



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**FOSFITO Y SU RELACIÓN
CON FACTORES DE ESTRÉS
ABIÓTICO EN TOMATE**

CASASOLA ELIZONDO CÉSAR ANTONIO

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. 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 César Antonio Casasola Elizondo, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe 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 Fosfito y su relación con factores de estrés abiótico en tomate.

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el 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 09 de Febrero de 2018



Firma del
Alumno (a)



Dra. Libia Iris Trejo Téllez

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada **"Fosfito y su relación con factores de estrés abiótico en tomate"**, realizada por el alumno César Antonio Casasola Elizondo, 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

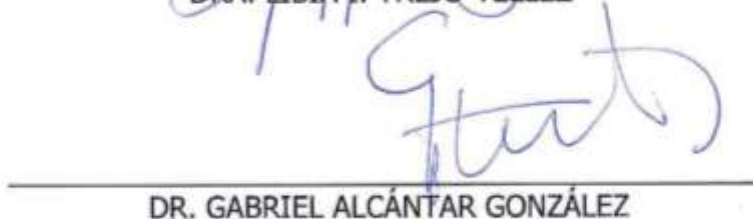
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

ASESOR:



DR. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. FERNANDO C. GÓMEZ MERINO

ASESORA:



DRA. SOLEDAD GARCÍA MORALES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2018

FOSFITO Y SU RELACIÓN CON FACTORES DE ESTRÉS EN TOMATE

César Antonio Casasola Elizondo, M.C.

Colegio de Postgraduados. 2018

RESUMEN

En esta investigación se evaluaron los efectos que tiene la adición de fosfito (Phi) a partir de H_3PO_3 a la solución nutritiva de Steiner al 25% en una concentración correspondiente al 15% del P [$0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$], en parámetros de crecimiento, concentración nutrimental en hoja, tallo y raíz, en parámetros bioquímicos y por último en parámetros relacionados con la fotosíntesis de plántulas de tomate variedad Cid, sometidas a los factores de estrés: salinidad por cloruro de sodio (NaCl), cadmio (Cd) y estrés nutrimental inducido por nitrógeno (N). El Phi tuvo efectos positivos en variables de crecimiento como número de hojas y de flores por plántula, altura y diámetro de tallo; asimismo, incrementó la concentración de macro y micronutrientes en los órganos evaluados. Por otro lado, la adición de NaCl (50 y 100 mM) y de Cd (10 y 20 μM) afectó de manera negativa el crecimiento de la planta, la concentración de clorofilas y los parámetros asociados con fotosíntesis. Por otra parte, conforme se incrementó la concentración de NO_3^- de 1.5 a 3.0 y 6.0 $\text{mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$, aumentó el número de hojas y flores, área foliar, peso fresco y seco de hoja, tallo y raíz, altura de planta, volumen y longitud de raíz; así como en la acumulación de macro y micro nutrientes en hoja, tallo y raíz; en los parámetros bioquímicos se observó un incremento significativo en la concentración de clorofila a y total; así como en los parámetros fotosintéticos tasa de transpiración (E) y fotosintética (A) y hubo una reducción en la concentración intercelular de Ci . En lo que respecta a los efectos de las interacciones entre el Phi y los factores de estrés evaluados, se observa que éstos fueron diferenciales. Destaca que el Phi provocó una reducción significativa en la concentración de aminoácidos libres totales a una concentración de 50 mM de NaCl, así como un incremento significativo en la concentración de prolina a 100 mM de NaCl en hojas de plántulas de tomate. Se observa que el aporte de Phi afectó de manera significativa el peso fresco y seco de raíz de plantas sin tratamiento con Cd, e incrementó el volumen de raíz y el diámetro de tallo cuando éstas se trataron con 10 y 20 μM de Cd y afectó de manera significativa la concentración de macro y micro nutrientes en hojas, tallo y raíz de plántulas de tomate. En lo que respecta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^-) se posee evidencia suficiente para demostrar que el Phi incrementa el peso seco de tallos y el diámetro de tallo de plantas tratadas con 3 $\text{mol}_{(+)} \text{ NO}_3^- \text{ m}^{-3}$; mientras que incrementa la concentración foliar de Ca, concentración intercelular de CO_2 (Ci), conductancia estomática (Gs) y tasa fotosintética (A) en plantas tratadas con 6 $\text{mol}_{(+)} \text{ NO}_3^- \text{ m}^{-3}$.

