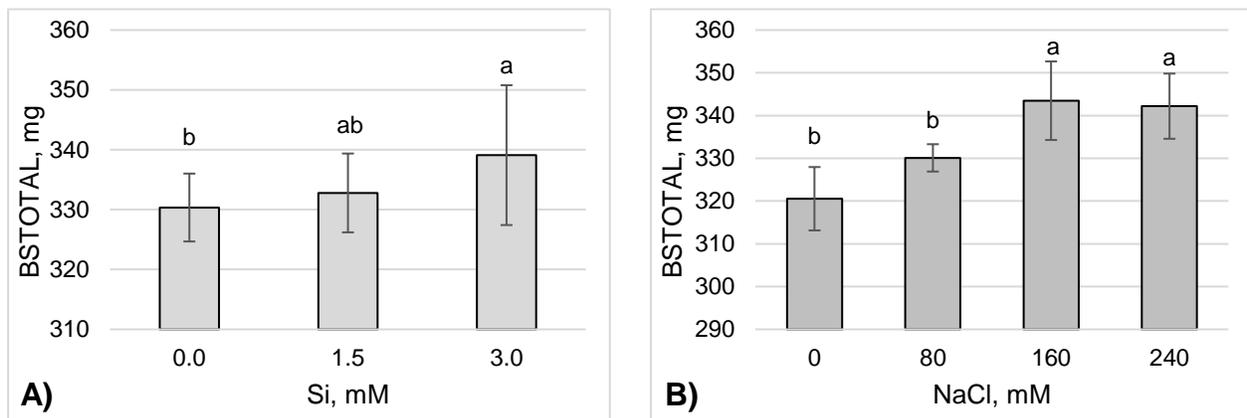


Figura 1.13. Biomasa seca total (BSTOTAL) de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.3.5.4. Relación biomasa seca de vástago y de raíz-grano (RELBSVSRYG)

La relación de biomasa seca de vástago y de raíz es un parámetro, el cual, fisiológicamente refleja la inversión de fotosintatos entre los órganos de la parte inferior o superior de la planta, inducidos por estreses bióticos o abióticos (Mokany *et al.*, 2006).

En la relación de biomasa seca de vástago y raíz-grano no se presentaron diferencias significativas ($LSD \leq 0.05$) entre los tratamientos de Si (Figura 1.14A). Por el contrario, esta relación se redujo conforme aumentó la concentración de NaCl (Figura 1.14B). Altas concentraciones de sales generan estrés osmótico y estrés iónico, y debido a esto, ocurren cambios severos negativos en la morfología y fisiología de la planta (Jampeetong y Brix, 2009).

En la relación de biomasa de vástago y raíz-grano, se observó que en las dosis de silicio 1.5 y 3 mM, se obtuvo un aumento en los tratamientos sin salinidad; es decir, el Si no mitigó los efectos negativos de la salinidad. Estos resultados son contrarios a lo reportado por Match *et al.* (1986), quienes indican que el suministro de Si al cultivo puede mitigar los efectos que genera la salinidad.

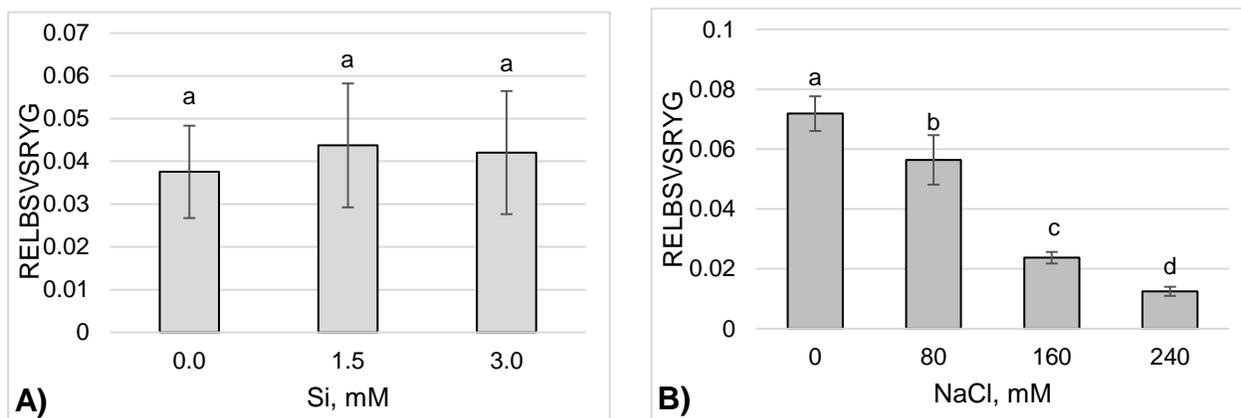


Figura 1.14. Relación biomasa seca de vástago y raíz-grano (RELBSVSRYG) en plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y NaCl en germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.4. CONCLUSIÓN

De los resultados obtenidos se puede concluir que la salinidad retrasa radicalmente la germinación y en altos niveles, ésta se inhibe. Asimismo, el NaCl tiene efectos negativos en el crecimiento temprano de plántulas de maíz.

La imbibición con 3 mM Si incrementó el porcentaje de peso de semilla posterior a la imbibición de manera significativa, respecto al testigo; asimismo, en ausencia de salinidad promovió el crecimiento de la radícula.

Si bien el Si mostró tendencias que permiten suponer que mitiga los efectos negativos de la salinidad en la mayoría de las variables, los resultados no mostraron diferencia estadística.

1.5. LITERATURA CITADA

Ahmad S. 2001. Environmental effects on seed characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.). J Agron Crop Sci 187: 213-216.

Al-Aghabary K, Zhu Z, Shi QH. 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. J Plant Nutr 27: 2101-2115. DOI: [10.1081/PLN-200034641](https://doi.org/10.1081/PLN-200034641)

- Ali A, Basra SMA, Ahmad R, Wahid A. 2009. Optimizing silicon application to improve salinity tolerance in wheat. *Soil & Environ* 28: 136-144.
- Aliu S, Rusinovci I, Fetahu S, Gashi B, Simeonovska E, Rozman L. 2015. The effect of salt stress on the germination of maize (*Zea mays* L.) seeds and photosynthetic pigments. *Acta Agric Slov* 105: 85-94. DOI: [10.14720/aas.2015.105.1.09](https://doi.org/10.14720/aas.2015.105.1.09)
- Al-Mudaris MA. 1998. Notes on various parameters recording the speed of seed germination. *Der Tropenlandwirt* 99: 147-154.
- Andreu P, Arbeloa A, Lorente P, Marín JA. 2011. Early detection of salt stress tolerance of *Prunus* rootstocks by excised root culture. *HortScience* 46: 80-85.
- Bewley JD. 2001. Seed germination and reserve mobilization. eLS Nature publishing group. 1-7. DOI: [10.1038/npg.els.0002047](https://doi.org/10.1038/npg.els.0002047)
- Craine JM. 2005. Reconciling plant strategy theories of Grime and Tilman. *J Eco* 93: 1041-1052. DOI: [10.1111/j.1365-2745.2005.01043.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01043.x).
- Epstein E. 1999. Silicon. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 50: 641-664. DOI: [10.1146/annurev.arplant.50.1.641](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641)
- Farooq M, Hussain M, Wakeel A, Siddique KHM. 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms and management. A review. *Agron Sustain Dev* 35: 461-481. DOI: [DOI 10.1007/s13593-015-0287-0](https://doi.org/10.1007/s13593-015-0287-0)
- Farsiani A, Ghobadi ME. 2009. Effects of PEG and NaCl stress on two cultivars of corn (*Zea mays* L.) at germination and early seedling stages. *World Acad Sci Eng Technol* 57: 382-385.
- Ghassemi-Golezani K, Nikpour-Rashidabad N, Zehtab-Salmasi S. 2012. Physiological performance of pinto vean cultivars under salinity. *Inter J Plant Animal Environ Sci* 2: 223-228.
- Haghighi M, Afifipour Z, Mozafarian M. 2012. The alleviation effect of silicon on seed germination and seedling growth of tomato under salinity stress. *Veg Crop Res Bull* 76: 119-126. DOI: [10.2478/v10032-012-0008-z](https://doi.org/10.2478/v10032-012-0008-z)
- ImageJ. 2017. Image processing and analysis in java. ImageJ bundled with java 1.8.0_101.

- Jampeetong A, Brix H. 2009. Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis, and proline accumulation of *Salvinia natans*. *Aquatic Botany* 91: 181-186. DOI: [10.1016/j.aquabot.2009.05.003](https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2009.05.003)
- Jorgensen EE, Chesser KL. 2000. Intraspecific differences in grass seed imbibition. *West N Am Nat* 60:433-438.
- Kaya M, Kaya G, Kaya MD, Atak M, Saglam S, Khawar KM, Ciftci CY. 2008. Interaction between seed size and NaCl on germination and early seedling growth of some Turkish cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *J Zhejiang Univ Sci B* 9: 371-377. DOI: [10.1631/jzus.B0720268](https://doi.org/10.1631/jzus.B0720268)
- Kotowski F. 1926. Temperature relations to germination of vegetable seed. *Proc Am Soc Hort Sci* 23:176-184.
- 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. DOI [10.1007/s10457-010-9299-6](https://doi.org/10.1007/s10457-010-9299-6)
- Li H, Zhu Y, Hu Y, Han W, Gong H. 2015. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiol Plant*. 37: 71. DOI: [10.1007/s11738-015-1818-7](https://doi.org/10.1007/s11738-015-1818-7)
- Li Y. 2008. Effect of salt stress on seed germination and seedling growth of three salinity plants. *Pak J Biol Sci* 11: 1268-1272. DOI: [10.3923/pjbs.2008.1268.1272](https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1268.1272)
- Liu C, Fukumoto T, Matsumoto T, Gena P, Frascaria D, Kaneko T, Katsuhara M, Zhong S, Sun X, Zhu Y, Iwasaki I, Ding X, Calamita G, Kitagawa Y. 2013. Aquaporin OsPIP1;1 promotes rice salt resistance and seed germination. *Plant Physiol Bioch* 63: 151-158. DOI: [10.1016/j.plaphy.2012.11.018](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.018)
- Ma JF, Yamaji N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cell Mol Life Sci* 65: 3049-3057. DOI [10.1007/s00018-008-7580-x](https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x)
- Machado RMA, Serralheiro RP. 2017. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae* 3: 30. DOI: [10.3390/horticulturae3020030](https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030)
- Maguire JD. 1962. Speed of germination – aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci* 2: 176-177. DOI: [10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x](https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x)

- Matoh T, Kairusmee P, Takahashi E. 1986. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *Soil Sci Plant Nutr* 32: 295-304. DOI: [10.1080/00380768.1986.10557506](https://doi.org/10.1080/00380768.1986.10557506)
- Misra N, Dwivedi UN. 2004. Genotypic difference in salinity tolerance of green gram cultivars. *Plant Sci* 166: 1135-1142. DOI: [10.1016/j.plantsci.2003.11.028](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.028)
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS. 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biol* 12: 84-96. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x)
- Munns R, Husain S, Rivelli AR, Richard AJ, Condon AG, Megan PL, Evans SL, Schachtman DP, Hare RA. 2002. Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically based selection traits. *Plant Soil* 247: 93-105. DOI: [10.1023/A:1021119414799](https://doi.org/10.1023/A:1021119414799)
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol* 59: 651-681. DOI: [10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911)
- Munns R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soil: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ* 16: 15-24.
- Munns R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytol* 167: 645-663. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x)
- Nonogaki H, Bassel GW, Bewley JD. 2010. Germination - Still a mystery. *Plant Sci* 179: 574-581. DOI: [10.1016/j.plantsci.2010.02.010](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.02.010)
- Parvaiz A, Satyawati S. 2008. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants – a review. *Plant Soil Environ* 54: 89-99.
- Pritchard SL, Charlton WL, Baker A, Graham IA. 2002. Germination and storage reserve mobilization are regulated independently in *Arabidopsis*. *Plant J* 31: 649-647.
- Rios JJ, Martínez-Ballesta MC, Ruiz JM, Blasco B, Carvajal M. 2017. Silicon-mediated improvement plant salinity tolerance: The role of aquaporins. *Frot Plant Sci* 8:948. DOI: [10.3389/fpls.2017.00948](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00948)
- Rodríguez-Romero AJ, Robles-Salazar CA, Ruíz-Picos RA, López-López E, Sedeño-Díaz JE, Rodríguez-Dorantes A. 2014. Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad de agua del río Chámala. *Rev Int Contam Ambient* 30: 307-316.

- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Shahbaz M, Ashraf M. 2013. Improving salinity tolerance in cereals. *Crit Rev Plant Sci* 32: 237-249. DOI: [10.1080/07352689.2013.758544](https://doi.org/10.1080/07352689.2013.758544)
- Sharma R. 2015. Salt stress genotypic response: Wheat cultivars relative tolerance of certain to salinity. *J Horticulture* 2: 158. DOI: [10.4172/2376-0354.1000158](https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000158)
- Sharma RK, Sharma S. 2010. Effect of storage and cold-stratification on seed physiological aspects of *Bunium persicum*: A Threatened medicinal herb of trans-Himalaya. *Int J Botany* 6: 151-156. DOI: [10.3923/ijb.2010.151.156](https://doi.org/10.3923/ijb.2010.151.156)
- Shi Y, Zhang Y, Yao H, Wu J, Sun H, Gong H. 2014. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress and bud seedlings in tomato under water deficit stress. *Plant Physiol Bioch* 78: 27-36. DOI: [10.1016/j.plaphy.2014.02.009](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.02.009)
- SIAP. 2017. Producción agrícola: OI+PV 2016. Disponible en línea en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/. Consultado: septiembre 06, 2017.
- Sidari M, Muscolo A, Anastasi U, Preiti G, Santonoceto C. 2007. Response of four genotypes of lentil to salt stress conditions. *Seed Sci & Technol* 35: 497-503.
- Sonobe K, Hattori T, An P, Tsuji W, Egrinya EA, Kobayashi S, Kawamura Y, Tanaka K, Inanaga S. 2011. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *J Plant Nutr* 34: 71-82. DOI: [10.1080/01904167.2011.531360](https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360)
- Soundararajan P, Sivanesan I, Jo EH, Jeong BR. 2013. Silicon promotes shoot proliferation and shoot growth of *Salvia splendens* under salt stress in vitro. *Hortic Environ Biotechnol* 54: 311-318.
- Sümer A, Zörb C, Yan F, Schubert S. 2004. Evidence of sodium toxicity for the vegetative growth of maize (*Zea mays* L.) during the first phase of salt stress. *J Appl Bot* 78:135-139.
- Tam NFY, Tiquia SM. 1994. Assessing toxicity of spent pig litter using seed a germination technique. *Resour Conserv Recy* 11:261-274. DOI: [10.1016/0921-3449\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90094-9)
- Torabi F, Majd A, Enteshari S. 2012. Effect of exogenous silicon on germination and seedling establishment in *Borago officinalis* L. *J Med Plants Res* 6: 1896-1901. DOI: [10.5897/JMPR11.1307](https://doi.org/10.5897/JMPR11.1307)

- Vaculík M, Landberg T, Greger M, Luxová M, Stoláriková M, Lux A. 2012. Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants. *Ann Bot* 110: 433-443. DOI: [10.1093/aob/mcs039](https://doi.org/10.1093/aob/mcs039)
- Wang XD, Ou-Yang C, Fan Z, Gao S, Chen F, Tang L. 2010. Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Momordica charantia* under salt stress. *J Anim Plant Sci* 6: 700-708.
- Zhang XH, Zhou D, Cui JJ, Ma HL, Lang DY, Wu XL, Wand ZS, Qiu HY, Li M. 2015. Effect of silicon on seed germination and the physiological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* under different levels of salinity. *J Hortic Sci Biotech* 90: 439-443. DOI: [10.1080/14620316.2015.11513207](https://doi.org/10.1080/14620316.2015.11513207)
- Zhu YX, Gong HJ. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron Sustain Dev* 34: 455-472. DOI: [10.1007/s13593-013-0194-1](https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1)

CAPÍTULO II. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS POR SEQUÍA EN GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE MAÍZ

RESUMEN

El estrés generado por sequía es uno de los ambientes más devastadores para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Asimismo, se ha estudiado que el silicio (Si), es un elemento que presenta beneficios en las plantas mitigando los estreses de tipo biótico y abiótico. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del Si en la mitigación de estrés por sequía en la germinación de semillas de maíz y en el crecimiento inicial de las plántulas. La semilla de maíz se sometió a imbibición con 0.0, 1.5 y 3.0 mM de metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) por 12 h. Posteriormente las semillas se colocaron sobre papel filtro en un contenedor de plástico (12 x 11 x 7 cm), y se suministraron los niveles de potencial osmótico: 0, -0.3, -0.6 y -0.9 MPa con PEG-8000. Los contenedores se incubaron en una cámara de germinación en oscuridad a 25 °C durante 5 días y en intervalos de 24 h se midieron las variables: porcentaje de peso ganado en la semilla en la imbibición, altura, longitud de raíz, variables de germinación y biomasa seca. La adición de Si disminuyó significativamente la altura de plántula y longitud de raíz, impactó negativamente en las variables de germinación y no causó diferencias significativas en el peso de biomasa seca. Por otra parte, la sequía afectó negativamente todas las variables evaluadas.

Palabras clave: metasilicato de sodio; sequía; mitigación de estrés; *Zea mays* L.

2.1. INTRODUCCIÓN

El recurso agua es el factor limitante que más afecta el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas en regiones áridas y semiáridas. En estas zonas las plantas son a menudo expuestas a periodos de estrés hídrico, conocido como sequía ([Efeoğlu et al., 2009](#)). La sequía es un tipo de estrés abiótico, considerado uno de los agobios ambientales más devastadores, dado que disminuye la producción de los cultivos más que ningún otro factor ambiental ([Lambers et al., 2008](#)). Las etapas más susceptibles a la sequía en la producción vegetal son la germinación y el desarrollo, en éstas el agua juega un papel de suma importancia; durante la germinación de la semilla, a través del

desglose hidrolítico de las reservas, solubilización y transporte de metabolitos, ajuste osmótico y distintas reacciones enzimáticas (Shi *et al.*, 2016).

Por otra parte, el maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia, debido a que se encuentra entre los cereales más cultivados a nivel mundial, y por su alto contenido nutricional (72% almidón, 10% proteínas y 4% lípidos), además es la fuente primordial de alimento en México (Nuss y Tanumihardjo, 2010). En 2016, se sembraron 15 309 630 ha en el país, de las cuales 7 761 216 ha pertenecen a maíz (SIAP, 2018), lo que corresponde a un 50.7% de la superficie cultivada.

Asimismo, el Si es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, solo que se encuentra en formas no disponibles para las plantas (Zhu y Gong, 2014). Su uso en la nutrición de cultivos se ha incrementado de manera considerable; se han reportado numerosos efectos benéficos que presenta en el crecimiento de las plantas bajo estrés biótico y abiótico (Nasseri *et al.*, 2012). Sayer y Gadallah (2014) indican que el uso de silicio en maíz disminuye los efectos negativos del estrés hídrico generado por la sequía.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del Si en la mitigación de los efectos negativos causados por la sequía en germinación y crecimiento inicial de plántulas de maíz blanco híbrido SD-308.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Establecimiento del experimento y material vegetal

El presente estudio tuvo su inicio en condiciones controladas usando una cámara de crecimiento (Thermo Scientific, Prevision, USA), a una temperatura de 25 °C. Se emplearon semillas de maíz (*Zea mays* L.) blanco híbrido SB-308 de la casa comercial Berentsen. Este híbrido es de los más utilizados por productores del Estado de México, debido a que tiene un buen desarrollo en valles altos, y además tiene un bajo costo de adquisición en el mercado.

2.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Se realizó un experimento factorial 3 x 4, donde los factores fueron el Si en la fase de imbibición de la semilla y la sequía inducida durante la germinación y el crecimiento inicial.

La fuente de Si fue metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, J. T. Baker®) y los niveles de éste fueron 0, 1.5 y 3.0 mM. La sequía fue inducida con polietilenglicol-8000 (PEG-8000, Sigma-Aldrich®) en los niveles: 0, -0.3, -0.6 y -0.9 MPa. Los 12 tratamientos resultantes fueron distribuidos completamente al azar dentro de la cámara de crecimiento (Thermo Scientific, Prevision, USA). Las unidades experimentales fueron cajas de polietileno (PET) de 12 x 11 x 7 cm, se utilizaron 10 semillas por repetición y cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones.

2.2.3. Aplicación de tratamientos

Las semillas divididas en tres grupos se sometieron a imbibición en las diferentes concentraciones de $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ por 12 h. Transcurrido el tiempo de imbibición las semillas se colocaron en grupos de 10 sobre papel filtro dentro de cada caja de PET. En cada unidad experimental se adicionaron 20 mL de las soluciones correspondientes a los tratamientos con PEG-8000 y se introdujeron en la cámara de germinación antes indicada, a 25 °C en condiciones de oscuridad. Transcurridas 48 h se adicionaron 5 mL más de las soluciones con PEG-8000; y las cajas de PET se sacaron de la cámara de germinación y se mantuvieron a temperatura ambiente.

2.2.4. Variables evaluadas

Una de las variables evaluadas fue el incremento del peso de la semilla, para el cual se registró el peso de la semilla antes y después de someterse a imbibición (12 h).

Las evaluaciones de germinación se realizaron cada 24 h durante 5 d (120 h), transcurridos estos se midió altura de planta y longitud de raíz utilizando un programa de análisis de imágenes “Imagej” ([Imagej, 2017](#)).

Dentro de los parámetros relacionados con la germinación se evaluaron:

Cinética de germinación. La germinación de las semillas se registró cada 24 h y hasta que el valor de ésta fue constante en cada tratamiento. Las semillas fueron consideradas germinadas cuando la radícula emergió aproximadamente 2 mm ([Sharma y Sharma 2010](#)).

Porcentaje de germinación total (PGT). El porcentaje de germinación total consideró al valor máximo de germinación alcanzado en la cinética (valor constante), fórmula empleada por [Al-Mudrais \(1998\)](#) de la siguiente manera:

$$PGT = \frac{\text{Semillas germinadas}}{\text{Semillas totales}} \times 100$$

Coeficiente de velocidad de germinación (CVG). El coeficiente de velocidad de germinación se estimó empleando la fórmula descrita por [Maguire \(1962\)](#):

$$CVG = \frac{\text{Número total de semillas germinadas por caja}}{A_1T_1 + A_2T_2 + A_xT_x}$$

Donde A= El número de semillas emergidas en un número de días en particular, los números 1, 2,.....x son el número respectivo de semillas germinadas por cada respectivo día después del inicio de la incubación.

Índice de germinación (IG). El índice de germinación se calculó utilizando la fórmula descrita por [Maguire \(1962\)](#):

$$IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

Dónde: PRG es el porcentaje de semillas germinadas en el tratamiento con respecto al control; CRR es el crecimiento relativo de radícula.

El porcentaje de germinación relativo (PGR), crecimiento relativo de radícula (CRR) y crecimiento relativo de vástago (CRV) se calcularon utilizando las fórmulas empleadas por [Tam y Tiquia \(1994\)](#).

El porcentaje de germinación relativo (PGR) se estimó con la siguiente fórmula:

$$PGR = \frac{\text{Semillas germinadas en el tratamiento}}{\text{Semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

El crecimiento relativo de radícula (CRR) se calculó con la siguiente fórmula:

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en semillas tratadas}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}} \times 100$$

El crecimiento relativo del vástago (CRV) se evaluó utilizando la siguiente fórmula:

$$CRV = \frac{\text{Longitud de vástago en semillas tratadas}}{\text{Longitud de vástago en el testigo}} \times 100$$

Pesos de raíz y vástagos secos. Transcurridos 5 d se separaron vástagos y raíces de cada caja en grupos de 10. Se colocaron en bolsas de papel y se secaron a 70 °C durante 48 h y posteriormente se determinó el peso en una balanza analítica. Para la toma de datos se incluyó el grano en el peso de la raíz, y el del vástago se tomó por separado.

2.2.5. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de la diferencia mínima significativa (LSD) al nivel de probabilidad 0.05 para cada parámetro con el paquete estadístico SAS Institute Inc ([SAS, 2011](#)).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Incremento porcentual de peso en semilla de maíz después de 12 h de imbibición

La primera fase en el proceso de germinación es la imbibición, la cual comprende el proceso inicial de absorción de agua por la semilla ([Jorgensen y Chesser, 2000](#)); ésta ocurre debido al gradiente de potencial hídrico entre la semilla seca y el exterior ([Nonogaki et al., 2010](#)). Transcurrido el tiempo de imbibición, el incremento porcentual de peso en semilla de maíz se registró, y éste no mostró diferencias significativas entre los distintos tratamientos de Si (**Figura 2.1**). El Si es un elemento muy abundante en la naturaleza y su disponibilidad para las plantas en la solución del suelo es habitualmente muy bajo, asimismo, su absorción es reducida particularmente en dicotiledóneas ([Hattori et al., 2005](#)); sin embargo, en este experimento se utilizó maíz, la cual es una monocotiledónea, y no presentó diferencias significativas a la adición de Si, por lo que podemos atribuírselo a la fuente de silicio empleada. Por ejemplo, en *Lolium perenne* cv. Nui, se observaron efectos diferenciales de dos fuentes de Si (Na_2SiO_3 y CaSiO_3), observándose que el Na_2SiO_3 tuvo mayor influencia en el sistema antioxidante al promover la producción de fenoles y la activación de enzimas antioxidantes que el CaSiO_3 ([Ribera-Fonseca et al., 2018](#)).

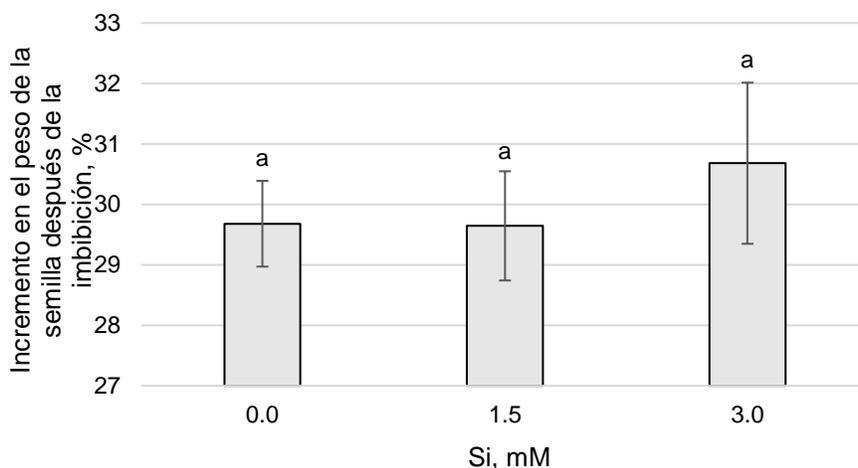


Figura 2.1. Incremento porcentual del peso de semillas de maíz después de 12 h de imbibición en soluciones con diferentes concentraciones de Si. Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

2.3.2. Longitud de radícula

En la longitud de raíz, la adición de Si ocasionó un decremento significativo con respecto al testigo (**Figura 2.2A**). [Kim et al. \(2014\)](#) realizaron un estudio en arroz (*Oryza sativa* L.) y obtuvieron que el suministro de Si no afectó la longitud de la radícula con respecto al testigo; como fuente de silicio utilizaron Na_2SiO_3 , lo cual corresponde con la fuente utilizada en este experimento. El decremento en la longitud de raíz se lo podemos atribuir a la fuente de silicio utilizada; por ejemplo, en *Lolium perenne* cv. Nui, el tratamiento con 1000 mg Si a partir de Na_2SiO_3 por kg de suelo, incrementó significativamente el peso de biomasa de raíz, en comparación con la misma dosis de Si suministrada a partir de CaSiO_3 ([Ribera-Fonseca et al., 2018](#)).

Por otra parte, en la **Figura 2.2B** se aprecia una disminución en la longitud de radícula conforme se reduce el potencial osmótico. De la misma manera, [Khayatnezhad et al. \(2010\)](#) realizaron un ensayo con cuatro cultivares de maíz, en el cual indujeron distintos potenciales osmóticos y observaron que cuando se disminuye el potencial osmótico, la longitud de radícula decrece significativamente. El estrés por sequía está relacionado con la fisiología de la planta, debido a que induce estrés osmótico, y la mayor parte de las respuestas metabólicas de las plantas afectadas son similares hasta cierto punto ([Djibril et al., 2005](#)).

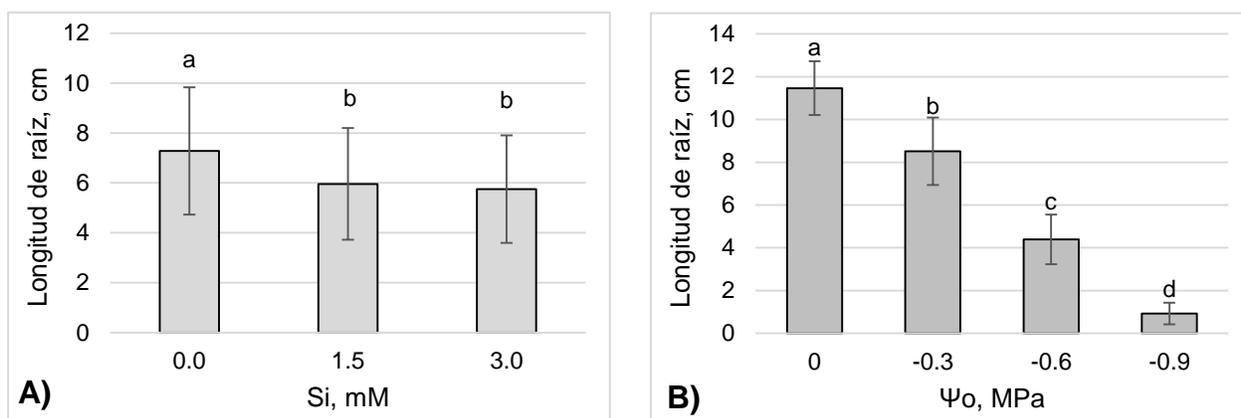


Figura 2.2. Longitud de radícula de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

En la interacción de las diferentes dosis de Si con los distintos potenciales osmóticos generados, se puede apreciar que el silicio no mitigó los efectos adversos que produce la sequía (**Cuadro 2.1**). Por el contrario, conforme aumenta el nivel de Si se aprecia una reducción en la longitud de raíz. [Gao et al. \(2005\)](#) mencionan que el silicio no presenta efectos significativos cuando es adicionado en ausencia de estrés.