Palabras clave: Fosfito, estrés abiótico, cloruro de sodio, cadmio, nitrógeno, bioestimulación, *Solanum lycopersicum*.

PHOSPHITE AND ITS RELATION WITH STRESS FACTORS IN TOMATO

César Antonio Casasola Elizondo, M.Sc.

Colegio de Postgraduados. 2018

ABSTRACT

In this research, the effects of the addition of phosphite (Phi) from H_3PO_3 to the nutrient solution of Steiner at 25%, at a concentration corresponding to 15% of P [$0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$] was evaluated on growth parameters, nutrimental concentration in leaf, stem and root, biochemical parameters and in parameters related to the photosynthesis of tomato seedlings variety Cid, subjected to the stress factors: salinity by sodium chloride (NaCl), cadmium (Cd) and nutritional stress induced by nitrogen (N). The Phi had positive effects on growth variables such as number of leaves and flowers, stem height and diameter; likewise, it increased the concentration of macro and micronutrients in the evaluated organs. On the other hand, the addition of NaCl (50 and 100 mM) and Cd (10 and 20 μM) negatively affected plant growth, chlorophyll concentration and the parameters associated with photosynthesis. On the other hand, as the NO_3^- concentration increased from 1.5 to 3.0 and 6.0 $\text{mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$, the number of leaves and flowers, foliar area, fresh and dry weight of leaf, stem and root, height of plant, volume and length of root; as well as in the accumulation of macro and micro nutrients in leaf, stem and root; in the biochemical parameters a significant increase in the concentration of chlorophyll a and total is observed; as well as in the photosynthetic parameters of transpiration (E) and photosynthetic (A) and there was a reduction in the intercellular concentration of C_i . With regard to the effects of the interactions between the Phi and the evaluated stress factors, it is observed that these were differential. It is noted that the Phi caused a significant reduction in the concentration of total free amino acids at a concentration of 50 mM NaCl, as well as a significant increase in the concentration of proline at 100 mM NaCl in tomato seedling leaves. It is observed that the contribution of Phi significantly affected the fresh and dry weight of root of plants without Cd treatment, and increased the volume of root and diameter of stem when these were treated with 10 and 20 μM of Cd and affected significantly, the concentration of macro and micro nutrients in leaves, stem and root of tomato seedlings. Regarding the interaction of the study factors (Phi and NO_3^-) there is sufficient evidence to show that the Phi increases the dry weight of stems and the stem diameter of plants treated with 3 $\text{mol}_{(+)} \text{ NO}_3^- \text{ m}^{-3}$; while it increases the foliar concentration of Ca, intercellular concentration of CO_2 (C_i), stomatal conductance (Gs) and photosynthetic rate (A) in plants treated with 6 $\text{mol}_{(+)} \text{ NO}_3^- \text{ m}^{-3}$.

Key words: Phosphite, abiotic stress, sodium chloride, cadmium, nitrogen, biostimulation, *Solanum lycopersicum*.

AGRADECIMIENTOS

Al **Colegio de Postgraduados (COLPOS)**, por facilitarme las instalaciones y brindarme la oportunidad de continuar mis estudios académicos.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

A la **Dra. Libia Iris Trejo Téllez**, por el esfuerzo y tiempo extra dedicado a la revisión de la presente investigación, por toda la experiencia y calidad académica compartida tanto dentro como fuera del salón de clases, pero sobre todo por contagiar esa pasión que posee por la investigación.

Al **Dr. Gabriel Alcántar González**, por su amabilidad y orientación sobre la línea de investigación a seguir al momento de ingresar al posgrado.

Al **Dr. Fernando Carlos Gómez Merino**, por sus muy atinadas observaciones y llamadas de atención, pero sobre todo por ser un claro ejemplo a seguir en el medio académico.