Cuadro 2.1. Efecto de la interacción de los factores de estudio en la longitud de raíz de plántulas de maíz.

Si, mM (durante la imbibición)	Potencial osmótico (Ψ_o) MPa (durante la germinación)	Longitud de radícula, cm
0.0	0.0	11.53 \pm 2.69 a
0.0	-0.3	10.67 \pm 4.35 a
0.0	-0.6	5.43 \pm 3.32 cd
0.0	-0.9	1.46 \pm 1.02 e
1.5	0.0	11.54 \pm 3.09 a
1.5	-0.3	7.71 \pm 1.57 b
1.5	-0.6	3.63 \pm 1.31 d
1.5	-0.9	0.92 \pm 0.94 e
3.0	0.0	11.30 \pm 1.82 a
3.0	-0.3	7.15 \pm 1.64 bc
3.0	-0.6	4.13 \pm 1.58 d
3.0	-0.9	0.38 \pm 0.84 e

Medias \pm DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

En este estudio, en presencia de estrés el Si no redujo los efectos negativos que genera la sequía, y cuando este elemento se suministró sin fuente de estrés se observó un decremento significativo en la longitud de raíz. [Kamran *et al.* \(2009\)](#) reporta que el decremento en la longitud de radícula bajo estrés hídrico se le atribuye a la inhibición de la división y elongación celular.

2.3.3. Altura de plántula

La altura de plántula presentó un decremento significativo con la adición de silicio, con respecto al testigo (**Figura 2.3A**). [Nascimento *et al.* \(2018\)](#) reportan un incremento en la altura con suministro de ácido silícico con respecto al control; resultados contrarios a los obtenidos en este estudio. Lo antes mencionado lo podemos atribuir a la fuente de silicio empleada, debido que ellos utilizaron una fuente diferente de Si. Asimismo, la disminución en el potencial osmótico generó una reducción en la altura de plántulas (**Figura 2.3B**). [Amin *et al.* \(2016\)](#) realizaron un experimento en maíz y obtuvieron que el estrés por sequía reduce significativamente la altura de maíz. Las respuestas de las plantas al estrés hídrico se manifiestan en reducción del potencial hídrico y turgencia de las células, lo cual eleva la concentración de los solutos en el citosol y matrices extracelulares ([Lisar *et al.*, 2012](#)).

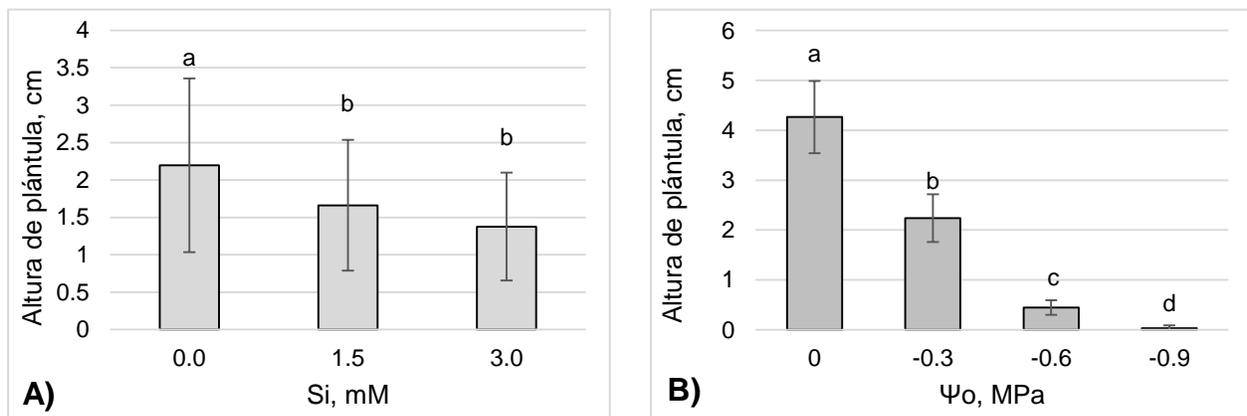


Figura 2.3. Altura de plántulas de maíz provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Si durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Al igual que en la variable de longitud de raíz, el Si no mitigó el efecto negativo de la sequía en la altura de plántula (**Cuadro 2.2**); por el contrario, se observó un decremento en la altura de plántula conforme se incrementaba la dosis de Si. [Gong et al. \(2011\)](#) realizaron un estudio similar en trigo, y reportan que no tuvieron diferencias significativas en la aplicación de silicio bajo estrés por sequía; lo cual coincide con nuestros resultados. [Chachar et al. \(2016\)](#) mencionan, que llevaron a cabo un experimento en trigo bajo estrés por sequía, en el cual obtuvieron decrementos significativos conforme disminuía el potencial osmótico. El decremento en la altura de la plántula en condiciones de estrés hídrico se debe a la inhibición de la división y elongación celular ([Kamran et al., 2009](#)).

Cuadro 2.2. Efecto de la interacción de los factores de estudio en la altura de plántulas de maíz.

Si, mM (durante imbibición)	Potencial osmótico (Ψ_o), MPa (durante la germinación)	Altura de plántula, cm
0.0	0	5.29 ± 1.79 a
0.0	-0.3	2.80 ± 1.07 cd
0.0	-0.6	0.60 ± 0.31 f
0.0	-0.9	0.07 ± 0.17 f
1.5	0	4.08 ± 0.82 b
1.5	-0.3	2.19 ± 0.87 de
1.5	-0.6	0.34 ± 0.24 f
1.5	-0.9	0.02 ± 0.07 f
3.0	0	3.40 ± 0.83 c
3.0	-0.3	1.71 ± 0.59 e
3.0	-0.6	0.39 ± 0.26 f
3.0	-0.9	0.00 ± 0.00 f

Medias ± DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

2.3.4. Variables de germinación

2.3.4.1. Porcentaje de germinación total (PGT)

El porcentaje de germinación total presentó un decremento significativo en la dosis 3 mM Si, respecto al testigo (**Figura 2.4A**). Asimismo, se registró una disminución en el PGT con potenciales osmóticos menores a -0.3 MPa (**Figura 2.4B**). Contrario a lo aquí observado, [Ma \(2004\)](#) menciona que el silicio presenta muchos beneficios, debido a que mitiga diversos tipos de estrés, entre ellos la sequía. [Farsiani y Ghobadi \(2009\)](#) realizaron un estudio en dos cultivares de maíz bajo sequía, y obtuvieron que conforme disminuye el potencial osmótico, el porcentaje de germinación va decreciendo de igual manera. El

estrés hídrico generado por la disminución del potencial osmótico afecta negativamente la germinación de las semillas (Van den Berg y Zeng, 2006).

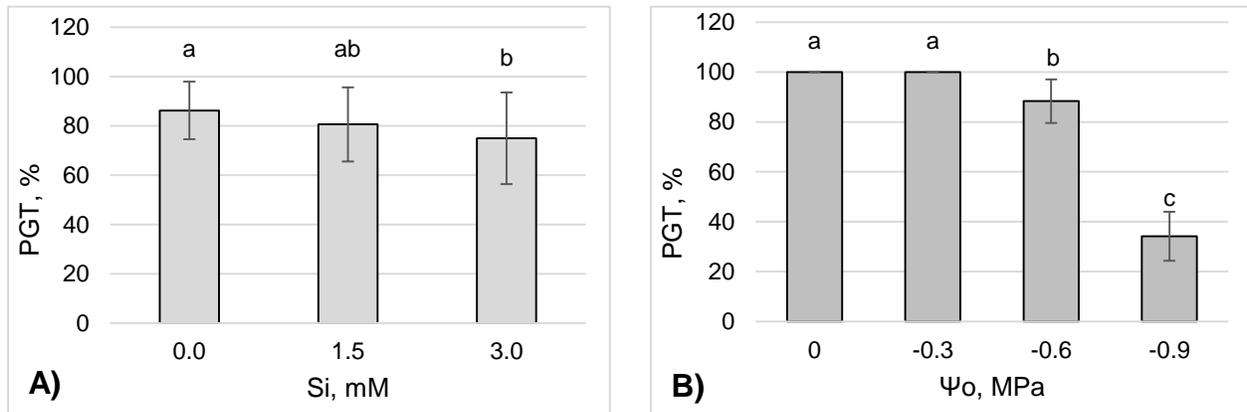


Figura 2.4. Porcentaje de germinación total (PGT) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Los resultados de la interacción entre Si y sequía en el porcentaje total de germinación total se muestra en el **Cuadro 2.3**. El PTG presentó un decremento significativo en potenciales osmóticos menores a -0.6 MPa. Asimismo, el Si suministrado redujo el PTG en los niveles de Ψ_o -0.6 y -0.9 MPa. Zhang *et al.* (2015) mencionan que la adición de silicio (K_2SiO_3) presenta beneficios en el porcentaje de germinación en semillas de *Glycyrrhiza uralensis* bajo condiciones de estrés salino; estos resultados son contrarios a los obtenidos en este estudio, debido que el suministro de Si redujo el PTG y además no mitigó los efectos negativos que genera la sequía.

Cuadro 2.3. Interacción de semillas de maíz tratadas con silicio en imbibición y con PEG-8000 en germinación en las variables de germinación.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Variables					
		PTG (%)	CVG	PGR (%)	CRR (%)	CRV (%)	IG
0	0	100.0±0.0a	88.3±12.0a	100.0±0.0a	100.0±21.6a	100.0±7.0a	100.0±21.6a
0	-0.3	100.0±0.0a	76.5±9.8ab	100.0±0.0a	92.5±34.6a	52.9±19.5dc	92.5±34.6a
0	-0.6	97.5±5.0ab	57.0±6.6dc	97.5±5.0ab	47.1±24.1bc	11.3±5.0f	46.2±24.8bc
0	-0.9	47.5±5.0c	34.2±7.2ef	47.5±5.0c	12.7±7.4ed	1.4±2.8f	5.7±2.8ed
1.5	0	100.0±0.0a	89.0±3.7a	100.0±0.0a	100.1±17.5a	77.1±13.5b	100.1±17.5a
1.5	-0.3	100.0±0.0a	68.2±13.9bc	100.0±0.0a	66.9±8.9b	41.3±15.6ed	66.9±8.9b
1.5	-0.6	82.5±28.7b	58.0±7.8dc	82.5±28.7b	31.4±7.6cd	6.4±4.0f	27.2±12.7cd
1.5	-0.9	40.0±21.6c	31.4±13.9f	40.0±21.6c	8.0±4.9e	0.4±0.8f	3.5±2.8e
3.0	0	100.0±0.0a	82.2±8.0ab	100.0±0.0a	98.0±13.4a	64.2±5.7bc	98.0±13.4a
3.0	-0.3	100.0±0.0a	72.3±9.0abc	100.0±0.0a	62.0±9.3b	32.3±9.9e	62.0±9.3b
3.0	-0.6	85.0±10.0ab	48.7±3.8de	85.0±10.0ab	35.8±10.1cd	7.3±3.1f	30.2±7.6c
3.0	-0.9	15.0±12.9d	32.2±27.7ef	15.0±12.9d	3.2±6.2e	0.0±0.0f	0.9±1.8e

Medias ± DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05). PTG = Porcentaje total de germinación, CVG = Coeficiente de variación de germinación, PGR = Porcentaje de germinación relativa, CRR = Crecimiento relativo de radícula, CRV = Crecimiento relativo de vástago, IG = Índice de germinación.

2.3.4.2. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)

El coeficiente de velocidad de germinación es un indicador de la rapidez de germinación, éste aumenta cuando el número de semillas germinadas se incrementa y el tiempo requerido para germinar disminuye (Jones y Sanders, 1987). El CVG no mostró diferencias significativas entre los tratamientos de Si (Figura 2.5A); resultados que coinciden con los reportados por Delavar *et al.* (2017), quienes realizaron un experimento en semillas de maíz y no obtuvieron diferencias significativas en el CVG con adición de silicio. Por otra parte, los potenciales osmóticos generados afectaron negativamente el CVG (Figura 2.5B). Almaghrabi (2012) realizó un estudio con diferentes cultivares de trigo bajo estrés por sequía, donde obtuvo que los potenciales osmóticos generados disminuyen drásticamente el CVG, y en algunas variedades la germinación se inhibe; resultados semejantes a los aquí obtenidos, donde se observa que conforme aumenta la presión osmótica, el CVG disminuye.

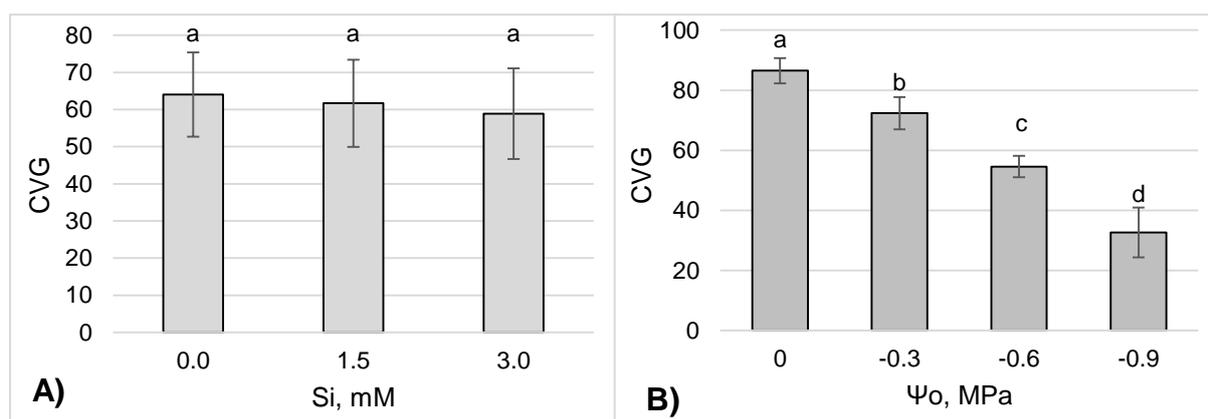


Figura 2.5. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

La interacción entre Si y sequía en el coeficiente de velocidad de germinación se muestra en el Cuadro 2.3. El silicio no mitigó los efectos negativos que presenta la sequía en ninguno de sus niveles. La sequía tiene un impacto drástico en las células, la cual disminuye la disponibilidad del agua (Mahajan y Tuteja, 2005); y en consecuencia, decrece el CVG dado que la semilla tarda más tiempo en absorber agua (Machado y Serralheiro, 2017).

2.3.4.3. Porcentaje de germinación relativo (PGR)

El porcentaje de germinación relativo presentó un decremento con la adición de silicio (**Figura 2.6A**).

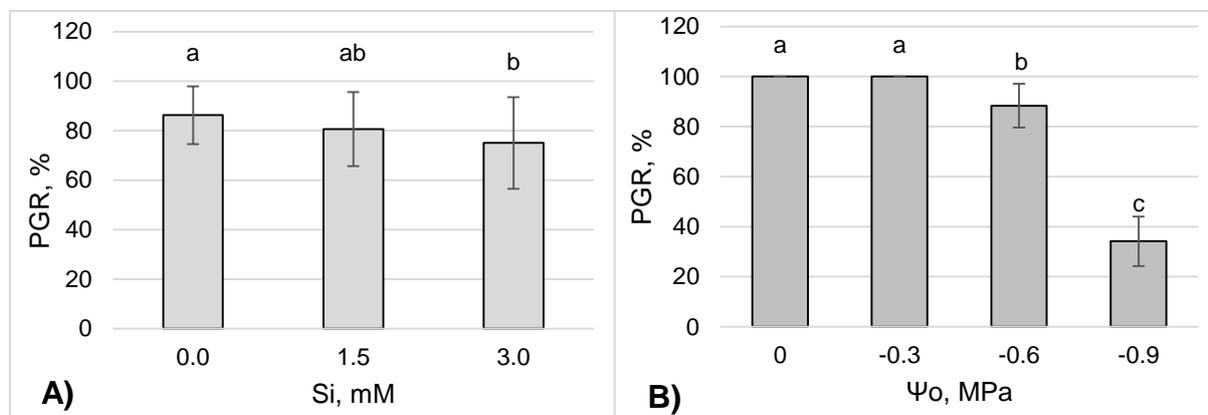


Figura 2.6. Porcentaje de germinación relativo (PGR) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

De igual manera, los potenciales osmóticos -0.6 y -0.9 MPa redujeron el PGR (**Figura 2.6B**). [Shi et al. \(2014\)](#) realizaron un estudio en cuatro cultivares de tomate (*Solanum lycopersicon* L.), aplicando silicio y PEG-6000, observaron que el Si no tuvo influencia en el porcentaje de germinación cuando se aplicó sin fuente de estrés; asimismo, la sequía inducida con PEG, disminuyó esta variable en todos los cultivares. Cuando se suministró en conjunto Si + PEG, obtuvieron que el Si redujo significativamente los efectos negativos que causa la sequía.

El efecto de la interacción de los factores de estudio en el PGR se muestra en el **Cuadro 2.3**. [Maghsoudi y Emam \(2016\)](#) reportan resultados positivos en trigo con la adición de Si en presencia y ausencia de estrés osmótico; resultados que difieren con los nuestros debido a que el silicio no redujo los efectos negativos que causa la sequía, sin por el contrario, redujo el PGR en carencia de estrés. El decremento en el porcentaje de germinación conforme se reduce el potencial osmótico se debe a que se disminuye la disponibilidad de agua en las células ([Verslues et al., 2006](#)); por lo que, a niveles altos de sequía, el PGR decrece de manera drástica.

2.3.4.4. Coeficiente relativo de raíz (CRR)

En el coeficiente relativo de raíz se registró un decremento significativo en presencia de 3 mM Si (**Figura 2.7A**). [Mali y Aery \(2008\)](#) reportan que, en trigo, el tratamiento con 100 ppm Si ocasionó mayor crecimiento de raíz, mientras que la aplicación de 400 y 800 ppm Si redujeron el crecimiento con respecto al testigo. Estos resultados difieren a los aquí obtenidos, debido a que el Si en todas las concentraciones evaluadas disminuyó el CRR. Por otra parte, en los distintos niveles de sequía se observó disminución significativa en el CRR respecto al testigo (**Figura 2.7B**). De la misma manera, [Duman \(2006\)](#) realizó un estudio en lechuga y menciona que el estrés por sequía disminuyó severamente el tamaño de la raíz.

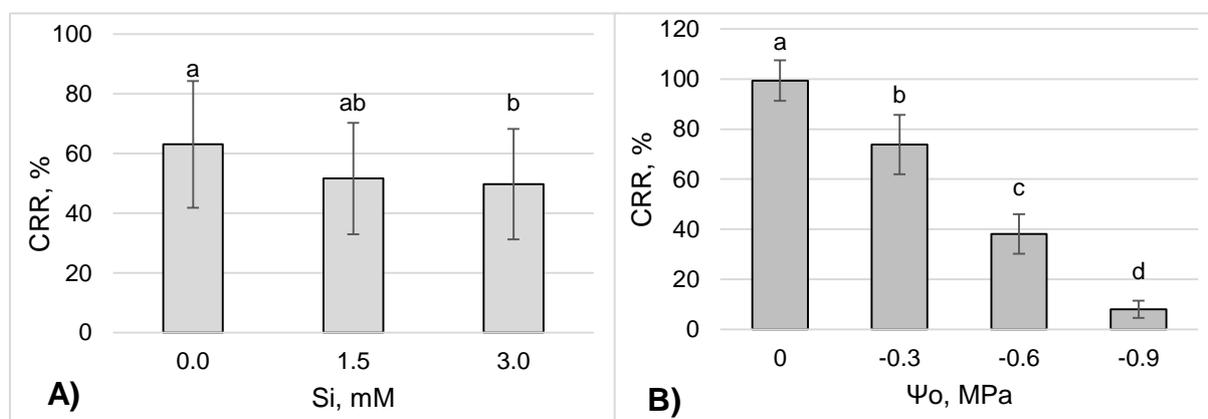


Figura 2.7. Coeficiente relativo de raíz (CRR) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

La interacción entre los factores de estudio Si y sequía en el CRR se muestra en el **Cuadro 2.3**. El Si no mitigó los efectos negativos que causa la sequía en ninguno de los niveles, y conforme el potencial osmótico disminuye el coeficiente relativo de raíz decrece. El crecimiento radical está determinado tanto por la elongación celular como por la continua producción de células del meristemo apical ([Dinneny y Benfey, 2008](#)). La sequía reduce drásticamente el crecimiento de raíz debido a que hay un decremento en la división y elongación celular, absorción y transporte de nutrimentos, se altera el metabolismo y la señalización de fitohormonas, así como también se modifica el metabolismo de las plantas en general ([Soroushi et al., 2011](#)).

2.3.4.5. Coeficiente relativo de vástago (CRV)

El coeficiente relativo de vástago decreció significativamente en presencia de Si (**Figura 2.8A**). De igual manera, cuando el potencial osmótico bajó, el CRV disminuyó significativamente (**Figura 2.8B**). Por otra parte, [Habibi \(2014\)](#) realizó un estudio en canola y encontró que el Si no tuvo efectos significativos cuando se suministró sin fuente de estrés; pero cuando hay presencia de estrés, presenta beneficios. En el estudio aquí presentado, el Si no presentó efectos positivos, independientemente de la presencia de estrés por sequía.

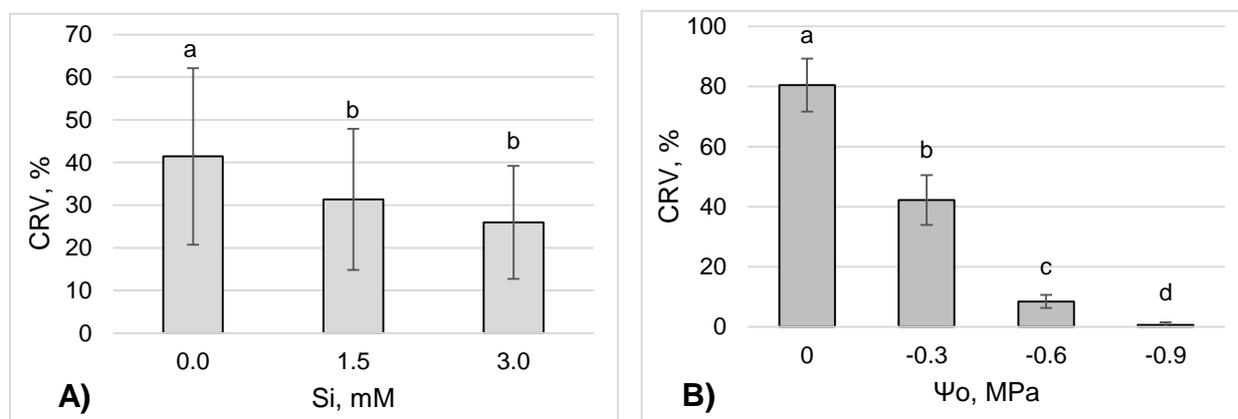


Figura 2.8. Coeficiente relativo de vástago (CRV) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Los efectos de la interacción de Si y sequía en el CRV se presentan en el **Cuadro 2.3**. El coeficiente relativo de vástago presentó decrementos con la adición de Si, además, conforme el nivel de estrés por sequía aumenta, el CRV disminuye, más aun, en el potencial osmótico -0.9 MPa donde el crecimiento de vástago casi se inhibe. [Hamayun et al. \(2010\)](#) indujeron en soya sequía con distintas concentraciones de PEG, registraron que conforme aumenta el nivel de sequía el tamaño del vástago disminuye. El estrés que genera la disminución del potencial osmótico ocasiona cambios negativos en la bioquímica y fisiología celular, afectando la función de las células ([Shao et al., 2008](#)).

2.3.4.6. Índice de germinación (IG)

El índice de germinación presentó un decremento en la adición de Si (**Figura 2.9A**). [Torabi et al. \(2012\)](#) realizaron un estudio en semillas de *Borago officinalis* L. tratadas

con Si, registraron que el mayor índice de germinación se obtuvo con 1.5 mM Si; sin embargo, el menor IG se tuvo con 2 mM Si. Por otra parte, conforme se disminuye el potencial osmótico el IG se reduce (**Figura 2.9B**). La germinación es uno de los estados más críticos en el ciclo de las plantas, bajo estrés hídrico, el bajo potencial osmótico es un factor determinante que puede inhibir la germinación de la semilla (Prisco *et al.*, 1992).

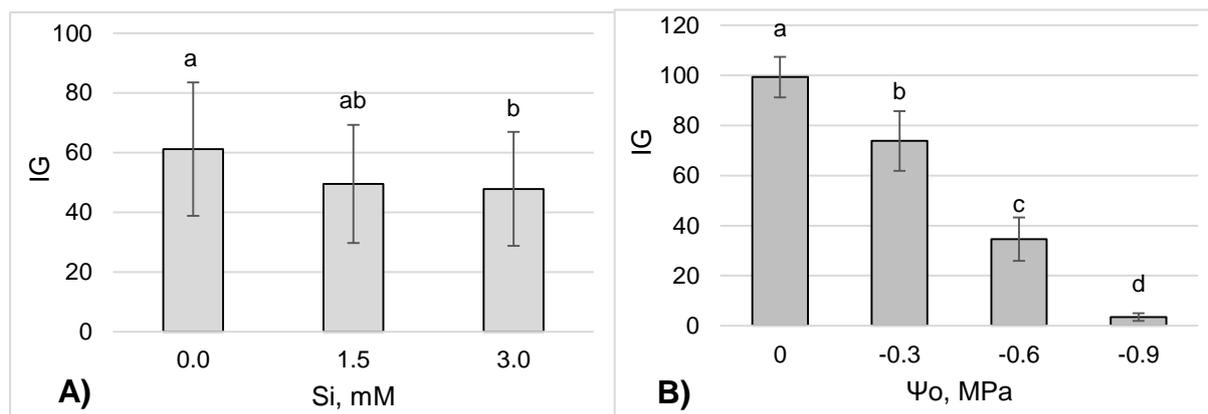


Figura 2.9. Índice de germinación (IG) de semillas de maíz tratadas con silicio durante la imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras iguales en cada figura, indican que no hay diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

El efecto de la interacción de los factores de estudio en el índice de germinación se muestra en el **Cuadro 2.3**. El Si mitiga los efectos negativos que genera la sequía, más no presenta beneficios en su aplicación sin fuente de estrés (Shi *et al.*, 2014). Resultados contrarios a los reportados por Shi *et al.* (2014), se obtuvieron en esta investigación, dado que el Si no mitigó los efectos adversos que ocasiona la disminución en el potencial osmótico. La reducción del índice de germinación en los distintos niveles de sequía se debe principalmente a que, con el incremento en este tipo de estrés, las células pierden turgencia y a su vez el volumen de células se reduce (Fathi y Tari, 2016).

2.3.5. Biomasa seca

2.3.5.1 Biomasa seca de vástago (BSV)

En la biomasa seca de vástago no se observaron diferencias significativas con la adición de Si (**Figura 2.10A**). Asimismo, el decremento en el potencial osmótico redujo

significativamente la BSV, observándose que el nivel -0.9 MPa la inhibió. [Li et al. \(2015\)](#) realizaron un estudio en tomate, y obtuvieron que el Si aumenta la BSV con y sin presencia de estrés por salinidad; resultados que difieren de los registrados en este estudio, donde el Si suministrado no ocasionó diferencias significativas en la BSV en ausencia de estrés, además, no mitigó los efectos negativos que causa el estrés hídrico cuando el potencial osmótico disminuye.

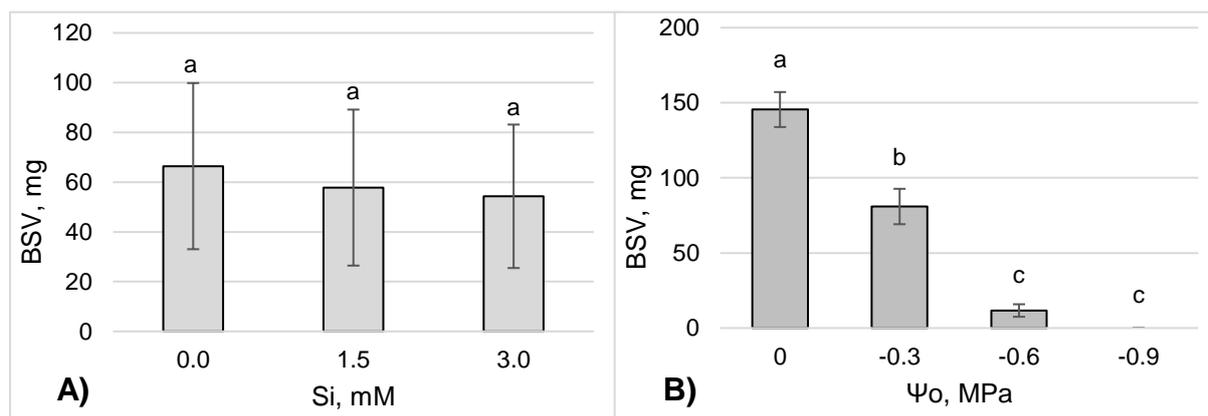


Figura 2.10. Biomasa seca de vástago (BSV) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Los efectos de la interacción de Si y sequía en las variables de biomasa seca se muestran en el **Cuadro 2.4**. La BSV presentó un decremento con la adición de silicio, de manera independiente al nivel de PEG8000. De igual manera, conforme el nivel de estrés por sequía aumentó, la BSV decreció. El estrés por salinidad, al igual que otros tipos de estrés abiótico inducen la producción de ERO's (especies reactivas de oxígeno), las cuales limitan la disponibilidad de la planta de utilizar la energía solar en la fotosíntesis ([Rossel et al., 2002](#)).

Cuadro 2.4. Efecto del PEG-8000 en semillas de maíz imbibidas con Si en la biomasa seca de vástago, raíz, grano, total y en la relación de biomazas secas de vástago:raíz.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Variables				
		BSV, mg	BSR, mg	BSG, mg	BSTOTAL, mg	RBSVBSR
0	0	158.0±32.0a	196.7±63.0b	2850.0±133.1g	3046.7±116.1e	3204.7±88.2d
0	-0.3	88.0±25.46b	195.0±42.1b	3184.7±131.7f	3379.7±109.3d	3467.7±89.8c
0	-0.6	19.7±6.0c	81.0±7.6c	3463.2±70.0cde	3544.2±77.0abc	3564.0±75.1abc
0	-0.9	0.0±0.0c	0.0±0.0e	3660.2±65.1ab	3660.2±65.1ab	3660.2±65.1ab
1.5	0	143.0±13.8a	249.5±57.6a	2784.2±53.0g	3033.7±58.0e	3176.7±68.1d
1.5	-0.3	81.0±33.8b	159.0±43.2b	3365.5±152.6def	3524.5±109.7bcd	3605.5±77.2abc
1.5	-0.6	7.2±8.3c	47.0±34.4cd	3559.0±163.4abc	3606.0±134.7abc	3613.2±127.0abc
1.5	-0.9	0.0±0.0c	3.2±6.5de	3704.5±98.6a	3707.7±103.5a	3707.7±103.5a
3.0	0	135.5±20.4a	261.5±10.0a	2793.2±174.3g	3054.7±170.5e	3190.2±157.4d
3.0	-0.3	73.7±10.5b	163.2±17.3b	3291.0±106.1ef	3454.2±92.8cd	3528.0±83.7bc
3.0	-0.6	8.0±4.0c	40.7±10.9cde	3514.0±217.3bcd	3554.7±208.6abc	3562.7±209.6abc
3.0	-0.9	0.0±0.0c	0.0±0.0e	3612.2±117.1abc	3612.2±117.1abc	3612.2±117.1abc

Medias ± DE con letra distinta en la columna, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05). BSV = Biomasa seca del vástago individual, BSR = Biomasa seca de raíz individual, BSG = Biomasa seca de grano individual, BSTOTAL = Biomasa seca total individual, RBSVBSR = Relación de biomasa seca de vástago y de raíz individual.

2.3.5.2. Biomasa seca de raíz (BSR)

La biomasa seca de raíz no mostró diferencias significativas en los tratamientos con Si (**Figura 2.11A**). Por otra parte, a medida que disminuye el potencial osmótico, la BSR decrece severamente (**Figura 2.11B**). [Romero-Aranda et al. \(2006\)](#) mencionan que el estrés por salinidad incrementa la biomasa seca de raíz; resultados contrarios a los aquí mostrados, donde el estrés generado por la sequía redujo significativamente la BSR.

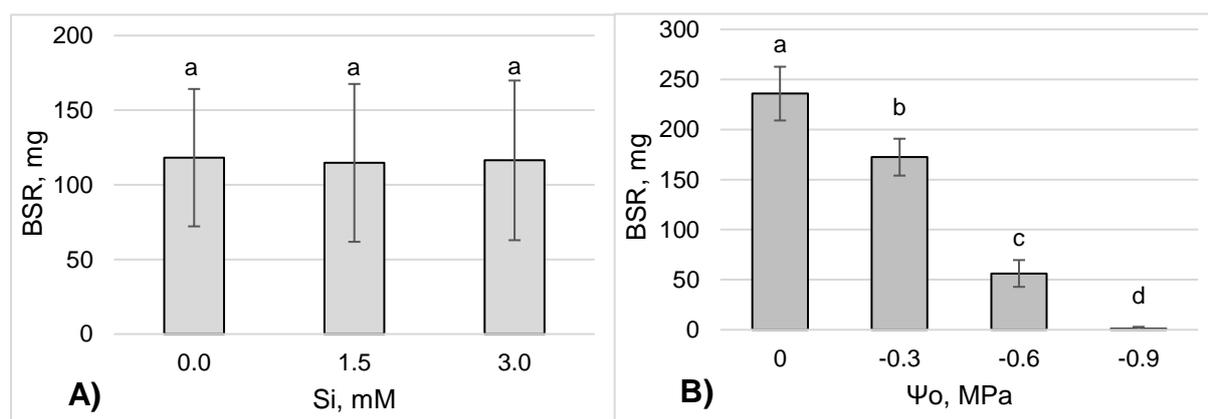


Figura 2.11. Biomasa seca de raíz (BSR) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias ± DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

En el **Cuadro 2.4**, se observa que el Si no ocasionó diferencias en la BSR, por otra parte, el decremento en el potencial osmótico disminuyó severamente la biomasa seca de raíz. El estrés osmótico es un tipo de estrés abiótico que restringe severamente la producción de los cultivos (Munns *et al.*, 2006).

2.3.5.3. Biomasa seca de grano (BSG)

En la biomasa seca de grano la adición de Si no ocasionó diferencias con respecto al testigo (**Figura 2.12A**). Por otra parte, conforme decrece el potencial osmótico, la BSG aumenta significativamente con respecto al testigo (**Figura 2.12B**).

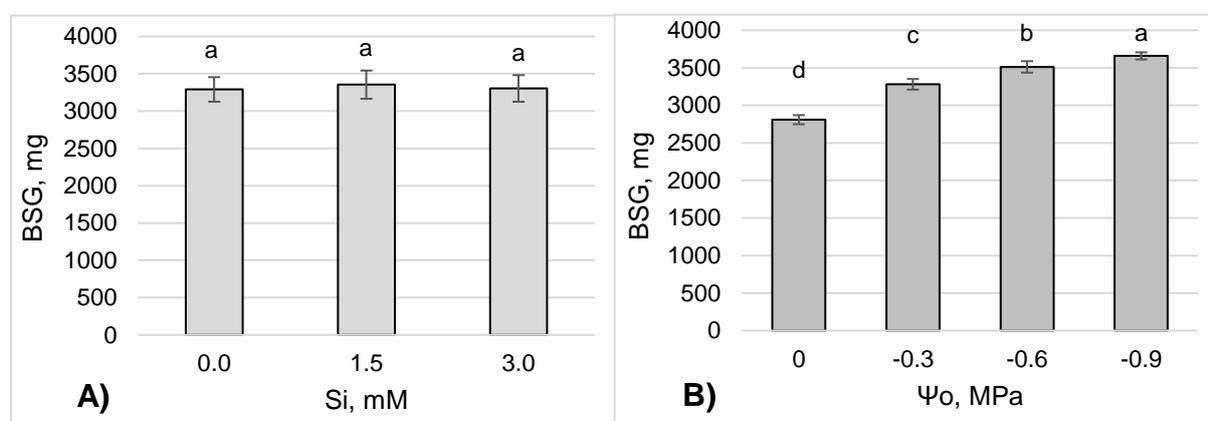


Figura 2.12. Biomasa seca de grano (BSG) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

En la biomasa seca de grano se registró un aumento conforme aumenta el nivel de estrés por sequía, debido a que se reduce el porcentaje de germinación y, la semilla cuando germina sufre un decremento en el peso, debido al proceso de movilización de reservas (Pritchard *et al.*, 2002).

La interacción de los factores de estudio no fue significativa en la BSG (**Cuadro 2.4**).

2.3.5.4. Biomasa seca total (BST)

La biomasa seca total no presentó diferencias significativas en ninguno de los tratamientos en adición de silicio con respecto al testigo (**Figura 2.13A**). En los tratamientos de sequía, conforme el nivel de estrés se incrementa, la biomasa seca total aumenta significativamente en comparación al testigo; lo anterior porque se

considera la biomasa seca de grano (**Figura 2.13B**). [Chen et al. \(2011\)](#) mencionan que el estrés por sequía inhibe la acumulación de biomasa en plántulas de arroz.

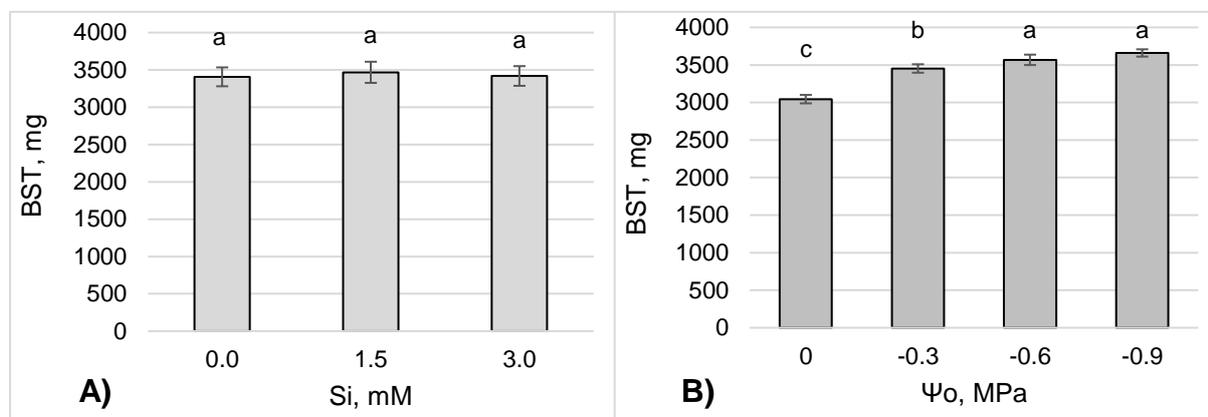


Figura 2.13. Biomasa seca total (BST) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

La BST no tuvo diferencias con la adición de Si, por otra parte, la BST aumenta con respecto a que el nivel de sequía se incrementa (**Cuadro 2.4**). Esto es así, debido a que se toma en cuenta en esta variable los pesos de BSV, BSR y BSG, de tal manera que, la BSG influye radicalmente en la BST, por tener un mayor peso con respecto a las otras variables de biomasa. Asimismo, la BSG tiene un peso más alto conforme el potencial osmótico decrece, debido a que se reduce el porcentaje de germinación de las semillas. [Pritchard et al. \(2002\)](#) menciona que la semilla que no germinó tiene un mayor peso por el proceso de movilización de reservas que se inicia con la germinación no ocurre.

2.3.5.5. Relación de biomasa seca de vástago y de raíz (RBSVBSR)

La relación de biomasa seca de vástago y de raíz es un parámetro que fisiológicamente refleja la inversión de fotosintatos entre los órganos de la parte inferior o superior de la planta, inducidos por estreses bióticos o abióticos ([Mokany et al., 2006](#)). En la relación de biomasa seca de vástago y de raíz, no se presentaron diferencias significativas con la adición de Si (**Figura 2.14A**). Por otra parte, en los tratamientos con sequía se presentó un aumento en la relación de biomasa seca de vástago y raíz conforme incrementa el nivel de estrés, porque se consideró el peso de la biomasa seca de grano (**Figura 2.14B**). [Ahmad et al. \(2017\)](#) mencionan que

conforme aumenta el nivel de sequía, el peso seco de la raíz, lo que reduce la relación de biomasa seca vástago:raíz.

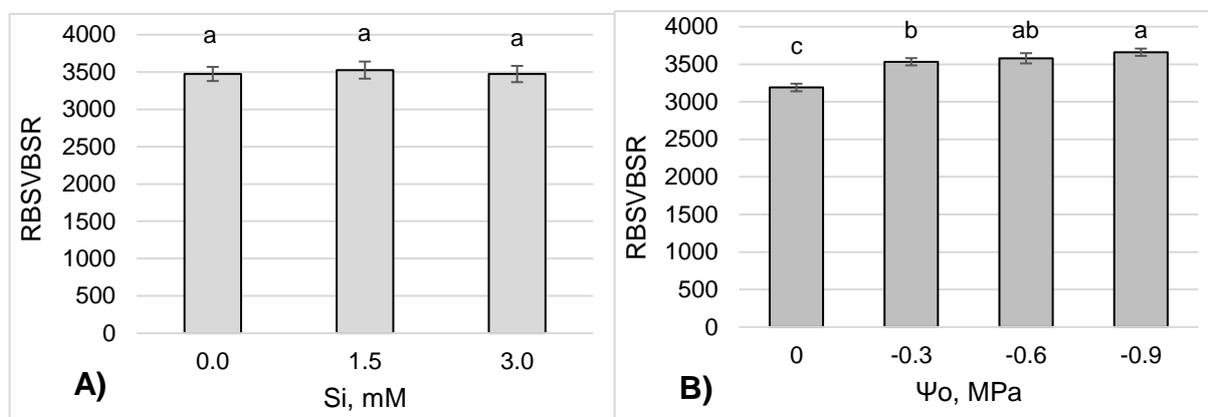


Figura 2.14. Relación de biomasa seca de vástago y raíz (RBSVBSR) de plántulas provenientes de semillas de maíz tratadas con diferentes dosis de silicio en imbibición (A) y con sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante la germinación (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

El uso de Si no mostró efectos significativos en la relación de biomasa seca de vástago y raíz, mientras que el incremento en los niveles de sequía aumentó la RBSVBSR (**Cuadro 2.4**). La sequía es un importante tipo de estrés abiótico, el cual tiene influencia negativa en el crecimiento y fisiología de la planta (Yao *et al.*, 2009).

2.4. CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que la disminución en los potenciales osmóticos (mayor estrés hídrico) retrasa severamente la germinación, disminuye la altura de plántulas, al igual que la longitud de raíz y las variables de biomasa seca; excepto la del grano.

La fuente de Si empleada no mitigó los efectos negativos que causa la sequía; por el contrario, la imbibición con Si generó una disminución en la altura de plántula y longitud de raíz, y se observó un efecto negativo en la mayoría de las variables de germinación.

Dados los resultados obtenidos con el Si suministrado a partir de metasilicato de sodio, en estudios futuros se recomienda evaluar otras fuentes de Si.

2.5. LITERATURA CITADA

- Ahmad NS, Kareem SHS, Mustafa KM, Ahmad DA. 2017. Early screening of some Kurdistan wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under drought stress. *J Agric Sci* 9: 88-103. DOI: 10.5539/jas.v9n2p88
- Almaghrabi OA. 2012. Impact of drought stress on germination and seedling growth parameters of some wheat cultivars. *Life Sci J* 9: 590-598.
- Al-Mударis MA. 1998. Notes on various parameters recording the speed of seed germination. *Der Tropenlandwirt* 99: 147-154.
- Amin M, Ahmad R, Ali A, Aslam M, Lee DJ. 2016. Silicon fertilization improves the maize (*Zea mays* L.) performance under limited moisture supply. *Cereal Res Commun* 44: 172-185. DOI: 10.1556/0806.43.2015.035
- Chachar Z, Cachar NA, Chachar QI, Mujtaba SM, Chachar GA, Chachar S. 2016. Identification of drought tolerant wheat genotypes under water deficit conditions. *Int J Res-Granthaalayah* 4: 206-214.
- Chen Q, Xiaoqin Y, Cai K, Chen J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biol Trace Elem Res* 142: 67-76. DOI: 10.1007/s12011-010-8742-x
- Delavar K, Ghanati F, Zare-Maivan H, Behmanesh M. 2017. Effects of silicon on the growth of maize seedlings under normal, aluminium, and salinity stress conditions. *J Plant Nutr* 40: 1475-1484. DOI: 10.1080/01904167.2016.1269344
- Dinneny JR, Benfey PN. 2008. Plant stem cell niches: standing the test of time. *Cell* 132: 553-557.
- Djibril S, Mohamed OK, Alain B. 2005. Growth and development of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seedlings under drought and salinity stresses. *Afr J Biotechnol* 4:968-972.
- Duman I. 2006. Effects of seed priming with PEG or K₃PO₄ on germination and seedling growth in lettuce. *Pak J Biol Sci* 11: 923-928.
- Efeoğlu B, Ekmekçi Y, Çiçek N. 2009. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *S Afr J Bot* 75: 34-42. DOI: 10.1016/j.sajb.2009.02.177
- Farsani A, Ghobadi ME. 2009. Effects of PEG and NaCl stress on two cultivars of corn (*Zea mays* L.) at germination and early seedling stages. *IJABE* 3: 442-445.
- Fathi A, Tari DB. 2016. Effect of drought stress and its mechanism in plants. *Int J Life Sci* 10: 1-6. DOI: 10.3126/ijls.v10i1.14509

- Gong H, Chen K, Chen G, Wang S, Zhang C. 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. *J Plant Nutr* 26: 1055-1063. DOI: 10.1081/PLN-120020075
- Habibi G. 2014. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. *Russ J Plant Physiol* 61: 784- 791. DOI: 10.1134/S1021443714060077
- Hamayun M, Khan SA, Shinwari ZK, Khan AL, Ahmad N, Lee I. 2010. Effect of polyethylene glycol induced drought stress on physio-hormonal attributes of soybean. *Pak J Bot* 42:977-986.
- Hattori T, Inanaga S, Araki H, An P, Morita S, Luxová M, Lux A. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. *Physiol Plantarum* 123: 459-466. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x
- ImageJ. 2017. Image processing and analysis in java. ImageJ bundled with java 1.8.0_101.
- Jones K, Sanders D. 1987. The influence of soaking pepper seed in water or potassium salt solutions on germination at three temperatures. *J Seed Technol* 11: 97-102.
- Jorgensen EE, Chesser KL. 2000. Intraspecific differences in grass seed imbibition. *West N Am Nat* 60:433-438.
- Kamran M, Shahbaz M, Ashraf M, Aisha NA. 2009. Alleviation of drought-induced adverse effects in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) using proline as a pre-sowing seed treatment. *Pak J Bot* 41: 621-632.
- Khayatnezhad M, Gholamin R, Jamaati-e-Somarin S, Zabihi-e-Mahmoodabad R. 2010. Effects of peg stress on corn cultivars (*Zea mays* L.) at germination stage. *World Appl Sci J* 11: 504-506
- Kim Y, Khan AL, Kim D, Lee S, Kim K, Waqas M, Jung H, Shin J, Kim J, Lee I. 2014. Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones. *BMC Plant Biol* 14:13. DOI: 10.1186/1471-2229-14-13
- Lambers H, Chapin FS, Pons TL. 2008. *Plant Physiological Ecology*, 2nd Ed. Springer, New York. 622 p. DOI: 10.1007/978-0-387-78341-3
- Li H, Zhu Y, Hu Y, Han W, Gong H. 2015. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiol Plant* 37: 71. DOI: 10.1007/s11738-015-1818-7
- Lisar SYS, Motafakkerzad R, Hossain MM, Rahman IMM. 2012. Water stress in plants: causes, effects and responses. *InTech* 15p. DOI: 10.5772/39363

- Ma JF. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci Plant Nutr* 50: 11-18. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447
- Machado RMA, Serralheiro RP. 2017. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae* 3: 30. DOI: 10.3390/horticulturae3020030
- Maghsoudi K, Emam Y. 2016. The effect of exogenous silicon on seed germination and seedling growth of wheat cultivars under salt stress conditions. *Iran Agric Res* 35: 1-8.
- Maguire JD. 1962. Speed of germination – aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci* 2: 176-177. DOI: 10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x
- Mahajan S, Tuteja N. 2005. Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Arch Biochem Biophys* 444: 139-158. DOI: 10.1016/j.abb.2005.10.018
- Mali M, Aery NC. 2008. Influence of silicon on growth, relative water content and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. *J Plant Nutr* 31: 1867- 1876. DOI: 10.1080/01904160802402666
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS. 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biol* 12: 84-96. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x
- Munns R, James RA, Lauchli A. 2006. Approaches to increase the salt tolerance of wheat and other cereals. *J Exp Bot* 57: 1025-1043. DOI: 10.1093/jxb/erj100
- Nascimento AM, Assis FA, Moraes JC, Souza BHS. 2018. Silicon application promotes rice growth and negatively affects development of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith). *J Appl Entomol* 142: 241-249. DOI: 10.1111/jen.12461
- Nasseri M, Arouiee K, Kafi M, Neamati H. 2012. Effect of silicon on growth and physiological parameters in fenugreek (*Trigonella foenumgraceum* L.) under salt stress. *Int J Agric Crop Sci* 21: 1554-1558.
- Nuss ET, Tanumihardjo SA. 2010. Maize: a paramount staple crop in the context of global nutrition. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 9: 417–436. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00117.x
- Nonogaki H, Bassel GW, Bewley JD. 2010. Germination - Still a mystery. *Plant Sci* 179: 574-581. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.02.010
- Prisco JT, Baptista CR, Pinheiro E JL. 1992. Effect of seed pre-treatment on seed germination under water stress condition. *Rev Bras Bot* 15: 31-35.

- Pritchard SL, Charlton WL, Baker A, Graham IA. 2002. Germination and storage reserve mobilization are regulated independently in Arabidopsis. *Plant J* 31: 649-647.
- Ribera-Fonseca A, Rumpel C, Mora M.L., Nikolic M, Cartes P. 2018. Sodium silicate and calcium silicate differentially affect silicon and aluminium uptake, antioxidant performance and phenolics metabolism of ryegrass in an acid Andisol. *Crop & Pasture Science* 69: 205-215. DOI: 10.1071/CP17202
- Romero-Aranda MR, Jurado O, Cuartero J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *J Plant Physiol* 163: 847-855. DOI: 10.1016/j.jplph.2005.05.010
- Rossel JB, Wilson IW, Pogson BJ. 2002. Global changes in gene expression in response to high light in Arabidopsis. *Plant Physiol* 130:1109–1120. DOI: 10.1104/pp.005595
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Sayer SA, Gadallah MAA. 2014. Effects of silicon on Zea mays plants exposed to water and oxygen deficiency. *Russ J Plant Physiol* 61: 460-466. DOI: 10.1134/S1021443714040165
- Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, Zhao CX. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C R Biol* 331: 215-225. DOI: 10.1016/j.crv.2008.01.002
- Sharma RK, Sharma S. 2010. Effect of storage and cold-stratification on seed physiological aspects of *Bunium persicum*: A Threatened medicinal herb of trans-Himalaya. *Int J Botany* 6: 151-156. DOI: 10.3923/ijb.2010.151.156
- Shi Y, Zhang Y, Han W, Feng R, Hu Y, Guo J, Gong H. 2016. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Front Plant Sci* 7:196. DOI: 10.3389/fpls.2016.00196
- Shi Y, Zhang Y, Yao H, Wu J, Syn H, Gong H. 2014. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. *Plant Physiol Biochem* 78: 27-36. DOI: 10.1016/j.plaphy.2014.02.009
- SIAP. 2018. Producción agrícola: OI + PV 2016. Disponible en línea en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/. Consultado: abril 07, 2018.

- Soroushi H, Nejad TS, Shoukofar A, Soltani M. 2011. The interaction of drought stress and gibberellic acid on corn (*Zea mays* L.). *World Acad Sci Eng Technol* 60:142-143.
- Tam NFY, Tiquia SM. 1994. Assessing toxicity of spent pig litter using seed a germination technique. *Resour Conserv Recy* 11:261-274. DOI: 10.1016/0921-3449(94)90094-9
- Torabi F, Majd A, Enteshari S. 2012. Effect of exogenous silicon on germination and seedling establishment in *Borago officinalis* L. *J Med Plants Res* 6:1896-1901. DOI: 10.5897/JMPR11.1307
- Van den Berg L, Zeng YJ. 2006. Response of South African indigenous grass species to drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) 6000. *Afr J Bot* 72: 284-286.
- Verslues PE, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, Zhu J, Zhu J. 2006. Methos and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *Plant J* 45: 523-539. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x
- Yao XQ, Chu JZ, Wang GY. 2009. Effects of drought stress and selenium supply on growth and physiological characteristics of wheat seedlings. *Acta Physiol Plant* 31:1031-1036. DOI: 10.1007/s11738-009-0322-3
- Zhang XH, Zhou D, Cui JJ, Ma HL, Lang DY, Wu XL, Wang ZS, Qiu HY, Li M. 2015. Effect of silicon on seed germination and the physiological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* under different levels of salinity. *J Horti Sci Biotech* 90: 439-443. DOI: 10.1080/14620316.2015.11513207
- Zhu YX, Gong HJ. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron Sustain Dev* 34: 455–472. DOI: 10.1007/s13593-013-0194-1

CAPÍTULO III. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS POR SEQUÍA EN FASE VEGETATIVA EN MAÍZ

RESUMEN

La sequía es el principal factor de estrés abiótico que limita la productividad de los cultivos, debido a que afecta negativamente el crecimiento, desarrollo, y por consecuencia el rendimiento de los cultivos. Asimismo, el silicio (Si) es un elemento no considerado esencial, pero sí benéfico debido a que disminuye los efectos adversos causados por distintos agobios ambientales. En este estudio se evaluó el efecto del Si en la mitigación de efectos negativos que causa la sequía en fase vegetativa en maíz. Se establecieron 12 tratamientos con 3 repeticiones y 4 plantas por repetición. La unidad experimental constó de un recipiente plástico con capacidad de 4 L. Se emplearon cuatro niveles de sequía inducida con polietilenglicol [potenciales osmóticos (Ψ_o) 0, -0.3, -0.6 y -0.9 MPa] y tres dosis de Si (0, 1.5 y 3 mM $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$); los tratamientos se iniciaron a los 21 días después de trasplante y se mantuvieron durante 7 días. Las variables evaluadas fueron: altura de planta (2 y 7 días con tratamiento, DT), variables fotosintéticas (concentración intracelular de CO_2 , conductancia estomática, tasa fotosintética y transpiración), volumen de raíz, biomasa seca de vástago y raíz, concentración y acumulación nutrimental. La sequía disminuyó la altura de planta, la conductancia estomática, tasa fotosintética y la biomasa seca de vástago. Por otra parte, la adición de silicio incrementó la biomasa seca de vástago y raíz, así como también la concentración y acumulación nutrimental.

Palabras clave: estrés abiótico; PEG-8000; elementos benéficos; potencial osmótico

3.1. INTRODUCCIÓN

La sequía es catalogada como uno de los estreses abióticos más devastadores que ataca a las plantas, esto se debe principalmente a las bajas precipitaciones de regiones específicas (Vurukonda *et al.*, 2016). Los efectos negativos de la sequía en el crecimiento y rendimiento de los cultivos se deben sustancialmente a la disminución en la absorción de agua y nutrimentos, así como también, a la apertura y cierre de estomas (Farooq *et al.*, 2009). Por otra parte, el Si es un elemento considerado no esencial para las plantas superiores, pero algunos autores lo mencionan como benéfico (Castellanos-González *et al.*, 2015). Es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, se encuentra presente en distintas formas

minerales, pero su disponibilidad para las plantas es muy baja (Etesami y Jeong, 2018). Se ha demostrado que el Si presenta efectos positivos en la mitigación de estreses del tipo abiótico principalmente como lo son la sequía y salinidad (Cooke y Leishman, 2016). Asimismo, el maíz es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, debido a que se utiliza como fuente de alimento, así como también en la industria para la producción de aceite, alcohol y etanol (Ranum *et al.*, 2014). Esta especie se cultiva prácticamente en todo el mundo, alcanzando una superficie de más de 187 millones de hectáreas, por lo cual es considerado el segundo cultivo básico de mayor importancia a nivel mundial (FAO, 2018). En 2017, se sembraron 21 590 574 hectáreas en el país, de las cuales 7 540 942 pertenecen a maíz (SIAP, 2018), correspondiente a un 34.9 % de la superficie cultivada.

En contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos del silicio en la mitigación de efectos de estrés causados por la sequía en maíz blanco híbrido SB-308 en fase vegetativa.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Ubicación del experimento y material vegetal

Esta investigación se llevó a cabo en un invernadero tipo baticenital perteneciente al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, localizado en Texcoco de Mora, Estado de México, coordenadas 19° 27' 47.9" LN 98° 54' 12.8" LO a 2243 de altitud. Se emplearon semillas de maíz (*Zea mays* L.) blanco híbrido SB-308 de la casa comercial Berentsen. Este híbrido es de los más utilizados por productores del estado de México, debido a que tiene un buen desarrollo en valles altos, y además tiene un bajo costo de adquisición en el mercado.

3.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Se realizó un experimento factorial 3 x 4, donde los factores de estudio fueron el Si y la sequía. La fuente de Si fue metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, JT Baker®) y los niveles de éste fueron 0, 1.5 y 3.0 mM. La sequía se generó con Polietilenglicol 8000 (PEG 8000, Sigma-Aldrich®) en los niveles: 0, -0.3, -0.6 y -0.9 MPa de potencial osmótico (Ψ_o). Los 12 tratamientos resultantes fueron distribuidos completamente al azar dentro del invernadero. La unidad experimental constó de un recipiente plástico de 4 L de capacidad, se utilizaron cuatro plantas por repetición y el tratamiento tuvo tres repeticiones.

3.2.3. Producción de plántulas

La germinación y producción de plántula se llevó a cabo en charolas de poliestireno expandido (EPS) de 200 cavidades utilizando turba como sustrato (Pro-mix®). Después de la emergencia se aplicaron riegos ligeros 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 (SN) de Steiner (Steiner, 1984) al 50% SN, tercera semana 75% SN y por último cuarta semana 100% SN, hasta su trasplante.

3.2.4. Aplicación de tratamientos

Una vez producida la plántula se trasplantó en los contenedores de plástico. Se utilizó un sistema hidropónico de balsa flotante dotado de un sistema de oxigenación. En los recipientes plásticos se suministró la solución nutritiva de Steiner al 100%; 21 días después del trasplante se suministraron los tratamientos, mismos que se adicionaron a la solución nutritiva. Se ajustó el pH de los tratamientos a un rango entre 5.5 y 6.5 cada 48 h, utilizando ácido sulfúrico (H₂SO₄) como fuente acidificante e hidróxido de sodio (NaOH) como alcalinizante.

3.2.5. Variables evaluadas

Altura de planta. Esta se tomó dos días con tratamientos (DT) y a los 7 DT.

Volumen de raíz. Una vez concluido el experimento, esta se determinó utilizando 200 mL de agua en un vaso de precipitado de 500 mL de capacidad, sumergiendo completamente la raíz de la planta en el agua y se registró el volumen de agua desplazado.

Variables fotosintéticas. Se llevaron a cabo con un analizador de los gases infrarrojo (IRGA), modelo PP Systems Ciras-2 (Amesbury, Massachusetts, E.U.A.) entre las 10 y 11 h del día, donde se evaluaron las características asociadas con la fotosíntesis: concentración intercelular de CO₂, y tasa fotosintética; y asociadas con el uso eficiente del agua: transpiración y conductancia estomática. Las evaluaciones se realizaron en etapa V4, empleando la cuarta hoja completamente desarrollada para hacer el muestreo.

Peso de biomasa seca de vástago y raíz. Una vez concluido el experimento, se separó vástago y raíz, mismos que se pusieron a secar dentro de una estufa de

circulación de aire forzado a 72 °C por 48 h. transcurrido el tiempo de secado, se pesaron individualmente las muestras en una balanza analítica.

Concentración de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Si, y micronutrientes en hojas, vástago, raíz, espiga y jilote. 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 H₂SO₄ y C₇H₆O₃. Para la determinación de P, K, Ca, Mg, micronutrientes (excepto Cl), Na y Si, se llevó a cabo una digestión húmeda con HNO₃ y HClO₄ ([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).

3.2.6. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de Tukey al nivel de probabilidad 0.05 para cada parámetro con el paquete estadístico SAS Institute Inc ([SAS, 2011](#)).

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Altura de plantas

La altura de planta no fue influenciada por el suministro del Si en las dos evaluaciones realizadas (2 y 7 ddt). Por otra parte, a medida que el potencial osmótico de la solución nutritiva se reduce, disminuye significativamente la altura de planta, en ambos muestreos (**Cuadro 3.1**).

Cuadro 3.1 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la altura de plantas de maíz.

Factor de estudio	Altura de plantas, cm	
	2 DT	7 DT
Si, mM		
0.0	34.69 a	40.93 a
1.5	34.77 a	40.64 a
3.0	34.89 a	39.18 a
Ψ_o, MPa		
0.0	37.72 a	45.83 a
-0.3	33.05 b	40.94 ab
-0.6	35.37 ab	38.16 b
-0.9	33.00 b	36.08 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). DT = Días con tratamiento.

Después de 2 DT, se observó el efecto positivo del Si a una dosis de 3 mM en ausencia de PEG en la solución nutritiva. A los 7 DT, se registraron los valores más altos en 0, 1.5 y 3.0 mM de Si sin fuente de estrés. Por otra parte, los niveles de Si solo mitigaron los efectos de estrés en el nivel -0.3 MPa de Ψ_o . (**Cuadro 3.2**).

Cuadro 3.2 Altura de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Altura de plantas, cm	
		2 DT	7 DT
0.0	0.0	36.29 b	44.83 a
0.0	-0.3	31.29 b	38.75 ab
0.0	-0.6	37.62 b	40.00 ab
0.0	-0.9	33.58 b	40.16 ab
1.5	0.0	36.54 b	47.58 a
1.5	-0.3	34.87 b	41.16 ab
1.5	-0.6	34.33 b	37.66 ab
1.5	-0.9	33.33 b	36.16 ab
3.0	0.0	40.33 a	45.08 a
3.0	-0.3	33.00 b	42.91 ab
3.0	-0.6	34.16 b	36.83 ab
3.0	-0.9	32.08 b	31.91 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). DT = Días con tratamiento.

[Amin et al. \(2016\)](#) en maíz reportaron que la adición de Si aumenta la altura de la planta cuando no hay presencia de estrés; resultados que coinciden con los obtenidos en este estudio. El decremento en la altura en plantas bajo estrés por sequía se debe principalmente a la disminución en división y elongación celular ([Jaleel et al., 2009](#)). Asimismo, [Ahmed et al. \(2013\)](#) hacen referencia al aumento en la altura de plantas bajo estrés por sequía como un importante rol del silicio, el cual mejora el estatus hídrico de las plantas estresadas.

3.3.2. Variables fotosintéticas

El factor Si no tuvo efecto en las variables fotosintéticas en maíz en fase vegetativa (**Cuadro 3.3**). Por otra parte, con el nivel de potencial osmótico -0.9 MPa se tuvo el valor más alto en la concentración intercelular de CO_2 (C_i), con respecto al resto de los niveles de potencial osmótico. La transpiración (E) no presentó diferencias estadísticas entre los distintos niveles de potenciales osmóticos. En la conductancia estomática (G_s), el valor más alto se tuvo en ausencia de estrés y disminuyó

significativamente con el nivel de -0.6 MPa. Las tasas fotosintéticas (Ph) más altas se obtuvieron sin fuente de estrés y con -0.3 MPa de potencial osmótico.

Cuadro 3.3 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en las variables fotosintéticas de plantas de maíz.

Factor de estudio	Variables fotosintéticas			
	Ci, $\mu\text{mol mol}^{-1}$	E, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Ph, $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Si, mM				
0.0	135.08 a	1.00 a	49.75 a	11.06 a
1.5	78.75 a	0.73 a	51.66 a	14.00 a
3.0	90.58 a	0.65 a	45.91 a	9.58 a
Ψ_o, MPa				
0	0 b	0.87 a	63.66 a	21.12 a
-0.3	4.55 b	0.85 a	61.00 ab	16.32 a
-0.6	71.11 b	1.11 a	27.55 b	5.52 b
-0.9	330.22 a	0.35 a	44.22 ab	3.23 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Ci = Concentración intercelular de CO_2 ; E = Transpiración; Gs = Conductancia estomática; Ph = Tasa fotosintética.

La transpiración (E) y la conductancia estomática (Gs) no fueron afectadas por los factores de estudio (**Cuadro 3.4**). De manera general, la concentración intercelular de CO_2 (Ci) fue superior en el nivel de potencial osmótico -0.9 MPa, independientemente del nivel de Si. La tasa fotosintética registró sus valores más altos con 0 y 1.5 mM de Si y ausencia de estrés.

Cuadro 3.4 Variables fotosintéticas de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Variables fotosintéticas			
		Ci, $\mu\text{mol mol}^{-1}$	E, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Ph, $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
0.0	0.0	0.00 c	0.67 a	48.67 a	22.17 a
0.0	-0.3	0.00 c	0.73 a	57.00 a	17.57 ab
0.0	-0.6	169.00 abc	2.43 a	27.67 a	4.47 ab
0.0	-0.9	371.33 a	0.20 a	65.67 a	0.07 b
1.5	0.0	0.00 c	0.93 a	66.00 a	22.60 a
1.5	-0.3	7.33 c	0.97 a	64.67 a	17.37 ab
1.5	-0.6	44.33 bc	0.57 a	33.67 a	6.77 ab
1.5	-0.9	263.33 ab	0.47 a	42.33 a	9.27 ab
3.0	0.0	0.00 c	1.03 a	76.33 a	18.60 ab
3.0	-0.3	6.33 c	0.87 a	61.33 a	14.03 ab
3.0	-0.6	0.00 c	0.33 a	21.33 a	5.33 ab
3.0	-0.9	356.00 a	0.40 a	48.67 a	0.37 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Ci = Concentración intercelular de CO_2 ; E = Transpiración; Gs = Conductancia estomática; Ph = Tasa fotosintética.

En un estudio realizado en plantas de maíz con suministro de Si y sequía [Amin et al. \(2016\)](#) encontraron que la adición de Si decrece la transpiración y aumenta la tasa fotosintética; resultados que concuerdan con los obtenidos en este estudio. La capacidad de mitigación de estrés en plantas que presentan déficit hídrico tratadas con silicio se atribuye a la disminución en la transpiración, debido a la deposición de Si debajo de la cutícula de las hojas ([Kurdali et al., 2013](#)). [Savvas et al. \(2009\)](#) mencionan que el atributo del Si es mejorar la tasa fotosintética de plantas que presentan estrés hídrico, disminuyendo los efectos negativos de la sequía, depositándose como gel de sílice coloidal (SiO_2) en los vasos del xilema y pared celular de las hojas; decreciendo el flujo de agua transpirada que cruza las células de la raíz hacia los vasos de xilema y proporciona una barrera a la transpiración cuticular. Por otra parte, [Xie et al. \(2015\)](#) reportan que el Si aumenta la concentración intracelular de CO_2 y la conductancia estomática; resultados que difieren con los registrados en este estudio, debido a que, el Si decreció los valores de la concentración intracelular de CO_2 en sus dos niveles con respecto al testigo, y en el caso de conductancia estomática solo se incrementó con 1.5 mM Si y en 3.0 mM disminuyó. La adición de Si mejora la conductancia estomática de plantas de arroz bajo estrés salino, denotando que los silicatos reducen la absorción de Na disminuyendo la tasa de transpiración ([Ali et al., 2012](#)). La concentración intracelular de CO_2 (C_i) aumenta con la adición de Si, por lo que se atribuye efecto de mitigación del estrés evitando que disminuyan las actividades de las enzimas fotosintéticas de las células del mesófilo de las hojas ([Parveen y Ashraf, 2010](#)); resultados contrarios a los aquí observados, donde la adición de silicio redujo la concentración intracelular de CO_2 y cuando el potencial osmótico disminuyó, esta variable aumentó.

3.3.3. Volumen de raíz

En los efectos principales del Si y sequía inducida con PEG-8000, no mostraron diferencias estadísticas significativas los distintos niveles evaluados en el volumen radical de plantas de maíz (**Figura 3.1 A y B**).

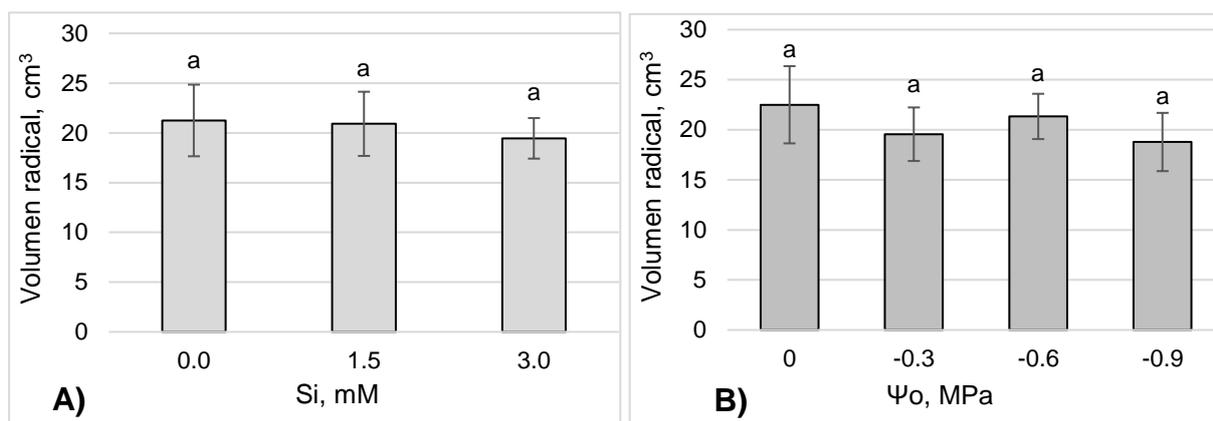


Figura 3.1 Volumen radical de plantas de maíz tratadas con distintos niveles de silicio (A) y sequía inducida con PEG-8000 (diferentes potenciales osmóticos, Ψ_o) durante fase vegetativa (B). Medias \pm DE con letras distintas en cada figura, indican diferencias estadísticas significativas

El volumen radical de plantas de maíz no presentó diferencias estadísticas significativas en ninguna de las combinaciones de Si y PEG-8000 evaluadas (**Cuadro 3.5**).

Cuadro 3.5 Volumen radicular de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de potencial osmótico (Ψ_o) y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Volumen radicular, mL
0.0	0.0	25.83 a
0.0	-0.3	21.33 a
0.0	-0.6	20.50 a
0.0	-0.9	17.33 a
1.5	0.0	20.83 a
1.5	-0.3	17.33 a
1.5	-0.6	23.83 a
1.5	-0.9	21.66 a
3.0	0.0	20.83 a
3.0	-0.3	20.00 a
3.0	-0.6	19.66 a
3.0	-0.9	17.33 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

[Vaculík et al. \(2012\)](#) realizaron un estudio en plantas de maíz y obtuvieron que el silicio incrementa el crecimiento de la raíz y disminuye los efectos negativos que causa el Cd; resultados que coinciden parcialmente con los nuestros, debido a que el silicio no aumentó la altura de la planta, pero si disminuyó la afectación en el volumen radical, en los niveles -0.6 y -0.9 MPa de potencial osmótico con 1.5 mM Si. [Hattori et al.](#)

(2003) reportan que el Si promueve la elongación de la raíz en sorgo (*Sorghum bicolor* L.), además mejora la extensibilidad de la pared celular en la zona de crecimiento de la raíz, por lo que se cree que es uno de los factores causales que promueven el alargamiento de la raíz. El crecimiento de las células depende principalmente de la turgencia para agrandar las paredes celulares, pero ésta se ve afectada por el estrés osmótico (Yazici *et al.*, 2007), lo que genera un decremento en el tamaño de raíz y la severidad del estrés osmótico dependerá del nivel de estrés al que esté sometido. Además, debido a la limitación en el crecimiento radical, se ven afectados los movimientos de difusión y la absorción de nutrimentos como P, NH₄⁺, K, Fe, Zn, Mn y Cu (Wan *et al.*, 2001).

3.3.4. Biomasa seca de raíz y vástago

Los efectos principales del Si mostraron que la dosis de 1.5 mM produce la biomasa seca de raíz y vástago más alta (**Cuadro 3.6**). Por otra parte, en los efectos principales de sequía inducida, muestran que el valor más alto de biomasa seca de raíz se obtuvo en el tratamiento -0.3 MPa de potencial osmótico. La biomasa seca de vástago más elevada se registró en 0.0 y -0.3 MPa, reduciéndose ésta de manera gradual con el decremento del potencial osmótico.

Cuadro 3.6 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la biomasa seca de raíz y vástago de plantas de maíz.

Factor de estudio	Biomasa seca, g	
	Raíz	Vástago
Si, mM		
0.0	0.94 b	2.53 ab
1.5	1.19 a	2.89 a
3.0	0.99 b	2.32 b
Ψ_o, MPa		
0	0.97 b	2.99 a
-0.3	1.15 a	2.94 a
-0.6	1.09 ab	2.43 b
-0.9	0.94 b	1.95 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

El tratamiento consistente en 1.5 mM Si y -0.6 MPa tuvo la media más alta en biomasa seca de raíz; mientras que, 1.5 mM Si y -0.3 MPa tuvieron la mayor biomasa seca de vástago (**Cuadro 3.7**).

Cuadro 3.7 Biomasa seca de raíz y vástago de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de potencial osmótico (Ψ_o) y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Biomasa seca, g	
		Raíz	Vástago
0.0	0.0	0.85 bc	3.24 ab
0.0	-0.3	1.10 ab	2.58 abc
0.0	-0.6	0.91 abc	2.28 bcd
0.0	-0.9	0.89 abc	2.01 cd
1.5	0.0	1.10 ab	2.87 abc
1.5	-0.3	1.17 ab	3.60 a
1.5	-0.6	1.26 a	2.72 abc
1.5	-0.9	1.23 ab	2.37 bcd
3.0	0.0	0.97 abc	2.86 abc
3.0	-0.3	1.19 ab	2.65 abc
3.0	-0.6	1.11 ab	2.28 bcd
3.0	-0.9	0.71 c	1.48 d

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Manivannan *et al.* (2015) realizaron un estudio en zinnia (*Zinnia elegans*) y mencionan que el Si incrementa significativamente la biomasa seca tanto en ausencia de estrés por salinidad como en condiciones de agobio, la adición de Si mitiga los efectos adversos que este genera. De la misma manera, Kaya *et al.* (2006) en un experimento realizado en maíz bajo condiciones de estrés por sequía reportan que el Si no tuvo efectos significativos en su aplicación en condiciones sin estrés, pero en los tratamientos con estrés osmótico, este elemento mitiga los efectos negativos que este agobio genera. En nuestros resultados encontramos que el Si aumenta la biomasa seca de raíz y vástago con la dosis de 1.5 mM Si. Esto se le puede atribuir a que el Si mejoró la producción de carbohidratos, además, se ha demostrado que incrementa la fosforilación de azúcares, lo cual promueve la síntesis de carbohidratos (Neu *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2004). Por otra parte, la reducción en la biomasa seca bajo condiciones de sequía es debida a la presencia de distintos desórdenes metabólicos, desbalance nutrimental, y una disminución en la elongación y división celular (Radi *et al.*, 2012).

3.3.5. Concentración nutrimental

3.3.5.1. Raíz

En raíz, las concentraciones de N, P y S incrementaron significativamente en plantas tratadas con 1.5 mM Si; por otra parte, la dosis 3 mM Si incrementó las concentraciones en raíz de Ca y Mg (**Cuadro 3.8**).

Por otra parte, con el potencial osmótico -0.3 MPa se incrementó significativamente la concentración de N en raíces, respecto al testigo sin estrés osmótico. Las concentraciones de P y K fueron superiores al testigo sin sequía, con los potenciales osmóticos -0.6 y -0.9 MPa. En Ca, los tratamientos sin estrés por sequía y -0.9 MPa Ψ_o fueron donde se registró un mayor valor de concentración. El Mg y el S obtuvieron su valor más alto de concentración en el nivel de potencial osmótico de -0.9 MPa.

Cuadro 3.8 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de macronutrientes en raíces de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	0.94 b	26.20 b	7.36 b	19.62 c	4.91 c	2.61 b
1.5	1.19 a	30.10 a	7.26 b	25.04 b	5.36 b	3.00 a
3.0	1.00 b	27.45 b	8.19 a	30.77 a	6.60 a	2.85 ab
Ψ_o, MPa						
0.0	0.97 b	26.10 b	7.27 b	26.90 a	5.53 b	2.72 b
-0.3	1.15 a	26.95 b	6.28 c	21.10 b	4.85 c	2.41 b
-0.6	1.09 ab	29.75 a	8.57 a	24.87 ab	5.71 b	2.70 b
-0.9	0.94 b	28.87 a	8.29 a	27.71 a	6.40 a	3.45 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En las distintas combinaciones de Si y potenciales osmóticos, se encontró que la concentración de N y P más altas se obtuvieron en los tratamientos con 1.5 mM Si y -0.6 MPa (**Cuadro 3.9**).

Cuadro 3.9 Concentración de macronutrientes en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0.0	0.85 bc	23.36 e	8.07 bcde	21.26 cde	5.21 c	2.56 cd
0.0	-0.3	1.11 ab	24.76 de	5.39 g	14.38 e	3.91 d	1.98 d
0.0	-0.6	0.91 abc	26.60 cde	7.19 cdef	19.44 de	5.27 c	2.58 cd
0.0	-0.9	0.90 abc	30.10 abc	8.79 ab	23.41bcde	5.29 c	3.34 ab
1.5	0.0	1.11 ab	28.00 cd	6.25 fg	24.46 bcd	5.47 c	2.94 bc
1.5	-0.3	1.17 ab	26.95 cde	6.65 efg	22.62 cde	5.14 c	2.55 cd
1.5	-0.6	1.26 a	33.34 a	8.31 bc	23.26 bcde	5.27 c	2.65 cd
1.5	-0.9	1.23 ab	32.11 ab	7.85 bcde	29.83 abc	5.57 bc	3.86 a
3.0	0.0	0.98 abc	26.95 cde	7.51 bcdef	34.98 a	5.92 bc	2.66 cd
3.0	-0.3	1.19 ab	29.14 bc	6.82 defg	26.31 abcd	5.51 bc	2.72 bc
3.0	-0.6	1.12 ab	29.31 bc	10.21 a	31.92 ab	6.62 b	2.87 bc
3.0	-0.9	0.71 c	24.41 de	8.25 bcd	29.88 abc	8.36 a	3.15 cb

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En el caso del K, este registró su valor más elevado en el nivel 3.0 mM Si con -0.6 MPa. Altas concentraciones de Ca se observaron en la dosis 3.0 mM Si, independientemente del potencial osmótico. Las raíces de plantas de maíz manifestaron la concentración de Mg más elevada en 3.0 mM de Si y -0.9 MPa de Ψ_o , siendo estadísticamente distinto al resto de los tratamientos. En el caso de S, se observó su máximo valor en 1.5 mm Si con -0.9 MPa.

La adición de Si en ambas dosis estudiadas, incrementaron la concentración de Fe y Zn en raíces. De la misma manera, la dosis 3 mM Si incrementó la concentración de Cu, B y Si, respecto al testigo. La concentración de Mn, fue estadísticamente menor con la dosis 1.5 mM Si, respecto al testigo (**Cuadro 3.10**). Por otra parte, se observó que las concentraciones de Fe, Mn y Si tuvieron el mayor valor con -0.6 MPa de potencial osmótico. En el caso de Cu y B se manifestó su valor más elevado sin estrés por sequía y en los niveles bajos de ésta. Asimismo, la concentración más alta de Zn se presentó en -0.9 MPa de potencial osmótico, siendo estadísticamente distinto a los tratamientos con los niveles de 0.0 y -0.6 MPa.

Cuadro 3.10 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de micronutrientes en raíces de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)					
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
Si, mM						
0.0	4.95 b	1103.08 b	138.70 b	168.04 a	1033.47 b	64.02 b
1.5	6.95 a	994.96 b	188.97 a	145.28 b	1139.06 ab	68.13 b
3.0	7.30 a	1603.96 a	169.58 a	178.27 a	1259.80 a	80.71 a
Ψ_o, MPa						
0.0	6.22 b	1560.79 a	133.86 c	158.71 ab	1296.96 a	71.40 a
-0.3	5.99 b	1465.43 a	168.75 ab	154.77 b	1254.97 a	64.16 b
-0.6	7.04 a	947.78 b	163.41 bc	176.17 a	1248.86 a	76.09 a
-0.9	6.34 b	962.01 b	196.98 a	165.82 ab	775.65 b	72.17 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En las distintas combinaciones de Si y potenciales osmóticos generados con PEG-8000, se encontraron los valores más altos de concentración de Fe, Cu y Si en el tratamiento 3.0 mM Si con -0.6 MPa de potencial osmótico (**Cuadro 3.11**). En el caso de Zn y B, las concentraciones más elevadas se registraron con 1.5 mm Si y -0.3 MPa de potencial osmótico. Asimismo, el Mn mostró la mayor concentración en el tratamiento sin Si y con -0.6 MPa de potencial osmótico.

Cuadro 3.11 Concentración de micronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)					
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
0.0	0.0	5.04 ef	886.53 ef	92.08 d	157.49 bcde	1399.66 ab	64.94 bcd
0.0	-0.3	3.83 f	1003.78 def	120.18 cd	120.27 e	605.07 d	56.11 d
0.0	-0.6	5.55 cde	1173.32 cde	160.78 bcd	209.44 a	1392.08 ab	69.88 bcd
0.0	-0.9	5.38 de	1348.72 cd	181.77 abc	185.01 abc	737.08 cd	65.17 bcd
1.5	0.0	6.59 bcd	922.32 def	128.24 cd	147.45 cde	1162.52 abc	70.38 bc
1.5	-0.3	6.98 b	692.73 f	254.55 a	147.58 cde	1561.70 a	69.32 bcd
1.5	-0.6	6.81 bc	880.75 ef	142.91 cd	125.30 de	987.40 bcd	69.47 bcd
1.5	-0.9	7.45 b	1484.05 bc	230.18 ab	160.83 bcde	844.65 cd	63.36 cd
3.0	0.0	7.04 b	1077.19 def	181.27 abc	171.21 abcd	1328.71 ab	78.90 ab
3.0	-0.3	7.17 b	1146.85 cde	131.52 cd	196.48 ab	1598.14 a	67.05 bcd
3.0	-0.6	8.78 a	2342.22 a	186.55 abc	193.78 abc	1367.12 ab	88.92 a
3.0	-0.9	6.21 bcde	1849.60 b	178.99 bc	151.63 bcde	745.24 cd	88.00 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Karman *et al.* (2009) realizaron un estudio en maíz bajo estrés por sequía y mencionan que obtuvieron decrementos en la concentración de N, K y Ca de raíz, mientras que en P se registró un incremento; resultados que difieren con los nuestros.

Wan *et al.* (2001) reportan que la sequía reduce significativamente el crecimiento de la raíz, y debido a esta limitación se ven afectados los movimientos de difusión y la absorción de nutrimentos como P, N, K, Fe, Zn, Mn y Cu. Asimismo, Barker y Pilbeam (2007) mencionan que la nitrato reductasa (NR) se activa en citosol, y que con ayuda de la nitrito reductasa (NiR), la cual se activa en cloroplastos, tienen la función de reducir el nitrato a amonio utilizando la energía y el poder reductor de la fotosíntesis (ferredoxina reducida). Asimismo, la sequía reduce la actividad de la NR y NiR, enzimas que reducen el nitrato a amonio para su asimilación; por lo que se incrementó la concentración de N en raíz con -0.3 y -0.6 MPa de potencial osmótico, y decreció en vástago por la disminución de la actividad de la NR y NiR. En el caso de K se mostró un incremento significativo en la dosis 3.0 mM Si, lo cual concuerda con lo mencionado por Mali y Aery (2008), quienes mencionan que incluso las bajas concentraciones de Si pueden aumentar la absorción de K, sea cual sea el medio de producción (suelo o hidroponía), debido a la activación de bombas de protones H⁺-ATPasas.

3.3.5.2. Vástago

En vástago, el tratamiento con 3 mM Si incrementó significativamente las concentraciones de P, K y S; asimismo, 1.5 mM Si incrementó la concentración de Ca (Cuadro 3.12). Por otra parte, la concentración más elevada de N en vástagos de maíz se presentó en el tratamiento sin sequía inducida. Las concentraciones de P, K,

Ca, Mg y S obtuvieron sus mayores valores con -0.6 MPa de potencial osmótico, siendo estadísticamente distintos al resto de los tratamientos.

Cuadro 3.12 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de macronutrientes en vástagos de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	35.85 a	6.42 b	24.15 b	7.33 b	4.03 a	2.73 c
1.5	36.66 a	6.87 ab	26.32 b	8.31 a	4.27 a	3.24 b
3.0	36.24 a	7.06 a	33.61 a	7.31 b	4.21 a	3.68 a
Ψ_o, MPa						
0.0	38.17 a	6.30 b	25.81 b	6.41 c	3.72 c	2.94 b
-0.3	35.14 b	6.07 b	27.28 b	6.96 c	3.81 bc	3.15 b
-0.6	36.28 b	8.35 a	32.31 a	9.26 a	4.93 a	3.68 a
-0.9	35.40 b	6.42 b	26.71 b	7.97 b	4.21 b	3.10 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En las distintas combinaciones de potenciales osmóticos y Si, se encontró la mayor concentración de N en vástagos de maíz sin fuente de estrés por sequía y sin Si (**Cuadro 3.13**). En el caso de P y Mg, su valor más alto se obtuvo con -0.6 MPa de potencial osmótico y sin silicio. El K y S mostraron su máximo positivo en los niveles de 3.0 mM Si y -0.6 MPa de potencial osmótico. Asimismo, el Ca registró sus mayores valores en los tratamientos sin silicio y -0.9 MPa de potencial osmótico, así como también en 1.5 mM Si con -0.6 MPa de potencial osmótico, siendo estadísticamente distintos al resto de los tratamientos ensayados.

Cuadro 3.13 Concentración de macronutrientes en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ _o , MPa	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0.0	39.64 a	5.61 de	14.38 f	6.61 ed	3.26 f	2.26 f
0.0	-0.3	32.64 c	5.28 e	25.34 cde	5.97 e	3.33 ef	2.59 ef
0.0	-0.6	36.14 abc	9.13 a	33.74 ab	10.58 a	5.38 a	3.40 bc
0.0	-0.9	35.00 bc	5.69 de	23.18 de	6.19 e	4.16 cdef	2.67 def
1.5	0.0	36.84 ab	6.22 cde	32.57 bc	6.57 ed	4.33 bcd	3.33 bcd
1.5	-0.3	36.23 abc	6.00 cde	22.83 e	7.76 bcd	3.56 def	2.95 cde
1.5	-0.6	36.84 ab	7.67 b	22.26 e	8.27 bc	4.21 cde	3.29 bcd
1.5	-0.9	36.75 ab	7.62 b	27.66 bcde	10.65 a	5.00 abc	3.41 bc
3.0	0.0	38.06 ab	7.09 bc	30.49 bcd	6.06 e	3.60 def	3.23 cde
3.0	-0.3	36.58 ab	6.94 bcd	33.68 ab	7.16 cde	4.56 abc	3.92 ab
3.0	-0.6	35.88 abc	8.27 ab	40.96 a	8.96 b	5.20 ab	4.36 a
3.0	-0.9	34.48 bc	5.95 cde	29.31 bcde	7.08 cde	3.48 def	3.23 cde

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En los efectos principales de Si, la concentración de Fe, Cu y Si, resultó ser mayor significativamente, en los tratamientos con 1.5 y 3.0 mM Si, con respecto al testigo (**Cuadro 3.14**). Mientras que, el Zn y B presentaron sus valores más altos de concentración en el tratamiento de 3.0 mM Si. En el caso del Mn, no presentó diferencias estadísticas significativas entre los niveles de silicio ensayado. Por otra parte, en los efectos principales de sequía, el Fe, Cu, Zn, Mn, B y Si mostraron su concentración más alta en los tratamientos de -0.6 MPa de Ψ_o .

Cuadro 3.14 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la concentración de micronutrientes en vástagos de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)					
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
Si, mM						
0.0	167.56 b	17.81 b	92.92 ab	351.92 a	81.18 c	23.86 b
1.5	205.35 a	20.50 a	86.52 b	353.50 a	87.60 b	29.98 a
3.0	197.28 a	20.15 a	96.01 a	359.56 a	94.09 a	29.60 a
Ψ_o, MPa						
0.0	166.90 b	18.14 b	73.54 c	313.13 c	74.16 d	26.28 ab
-0.3	165.16 b	19.60 ab	82.40 c	316.75 c	88.86 b	25.53 b
-0.6	257.68 a	21.57 a	112.70 a	437.88 a	105.83 a	30.41 a
-0.9	170.50 b	18.64 b	98.62 b	352.21 b	81.65 c	29.05 ab

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En las diferentes combinaciones de Si y potencial osmótico, se puede observar que las concentraciones más altas de Fe, Cu, Zn, Mn y Si se presentaron en el tratamiento -0.6 MPa de potencial osmótico sin Si (**Cuadro 3.15**). Asimismo, el B registró sus mayores valores en los niveles de -0.6 MPa de potencial osmótico y sin Si, siendo estadísticamente distintos al resto de los tratamientos ensayados.

Cuadro 3.15 Concentración de micronutrientes en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)					
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
0.0	0.0	113.29 d	13.70 c	64.52 e	318.12 de	57.24 e	14.64 d
0.0	-0.3	141.78 cd	15.64 bc	69.07 de	259.20 e	80.39 cd	23.14 bcd
0.0	-0.6	268.90 a	22.99 a	133.91 a	510.64 a	112.35 a	34.98 a
0.0	-0.9	146.31 cd	18.92 ab	104.21 bc	319.72 de	74.78 d	22.72 cd
1.5	0.0	209.00 abc	21.00 a	74.53 de	307.38 de	75.15 d	30.95 abc
1.5	-0.3	172.71 bcd	21.76 a	70.02 de	352.51 cd	88.84 bc	25.09 abc
1.5	-0.6	263.99 a	21.21 a	92.22 bcd	332.84 de	91.72 bc	33.69 abcd
1.5	-0.9	175.72 bcd	18.05 abc	109.34 ab	421.31 bc	94.73 b	30.22 abc
3.0	0.0	178.44 bcd	19.73 ab	81.60 cde	313.92 de	90.11 bc	33.27 abc
3.0	-0.3	181.02 bcd	21.41 a	108.13 b	338.57 d	97.36 b	28.37 abc
3.0	-0.6	240.18 ab	20.53 ab	111.99 ab	470.19 ab	113.45 a	22.57 cd
3.0	-0.9	189.48 bc	18.96 ab	82.34 cde	315.61 de	75.45 d	34.22 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

[Kaya et al. \(2006\)](#) en un estudio realizado en maíz encontraron que la aplicación de Si puede incrementar la concentración de K, Ca y Si bajo estrés por sequía; resultados que coinciden con los obtenidos en este estudio. Asimismo, [Chen et al. \(2011\)](#) mencionan que la adición de Si solo aumenta la concentración de Si en parte aérea, mientras que la disminución en el potencial osmótico decreció las concentraciones de K, Na, Ca, Mg y Fe; resultados que difieren a los aquí expuestos, dado que con la adición de Si se incrementó la concentración de P, K, Ca, S, Fe, Cu, Zn, B y Si. La absorción y translocación nutrimental en la planta se ve afectada en condiciones de estrés osmótico ([Hu y Schmidhalter, 2005](#)), no obstante, en este estudio las concentraciones de nutrimentos se vieron incrementadas, excepto por N.

El N, P, K, Ca, Mg, Fe y Zn son influenciados de forma negativa en condiciones de estrés por sequía, así como también el Mn y B, pero estos últimos de una forma más severa ([Gunes et al., 2008](#); [Hernandez-Apaloza, 2014](#)); resultados que difieren con los nuestros, puesto que, solo disminuyó la concentración de N, mientras que aumentaron las de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Si en el nivel -0.6 MPa de Ψ_o . Asimismo, [Greger et al. \(2018\)](#) menciona que el Si afecta la absorción, distribución y funcionalidad de distintos nutrimentos en las plantas, y esto se presenta diferente para cada una de las especies.

3.3.6. Acumulación nutrimental

3.3.6.1. Raíz

Los efectos principales de Si, en la acumulación nutrimental de N, Mg y S en raíces de plantas de maíz mostraron su valor más alto en la dosis 1.5 mM Si, siendo estadísticamente significativos con respecto al resto de los tratamientos ensayados (**Cuadro 3.16**). Asimismo, las acumulaciones más altas de P, K y Ca se registraron en los niveles de 1.5 y 3.0 mM Si, presentando diferencias estadísticas con base al testigo. Por otra parte, las mayores acumulaciones de N, P, Ca y S se registraron con potencial osmótico de -0.6 MPa. En el caso del Mg, su valor más elevado se mostró con -0.9 MPa de potencial osmótico. Mientras que, en K no se registraron diferencias estadísticas significativas en los distintos niveles ensayados.

Cuadro 3.16 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de macronutrientes en raíces de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg raíces ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	24.43 c	6.76 b	17.88 b	4.52 b	2.41 c	4.52 c
1.5	35.96 a	8.64 a	29.51 a	6.36 a	3.55 a	8.27 a
3.0	27.67 b	8.14 a	30.45 a	6.38 a	2.80 b	7.38 b
Ψ_o, MPa						
0.0	25.61 c	7.00 b	26.14 a	5.37 b	2.66 b	6.09 c
-0.3	31.09 ab	7.25 b	24.40 a	5.62 b	2.80 b	6.95 b
-0.6	32.94 a	9.42 a	27.30 a	6.26 a	2.95 ab	7.78 a
-0.9	27.77 bc	7.72 b	25.95 a	5.77 ab	3.27 a	6.08 c

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La mayor acumulación de N se tuvo en el tratamiento con 1.5 mM Si y -0.6 MPa de potencial osmótico (**Cuadro 3.17**). Asimismo, el mayor valor en P, K, Ca y S se registró en 3.0 mM Si y -0.6 MPa de potencial osmótico. En el caso del Mg, se tuvo la mayor acumulación con 1.5 mM Si y -0.9 MPa de potencial osmótico, siendo significativamente distinto al resto de las combinaciones ensayadas.

Cuadro 3.17 Acumulación de macronutrientes en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ _o , MPa	Acumulación nutrimental (mg raíces ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0.0	19.51 ef	6.78 cd	17.79 d	4.29 d	2.15 e	4.12 c
0.0	-0.3	27.30 cde	5.97 d	15.60 d	4.34 d	2.20 de	4.23 c
0.0	-0.6	24.16 def	6.53 cd	17.61 d	4.78 cd	2.33 cde	5.03 c
0.0	-0.9	26.76 cde	7.79 bcd	20.56 cd	4.70 cd	2.97 bcd	4.72 c
1.5	0.0	31.01 bcd	6.90 cd	26.47 bc	6.05 abc	3.26 b	7.29 b
1.5	-0.3	31.36 bcd	7.71 bcd	26.37 bc	6.00 abc	2.98 bc	8.13 ab
1.5	-0.6	42.03 a	10.42 a	28.97 abc	6.64 ab	3.33 b	8.54 ab
1.5	-0.9	39.43 ab	9.56 ab	36.25 a	6.76 ab	4.65 a	9.15 a
3.0	0.0	26.32 cde	7.34 cd	34.17 ab	5.78 bc	2.59 bcde	6.87 b
3.0	-0.3	34.64 abc	8.09 bc	31.25 ab	6.55 ab	3.24 b	8.52 ab
3.0	-0.6	32.63 bcd	11.34 a	35.34 a	7.36 a	3.19 b	9.78 a
3.0	-0.9	17.13 f	5.81 d	21.06 cd	5.86 bc	2.21 cde	4.39 c

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Los efectos cruciales de Si en la acumulación de macronutrientes en raíces de maíz, manifestó un incremento significativo en N con la dosis 3.0 mM Si, resultando estadísticamente distinto con respecto al resto de los niveles ensayados (**Cuadro 3.18**). Asimismo, el Cu y Si presentaron su mayor acumulación con 1.5 mM Si. En el caso de Zn, Mn y B se tuvieron las mayores acumulaciones con 1.5 y 3.0 mM Si. Por otra parte, en los efectos principales de la sequía, la acumulación mayor de Fe, B y Si

se registró en el tratamiento -0.6 MPa de potencial osmótico, siendo significativamente diferente con respecto a los otros niveles ensayados. De la misma manera, en Cu, los tratamientos -0.3, -0.6 y -0.9 MPa de potencial osmótico resultaron ser estadísticamente distintos en comparación al testigo. En el caso de Zn, sus valores más altos de acumulación se obtuvieron con -0.3 y -0.6 MPa de potencial osmótico. El Mn, presentó su acumulación más elevada en el nivel -0.3 MPa de potencial osmótico, sin embargo, con -0.9 MPa decreció drásticamente el valor de este micronutriente.

Cuadro 3.18 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de micronutrientes en raíces de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g raíces}^{-1}$)					
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
Si, mM						
0.0	1024.08 c	127.06 c	153.95 b	925.04 b	59.30 b	20.87 c
1.5	1178.54 b	223.11 a	170.46 a	1337.97 a	80.68 a	34.38 a
3.0	1570.55 a	165.44 b	180.62 a	1302.95 a	79.39 a	27.35 b
Ψ_o, MPa						
0.0	931.49 d	130.05 b	152.92 b	1239.23 b	69.73 bc	26.42 b
-0.3	1092.96 c	194.27 a	178.66 a	1454.27 a	74.16 b	25.78 b
-0.6	1585.46 a	175.58 a	186.60 a	1328.15 ab	83.13 a	32.08 a
-0.9	1420.98 b	187.60 a	155.20 b	732.96 c	65.47 c	25.84 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Altas acumulaciones de Fe y B se observaron en los tratamientos de 3.0 mM Si con -0.6 MPa de potencial osmótico (**Cuadro 3.19**). Asimismo, con el nivel de 1.5 mM Si con -0.3 y -0.9 MPa de potencial osmótico se registraron los valores más altos de acumulación de Cu. En el caso de Zn y Mn, manifestaron la acumulación más alta en los tratamientos 3.0 mM Si con -0.3 MPa de potencial osmótico. De igual manera, en raíces de plantas de maíz se encontró la mayor acumulación de Si en el tratamiento 1.5 mM Si con -0.6 MPa de potencial osmótico, presentando diferencias significativas con base en el resto de las combinaciones ensayadas.

Greger *et al.* (2018) mencionan que, en un experimento realizado en maíz, presentaron una disminución en la acumulación de N, P, K, Ca y S en raíces de maíz con la adición de Si, sin embargo, el Mg no registró diferencias significativas; resultados que difieren a los nuestros, debido a que, la acumulación de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Si se incrementó con la adición de Si. Hu y Schmidhalter (2005) reportan que la sequía disminuye la absorción y translocación de algunos

nutrimentos; resultados que discrepan a los obtenidos en este estudio, puesto que N, P, Ca, S, Fe, Cu, Zn y Si aumentaron en condiciones de estrés por sequía. [Chaves y Oliveira \(2004\)](#) atribuyen la acumulación de iones inorgánicos como una respuesta de la planta, a la adaptación de agobios ambientales. Asimismo, [Ma \(2004\)](#) menciona que el Si puede incrementar la accesibilidad de P indirectamente, decreciendo la acumulación de Fe y Mn en la planta; resultados que difieren a los obtenidos en este estudio, puesto que con la adición de Si aumentó la acumulación de P, más no disminuyó la de Fe y Mn en raíz.

Cuadro 3.19 Acumulación de micronutrientes en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g raíces}^{-1}$)					
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
0.0	0.0	729.05g	72.48d	129.61fg	1135.79d	54.62e	18.88d
0.0	-0.3	1112.87de	132.91c	133.12efg	661.17e	62.10de	18.18d
0.0	-0.6	1056.92de	144.23c	189.55bc	1250.39cd	63.34cde	20.13cd
0.0	-0.9	1197.51cde	158.64bc	163.56cde	652.84e	57.17e	26.30bcd
1.5	0.0	1015.11ef	141.80c	162.61cdef	1283.44cd	77.69bcd	29.83bc
1.5	-0.3	805.20fg	295.56a	169.94cd	1809.94ab	80.57bc	28.86bc
1.5	-0.6	1098.99de	176.95bc	154.66def	1224.26cd	87.10ab	51.00a
1.5	-0.9	1794.87b	278.15a	194.63bc	1034.24d	77.38bcd	27.85bcd
3.0	0.0	1050.33def	175.88bc	166.56cd	1298.47cd	76.90bcd	30.58b
3.0	-0.3	1360.81c	154.35bc	232.92a	1891.70a	79.82bcd	30.31b
3.0	-0.6	2600.50a	205.56b	215.60ab	1509.82bc	98.97a	25.13bcd
3.0	-0.9	1270.57cd	126.01c	107.43g	511.81e	61.88de	23.39bcd

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

3.3.6.2. Vástago

En los efectos principales del Si, se encontró la mayor acumulación de N, P y Mg en la dosis de 1.5 mM Si, siendo estadísticamente distintos con los otros niveles ensayados (**Cuadro 3.20**). Asimismo, en K, Ca y S se registraron los valores más altos de acumulación en los tratamientos con silicio (1.5 y 3.0 mM), presentando diferencias significativas con respecto al testigo. Por otra parte, dentro de los efectos principales de la sequía, se obtuvo la mayor acumulación de N en el tratamiento sin estrés por sequía, y este valor fue decreciendo a medida que el potencial osmótico disminuía. Mientras que, las acumulaciones de P, K Mg y S se redujeron significativamente con el nivel de -0.9 MPa de potencial osmótico. En Ca, se observaron sus máximos valores de acumulación en -0.3 y -0.6 MPa de potencial osmótico.

Cuadro 3.20 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de macronutrientes en vástagos de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg vástagos ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	91.35 b	16.16 b	59.98 b	18.38 b	9.90 b	6.77 b
1.5	105.78 a	19.65 a	74.71 a	23.69 a	12.11 a	9.35 a
3.0	84.75 b	16.52 ab	78.49 a	16.86 b	9.86 b	8.63 a
Ψ_o, MPa						
0.0	113.90 a	18.78 a	75.30 a	19.27 ab	11.07 a	8.71 a
-0.3	103.98 ab	17.97 a	79.11 a	20.82 a	11.16 a	9.23 a
-0.6	88.16 b	20.31 a	77.06 a	22.28 a	11.81 a	8.88 a
-0.9	69.80 c	12.71 b	51.43 b	16.20 b	8.47 b	6.19 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación más alta de N, P, Ca, Mg y S se tuvo en el tratamiento con 1.5 mM Si y -0.3 MPa de potencial osmótico. Asimismo, el K registró su mayor acumulación en el tratamiento 3.0 mM Si con -0.6 MPa de potencial osmótico (**Cuadro 3.21**).

Cuadro 3.21 Acumulación de macronutrientes en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ _o , MPa	Acumulación nutrimental (mg vástagos ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0.0	127.67a	18.36ab	46.97cd	21.44abcd	10.52a	7.27abc
0.0	-0.3	84.24bc	13.77abc	65.31abcd	15.48cde	8.58ab	6.66abc
0.0	-0.6	82.55bc	20.97a	77.01abc	24.11abc	12.19a	7.76abc
0.0	-0.9	70.95bc	11.54bc	46.66cd	12.49de	8.32ab	5.43bc
1.5	0.0	105.20ab	17.75ab	91.40a	19.07abcde	12.36a	9.53a
1.5	-0.3	130.68a	21.73a	82.33ab	27.99a	12.77a	10.64a
1.5	-0.6	100.06ab	21.15a	60.77bcd	22.44abc	11.43a	9.01ab
1.5	-0.9	87.21bc	17.98ab	64.37abcd	25.27ab	11.92a	8.23abc
3.0	0.0	108.85ab	20.25ab	87.56ab	17.32bcde	10.34a	9.32ab
3.0	-0.3	97.03ab	18.42ab	89.70ab	18.99abcde	12.14a	10.41a
3.0	-0.6	81.88bc	18.82ab	93.43a	20.31abcd	11.83a	9.90a
3.0	-0.9	51.25c	8.63c	43.29d	10.84e	5.17b	4.91c

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

El tratamiento con 1.5 mM Si incrementó la acumulación de Fe, Cu, Mn, B y Si en vástagos de plantas de maíz (**Cuadro 3.22**). Por otra parte, la acumulación de Fe, Zn y Mn mostraron su mayor valor en el tratamiento -0.6 MPa de potencial osmótico, siendo estadísticamente significativo con respecto al nivel más elevado de estrés (-0.9 MPa). En el caso de Cu y B su acumulación más elevada se registró en -0.3 MPa, presentando diferencias estadísticas con base al potencial osmótico más bajo (-0.9 MPa). En la acumulación de Si se tuvo el valor más alto en el tratamiento sin estrés, y este valor decrece conforme aumenta el nivel de estrés.

Cuadro 3.22 Efectos principales de los factores de estudio (Si y PEG-8000) en la acumulación de micronutrientos en vástagos de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g vástagos}^{-1}$)					
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
Si, mM						
0.0	414.71b	43.92b	225.97a	878.05ab	200.99b	58.42b
1.5	592.53a	59.74a	243.53a	1015.93a	253.13a	86.16a
3.0	455.59b	47.39b	223.86a	838.95b	222.18ab	68.38b
Ψ_o, MPa						
0.0	489.28b	53.77a	217.63b	937.75a	220.81a	77.61a
-0.3	491.51b	58.42a	238.54ab	946.91a	262.21a	75.26ab
-0.6	631.65a	52.21a	272.64a	1052.33a	256.30a	74.99ab
-0.9	338.00c	37.00b	195.66b	706.92b	162.41b	56.09b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En las distintas combinaciones de Si y potencial osmótico, se encontró la acumulación más alta de Fe en 1.5 mM Si con -0.6 MPa potencial osmótico; mientras que la de Cu, Mn y B con 1.5 mM Si y -0.3 MPa (**Cuadro 3.23**). Por otra parte, la mayor acumulación de Zn se registró en el tratamiento sin Si con -0.6 MPa de potencial osmótico, presentando diferencias estadísticas significativas con el nivel 3.0 mM Si con -0.9 MPa de potencial osmótico. En el caso del Si, su valor más alto se encontró en el tratamiento sin estrés por sequía con 3.0 mM Si.

Cuadro 3.23 Acumulación de micronutrientos en vástagos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de PEG-8000 y Si.

Si, mM	Ψ_o , MPa	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g vástagos}^{-1}$)					
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
0.0	0.0	377.56bc	44.70bc	211.66abc	1039.35ab	186.64bcd	49.42ab
0.0	-0.3	367.29bc	40.18bc	178.16bc	664.85bc	207.69bcd	59.63ab
0.0	-0.6	619.17ab	52.41bc	306.14a	1161.36a	257.56abc	79.39ab
0.0	-0.9	294.82c	38.42bc	207.92abc	646.68bc	152.08cd	45.28b
1.5	0.0	585.77abc	59.74ab	209.80abc	880.19abc	217.97abc	88.21ab
1.5	-0.3	625.41ab	78.22a	251.73ab	1276.15a	320.47a	90.31ab
1.5	-0.6	733.06a	57.91ab	254.47ab	912.86abc	249.77abc	94.89a
1.5	-0.9	425.90bc	43.10bc	258.12ab	994.54ab	224.33abc	71.24ab
3.0	0.0	504.53abc	56.89ab	231.43ab	893.72abc	257.83abc	95.23a
3.0	-0.3	481.85abc	56.88ab	285.75a	899.74abc	258.47ab	75.86ab
3.0	-0.6	542.73abc	46.33bc	257.32ab	1082.79ab	261.57ab	50.70ab
3.0	-0.9	293.27c	29.47c	120.95c	479.56c	110.85d	51.76ab

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

El estrés hídrico disminuye la acumulación de nutrientes, como lo son el N, P, K y Cu (Ali *et al.*, 2007), debido a que se reduce la conductancia estomática y la tasa de transpiración (Pessaraki, 1999). El nivel más alto de sequía registró la acumulación más baja de P, Marschner (1995) menciona que la deficiencia de P genera una

reducción en la mayoría de los procesos metabólicos, incluyendo la división y expansión celular, así como también la respiración y la fotosíntesis; por lo que podemos decir que, la severidad de este estrés afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de la planta de maíz.

Treder y Cieslinski (2005) mencionan que translocación de Zn a parte aérea es afectada con la adición de Si, es posible que la disminución en la translocación sea por la unión de Zn a Si en raíces, el Si mostró el mismo patrón de descenso en la distribución de Si a vástago con suministro de Si (Greger *et al.*, 2018); resultados que difieren a los obtenidos en este estudio, debido a que no presentamos diferencias estadísticas significativas. Por otra parte, Hattori *et al.* (2008) encontró que la adición de Si mitiga los efectos negativos de la sequía, debido principalmente a la mejora en la capacidad de absorción de agua; resultados que coinciden con los nuestros, puesto que el suministro de silicio reflejó un aumento en la acumulación de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Si.

3.4. CONCLUSIÓN

Con los resultados obtenidos podemos concluir que los efectos adversos que el estrés por sequía genera, afectan negativamente la altura de plantas de maíz, conductancia estomática y tasa fotosintética.

Por otra parte, el Si incrementa el peso de biomasa seca de vástagos y raíces, concentración y acumulación nutrimental sin condiciones de agobio. Asimismo, el Si no presenta diferencias estadísticas significativas en la altura de la planta, sin embargo, en condiciones de sequía, la adición de este elemento mitiga los efectos negativos que este estrés ocasiona.

3.5. LITERATURA CITADA

Ahmed M, Kamran A, Asif M, Qadeer U, Ahmed ZI, Goyal A. 2013. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: A review. *Aus J Crop Sci* 7:484-491.

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 A, Barsa SMA, Hussain S, Iqbal J, Bukhsh MAAHA, Sarwar M. 2012. Salt stress alleviation in field crops through nutritional supplementation of silicon. *Pak J Nutr* 11: 735-753. DOI: 10.3923/pjn.2012.735.753
- Ali Q, Ashraf M, Athar HR. 2007. Exogenously applied proline at different growth stages enhances growth of two maize cultivars grown under water deficit conditions. *Pak J Bot* 39: 1133-1144.
- Amin M, Ahmad R, Ali A, Aslam M, Lee DJ. 2016. Silicon fertilization improves the maize (*Zea mays* L.) performance under limited moisture supply. *Cereal Res Commun* 44: 172-185. DOI: 10.1556/0806.43.2015.035
- Barker AV, Pilbeam DV. 2007. *Handbook of Plant Nutrition* (1st Ed), CRC Taylor and Francis, NY, 636 pp.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *Methods of soil analysis*. Part 2. Agronomy 9. American Society of agronomy. Madison, Wisconsin.
- Castellanos-González L, Mello-Prado R, Silva-Campos CN. 2015. El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. *Cultrop* 36: 16-24.
- Chaves MM, Oliveira MM. 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *J Exp Bot* 407: 2365-2384. DOI: 10.1093/jxb/erh269
- Chen W, Yao X, Cai K, Chen J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biol Trace Elem Res* 142: 67-76. DOI 10.1007/s12011-010-8742-x
- Cooke J, Leishman MR. 2016. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Funct Ecol* 30: 1340–1357. DOI: 10.1111/1365-2435.12713
- Etesami H, Jeong BR. 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicol Environ Saf* 147: 881-896. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.063
- FAO. 2018. FAOSTAT. Producción agrícola mundial de maíz 2016. Disponible en línea en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> Consultado: julio 10, 2018.
- Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron Sustain Dev* 29: 185-212. DOI: 10.1051/agro:2008021

- Greger M, Landberg T, Vaculík M. 2018. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants* 7: 41. DOI: 10.3390/plants7020041
- Gunes A, Kadioglu YK, Pilbeam DJ, Inal A, Coban S, Aksu A. 2008. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, ii; essential and nonessential element uptake determined by polarized energy dispersive x-ray fluorescence. *Commun Soil Sci Plant Anal* 39: 1904-1927. DOI: 10.1080/00103620802134719
- Hattori T, Inanaga S, Tanimoto E, Lux A, Luxová M, Sugimoto Y. 2003. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant Cell Physiol* 44: 743-749. DOI: 10.1093/pcp/pcg090
- Hattori T, Sonobe K, Araki H, Inanaga S, An P, Morita S. 2008. Silicon application by sorghum through the alleviation of stress-induced increase in hydraulic resistance. *J Plant Nutr* 31: 1482-1495. DOI: 10.1080/01904160802208477
- Hernandez-Apaolaza L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta* 240: 447-458. DOI 10.1007/s00425-014-2119-x
- Hu YC, Schmidhalter U. 2005. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *J Plant Nutr Soil Sci* 168:541-549. DOI: 10.1002/jpln.200420516
- Jaleel CA, Manivannan P, Wahid A, Farooq M, AL-Juburi HJ, Somasundaram R, Vam RP. 2009. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. *Intl J Agri Biol* 11:100-105.
- Karman M, Shahbaz M, Ashraf M, Akram NA. 2009. Alleviation of drought-induced adverse effects in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) using proline as a pre-sowing seed treatment. *Pak J Bot* 41:621-632.
- Kaya C, Tuna L, Higgs D. 2006. Effect of silicon on plant growth and plant mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *J Plant Nutr* 29: 1469-1480. DOI: 10.1080/01904160600837238
- Kurdali F, Al-Chammaa M, Mouasess A. 2013. Growth and nitrogen fixation in silicon and/or potassium fed chickpeas grown under drought and well watered conditions. *J Stress Physiol Biochem* 9:385-406.
- Ma CC, Li QF, Gao YB, Xin TR. 2004. Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. *Soil Sci Plant Nutr* 50: 623-632. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408520

- Ma JF. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci Plant Nutr* 50: 11-18. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447
- Mali M, Aery NC. 2008. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. *J Plant Nutr* 31: 1867-1876. DOI: 10.1080/01904160802402666
- Manivannan A, Soundararajan P, Arum LS, Ko CH, Muneer S, Joeng BR. Silicon-mediated enhancement of physiological and biochemical characteristics of *Zinnia elegans* 'Dreamland Yellow' grown under salinity stress. *Hortic Environ Biotechnol* 56: 721-731. DOI: 10.1007/s13580-015-1081-2
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition, London America Press, London 889 pp.
- Neu S, Schaller J, Dudel GD. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sci Rep* 7: 40829. DOI: 10.1038/srep40829
- Parveen N, Ashraf M. 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. *Pak J Bot* 42: 1675-1684.
- Pessarakli M. 1999. Handbook of Plant and Crop Stress. 2nd Edition. University of Arizona. Tucson Arizona. U.S.A. 1198 pp.
- Radi AA, Abdel-Wahab DA, Hamada AM. 2012. Evaluation of some bean lines tolerance to alkaline soil. *J Biol Earth Sci* 2: B18–B27.
- Ranum P, Peña-Rosas JP, Garcia-Casal MN. 2014. Global maize production, utilization, and consumption. *Ann N Y Acad Sci* 1312:105-112. DOI: 10.1111/nyas.12396
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Savvas D, Giotis D, Chatzieustratiou E, Bakea M, Patakioutas G. 2009. Silicon supply in soil less cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environ Exp Bot* 65:11-17. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2008.07.004
- SIAP. 2018. Producción agrícola: OI + PV 2017. Disponible en línea en: <http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Consultado: julio 10, 2018.
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. *In*: 6th international congress on soilless culture. Wageningen, Holanda. pp. 633-650.

- Treder W, Cieslinski G. 2005. Effect of silicon application on cadmium uptake and distribution in strawberry plants grown on contaminated soils. *J. Plant Nutr* 28: 917-929. DOI: 10.1081/PLN-200058877
- Vaculík M, Landberg T, Greger M, Luxová M, Stoláriková M, Lux A. 2012. Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in Young maize plants. *Ann Bot* 110: 433-443. DOI:10.1093/aob/mcs039
- Vurukonda SS, Vardharajula S, Shrivastava M, SkZ A. 2016. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiol Res* 184: 13-24. DOI: 10.1016/j.micres.2015.12.003
- Wan X, Zwiazek JJ, Lieffers VJ, Landhäusser M. 2001. Hydraulic conductance in aspen (*Populus tremuloides*) seedlings exposed to low root temperatures. *Tree Physiol* 21: 691-696. DOI: 10.1093/treephys/21.10.691
- Xie Z, Song R, Shao H, Song F, Xu H, Lu Yan. 2015. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. *Sci World J* 2015:718716. DOI: 10.1155/2015/245072
- Yazici I, Turkan I, Sekmen AH, Demiral T. 2007. Salinity tolerance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline accumulation. *Environ Exp Bot* 61: 49–57. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2007.02.010

CAPÍTULO IV. SILICIO EN LA MITIGACIÓN DE EFECTOS DE ESTRÉS SALINO EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ

RESUMEN

La salinidad del suelo es un problema que se ha caracterizado por reducir, e incluso inhibir el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y por consecuencia, tener efectos negativos en el rendimiento. Asimismo, el silicio (Si) es un elemento considerado benéfico, el cual se ha reportado reduce los efectos adversos que genera la salinidad. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del silicio en la mitigación de los efectos de la salinidad en la producción de maíz. Se establecieron 12 tratamientos con tres repeticiones. La unidad experimental constó de una bolsa plástica de 35 x 35 cm (10 L) con una planta. Se emplearon cuatro niveles de salinidad (0, 80, 160 y 240 mM NaCl) y tres dosis de Si (0, 1.5 y 3 mM Na₂SiO₃ 9H₂O). Posteriormente, a los 43 días después del trasplante se inició con el suministro de tratamientos a través del sistema de riego localizado por goteo. Las variables evaluadas fueron altura de planta (a los 0, 20 y 34 días en tratamiento, dt), concentración y acumulación nutrimental de hoja, tallo, raíz, espiga y jilote (a los 34 dt). La adición de Si en plantas de maíz presentó un incremento en la altura de plantas bajo condiciones de estrés con la dosis 3 mM Si, en relación con el testigo. La adición del Si muestra tendencias positivas en la concentración y acumulación nutrimental de algunos órganos, pero los análisis estadísticos no presentan significancia. Por otra parte, se observó que la salinidad disminuyó significativamente la altura de plantas, concentración y acumulación nutrimental.

Palabras clave: *Zea mays* L.; concentración nutrimental; acumulación nutrimental; crecimiento; salinidad; metasilicato de sodio

4.1. INTRODUCCIÓN

La salinidad de los suelos es uno de los factores abióticos que limitan severamente la producción de los cultivos ([Shrivastava y Kumar, 2015](#)). Se ha reportado una relación inversa entre el crecimiento de las plantas y el incremento en la salinidad ([Beltagi et al., 2006](#)). Esto se debe principalmente a que la salinidad involucra estrés osmótico al igual que iónico; la disminución en el crecimiento está directamente relacionada con concentración total de sales solubles y el potencial osmótico de la solución del suelo ([Tavakkoli et al., 2011](#)). Por otra parte, el silicio (Si) es un elemento que no se

encuentra catalogado como esencial, pero si dentro de los nutrientes benéficos más importantes para el crecimiento de las plantas (Laing *et al.*, 2006). El silicio aumenta de manera significativa el crecimiento de muchas especies de plantas a través del incremento de la actividad fotosintética, área foliar y contenido de clorofila, mejorando la estructura del cloroplasto en plantas que presentan estrés por sales (Soundararajan *et al.*, 2013). El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes para la alimentación a nivel mundial, además funge como materia prima para la industria (Meng *et al.*, 2016). Este cultivo es conocido por ser moderadamente sensible a las sales, además, su crecimiento y rendimiento se ve severamente afectado a altos niveles de salinidad (Farooq *et al.*, 2015). La cantidad de tierras agrícolas afectadas por la acumulación de sales se estima en 10 millones de hectáreas anualmente a nivel mundial (Pimentel *et al.*, 2004). En 2016, se sembraron 15 309 630 hectáreas en el país, de las cuales 7 761 216 pertenecen a maíz (SIAP, 2018), correspondiente a un 50.7% de la superficie cultivada.

Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del silicio en la mitigación de los efectos negativos que causa la salinidad en la producción de maíz blanco híbrido SB-308.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Ubicación del experimento y material vegetal

El experimento se condujo en un invernadero tipo baticenital perteneciente al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, localizado en Texcoco de Mora, Estado de México, coordenadas 19° 27' 47.9" LN 98° 54' 12.8" LO a 2243 de altitud. Se emplearon semillas de maíz (*Zea mays* L.) blanco híbrido SB-308 de la casa comercial Berentsen. Este híbrido es de los más utilizados por productores del Estado de México, debido a que tiene un buen desarrollo en valles altos, y además tiene un bajo costo de adquisición en el mercado.

4.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Se condujo un experimento factorial 3 x 4, donde los factores fueron el silicio (Si) y salinidad inducida por NaCl, ambos suministrados a la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1984). La fuente de Si fue el metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, JT Baker®) y los niveles de éste fueron 0, 1.5 y 3.0 mM. La salinidad se generó con cloruro de sodio (NaCl, JT Baker®) en los niveles: 0, 80, 160, 240 mM. Los 12 tratamientos

resultantes fueron distribuidos completamente al azar dentro del invernadero. Se empleó tezontle rojo como sustrato, cuyo tamaño de partícula osciló de 0.5 a 1.0 cm. Las unidades experimentales fueron bolsas plásticas de 35 x 35 cm (10 L), se utilizó una planta por bolsa y cada tratamiento tuvo tres repeticiones.

4.2.3. Producción de plántulas

La germinación y producción de plántula se llevó a cabo en charolas de poliestireno expandido (EPS) de 200 cavidades utilizando turba como sustrato (Pro-mix®). Después de la emergencia se aplicaron riegos ligeros 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 (SN) de Steiner (Steiner, 1984) al 50% SN, tercera semana 75% SN y por último cuarta semana 100% SN, hasta su trasplante.

4.2.4. Aplicación de tratamientos

Una vez producida la plántula se trasplantó en macetas. Se utilizó el sistema de riego por goteo localizado, por el cual se suministraba la solución nutritiva de Steiner al 100%. Después de 43 días del trasplante se inició con el suministro de tratamientos, mismos que se adicionaron a la solución nutritiva. Se emplearon 12 tanques con capacidad de 200 L, un tanque por tratamiento, para realizar las distintas combinaciones de los factores de estudio.

4.2.5. Variables evaluadas

Altura de planta. Esta se tomó antes de iniciar los tratamientos, a los 20 días con tratamiento (DT) y por último a los 34 DT.

Peso de biomasa seca de hojas, tallo, raíz, espiga y jilote. Una vez concluido el experimento, se separó hojas, tallo, raíz, espiga y jilote, mismas que se pusieron a secar dentro de una estufa de circulación de aire forzado a 72 °C por 48 h. transcurrido el tiempo de secado, se pesaron individualmente las muestras en una balanza analítica.

Concentración de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Si, y micronutrientes en hojas, tallo, raíz, espiga y jilote. 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 H₂SO₄ y C₇H₆O₃. Para la determinación de P, K, Ca, Mg,

S, y micronutrientos, así como Na y Si, se llevó a cabo una digestión húmeda con HNO₃ y HClO₄ (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).

4.2.6. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de Tukey al nivel de probabilidad 0.05 para cada parámetro con el paquete estadístico SAS Institute Inc (SAS, 2011).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Altura de plantas

Al inicio del experimento (0 DT) se observa que las plantas tuvieron una altura inicial homogénea entre los tratamientos (**Cuadro 4.1**).

En la evaluación realizada 20 DT no se observaron diferencias estadísticas significativas del factor Si; por el contrario, en la medición realizada 34 DT mostró su valor más alto en el tratamiento de 3.0 mM Si, aunque no fue diferente al testigo. Por otra parte, todos los niveles evaluados de NaCl, redujeron significativamente la altura de planta medida 20 y 34 DT (**Cuadro 4.1**).

Cuadro 4.1 Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la altura de planta de maíz.

Factor de estudio	Altura de planta, cm		
	0 DT	20 DT	34 DT
Si, mM			
0.0	61.00 a	114.08 a	134.50 ab
1.5	60.33 a	107.58 a	128.33 b
3.0	60.83 a	115.00 a	143.00 a
NaCl, mM			
0	62.78 a	149.33 a	181.22 a
80	59.89 a	117.56 b	155.33 b
160	60.89 a	103.00 b	117.78 c
240	59.33 a	79.00 c	86.78 d

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). DT = Días con tratamiento.

En las interacciones ensayadas de Si y NaCl, a los 20 y 34 DT se registró un decremento significativo en la altura de planta en los niveles 0, 1.5 y 3 mM Si con 80, 160 y 240 mM NaCl (**Cuadro 4.2**).

Cuadro 4.2. Altura de plantas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Altura de plantas, cm		
		0 DT	20 DT	34 DT
0.0	0	70.00 a	160.67 a	183.67 a
0.0	80	56.67 a	117.33 bcd	160.33 ab
0.0	160	61.67 a	100.00 cdef	112.67 cd
0.0	240	53.67 a	78.33 f	81.33 d
1.5	0	61.33 a	147.33 ab	183.00 a
1.5	80	64.67 a	116.00 bcde	142.00 bc
1.5	160	64.00 a	84.00 def	100.33 d
1.5	240	60.00 a	83.00 ef	88.00 d
3.0	0	58.67 a	140.00 ab	177.00 ab
3.0	80	56.33 a	119.33 bc	163.67 ab
3.0	160	63.33 a	125.00 bc	140.33 bc
3.0	240	58.33 a	75.67 f	91.00 d

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). DT = Días con tratamiento.

Bakht *et al.* (2011) realizaron un estudio en maíz bajo estrés por salinidad, y obtuvieron que el NaCl decrece significativamente la altura de la planta; resultados que coinciden con los aquí presentados. Los efectos de la salinidad son los resultados de interacciones complejas entre procesos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos, como el crecimiento de la planta, la absorción de agua y nutrientes (Akbarimoghaddam *et al.*, 2011). Por otra parte, el silicio contribuye al crecimiento de la planta bajo estrés por salinidad, y esto se puede atribuir a que mejora el estatus hídrico de la planta (Romeo-Aranda *et al.*, 2006); respuesta que fue observada en este estudio, puesto que la dosis 3.0 mM de Si mitigó los efectos adversos de la sequía con respecto al control.

4.3.2. Concentración nutrimental

4.3.2.1. Hojas

En los efectos principales del Si en la concentración de N, P, K, Ca, Mg y S no fueron significativos. Por otra parte, la salinidad redujo la concentración de N, P y S. Por el contrario, las concentraciones más altas de K, Ca y Mg se registraron en los niveles 240 y 160 mM de NaCl respectivamente (**Cuadro 4.3**).

Cuadro 4.3. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración foliar de macronutrientes en maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	23.28 a	2.26 a	13.69 a	11.78 a	9.04 a	1.67 a
1.5	24.87 a	2.42 a	13.73 a	11.06 a	8.60 a	1.78 a
3.0	24.33 a	2.10 a	13.00 a	10.10 a	7.52 a	1.57 a
NaCl, mM						
0	28.31 a	2.49 a	11.93 b	8.84 b	6.43 b	2.02 a
80	25.89 ab	2.50 a	10.80 b	10.49 b	7.86 b	1.61 b
160	21.82 bc	2.52 a	13.82 ab	10.71 ab	8.56 ab	1.57 b
240	20.61 c	1.53 b	17.33 a	13.88 a	10.70 a	1.50 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración foliar de N mostró los valores más altos en los tratamientos sin NaCl y con 0 y 3 mM Si, éstos fueron estadísticamente distintos a aquellos registrados en plantas del tratamiento con NaCl y sin tratamiento con Si. Destaca el hecho de que los dos niveles ensayados de Si, ocasionaron que la concentración de N en hojas no fuera afectada por el efecto de la salinidad. En el caso del P, la mayor concentración se encontró en el tratamiento de 80 mM de NaCl sin Si. Las mayores concentraciones de Mg se encontraron en los niveles de 240 mM NaCl con 0 y 1.5 mM Si. Por otra parte, no se registraron efectos significativos de los tratamientos en las concentraciones de K, Ca y S (**Cuadro 4.4**).

Cuadro 4.4. Concentración de macronutrientes en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	29.51 a	2.19 bc	14.16 a	7.97 a	5.49 c	1.87 a
0.0	80	27.41 ab	4.50 a	8.62 a	10.69 a	8.52 abc	1.83 a
0.0	160	20.06 ab	1.25 c	17.62 a	13.36 a	10.30 abc	1.49 a
0.0	240	16.10 b	1.08 c	14.32 a	15.07 a	11.81 a	1.49 a
1.5	0	26.71 ab	2.44 bc	9.87 a	9.78 a	7.42 abc	2.16 a
1.5	80	25.41 ab	1.52 c	13.73 a	10.98 a	8.17 abc	1.52 a
1.5	160	22.40 ab	3.55 ab	12.41 a	9.70 a	8.26 abc	1.82 a
1.5	240	24.96 ab	2.16 bc	18.88 a	13.75 a	10.53 ab	1.60 a
3.0	0	28.70 a	2.82 abc	11.75 a	8.75 a	6.35 bc	2.03 a
3.0	80	24.85 ab	1.45 c	10.02 a	9.78 a	6.87 bc	1.47 a
3.0	160	22.98 ab	2.74 abc	11.43 a	9.04 a	7.11 abc	1.38 a
3.0	240	20.76 ab	1.35 c	18.78 a	12.80 a	9.73 abc	1.40 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En lo que respecta a la concentración de micronutrientes, el Si solo influenció de manera significativa las concentraciones foliares de Mn, Si y Na. El Mn presentó un decremento significativo con el suministro de Si, resultando el valor más alto el

tratamiento sin Si. Las concentraciones foliares de Na más altas se registraron en plantas tratadas con 1.5 y 3 mM Si. Por otra parte, el tratamiento 240 mM NaCl incrementó significativamente a concentración de Cu y Na y redujo la de B, en ambos casos respecto al tratamiento sin salinidad (**Cuadro 4.5**).

Cuadro 4.5. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración foliar de micronutrientes en maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	290.86 a	849.10 a	25.51 a	115.24 a	66.42 a	73.03 ab	4098.73b
1.5	655.85 a	939.83 a	22.56 a	100.48 a	63.21 a	81.57 a	6450.28a
3.0	216.35 a	714.23 a	19.84 a	70.44 b	58.12 a	49.35 b	4835.22ab
NaCl, mM							
0	603.69 a	658.39 b	22.66 a	98.43 a	69.17 a	57.61 ab	948.79c
80	252.00 a	759.58 ab	25.40 a	106.89 a	69.18 a	89.52 a	2471.16c
160	348.00 a	850.29 ab	23.94 a	85.31 a	60.37 ab	75.48 ab	6434.83b
240	347.07 a	1069.28 a	18.56 a	90.93 a	51.61 b	49.33 b	10657.52a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En el **Cuadro 4.6** se presentan los efectos de las interacciones en las concentraciones foliares de micronutrientes. La concentración foliar de Fe y B no fue influenciada por los tratamientos. En el caso del Cu, los valores de concentración foliar más elevados se obtuvieron en el nivel 240 mM NaCl, correspondientes a los tratamientos más altos de salinidad, con 0 y 1.5 mM Si. La concentración de Zn y Mn en las hojas de maíz, mostró el resultado más alto en los tratamientos de 80 mM NaCl y 0 mM Si. La concentración foliar de silicio tuvo su mayor valor en 80 mM de NaCl y 1.5 mM de Si, resultados que fueron distintos estadísticamente con los de 3.0 mM Si con el mismo nivel de salinidad. La concentración de Na en hojas de maíz alcanzó su valor más elevado en el nivel 240 mM NaCl tanto con 1.5 como con 3.0 mM Si, siendo estadísticamente distinto a los niveles 0, 80 y 160 mM NaCl con 0, 1.5 y 3 mM Si; se puede observar que el Si incrementa la concentración foliar de Na en maíz.

Cuadro 4.6. Concentración de micronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	149.38 a	403.63 b	22.10 ab	105.48 ab	76.84 a	41.07 b	616.38 d
0.0	80	293.16 a	769.84 ab	37.38 a	149.42 a	69.58 a	76.16 ab	2203.81 d
0.0	160	196.53 a	927.58 ab	21.82 ab	91.55 ab	63.77 a	104.61 ab	4971.94 bcd
0.0	240	524.35 a	1295.33 a	20.74 ab	114.51 ab	55.47 a	70.27 ab	8602.76 abc
1.5	0	1331.14 a	822.32 ab	23.48 ab	128.46 ab	62.40 a	82.07 ab	823.20 d
1.5	80	236.86 a	999.63 ab	19.46 ab	94.02 ab	80.26 a	44.44 a	2919.39 cd
1.5	160	704.57 a	833.32 ab	26.87 ab	93.51 ab	57.48 a	63.94 b	10194.06 ab
1.5	240	350.82 a	1104.04 ab	20.43 ab	85.90 ab	52.67 a	35.82 b	11864.46 a
3.0	0	330.54 a	749.20 ab	22.38 ab	61.33 b	68.26 a	49.66 b	1406.76 d
3.0	80	225.95 a	509.27 b	19.34 ab	77.21 ab	57.70 a	47.95 b	2290.27 d
3.0	160	142.87 a	789.97 ab	23.13 ab	70.85 ab	59.83 a	57.88 b	4138.49 cd
3.0	240	166.04 a	808.45 ab	14.51 b	72.35 ab	46.67 a	41.88 b	11505.33 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los obtenidos por [Rashad y Hussien \(2014\)](#) donde reportan que el Si no generó diferencias estadísticas en la concentración foliar de P con respecto al control, por otra parte, mencionan que el N aumentó con adición de silicio, y el K disminuyó, esto difiere con nuestros resultados, debido a que no presentaron diferencias significativas en los distintos niveles de silicio. [Karimi et al. \(2005\)](#) mencionan que el desbalance iónico se presenta en las células, debido a una acumulación excesiva de Na⁺ y Cl⁻ y reduce la absorción de otros minerales como el K⁺, Ca²⁺ y Mn²⁺; resultados que difieren a los nuestros, debido a que no mostraron diferencias significativas entre los distintos niveles de salinidad. [Shaaban y Abou El-Nour \(2014\)](#) realizaron un estudio en maíz y mencionan que la salinidad redujo significativamente la concentración de Fe, Cu, Zn y Mn; esto solo coincide con los resultados obtenidos en Zn en este estudio.

4.3.2.2. Tallos

La concentración de N, P, K, Ca y S en tallos de maíz no presentó diferencias significativas por los niveles de Si estudiados; mientras que el nivel 3 mM Si redujo la concentración de Mg. Por otra parte, la concentración más alta de N, K, Ca, Mg y S se obtuvo en 240 mM NaCl, siendo estadísticamente distinto al tratamiento 0 mM NaCl (**Cuadro 4.7**).

Cuadro 4.7. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientes en tallos de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	23.25 a	2.38 a	16.27 a	4.02 a	4.94 a	1.08 a
1.5	24.91 a	2.71 a	14.30 a	4.50 a	4.81 a	1.24 a
3.0	17.30 a	2.18 a	15.21 a	3.54 a	4.02 b	1.05 a
NaCl, mM						
0	12.95 b	1.81 a	12.77 b	2.17 c	2.37 d	0.66 c
80	26.33 ab	2.98 a	15.51 ab	3.49 bc	3.98 c	1.13 b
160	16.68 ab	2.34 a	15.77 ab	4.74 ab	5.02 b	1.13 b
240	31.31 a	2.57 a	16.99 a	5.70 a	7.00 a	1.58 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Al analizar los efectos de la interacción de los factores de estudio, se observa que la concentración de N más alta se encontró en el tratamiento de 80 mM NaCl y 1.5 mM Si, resultados estadísticamente distintos a los obtenidos sin estrés salino en los niveles 0 y 1.5 mM Si. Por otra parte, los tratamientos de P y K no registraron diferencias estadísticas significativas (**Cuadro 4.8**).

Los valores obtenidos en los tratamientos de Ca, Mg y S mostraron sus concentraciones en tallos de maíz más altas en el tratamiento de 240 mM NaCl y 1.5 mM Si.

Cuadro 4.8. Concentración de macronutrientes en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	10.15 c	1.01 a	15.43 a	1.88 e	2.13 f	0.58 d
0.0	80	16.10 abc	3.79 a	13.88 a	2.97 bcde	3.43 def	0.96 bcd
0.0	160	21.58 abc	2.05 a	18.07 a	5.71 ab	6.82 ab	1.35abcd
0.0	240	45.15 ab	2.67 a	17.67 a	5.49 abc	7.37 a	1.41 abc
1.5	0	12.95 bc	2.04 a	10.53 a	2.58 cde	2.69 ef	0.69 cd
1.5	80	47.36 a	3.23 a	15.71 a	3.47 abcde	3.98 cdef	1.39 abc
1.5	160	14.23 abc	2.50 a	14.87 a	5.50 abc	4.88 bcd	1.07abcd
1.5	240	25.08 abc	3.04 a	16.08 a	6.45 a	7.65 a	1.79 a
3.0	0	15.75 abc	2.37 a	12.33 a	2.02 ed	2.27 f	0.69 cd
3.0	80	15.51 abc	1.90 a	16.92 a	4.00 abcde	4.50 cde	1.03abcd
3.0	160	14.23 abc	2.46 a	14.36 a	2.98 bcde	3.35 def	0.96 bcd
3.0	240	23.68 abc	1.97 a	17.21 a	5.15 abcd	5.95 abc	1.52 ab

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Las concentraciones en tallos de maíz de Fe, Cu, Zn, B, Si y Na no presentaron diferencias estadísticas significativas en los distintos niveles de Si (**Cuadro 4.9**). El Mn mostró su valor más alto en el tratamiento de 1.5 mM Si, en comparación con los tratamientos 0 y 3 mM. Por otra parte, en los tratamientos de salinidad el Fe, B, Na

registraron su concentración más elevada en el tratamiento 240 mM NaCl, presentando diferencias estadísticas con respecto a 0 mM NaCl. La concentración en tallos de Cu y Si no presentó diferencias estadísticas en ninguno de sus tratamientos. El Zn y Mn mostraron su concentración más alta en los niveles de 80 mM NaCl, siendo estadísticamente significativo con respecto a 0 mM NaCl.

Cuadro 4.9. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en tallos de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	302.60 a	119.54 a	16.45 a	41.87 ab	30.85 a	46.40 a	20031.76a
1.5	382.67 a	104.43 a	15.41 a	45.31 a	32.15 a	45.60 a	17420.40a
3.0	323.55 a	119.85 a	12.17 a	33.64 b	29.65 a	40.63 a	22694.06a
NaCl, mM							
0	128.66 b	44.15 a	10.20 b	31.23 b	26.38 b	38.99 a	856.53d
80	425.21 ab	143.05 a	18.97 a	48.12 a	32.55 a	44.72 a	15728.68c
160	321.72 ab	168.07 a	15.17 ab	43.13 a	31.56 a	44.03 a	23195.92b
240	469.51 a	103.16 a	14.37 ab	38.63 ab	33.03 a	49.09 a	40413.82a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración de Fe, Cu, Zn y Si en tallos de maíz no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos (**Cuadro 4.10**).

Cuadro 4.10. Concentración de micronutrientos en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	71.22 a	31.40 a	9.57 a	25.23 b	28.70ab	59.55 a	749.13 e
0.0	80	320.03 a	160.32 a	27.74 a	56.74 a	28.46ab	44.54 a	12773.85 cde
0.0	160	487.06 a	205.20 a	14.98 a	49.44 ab	33.50ab	40.66 a	26510.90 bc
0.0	240	332.06 a	81.23 a	13.51 a	36.06 ab	32.72ab	40.82 a	40093.16 ab
1.5	0	182.10 a	30.96 a	9.67 a	40.61 ab	24.69b	30.72 a	892.97 de
1.5	80	330.63 a	19.18 a	18.86 a	42.74 ab	36.31a	58.13 a	16972.80 cde
1.5	160	275.80 a	224.57 a	16.43 a	47.31 ab	31.70ab	31.69 a	17374.23 cde
1.5	240	742.13 a	142.98 a	16.66 a	50.55 ab	35.86a	61.87 a	34441.56 ab
3.0	0	132.65 a	70.06 a	11.34 a	27.84 b	25.75b	26.69 a	927.47 de
3.0	80	624.94 a	249.63 a	10.29 a	44.85 ab	32.85ab	31.49 a	17439.38 cd
3.0	160	202.27 a	74.45 a	14.08 a	32.61 ab	29.47ab	59.74 a	25702.63 bc
3.0	240	334.31 a	85.25 a	12.94 a	29.24 b	30.51ab	44.58 a	46706.73 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración de Mn en el tratamiento 80 mM NaCl con 0 mM Si, fue estadísticamente superior a la obtenida en los tratamientos con 0 mM de salinidad con 0 y 3.0 mM Si. La concentración más elevada de B en tallos de maíz se encontró en los niveles 80 y 240 mM de NaCl con 1.5 mM Si, resultando estadísticamente diferente

a los tratamientos sin salinidad con 1.5 y 3.0 mM Si. En Na, la concentración más alta se presentó en el nivel 240 mM de NaCl con 3.0 mM de Si, siendo estadísticamente distinto a los tratamientos de 0, 80 y 160 mM de NaCl; la dosis 3.0 mM Si concentra más Na en tallos (**Cuadro 4.10**).

Turan *et al.* (2010) reportan que la adición de NaCl en vástagos de maíz, la concentración de N, Ca y Fe disminuye, y a su vez el valor de P, Zn y Mn aumenta; resultados que coinciden parcialmente con los aquí presentados, debido a que el N, P, Ca, Fe, Zn y Mn aumentaron en existencia de NaCl. Jiang *et al.* (2017) mencionan que, en maíz la presencia de salinidad, disminuye la concentración de K⁺ en vástagos; mientras que en este estudio la concentración de K aumentó con la adición de NaCl. Asimismo, el valor del Na⁺ aumentó cuando se suministró NaCl, resultados semejantes a los obtenidos en este estudio. Abou El-Nour (2002) realizó un estudio y encontró que la salinidad reduce la concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en vástagos de maíz; resultados que difieren a los obtenidos en este estudio. Concentraciones excesivas de Na en el tejido vegetal afectan el balance nutrimental y la regulación osmótica y causan toxicidad por iones (Katerji *et al.*, 2004).

4.3.2.3. Raíz

La concentración de N en raíces de maíz resultó tener el mayor valor en el tratamiento de 3.0 mM de Si, siendo estadísticamente distinto con los otros tratamientos (**Cuadro 4.11**). Sin embargo, en K la mayor concentración se encontró en las raíces de plantas que no tenían dosis de silicio, resultando estadísticamente distintas y con un menor valor las que tenían 1.5 y 3.0 mM Si. Por otra parte, las concentraciones de P, Ca, Mg y S en raíces de plantas de maíz no presentaron diferencias estadísticas significativas.

Cuadro 4.11. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientes en raíces de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	6.85 b	0.89 a	2.90 a	15.22 a	16.94 a	1.95 a
1.5	7.20 b	0.75 a	1.56 b	15.71 a	18.56 a	1.41 a
3.0	11.36 a	0.52 a	1.55 b	15.09 a	12.48 a	1.06 a
NaCl, mM						
0	14.19 a	1.09 a	3.84 a	13.96 a	14.30 a	2.05 a
80	6.61 b	0.75 ab	1.58 b	21.04 a	20.14 a	1.95 a
160	6.61 b	0.51 b	1.02 b	11.14 a	11.83 a	0.86 a
240	6.48 b	0.52 b	1.58 b	15.21 a	17.69 a	1.03 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración de N en raíces de maíz más alta se registró en el nivel 3.0 mM Si sin fuente de estrés salino, resultados que son estadísticamente distintos con el resto de los tratamientos (**Cuadro 4.12**). En el caso de P, la concentración más elevada se mostró en el tratamiento sin estrés por salinidad y sin silicio, siendo estadísticamente superior a las concentraciones de los tratamientos con 160 y 240 mM NaCl en combinación con 3.0 mM Si. El K presentó su mayor valor en el tratamiento 0 mM NaCl y 0 mM Si, resultando significativamente distinto al resto de las combinaciones ensayadas. La concentración de S en raíces de maíz más alta se registró en el tratamiento sin fuente de estrés por salinidad, al igual que ninguna dosis de silicio, siendo estadísticamente diferente a las combinaciones de 160 y 240 mM NaCl con 1.5 y 3.0 mM Si. Por otra parte, la concentración de los macronutrientes secundarios Ca y Mg no presentaron diferencias significativas en ninguno de los tratamientos.

Cuadro 4.12. Concentración de macronutrientes en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutricional (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	8.28 b	1.50 a	7.16 a	13.23 a	13.03 a	3.88 a
0.0	80	6.82 b	0.87 ab	1.36 b	14.05 a	16.37 a	1.29 ab
0.0	160	6.53 b	0.48 ab	1.40 b	13.27 a	13.80 a	1.16 ab
0.0	240	5.77 b	0.68 ab	1.65 b	20.33 a	24.55 a	1.45 ab
1.5	0	10.83 b	1.07 ab	2.64 b	17.11 a	17.79 a	1.48 ab
1.5	80	5.83 b	0.69 ab	1.51 b	18.78 a	22.38 a	2.22 ab
1.5	160	4.90 b	0.67 ab	0.97 b	12.65 a	15.69 a	0.89 b
1.5	240	7.23 b	0.54 ab	1.15 b	14.26 a	18.35 a	1.01 b
3.0	0	23.45 a	0.70 ab	1.69 b	11.53 a	12.07 a	0.78 b
3.0	80	7.17 b	0.66 ab	1.86 b	30.29 a	21.65 a	2.32 ab
3.0	160	8.40 b	0.37 b	0.68 b	7.49 a	6.00 a	0.52 b
3.0	240	6.41 b	0.32 b	1.96 b	11.03 a	10.18 a	0.61 b

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Los efectos principales del Si no fueron significativos en las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na en raíz. Asimismo, en los efectos principales del NaCl no influyeron las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B. La concentración de Na en raíz se relacionó de manera positiva con la concentración de NaCl en la solución nutritiva (**Cuadro 4.13**).

Cuadro 4.13. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en raíces de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	12466.78a	49.36 a	31.75 a	333.72 a	16.33 a	129.56 a	13986.79 a
1.5	14233.97a	48.44 a	29.82 a	369.91 a	13.02 a	148.00 a	12603.86 a
3.0	8578.52a	31.56 a	20.77 a	219.65 a	10.67 a	160.67 a	12028.10 a
NaCl, mM							
0	10540.85a	44.60 a	30.03 a	318.11 a	16.91 a	128.93 a	4128.12 b
80	14979.92a	51.62 a	34.02 a	384.39 a	12.05 a	178.32 a	11890.06ab
160	8870.23a	30.67 a	19.77 a	212.69 a	11.08 a	153.24 a	11129.53ab
240	12648.03a	45.58 a	25.97 a	315.85 a	13.31 a	123.81 a	24343.96 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si, Na en las raíces de plantas de maíz no presentaron diferencias estadísticas significativas entre las combinaciones de Si y NaCl ensayadas (**Cuadro 4.14**).

Cuadro 4.14. Concentración de micronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	8574.87a	41.49a	33.60a	270.35a	26.24a	52.53a	4438.36a
0.0	80	13124.06a	49.03a	35.44a	379.62a	8.13a	157.23a	11597.41a
0.0	160	9377.55a	37.13a	21.02a	227.45a	17.68a	182.32a	11861.99a
0.0	240	18790.63a	69.78a	36.92a	457.45a	13.24a	126.12a	28049.40a
1.5	0	13544.03a	58.40a	32.81a	387.35a	18.04a	206.79a	4468.10a
1.5	80	17444.16a	58.30a	34.03a	432.86a	8.91a	128.55a	11238.37a
1.5	160	12243.14a	37.13a	25.82a	300.71a	8.10a	125.21a	12214.84a
1.5	240	13704.53a	39.91a	26.59a	358.69a	17.02a	131.43a	22494.10a
3.0	0	9503.640a	33.90a	23.66a	296.61a	6.46a	127.46a	3477.88a
3.0	80	14371.52a	47.53a	32.58a	340.68a	19.10a	249.16a	12834.40a
3.0	160	4989.99a	17.75a	12.45a	109.91a	7.44a	152.16a	9311.76a
3.0	240	5448.92a	27.03a	14.38a	131.38a	9.66a	113.86a	22488.36a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Turan *et al.* (2010) registraron en un estudio realizado en plantas de maíz, el aumento en la concentración de N, P, Ca, Na, Fe, Zn y Mn en raíces cuando se suministra NaCl; resultados contrarios a los aquí obtenidos. Jiang *et al.* (2017) mencionan que, en maíz la presencia de salinidad disminuye la concentración de K⁺ en raíces; respuesta no observada en este estudio. El-Fouly *et al.* (2011) reportan una disminución en la concentración de Fe, Cu, Zn y Mn cuando aumenta el nivel de salinidad, contrario a lo aquí registrado. Cantidades excesivas de sales solubles en raíz causan estrés osmótico, lo que ocasiona un desbalance en las relaciones de agua de la planta, en la absorción y uso de los nutrientes y también toxicidad por iones; como resultado

de estos cambios, la actividad de enzimas y el metabolismo de la planta se ven afectados (Munns, 2002).

4.3.2.4. Espiga

Los efectos principales de Si no fueron significativos en las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y S en espigas. Asimismo, en los efectos de la salinidad no afectaron las concentraciones de P, K, Ca, Mg y S en espigas. Por otra parte, la concentración de N fue significativamente reducida en el tratamiento 240 mM NaCl respecto al resto de los niveles de NaCl y el testigo, se puede observar que, a medida que aumenta el nivel de salinidad, la concentración de N decrece (**Cuadro 4.15**).

Cuadro 4.15. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientes en raíces de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	2.80 a	19.70 a	12.24 a	9.74 a	6.57 a	2.21 a
1.5	2.06 a	18.60 a	12.57 a	10.40 a	6.75 a	2.91 a
3.0	2.32 a	20.23 a	10.77 a	10.55 a	6.43 a	2.37 a
NaCl, mM						
0	3.18 a	13.23 a	13.23 a	7.72 a	5.19 a	2.36 a
80	2.73 a	17.17 a	17.17 a	9.49 a	5.62 a	2.17 a
160	2.18 ab	20.79 a	20.79 a	11.08 a	6.76 a	2.28 a
240	1.48 b	26.84 a	26.84 a	12.63 a	8.76 a	3.20 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración de N en espigas de plantas de maíz mostró su valor más alto los tratamientos sin estrés por salinidad y sin Si, resultados estadísticamente distintos con el tratamiento consistente en 240 mM NaCl y 1.5 mM Si. Por otra parte, la concentración de P, K, Ca, Mg y S no presentó diferencias estadísticas significativas con respecto al resto de los tratamientos (**Cuadro 4.16**).

Los efectos principales de Si en la concentración de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Na en espigas de plantas de maíz no fueron significativos. Asimismo, la concentración de Si más alta significativamente se registró en el tratamiento de 1.5 mM Si. Por otra parte, los efectos principales de la salinidad no fueron significativos en las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na en espigas (**Cuadro 4.17**).

Las combinaciones ensayadas de NaCl y Si no presentaron diferencias estadísticas significativas en la concentración de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na en espigas (**Cuadro 4.18**).

Cuadro 4.16. Concentración de macronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	4.42 a	13.14 a	7.86 a	6.26 a	4.20 a	1.70 a
0.0	80	2.61 ab	17.90 a	9.36 a	9.75 a	6.26 a	2.18 a
0.0	160	2.35 ab	23.18 a	13.75 a	10.82 a	6.92 a	2.00 a
0.0	240	1.78 ab	24.56 a	17.98 a	12.11 a	8.86 a	2.96 a
1.5	0	2.38 ab	14.09 a	8.13 a	7.63 a	5.39 a	2.73 a
1.5	80	3.19 ab	15.41 a	8.79 a	8.54 a	5.08 a	2.25 a
1.5	160	1.86 ab	19.28 a	11.26 a	12.50 a	7.14 a	2.66 a
1.5	240	0.79 b	25.58 a	22.07 a	12.91 a	9.37 a	3.98 a
3.0	0	2.71 ab	12.45 a	6.66 a	9.25 a	5.97 a	2.62 a
3.0	80	2.37 ab	18.17 a	8.61 a	10.18 a	5.50 a	2.05 a
3.0	160	2.31 ab	19.90 a	11.83 a	9.92 a	6.21 a	2.16 a
3.0	240	1.85 ab	30.36 a	15.97 a	12.85 a	8.03 a	2.64 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Cuadro 4.17. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en espigas de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	1.67 a	54.16 a	28.13 a	33.29 a	42.67 a	31.84 b	29.22 a
1.5	2.10 a	934.19 a	174.71 a	29.85 a	42.75 a	47.13 a	32.87 a
3.0	1.64 a	67.86 a	45.69 a	24.45 a	33.15 a	35.51 ab	36.53 a
NaCl, mM							
0	1.72 a	69.30 a	36.94 a	26.21 a	37.28 a	39.73 a	39.73 a
80	1.62 a	58.70 a	74.10 a	27.82 a	37.98 a	36.04 a	36.04 a
160	1.73 a	113.20 a	41.02 a	28.72 a	37.04 a	34.01 a	34.01 a
240	2.15 a	1167.10 a	179.33 a	34.04 a	45.78 a	42.85 a	42.85 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Cuadro 4.18. Concentración de micronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	1.35 a	28.11 a	20.84 a	31.32 a	31.18 a	27.49 a	19.82 a
0.0	80	1.75 a	62.78 a	23.33 a	38.15 a	51.99 a	39.09 a	42.00 a
0.0	160	1.47 a	66.03 a	28.71 a	27.68 a	35.40 a	25.69 a	27.96 a
0.0	240	2.11 a	59.72 a	39.64 a	36.02 a	52.08 a	35.05 a	27.08 a
1.5	0	2.02 a	67.51 a	62.38 a	21.55 a	42.33 a	53.39 a	32.58 a
1.5	80	1.68 a	31.11 a	160.03 a	18.98 a	24.88 a	37.86 a	28.20 a
1.5	160	1.91 a	249.20 a	67.10 a	32.96 a	42.79 a	37.31 a	25.74 a
1.5	240	2.77 a	3388.92 a	409.31 a	45.89 a	60.98 a	59.95 a	44.92 a
3.0	0	1.78 a	112.14 a	27.58 a	25.75 a	38.31 a	38.29 a	35.99 a
3.0	80	1.41 a	82.30 a	38.93 a	26.33 a	37.07 a	31.16 a	30.50 a
3.0	160	1.78 a	24.27 a	27.22 a	25.52 a	32.93 a	39.03 a	28.29 a
3.0	240	1.56 a	52.69 a	89.03 a	20.20 a	24.28 a	33.53 a	51.30 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Ullrich (2002) menciona que, la disminución en concentración de N en espigas de maíz se debe a que altas concentraciones de Na⁺ inhiben la absorción y asimilación de NO³⁻ y NH⁴⁺. Tammam *et al.* (2008) realizaron un estudio en maíz y mencionan que la adición de 240 mM de NaCl la concentración de Ca y Na en espigas aumentó, discrepando del K y Mg debido a que disminuyeron con respecto al testigo; resultados que coinciden parcialmente con los aquí presentados, puesto que, los valores de Ca, Na, K y Mg se incrementaron con presencia de la salinidad. La habilidad relativa de la planta o de los órganos para incentivar la acumulación de solutos en sus tejidos (ajuste osmótico) determinará parcialmente su tolerancia a las condiciones de estrés (Karimi *et al.*, 2005). Chen *et al.* (2000) menciona que el Si inhibe la absorción de Mn y Na, y a su vez aumenta la de P, Mg, K, Fe, Cu y Zn; resultados que coinciden con los obtenidos en este experimento, excepto la concentración de Na que es incrementado con los tratamientos con Si. Peres-Soratto *et al.* (2012) mencionan que la adición de Si incrementó la concentración de K y Si en espigas, por otra parte, en N, P, Ca, Mg y S no registraron diferencias; en este estudio solo la concentración de Si en espigas aumento con el suministro de Si.

4.3.2.5. Jilote

En los efectos principales de NaCl y Si no fueron significativos en la concentración de N, P, K, Ca, Mg y S en jilotes de plantas de maíz (**Cuadro 4.19**).

Cuadro 4.19. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de macronutrientes en jilotes de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	28.24 a	20.03 a	12.16 a	8.37 a	7.14 a	1.67 a
1.5	18.80 a	24.82 a	11.55 a	9.47 a	4.91 a	1.70 a
3.0	23.16 a	22.61 a	12.25 a	10.63 a	6.74 a	1.61 a
NaCl, mM						
0	39.85 a	28.33 a	10.23 a	9.31 a	5.60 a	1.50 a
80	13.99 a	18.51 a	12.02 a	9.55 a	6.26 a	1.82 a
160	11.66 a	20.21 a	14.10 a	9.82 a	6.79 a	1.68 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Las combinaciones ensayadas en los distintos niveles de NaCl y Si no ocasionaron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y S en los jilotes de plantas de maíz (**Cuadro 4.20**).

Cuadro 4.20. Concentración de macronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (g kg ⁻¹ de materia seca)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	48.71 a	26.62 a	8.61 a	8.73 a	7.01 a	1.56 a
0.0	80	15.87 a	18.82 a	9.25 a	9.71 a	4.97 a	1.67 a
0.0	160	3.87 a	3.87 a	31.50 a	3.21 a	13.97 a	1.97 a
1.5	0	37.76 a	33.23 a	12.69 a	8.47 a	3.98 a	1.42 a
1.5	80	10.63 a	18.59 a	10.13 a	9.49 a	5.70 a	1.97 a
1.5	160	8.00 a	22.61 a	11.80 a	10.44 a	5.02 a	1.69 a
3.0	0	33.05 a	25.13 a	9.39 a	10.71 a	5.79 a	1.49 a
3.0	80	16.18 a	17.89 a	19.01 a	9.37 a	9.02 a	1.81 a
3.0	160	17.91 a	23.23 a	10.58 a	11.39 a	6.16 a	1.57 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La combinación de los niveles de NaCl y Si no afectó la concentración de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na de jilotes de plantas de maíz (**Cuadro 4.21**).

Cuadro 4.21. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la concentración de micronutrientos en jilotes de maíz.

Factor de estudio	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	1.33 a	45.61 a	74.68 a	21.71 a	23.45 a	25.33 a	26.35 a
1.5	1.39 a	98.52 a	53.74 a	19.54 a	20.41 a	25.47 a	27.38 a
3.0	1.33 a	66.64 a	69.47 a	17.15 a	18.26 a	23.82 a	27.09 a
NaCl, mM							
0	1.22 a	64.48 a	48.30 a	16.09 a	16.55 a	23.36 a	27.29 a
80	1.37 a	67.82 a	63.56 a	21.86 a	25.50 a	27.02 a	25.54 a
160	1.51 a	88.03 a	88.43 a	20.76 a	20.13 a	24.40 a	28.24 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Las combinaciones ensayadas en los diferentes niveles de NaCl y Si no ocasionaron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na en los jilotes de plantas de maíz (**Cuadro 4.22**).

Cuadro 4.22. Concentración de micronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Concentración nutrimental (mg kg ⁻¹ de materia seca)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	1.17 a	40.65 a	66.61 a	16.78 a	16.55 a	23.96 a	31.42 a
0.0	80	1.24 a	65.26 a	74.65 a	27.46 a	30.43 a	31.37 a	20.18 a
0.0	160	2.07 a	1.52 a	98.91 a	19.19 a	23.17 a	11.33 a	29.58 a
1.5	0	1.23 a	100.50 a	35.30 a	16.03 a	18.97 a	23.81 a	24.96 a
1.5	80	1.44 a	61.69 a	34.03 a	18.73 a	20.23 a	24.89 a	29.48 a
1.5	160	1.48 a	133.35 a	91.87 a	23.84 a	22.01 a	27.70 a	27.69 a
3.0	0	1.24 a	52.27 a	42.97 a	15.43 a	14.13 a	22.29 a	25.47 a
3.0	80	1.43 a	80.83 a	91.19 a	18.12 a	26.01 a	23.68 a	27.66 a
3.0	160	1.35 a	71.54 a	81.48 a	18.20 a	17.22 a	25.44 a	28.32 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La concentración de N en espigas de maíz disminuyó en presencia de NaCl, este decremento se debe a que altas concentraciones de Na⁺ inhiben la absorción y asimilación de NO³⁻ y NH⁴⁺ (Ullrich, 2002). Hasan y Miyake (2017) realizaron un estudio en maíz para evaluar el efecto de la salinidad en la concentración nutrimental y obtuvieron que la salinidad generada por NaCl aumentó la concentración de Ca, Mg, B y Na, mientras que el P y K disminuyeron significativamente; resultados contrarios a los aquí mostrados, puesto que no registramos diferencias significativas. El Na⁺ es el principal ion que causa la toxicidad en maíz bajo estrés por salinidad (Munns y Tester, 2008). Costa-Crusciol *et al.* (2013) mencionan que en la concentración de N, P y S no presentó diferencias significativas, sin embargo, en el caso de K, Ca, Mg y Si registraron un aumento en el suministro de silicio; resultados que coinciden con los nuestros.

4.3.3. Acumulación nutrimental

4.3.3.1. Hojas

Los efectos principales de Si en la acumulación foliar de N, P, K, Ca, Mg y S en plantas de maíz no fueron significativos. Por otra parte, dentro de los efectos principales de la salinidad se encontró que la mayor acumulación foliar de N, P y S se presentó en los niveles de 0 mM NaCl, siendo estadísticamente distinto con el tratamiento más elevado, correspondiente a 240 mM NaCl. Se puede observar que conforme el nivel de salinidad aumenta la acumulación de N, P y S se reduce. En el caso del K, se encontró su acumulación foliar más elevada en el tratamiento de 0 mM NaCl, presentando diferencias estadísticas significativas con respecto al nivel 80 mM NaCl. Por otra parte, la acumulación de Ca y Mg en hojas de plantas de maíz no fue afectada por los efectos principales de los factores de estudio (**Cuadro 4.23**).

Cuadro 4.23. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación foliar de macronutrientes en maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg hojas ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	511.76 a	48.01 a	285.73 a	227.96 a	172.60 a	35.56 a
1.5	440.67 a	42.55 a	242.85 a	196.10 a	152.23 a	31.57 a
3.0	484.92 a	41.75 a	252.08 a	197.52 a	146.69 a	31.40 a
NaCl, mM						
0	688.00 a	59.05 a	296.60 a	209.76 a	151.28 a	48.25 a
80	481.45 b	46.37 a	197.67 b	194.11 a	145.10 a	29.95 b
160	396.92 bc	44.59 a	254.55 ab	196.97 a	156.93 a	28.30 b
240	350.10 c	26.41 b	292.07 ab	227.92 a	175.40 a	24.88 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación foliar de N en plantas de maíz mostró su valor más alto en el tratamiento sin salinidad y sin silicio, siendo diferente estadísticamente con el resto de las combinaciones ensayadas. En el caso del P, registró su mayor acumulación foliar en el tratamiento de 80 mM NaCl sin silicio, presentando diferencias estadísticas significativas con el tratamiento 240 mM NaCl con 0 mM Si, al igual que en 80 y 240 mM NaCl con 1.5 y 3.0 mM Si. El K registró su acumulación foliar más alta en el tratamiento sin salinidad y sin silicio. La acumulación foliar de S más alta se presentó en el tratamiento 0 NaCl mM con 0 mM Si, siendo estadísticamente diferente con respecto a los niveles 80, 160 y 240 mM de NaCl con 0, 1.5 y 3.0 mM Si. Por otra parte, la acumulación foliar de Ca y Mg no mostró diferencias estadísticas significativas en las distintas combinaciones ensayadas (**Cuadro 4.24**).

Cuadro 4.24. Acumulación de macronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental (mg hojas ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	929.90 a	69.20 ab	446.15 a	251.13 a	173.22 a	59.03 a
0.0	80	509.01 bc	83.73 a	160.12 b	198.54 a	158.21 a	34.01 bcd
0.0	160	396.69 bcd	24.88 cd	348.49 ab	264.19 a	203.76 a	29.60 bcd
0.0	240	211.44 d	14.21 d	188.13 b	197.95 a	155.19 a	19.58 d
1.5	0	523.30 bc	47.89 abcd	193.40 b	191.72 a	145.41 a	42.35 abc
1.5	80	405.28 bcd	24.29 cd	219.09 b	175.14 a	130.40 a	24.33 cd
1.5	160	356.34 cd	56.57 abc	197.44 b	154.37 a	131.46 a	28.95 bcd
1.5	240	477.70 cd	41.41 bcd	361.44 ab	263.16 a	201.65 a	30.65 bcd
3.0	0	610.80 b	60.04 abc	250.23 ab	186.43 a	135.21 a	43.36 ab
3.0	80	530.03 bc	31.09 bcd	213.77 b	208.64 a	146.66 a	31.51 bcd
3.0	160	437.71 bc	52.29 abcd	217.70 b	172.35 a	135.55 a	26.33 bcd
3.0	240	361.12 cd	23.59 cd	326.62 ab	222.64 a	169.34 a	24.40 cd

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Los efectos principales del Si en la acumulación foliar de Fe, Cu, Zn y Si no fueron significativos. Mientras que, en Mn y B, la acumulación más alta se registró en los tratamientos sin Si, presentando diferencias estadísticas significativas con respecto a los niveles 1.5 y 3.0 mM Si. En el caso del Na, la acumulación foliar más elevada se encontró en el tratamiento de 1.5 mM Si, siendo estadísticamente distinto con base en el nivel 0 mM Si; se puede decir que, los tratamientos con Si acumulan más Na en las hojas de maíz (**Cuadro 4.25**).

Cuadro 4.25. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación foliar de micronutrientos en maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g hojas}^{-1}$)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	5230.21a	15589.48a	523.56a	2352.83a	1425.50a	1424.77a	67900.90b
1.5	11943.30a	16608.49a	397.20a	1786.87b	1106.22b	1403.57a	112971.47a
3.0	4365.69a	13977.77a	395.49a	1390.02b	1158.72b	977.68a	89420.21ab
NaCl, mM							
0	12604.84a	14922.76a	544.21a	2381.63a	1698.63a	1319.58ab	21827.52c
80	4680.14a	13699.84a	472.34ab	1973.60ab	1267.64b	1580.25a	45443.43c
160	5938.35a	15546.28a	433.19ab	1549.06b	1104.94bc	1395.90ab	113092.30b
240	5495.59a	17398.77a	305.26b	1468.67b	849.37c	778.98b	180026.86a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Los tratamientos estudiados no afectaron las acumulaciones foliares de Fe y Cu en hojas. El Zn y Mn mostraron su acumulación foliar más elevada en el tratamiento sin salinidad y sin silicio, sus valores más bajos se registraron en el nivel 240 mM NaCl y 3.0 mM Si. En el caso del B, su acumulación nutrimental más alta se encontró en el tratamiento sin estrés por NaCl y sin Si. La acumulación foliar de Si más elevada se encontró en el tratamiento con 80 mM de NaCl y 1.5 mM Si, siendo estadísticamente distinto con los niveles 240 mM NaCl con 1.5 y 3.0 mM Si. En el caso de Na, la mayor acumulación foliar se encontró en 240 mM NaCl con 1.5 mM Si, presentando diferencias estadísticas significativas entre los niveles 0, 80 y 160 mM NaCl con 0, 1.5 y 3.0 mM Si (**Cuadro 4.26**).

Cuadro 4.26. Acumulación de micronutrientos en hojas de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g hojas}^{-1}$)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	4706.22a	12716.33a	696.30a	3323.27a	2420.81a	1294.08ab	19418.84d
0.0	80	5442.93a	14292.96a	694.05a	2774.19ab	1291.85b	1414.05ab	40915.99d
0.0	160	3885.32a	18337.03a	431.48ab	1809.97ab	1260.74b	2068.02ab	98288.70cd
0.0	240	6886.36a	17011.56a	272.39b	1503.86b	728.60b	922.93ab	112980.04bcd
1.5	0	26073.60a	16107.13a	460.00ab	2516.29ab	1222.28b	1607.58ab	16124.40d
1.5	80	3777.99a	15944.10a	310.39ab	1499.63b	1280.15b	2303.83a	46564.37d
1.5	160	11208.63a	13256.78a	427.45ab	1487.68b	914.51b	1017.31ab	162170.52abc
1.5	240	6712.94a	21125.93a	390.94ab	1643.86b	1007.91b	685.56b	227026.57a
3.0	0	7034.69a	15944.81a	476.32ab	1305.32b	1452.79b	1057.06ab	29939.29d
3.0	80	4819.48a	10862.45a	412.55ab	1646.97b	1230.90b	1022.84ab	48849.92d
3.0	160	2721.09a	15045.02a	440.61ab	1349.52b	1139.58b	1102.36ab	78817.66cd
3.0	240	2887.46a	14058.80a	252.44b	1258.27b	811.59b	728.44b	200073.95ab

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Turan *et al.* (2010) obtuvieron que la salinidad decrece la acumulación foliar de N; esto coincide con lo obtenido en nuestro estudio. Carrasco-Ríos *et al.* (2013) realizaron un experimento en maíz con condiciones de salinidad y encontraron que la acumulación de Ca se incrementa, pero a su vez, el P y K disminuye. Esto se comprende como el antagonismo que existe entre Na⁺ y K⁺ (Azevedo y Tabosa, 2000). Hu y Schmidhalter (2005) indican que la translocación de K a las hojas es facilitada por un pequeño radio iónico de este mismo ión, el cual permite una fácil translocación a través de las membranas. Chen *et al.* (2011) mencionan que en un estudio en arroz bajo estrés por sequía tratado con Si, encontraron que la acumulación foliar de K, Na, Ca, Mg y Fe aumentó en condiciones de estrés y sin Si; resultados que difieren a los nuestros, debido que el K, Ca y Fe disminuyeron en condiciones de salinidad, por otra parte, el Na y Mg aumentaron en presencia de la misma; asimismo, el silicio no mostró diferencias estadísticas significativas en la concentración de K, Na, Ca, Mg y Fe.

4.3.3.2. Tallos

Los efectos principales del Si no afectaron la acumulación de N y P en tallos de maíz. Por el contrario, la acumulación de K, Ca, Mg y S fue mayor en los tratamientos sin Si. En los efectos principales de la salinidad, la acumulación de N, P y S registró sus valores más altos en el nivel 80 mM NaCl, siendo estadísticamente distinto al nivel 240 mM NaCl. Por otra parte, el K no mostró diferencias significativas en su acumulación nutrimental en los distintos niveles de salinidad. El Ca y Mg presentaron los mayores valores de acumulaciones en el tratamiento de 160 mm NaCl, resultando estadísticamente distintos a los niveles 0 y 240 mM de NaCl (**Cuadro 4.27**).

Cuadro 4.27. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientes en tallos de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg tallos ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	1298.41 a	161.03 a	1205.30 a	253.99 a	301.79 a	70.55 a
1.5	1088.24 a	112.64 a	589.20 b	176.38 b	188.35 b	50.09 b
3.0	817.51 a	109.58 a	743.24 b	165.37 b	186.95 b	49.22 b
NaCl, mM						
0	956.77ab	123.16 ab	1083.02 a	163.29 b	180.62 c	50.15 ab
80	1536.05 a	193.18 a	966.77 a	216.37 ab	247.12 ab	69.60 a
160	929.12 ab	122.02 b	856.77 a	252.72 a	277.73 a	61.73 ab
240	850.27 b	72.64 b	477.10 b	161.93 b	197.32 bc	45.00 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En tallos de maíz la mayor acumulación de N se presentó en el tratamiento de 80 mM NaCl con 1.5 mM Si, siendo estadísticamente distinto en el mismo nivel de silicio (1.5 mM) con 0,160 y 240 mM NaCl y en los cuatro niveles de salinidad con 3.0 mM Si. En el caso del P, su valor más alto se registró en el tratamiento 80 mM NaCl sin silicio, mostrando su nivel más bajo en 240 mM NaCl con 3.0 mM Si. El K registró su mayor acumulación en tallos de maíz en el tratamiento sin salinidad y sin silicio, presentando diferencias estadísticas significativas con base en el resto de las combinaciones ensayadas. La acumulación de Ca y Mg más alta se presentó en el nivel 160 mM NaCl sin silicio. En el caso de S, la acumulación más elevada se tuvo en el tratamiento 160 mM NaCl sin Si, mostrando diferencias estadísticas significativas en los niveles de 0 NaCl con los tres niveles de Si, al igual que en 240 mM NaCl con 0 y 3.0 mM Si (**Cuadro 4.28**).

Cuadro 4.28. Acumulación de macronutrientes en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental (mg tallos ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	1332.25 ab	133.14 b	2025.84 a	247.23 b	279.65 b	76.58 ab
0.0	80	1290.10 ab	304.05 a	1112.65 bc	238.49 b	275.64 b	77.35 ab
0.0	160	1516.85 ab	144.46 b	1270.02 b	401.95 a	479.53 a	95.16 a
0.0	240	1054.41 ab	62.47 b	412.67 e	128.26 b	172.30 bc	33.08 b
1.5	0	627.50 b	99.07 b	510.32 de	125.27 b	130.76 c	33.57 b
1.5	80	2413.25 a	164.58 ab	800.73 bcde	177.19 b	202.87 bc	71.10 ab
1.5	160	506.10 b	89.10 b	528.81 de	195.66 b	173.73 bc	38.07 b
1.5	240	806.11 b	97.80 b	516.94 de	207.36 b	246.02 bc	57.60 ab
3.0	0	910.55 b	137.25 b	712.89 cde	117.35 b	131.43 c	40.27 b
3.0	80	904.78 b	110.89 b	986.91 bcd	233.41 b	262.83 b	60.34 ab
3.0	160	764.41 b	132.50 b	771.46 bcde	160.53 b	179.92 bc	51.94 ab
3.0	240	690.29 b	57.63 b	501.68 de	150.15 b	173.61 bc	44.31 b

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En los efectos principales del Si en la acumulación de Fe, Cu y Na en tallos de maíz no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los niveles de Si. Asimismo, la acumulación de Zn, Mn, B y Si mostró sus valores más altos en los tratamientos sin Si. Por otra parte, los efectos principales de la salinidad no fueron significativos en las en la acumulación de Fe y Cu. Así también, se registró mayor acumulación de Zn y Mn en el tratamiento 80 mM NaCl. Asimismo, en B y Si las acumulaciones más elevadas se presentaron en ausencia de estrés por NaCl. En Na, los valores más altos de acumulación se mostraron en plantas tratadas con NaCl en todas sus concentraciones (**Cuadro 4.29**).

Cuadro 4.29. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en tallos de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g tallos}^{-1}$)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	19244.68a	8321.82a	1212.05a	3044.18a	2291.78a	3799.65a	980348.12a
1.5	14831.66a	3764.70a	637.53b	1863.27b	1331.75b	1891.44b	658164.80a
3.0	16179.50a	6272.44a	597.49b	1707.36b	1469.20b	1971.89b	953059.98a
NaCl, mM							
0	8613.96a	3224.47a	793.93b	2296.62b	2151.12a	3616.58a	65073.23b
80	26310.41a	9460.10a	1261.38a	3113.46a	2015.59a	2789.17ab	968404.64a
160	18300.31a	8801.68a	797.98b	2303.13b	1688.20b	2397.82ab	1287109.89a
240	13783.12a	2992.35a	409.48b	1106.55c	935.40c	1413.73b	1134842.77a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de Fe y Cu en tallos de maíz no presentaron diferencias estadísticas significativas en las distintas combinaciones ensayadas. En el caso de Zn y Mn, las acumulaciones más altas se mostraron en el tratamiento de 80 mM NaCl sin Si. En B y Si la mayor acumulación se presentó en el testigo (sin NaCl y sin Si). Por otra parte, la acumulación de Na más alta se encontró en el nivel de 160 mM NaCl en ausencia de Si (**Cuadro 4.30**).

Cuadro 4.30. Acumulación de micronutrientos en tallos de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g tallos}^{-1}$)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	9348.32a	4122.16a	1256.91ab	3312.08abc	3767.85a	7817.60a	98328.99cd
0.0	80	25644.93a	12846.73a	2222.83a	4547.14a	2280.60bc	3569.48b	1023581.37abcd
0.0	160	34230.51a	14421.34a	1052.87b	3475.17ab	2354.46b	2858.20b	1863159.54a
0.0	240	7754.94a	1897.03a	315.58b	842.30e	764.20f	953.29b	936322.58abcd
1.5	0	8824.11a	1500.63a	468.98b	1968.16cde	1196.50ef	1488.84b	43270.08d
1.5	80	16845.36a	977.56a	961.20b	2177.71bcde	1850.42cd	2961.71b	864736.16abcd
1.5	160	9806.97a	7985.31a	584.38b	1682.35de	1127.36ef	1126.86b	617792.99bcd
1.5	240	23850.19a	4595.27a	535.53b	1624.85de	1152.69ef	1988.33b	1106859.99abc
3.0	0	7669.43a	4050.61a	655.89b	1609.60de	1488.98de	1543.28b	53620.63d
3.0	80	36440.92a	14556.00a	600.09b	2615.50bcd	1915.74bcd	1836.30b	1016896.39abcd
3.0	160	10863.43a	3998.38a	756.67b	1751.84de	1582.75de	3208.39b	1380377.14ab
3.0	240	9744.20a	2484.75a	377.30b	852.48e	889.29f	1299.56b	1361345.74ab

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La presencia de salinidad en vástagos de maíz, disminuye la acumulación de N, Ca y Fe, y a su vez el valor de P, Zn y Mn aumenta ([Turan et al., 2010](#)); resultados que coinciden parcialmente con los aquí mostrados, puesto que, la acumulación de N, P, Ca, Fe, Zn y Mn disminuyeron en adición de NaCl. [Sacala et al. \(2002\)](#) realizaron un estudio en vástagos de maíz y mencionan que la acumulación de K y Ca decrece

significativamente en presencia de NaCl, por otra parte, el valor de Na aumenta; esto se debe al antagonismo entre K y Na. [Hu y Schmidhalter \(2005\)](#) mencionan que, el K es uno de los cationes con mayor acumulación intercelular y una gran actividad osmótica. En condiciones de estrés por salinidad, un nivel adecuado de K en los tejidos, dependerá de su entrada a la planta, distribución y su acumulación ([Carden et al., 2003](#)). [Greger et al. \(2018\)](#) mencionan que la adición de silicio a plantas de maíz, disminuye la acumulación de N, P, K, S, Cu y Zn en tallos de maíz, mientras que aumenta las de Ca, Mg, Fe, Mn y B; resultados que difieren con los nuestros debido que la adición de Si disminuyó la acumulación de todos los nutrimentos evaluados en tallos de maíz.

4.3.3.3. Raíz

En la evaluación de los efectos principales del Si, se encontró que 3.0 mM Si aumentó significativamente la acumulación de N en raíces de plantas de maíz, con respecto a 1 y 1.5 mM de Si. En el caso de P y K, la mayor acumulación de estos nutrimentos se registró en el tratamiento sin Si. En la acumulación en raíces de maíz de Ca, Mg y S no se mostraron diferencias estadísticas significativas (**Cuadro 4.31**). En los efectos principales de salinidad encontramos que el N, P, K y S mostraron mayor acumulación en tratamientos sin salinidad, y disminuyó significativamente la presencia de Na. Por otra parte, el Ca y Mg no presentaron diferencias estadísticas significativas en los distintos niveles evaluados de salinidad.

Cuadro 4.31. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrimentos en raíces de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg raíces ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	273.05 b	40.26 a	158.38 a	542.71 a	582.62 a	95.42 a
1.5	301.65 b	31.91 ab	63.49 b	667.36 a	797.52 a	57.47 a
3.0	422.86 a	18.64 b	53.66 b	536.20 a	444.56 a	38.27 a
NaCl, mM						
0	667.63 a	59.11 a	228.77 a	686.04 a	696.89 a	122.52 a
80	214.61 b	23.69 b	52.31 b	716.92 a	668.25 a	65.95 ab
160	236.11 b	21.63 b	39.14 b	449.70 a	503.66 a	33.86 b
240	211.71 b	16.66 b	47.14 b	475.71 a	564.14 a	32.55 b

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de N en raíces de plantas de maíz mostró su valor más alto en el tratamiento de 3.0 mM Si sin estrés salino, resultado significativamente distinto al resto de las combinaciones ensayadas. En el caso del P, K y S registraron su acumulación nutrimental más elevada en el tratamiento sin NaCl y sin Si, resultando estadísticamente diferentes al resto de los tratamientos. Por otra parte, el Ca y Mg no presentaron diferencias estadísticas significativas en ninguna de las combinaciones ensayadas (**Cuadro 4.32**).

Cuadro 4.32. Acumulación de macronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental (mg raíces ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	601.74 b	109.41 a	520.36 a	961.41 a	946.66 a	281.93 a
0.0	80	168.69 c	21.59 b	33.73 b	347.31 a	404.72 a	32.09 b
0.0	160	181.78 c	13.49 b	39.22 b	369.37 a	384.05 a	32.29 b
0.0	240	139.97 c	16.53 b	40.19 b	492.74 a	595.03 a	35.34 b
1.5	0	374.61 bc	37.22 b	91.58 b	591.92 a	615.30 a	51.25 b
1.5	80	202.28 c	24.11 b	52.46 b	651.49 a	776.37 a	77.18 b
1.5	160	301.63 c	41.39 b	59.76 b	778.93 a	966.16 a	55.21 b
1.5	240	328.04 bc	24.88 b	50.14 b	647.09 a	832.22 a	46.23 b
3.0	0	1026.53 a	30.68 b	74.37 b	504.77 a	528.69 a	34.35 b
3.0	80	272.86 c	25.34 b	70.74 b	1151.95 a	823.65 a	88.57 b
3.0	160	224.91 c	9.9 b	18.43 b	200.79 a	160.75 a	14.06 b
3.0	240	167.12 c	8.55 b	51.07 b	287.28 a	265.16 a	16.08 b

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Dentro de los efectos principales del Si evaluados, el Fe presentó su mayor acumulación en raíces de plantas de maíz en el tratamiento 1.5 mM Si, sin embargo, el nivel de 3.0 mM Si redujo significativamente este valor. Por otra parte, el Cu, Zn, Mn, B, Si y Na no mostraron diferencias estadísticas significativas por efecto del nivel de Si. En los efectos principales de salinidad el Fe, Cu, Zn, Mn, B y Si no registraron diferencias significativas en la acumulación nutrimental con respecto a los distintos niveles ensayados. Asimismo, el Na presentó su acumulación más alta en el tratamiento 240 mM NaCl, siendo estadísticamente distinto al tratamiento sin salinidad (**Cuadro 4.33**).

Cuadro 4.33. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en raíces de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g raíces}^{-1}$)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	415916.04ab	1737.65a	1199.42a	11609.83a	730.10a	3958.15a	404742.29a
1.5	612118.07a	2034.37a	1277.70a	15796.06a	551.11a	6319.52a	579074.60a
3.0	309523.92b	1117.83a	745.78a	8076.36a	365.12a	5523.92a	368845.62a
NaCl, mM							
0	502433.22a	2172.60a	1537.36a	15339.65a	937.65a	5515.75a	209726.00b
80	491950.52a	1680.55a	1098.54a	12449.99a	412.26a	5940.00a	388152.50ab
160	382735.43a	1264.81a	836.04a	9261.01a	396.89a	5618.54a	443770.02ab
240	406291.54a	1401.84a	825.26a	10259.03a	448.31a	3994.50a	761901.50a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de Fe, Cu, Mn, Si y Na en raíces de plantas de maíz, no presentó diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos. Por otra parte, el Zn y B mostraron su valor más alto en el tratamiento sin NaCl y sin Si, sin embargo, significativamente su acumulación más baja se percibió en el tratamiento 160 mM NaCl con 3.0 mM Si (**Cuadro 4.34**).

Cuadro 4.34. Acumulación de micronutrientos en raíces de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g raíces}^{-1}$)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	622922.01a	3014.06a	2441.42a	19640.10a	1906.32a	3816.18a	322425.24a
0.0	80	324383.22a	1211.85a	876.18ab	9382.99a	200.95b	3886.36a	286649.44a
0.0	160	260924.13a	1033.32a	584.99b	6328.70a	492.10b	5073.01a	330051.92a
0.0	240	455434.78a	1691.33a	895.07ab	11087.51a	321.01b	3057.03a	679842.56a
1.5	0	468352.67a	2019.59a	1134.89ab	13394.59a	623.84ab	7151.12a	154507.13a
1.5	80	604928.81a	2021.95a	1180.38ab	15010.86a	309.25b	4457.97a	389724.43a
1.5	160	753671.82a	2285.81a	1589.56ab	18511.32a	499.17b	7708.21a	751929.51a
1.5	240	621518.96a	1810.12a	1205.96ab	16267.46a	772.16ab	5960.78a	1020137.35a
3.0	0	416024.97a	1484.12a	1035.75ab	12984.22a	282.78b	5579.93a	152245.64a
3.0	80	546539.53a	1807.82a	1239.05ab	12956.08a	726.56ab	9475.66a	488083.63a
3.0	160	133610.32a	475.30a	333.54b	2942.99a	199.38b	4074.39a	249328.61a
3.0	240	141920.85a	704.06a	374.74b	3422.11a	251.74b	2965.69a	585724.58a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Greger *et al.* (2018) realizaron un ensayo, donde registraron un decremento en la acumulación de N, P, K, Ca y S en raíces de maíz con la adición de Si, mientras que el Mg no presentó diferencias significativas; resultados que coinciden parcialmente con los nuestros, debido a que la acumulación de N, Ca y Mg aumentó en el nivel 1.5 mM Si, por otra parte, P, K y S disminuyeron. Greger *et al.* (2018) reportan que los valores de Fe, Mn, Zn y B aumentan con la adición de Si en raíces de maíz, mientras que los de Cu disminuyen; estos resultados son similares a los obtenidos en este

estudio. *Sacala et al. (2002)* llevaron a cabo un experimento, donde obtuvieron que la acumulación de K y Ca en raíces de maíz disminuye significativamente en adición de NaCl, por contraste, el valor de Na se incrementó; resultados que coinciden los aquí observados. A su vez, *Carrasco-Ríos et al. (2013)* reportan que, en maíz con condiciones de salinidad la acumulación de P, K y Ca en raíces disminuye significativamente; la reducción de K en presencia de NaCl se debe a una inhibición en la entrada de éste a las raíces causada por Na, y su posterior transporte en xilema.

4.3.3.4. Espiga

En los efectos principales del Si no se encontraron diferencias estadísticas significativas en la acumulación de N, P, K, Ca, Mg y S en espigas de plantas de maíz. Por otra parte, en los efectos principales de la salinidad, el N mostró su mayor acumulación en el tratamiento de 240 mM NaCl, a su vez, decreció significativamente su valor en el nivel sin estrés por salinidad. Asimismo, el P, K, Ca, Mg y S no presentaron diferencias estadísticas significativas en los niveles de NaCl ensayados (**Cuadro 4.35**).

Cuadro 4.35. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientes en espigas de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg espigas ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	1478.42 a	1037.67 a	30.95 a	25.09 a	16.79 a	5.81 a
1.5	1266.79 a	1072.77 a	21.52 a	19.79 a	12.48 a	5.48 a
3.0	1550.62 a	645.98 a	23.94 a	24.07 a	14.67 a	5.49 a
NaCl, mM						
0	250.89 b	150.39 a	24.12 a	23.71 a	15.92 a	7.07 a
80	416.74 ab	365.49 a	24.37 a	25.69 a	15.25 a	5.94 a
160	1371.55 ab	283.44 a	26.96 a	23.95 a	14.68 a	4.90 a
240	3688.60 a	2875.90 a	26.41 a	18.57 a	12.72 a	4.45 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de N, P, K, Ca, Mg y S en espigas de plantas de maíz no presentó diferencias estadísticas significativas en ninguna de las combinaciones ensayadas (**Cuadro 4.36**).

Cuadro 4.36. Acumulación de macronutrientos en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental (mg espigas ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	228.30 a	141.17 a	34.83 a	27.75 a	18.63 a	7.53 a
0.0	80	466.13 a	482.49 a	24.52 a	25.53 a	16.41 a	5.72 a
0.0	160	987.23 a	335.58 a	32.37 a	25.46 a	16.28 a	4.70 a
0.0	240	4231.99 a	3191.44 a	32.04 a	21.59 a	15.80 a	5.28 a
1.5	0	278.78 a	167.72 a	19.43 a	18.24 a	12.89 a	6.54 a
1.5	80	291.85 a	401.41 a	28.09 a	27.29 a	16.24 a	7.21 a
1.5	160	2754.00 a	256.63 a	21.04 a	23.37 a	13.34 a	4.98 a
1.5	240	1742.50 a	3465.29 a	17.48 a	10.23 a	7.42 a	3.15 a
3.0	0	245.57 a	142.28 a	18.09 a	25.14 a	16.22 a	7.13 a
3.0	80	492.21 a	212.56 a	20.48 a	24.22 a	13.08 a	4.88 a
3.0	160	373.39 a	258.10 a	27.45 a	23.01 a	14.41 a	5.01 a
3.0	240	5091.28 a	1970.96 a	29.70 a	23.89 a	14.93 a	4.91 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

El factor Si no ocasionó diferencias en las acumulaciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na. Por otra parte, los efectos principales del factor NaCl solo fueron significativos en la acumulación de Fe, B y Si en espigas de plantas de maíz; registrándose las medias más altas en el testigo resultó ser mayor en los tratamientos sin NaCl y disminuyó significativamente su valor en los tratamientos de 240 mM NaCl. En el caso del Cu, Zn, Mn, y Na no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los niveles de salinidad evaluados (**Cuadro 4.37**).

Cuadro 4.37. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en espigas de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (µg espigas ⁻¹)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	4.45 a	137.69 a	72.91 a	91.99 a	112.60 a	86.78 a	77.97 a
1.5	4.00 a	852.90 a	277.52 a	52.53 a	77.24 a	91.44 a	62.92 a
3.0	3.82 a	163.64 a	99.04 a	57.33 a	78.44 a	82.75 a	82.82 a
NaCl, mM							
0	5.22 a	196.77 a	105.42 a	86.71 a	114.42 a	117.78 a	87.80 a
80	4.45 ab	153.18 a	221.67 a	74.40 a	101.28 ab	99.16 ab	90.88 a
160	3.73 ab	225.82 a	85.38 a	61.98 a	79.90 ab	73.58 bc	59.85 a
240	2.96 b	963.19 a	186.82 a	46.04 a	62.10 b	57.44 c	59.75 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de Fe en espigas de plantas de maíz registró su mayor valor en el tratamiento sin salinidad y sin silicio, siendo estadísticamente significativo con respecto al nivel 240 mM de NaCl con 1.5 mM Si. Por otra parte, el Cu, Zn, Mn, B, Si

y Na no mostraron diferencias estadísticas significativas en la acumulación nutrimental de las espigas de maíz en las distintas combinaciones ensayadas (**Cuadro 4.38**).

Cuadro 4.38. Acumulación de micronutrientes en espiga de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental (μg espigas ⁻¹)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	5.98a	124.47a	92.31a	138.70a	138.08a	121.75a	87.79a
0.0	80	4.58ab	164.43a	61.11a	99.92a	136.16a	102.39a	109.99a
0.0	160	3.46ab	155.39a	67.57a	65.14a	83.31a	60.47a	65.81a
0.0	240	3.76ab	106.45a	70.65a	64.19a	92.82a	62.47a	48.26a
1.5	0	4.82ab	161.26a	149.02a	51.48a	101.13a	127.55a	77.84a
1.5	80	5.37ab	99.42a	511.30a	60.65a	79.51a	120.97a	90.10a
1.5	160	3.58ab	465.76a	125.42a	61.60a	79.98a	69.74a	48.11a
1.5	240	2.19b	2685.15a	324.31a	36.36a	48.31a	47.50a	35.59a
3.0	0	4.83ab	304.57a	74.91a	69.94a	104.05a	104.01a	97.76a
3.0	80	3.37ab	195.69a	92.57a	62.60a	88.14a	74.10a	72.53a
3.0	160	4.15ab	56.30a	63.14a	59.19a	76.38a	90.52a	65.61a
3.0	240	2.90ab	97.96a	165.50a	37.55a	45.14a	62.34a	95.38a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Tavakkoli *et al.* (2011) mencionan que en vástagos de cebada la salinidad generada por NaCl decrece la acumulación de P, K, Ca, Mg y S, resultados que difieren a los obtenidos en este estudio, puesto que incrementaron los valores de P, K y Cu en espigas de maíz en presencia de salinidad, redujeron la acumulación de Ca. Una alta acumulación de K en espiga nos puede generar un polen de mayor calidad (Rehman y Yun, 2006), y esto puede contribuir a una mejor polinización. El Si inhibe la absorción de Mn y Na, asimismo, aumenta la de P, Mg, K, Fe, Cu y Zn (Chen *et al.*, 2000); resultados que difieren a los obtenidos en este estudio, puesto que, la acumulación de Cu, Zn y Na se incrementaron con la adición de Si, a su vez, se disminuyó la de P, Mg, K, Fe y Mn.

4.3.3.5. Jilote

Los efector principales de Si y NaCl no fueron significativos en la acumulación de N, P, K, Ca, Mg y S en jilotes de plantas de maíz (**Cuadro 4.39**).

La acumulación de N, P, K, Ca, Mg y S en jilotes de plantas de maíz, no mostró diferencias estadísticas significativas en las distintas combinaciones ensayadas (**Cuadro 4.40**).

Cuadro 4.39. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de macronutrientos en jilotes de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (mg jilotes ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Si, mM						
0.0	336.67 a	1392.23 a	260.24 a	250.21 a	188.05 a	45.17 a
1.5	1715.08 a	1220.23 a	227.27 a	168.20 a	83.88 a	29.52 a
3.0	1840.34 a	1823.97 a	264.50 a	247.23 a	149.81 a	36.49 a
NaCl, mM						
0	359.37 a	774.37 a	403.22 a	366.48 a	228.03 a	59.95 a
80	850.29 a	1244.62 a	172.44 a	133.65 a	88.91 a	25.15 a
160	3211.22 a	2627.58 a	139.23 a	125.09 a	72.32 a	19.01 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

Cuadro 4.40. Acumulación de macronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental (mg jilotes ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0	0	283.00 a	816.80 a	419.68 a	425.43 a	341.76 a	76.30 a
0.0	80	490.63 a	683.63 a	146.85 a	154.24 a	78.97 a	26.55 a
0.0	160	35.78 a	5244.26 a	122.06 a	12.45 a	54.16 a	7.63 a
1.5	0	357.64 a	918.31 a	479.50 a	319.98 a	150.68 a	53.99 a
1.5	80	934.44 a	1625.95 a	107.74 a	100.97 a	60.68 a	20.98 a
1.5	160	3853.15 a	1116.41 a	94.54 a	83.63 a	40.25 a	13.57 a
3.0	0	437.44 a	587.99 a	310.46 a	354.01 a	191.63 a	49.53 a
3.0	80	1263.52 a	1514.11 a	307.84 a	151.75 a	146.14 a	29.30 a
3.0	160	3627.76 a	3266.52 a	189.64 a	204.10 a	110.43 a	28.23 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

En los efectos principales de Si y salinidad no fueron significativos en la acumulación de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na en jilotes de plantas de maíz (**Cuadro 4.41**).

Cuadro 4.41. Efectos principales de los factores de estudio (Si y NaCl) en la acumulación de micronutrientos en jilotes de maíz.

Factor de estudio	Acumulación nutrimental (µg jilotes ⁻¹)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
Si, mM							
0.0	34.09 a	1293.75 a	1953.57 a	547.98 a	565.51 a	720.03 a	809.87 a
1.5	24.62 a	1839.92 a	810.30 a	331.86 a	369.28 a	461.95 a	492.70 a
3.0	30.38 a	1455.52 a	1448.99 a	386.94 a	396.18 a	543.07 a	617.88 a
NaCl, mM							
0	48.34 a	2501.38 a	1999.66 a	644.49 a	663.31 a	934.49 a	1105.21 a
80	18.99 a	961.70 a	949.23 a	311.58 a	367.15 a	381.87 a	349.70 a
160	16.62 a	1007.68 a	995.56 a	232.15 a	220.64 a	296.70 a	328.86 a

Medias con letra distinta en cada columna por factor de estudio, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de Fe, Cu, Zn, Mn, B, Si y Na en jilotes de plantas de maíz no presentaron diferencias estadísticas significativas en ninguna de las combinaciones ensayadas (**Cuadro 4.42**).

Cuadro 4.42. Acumulación de micronutrientos en jilotes de maíz en las distintas combinaciones de los niveles de NaCl y Si.

Si, mM	NaCl, mM	Acumulación nutrimental ($\mu\text{g jilotes}^{-1}$)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si	Na
0.0	0	57.11 a	1980.60 a	3245.31 a	817.76 a	806.34 a	1167.38 a	1530.98 a
0.0	80	19.74 a	1036.18 a	1185.25 a	436.06 a	483.23 a	498.03 a	320.51 a
0.0	160	8.04 a	5.91 a	383.28 a	74.36 a	89.81 a	43.92 a	114.63 a
1.5	0	46.61 a	3795.94 a	1333.34 a	605.47 a	716.45 a	899.33 a	942.83 a
1.5	80	15.40 a	655.90 a	361.83 a	199.17 a	215.07 a	264.65 a	313.46 a
1.5	160	11.85 a	1067.92 a	735.72 a	190.91 a	176.31 a	221.84 a	221.81 a
3.0	0	41.29 a	1727.59 a	1420.30 a	510.22 a	467.14 a	736.75 a	841.82 a
3.0	80	23.22 a	1308.67 a	1476.28 a	293.46 a	421.13 a	383.45 a	447.81 a
3.0	160	24.24 a	1281.35 a	1459.47 a	325.98 a	308.57 a	455.80 a	507.32 a

Medias con letra distinta en cada columna, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).

La acumulación de N en espigas de maíz presentó un decremento con el suministro de salinidad, esta disminución se debe a que la absorción y asimilación de NO_3^- se vio inhibida por las altas concentraciones de NaCl (Ullrich, 2002); resultados que difieren con los nuestros, puesto que, la acumulación de N aumentó en condiciones de salinidad.

Hu y Schmidhalter (1997) mencionan que la acumulación de K decreció en presencia de salinidad; resultados que concuerdan con los obtenidos en este experimento. En condiciones de estrés por NaCl, la acumulación de micronutrientos en maíz no se ve afectada (Izzo *et al.*, 1991); contrario a lo aquí observado, donde se tuvo un decremento en la acumulación de Fe, Cu, Zn, Mn y B en los jilotes de maíz. Miyake (1993) menciona que la absorción de Cl^- por NaCl disminuye la acumulación de Si; tal como se manifestó de la misma manera en este experimento.

4.4. CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que la salinidad disminuye severamente la altura de plantas de maíz, la concentración y acumulación nutrimental. La dosis de 3.0 mM Si incrementó de manera significativa la altura de las plantas de maíz, sin estrés por salinidad, y bajo condiciones de agobio el Si mitigó los efectos adversos que ocasionan las altas concentraciones de sales en la altura de planta.

Pese a que las concentraciones y acumulaciones nutrimentales mostraron en algunos órganos tendencias positivas con la adición de Si, los resultados no fueron estadísticamente significativos.

4.5. LITERATURA CITADA

- Abou El-Nour EAA. 2002. Growth and nutrient contents response of maize to foliar nutrition with micronutrients under irrigation with saline water. *J Biol Sci* 2: 92-97.
- Akbarimoghaddam H, Galavi M, Ghanbari A, Panjehkeh N. 2011. Salinity effects on seed germination and seedling growth of bread wheat cultivars. *Trakia J Sci* 9: 43-50.
- 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.
- Azevedo NAD, Tabosa JN. 2000. Salt stress in maize seedlings: II. Distribution of cationic macronutrients and its relation with sodium. *Rev Bras Eng Agr Amb* 4: 165-171.
- Bakht J, Shafi M, Jamal Y, Sher H. 2011. Response of maize (*Zea mays* L.) to seed priming with NaCl and salinity stress. *Span J Agric Res* 9: 252-261.
- Beltagi MS, Ismail MA, Mohamed FH. 2006. Induced salt tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by gamma irradiation. *Pak J Biol Sci* 9: 1143-1148. DOI: 10.3923/pjbs.2006.1143.1148
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy* 9. American Society of agronomy. Madison, Wisconsin.
- Carden DE, Walker DJ, Flower TJ, Miller AJ. 2003. Single cell measurements of the contributions of cytosolic Na⁺ and K⁺ to salt tolerance. *Plant Physiol* 131: 676-683. DOI: 10.1104/pp.011445
- Carrasco-Ríos L, Rojas C, Pinto M. 2013. Contrasting physiological responses to high salinity between two varieties of corn 'Lluteño' (salt tolerant) and 'Jubilee' (salt sensitive). *Chil J Agr Res* 73: 205- 212. DOI: 10.4067/S0718-58392013000300001
- Chen J, Caldwell RD, Robinson CA, Steinkamp R. 2000. Silicon: The estranged medium element. Institute of Food and Agricultural Sciences, extension of University of Florida. pp. 5.

- Chen W, Yao X, Cai K, Chen J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrition absorption. *Biol Trace Elem Res* 142: 67-76. DOI: 10.1007/s12011-010-8742-x
- Costa-Crusciol CA, Peres-Soratto R, Amaral-Castro GS, Ferrari-Neto J, Hideo-Martins da Costa C. 2013. Leaf application of silicic acid to upland rice and corn. *Semin Cienc Agrar* 34: 2803-2808. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n6p2803
- El-Fouly MM, Mobarak ZM, Salama ZA. 2011. Micronutrients (Fe, Mn, Zn) foliar spray for increasing salinity tolerance in wheat *Triticum aestivum* L. *Afr J Plant Sci* 5: 314-322.
- Farooq M, Hussain M, Wakeel A, Siddique KHM. 2015. *Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management: a review*. *Agron Sustain Dev* 35: 461-481.
- Greger M, Landberg T, Vaculík M. 2018. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants* 7: 41. DOI: 10.3390/plants7020041
- Hasan R, Miyake H. 2017. "Salinity stress alters nutrient uptake and causes the damage of root and leaf anatomy in maize" in ICBS Conference Proceedings, International Conference on Biological Science (2015), KnE Life Sciences 219-225. DOI: 10.18502/cls.v3i4.708
- Hu Y, Schmidhalter U. 1997. Interactive Effects of Salinity and Macronutrient Level on Wheat: Part II. Composition. *J Plant Nutr* 20: 1169-1182.
- Hu Y, Schmidhalter U. 2005. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *J Plant Nutr Soil Sci* 168:541-549. DOI: 10.1002/jpln.200420516
- Izzo R, Navari-Izzo F, Quartacci M. 1991. Growth and mineral absorption in maize seedlings as affected by increasing NaCl concentration. *J Plant Nutr* 14: 687–699.
- Jiang C, Zu C, Lu D, Zheng Q, Shen J, Wang H, Li D. 2017. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Sci Rep* 7: 42039. DOI: 10.1038/srep42039

- Karimi G, Ghorbanli M, Heidari H, Khavarinejad RA, Assareh MH. 2005. The effects of NaCl on growth, water relations, osmolytes and ion content in *Kochia prostrata*. *Biol Plant* 49: 301-304.
- Katerji N, van Hoorn JW, Hamdy A, Mastrorilli M. 2004. Comparison of corn yield response to plant water stress caused by salinity and by drought. *Agric Water Manag* 65: 95-101. DOI: 10.1016/S0378-3774(03)00216-6
- Laing M, Gatarayiha M, Adandonon A. 2006. Silicon use for pest control in agriculture: a review. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 80: 278- 286.
- Meng Q, Chen X, Lobell DB, Cui Z, Zhang Y, Yang H, Zhang F. 2016. Growing sensitivity of maize to water scarcity under climate change. *Sci Rep* 6: 19605 DOI: 10.1038/srep19605
- Miyake Y. 1993. Silica in soil and plants. *Sci Rep Fac Agric* 81: 61-79.
- 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
- Peres-Soratto R, Costa-Crusciol CA, Amaral-Castro GS, Hideo-Martins da Costa C, Ferrari-Neto J. 2012. Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. *R Bras Ci Solo* 36: 1538-1544.
- Pimentel D, Berger B, Filiberto D, Newton M, Wolfe B, Karabinakis E, Clark S, Poon E, Abbett E, Nandaopal S. 2004. Water Resources: Agricultural and Environmental Issues. *BioScience* 54: 909–918. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2
- Rashad RT, Hussien RA. 2014. A comparison study on the effect of some growth regulators on the nutrients content of maize plant under salinity conditions. *Ann Agric Sci* 59: 89-94. DOI: 10.1016/j.aoas.2014.06.013
- Rehman S, Yun SJ. 2006. Developmental regulation of K accumulation in pollen, anthers, and papillae: are anther dehiscence, papillae hydration, and pollen swelling leading to pollination and fertilization in barley (*Hordeum vulgare* L.) regulated by changes in K concentration? *J Exp Bot* 57: 1315-1321. DOI: 10.1093/jxb/erj106
- Romero-Aranda MR, Jurado O, Cuartero J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *J Plant Physiol* 163: 847-855. DOI: 10.1016/j.jplph.2005.05.010

- Sacala E, Demczuk A, Grzyś E, Sobczak A. 2002. The effects of salt stress on growth and biochemical parameters in two maize varieties. *Acta Soc Bot Pol* 71: 101-107.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Shaaban MM, Abou El-Nour EEA. 2014. Macro and micro-nutrients concentrations and uptake by maize seedlings irrigated with fresh or saline water as affected by K-silicate foliar fertilization. *Am J Plant Physiol* 9: 95-102.
- Shrivastava P, Kumar R. 2015. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *J Biol Sci* 22: 123-131. DOI: 10.1016/j.sjbs.2014.12.001
- SIAP. 2018. Producción agrícola: OI + PV 2016. Disponible en línea en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/. Consultado: abril 07, 2018.
- Soundararajan P, Sivanesan I, Jo EH, Jeong BR. 2013. Silicon promotes shoot proliferation and shoot growth of *Salvia splendens* under salt stress in vitro. *Hortic Environ Biotechnol* 54: 311-318.
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. *In: 6th international congress on soilless culture*. Wageningen, Holanda. pp. 633-650.
- Tammam AA, Akhamd MFA, Hemeda MM. 2008. Study of salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar Banysoif 1. *Aust J Crop Sci* 1: 115-125.
- 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: 2189-2203. DOI: 10.1093/jxb/erq422
- Turan MA, Elkarim AHA, Taban N, Taban S. 2010. Effect of salt stress on growth and ion distribution and accumulation in shoot and root of maize plant. *Afr J Agri Res* 5: 584-588. DOI: 10.5897/AJAR09.677
- Ullrich WR. 2002. Salinity and nitrogen nutrition. *In: Salinity: Environment-Plants-Molecules*. Läuchli A (ed.). Springer. pp. 229-248.

CONCLUSIÓN GENERAL

En los estudios realizados en esta tesis se observó que la salinidad disminuye severamente la germinación, y en altas concentraciones ésta se ve inhibida. Asimismo, el NaCl presenta efectos negativos en la altura de plantas de maíz, así como también en la concentración y acumulación nutrimental. Por otra parte, en fase de germinación, las semillas imbibidas con 3 mM Si mostraron un incremento en el porcentaje de peso de semilla después de imbibición, con respecto al testigo; y en ausencia de estrés se registró un aumento en el tamaño de radícula. En fase vegetativa el nivel 3.0 mM Si incrementó la altura de plantas de maíz en ausencia de estrés, y en condiciones de agobio mitigó los efectos negativos que este estrés ocasiona.

La sequía retrasa severamente la germinación debido a que el potencial osmótico se ve disminuido; asimismo, decrece la altura de plántulas y plantas de maíz, longitud de raíz, conductancia estomática, tasa fotosintética, así como también, variables de biomasa seca; excepto la de grano. Por otra parte, en fase vegetativa y sin condiciones de agobio, el Si incrementa el peso de biomasa seca de vástagos y raíces, concentración y acumulación nutrimental. El Si sin fuente de estrés no presentó diferencias estadísticas significativas en la altura de planta, sin embargo, en condiciones de sequía, la adición de este elemento mitigó los efectos adversos que este estrés ocasiona.

Se concluye que, bajo las condiciones experimentales aquí seguidas, el Si no mitigó los efectos negativos de la sequía ni de la salinidad en maíz, tanto en fase de germinación como en crecimiento vegetativo.