A la **Dra. Soledad García Morales**, por estar siempre al pendiente de mis avances en la presente investigación así como su apoyo en laboratorio.

A mi esposa **Zulia Helena Caamal Pat**, por todo el apoyo, paciencia y amor otorgado antes, durante y después del presente trabajo.

A la **Ing. Gloria**, la **C. Fernanda** y la **Dra. Guadalupe** por el apoyo brindado en la fase de campo y de laboratorio en la presente investigación.

TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1. Fosfito como bioestimulante	1
2. Factores de estrés abiótico en plantas.....	2
3. Salinidad y su impacto en plantas superiores	5
4. Estrés por Cd en plantas superiores.....	7
5. Nitrógeno, toxicidad y deficiencia en plantas	9
6. Tomate como planta modelo en estudios fisiológicos y moleculares	10
LITERATURA CITADA	11
CAPÍTULO I. FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS SALINO EN TOMATE.....	14
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	15
1.1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos particulares	17
1.3. HIPÓTESIS	18
1.3.1. Hipótesis general.....	18
1.3.2. Hipótesis particulares	18
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
1.4.1 Localización geográfica del área experimental	18
1.4.2. Sustrato.....	19
1.4.3. Material vegetal	20
1.4.4. Descripción de tratamientos	21
1.4.5. Diseño experimental.....	22
1.4.6. Manejo del experimento	23
1.4.7. Variables evaluadas	23

1.4.8. Análisis estadístico	25
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
1.5.1. Parámetros de crecimiento	26
1.5.2. Concentración foliar de nutrimentos y sodio	47
1.5.3. Concentración de nutrimentos y sodio en tallos	54
1.5.4. Concentración nutrimental y de sodio en raíz	58
1.5.5. Parámetros bioquímicos	62
1.5.6. Parámetros relacionados con fotosíntesis	68
1.6. CONCLUSIONES	76
1.7. LITERATURA CITADA	78
CAPÍTULO II. FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS POR CADMIO EN TOMATE .	82
RESUMEN.....	82
ABSTRACT	83
2.1. INTRODUCCIÓN.....	84
2.2. OBJETIVOS	86
2.2.1. Objetivo general	86
2.2.2. Objetivos particulares	86
2.3. HIPÓTESIS	86
2.3.1. Hipótesis general.....	86
2.3.2. Hipótesis particulares	86
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	87
2.4.1 Localización geográfica del área experimental	87
2.4.2. Sustrato	87
2.4.3. Material vegetal	87
2.4.4. Descripción de tratamientos	87
2.4.5. Diseño experimental.....	88
2.4.6. Manejo del experimento	89
2.4.7. Variables evaluadas	89
2.4.8. Análisis estadístico	91
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	91
2.5.1. Parámetros de crecimiento.....	91
2.5.2. Concentración foliar de nutrimentos	111
2.5.3. Concentración nutrimental en tallos.....	118
2.5.4. Concentración nutrimental en raíz	125
2.5.5. Parámetros bioquímicos	134
2.5.6. Parámetros relacionados con fotosíntesis	138
2.6. CONCLUSIONES	146

2.7. LITERATURA CITADA	148
CAPÍTULO III. FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS NUTRIMENTAL EN TOMATE	152
RESUMEN.....	152
ABSTRACT	153
3.1. INTRODUCCIÓN.....	154
3.2. OBJETIVOS	155
3.2.1. Objetivo general	155
3.2.2. Objetivos particulares	155
3.3. HIPÓTESIS	156
3.3.1. Hipótesis general.....	156
3.3.2. Hipótesis particulares	156
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	156
3.4.1 Localización geográfica del área experimental	156
3.4.2. Sustrato.....	157
3.4.3. Material vegetal	157
3.4.4. Descripción de tratamientos	157
3.4.5. Diseño experimental.....	158
3.4.6. Manejo del experimento	158
3.4.7. Variables evaluadas	158
3.4.8. Análisis estadístico	160
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	161
3.5.1. Parámetros de crecimiento.....	161
3.5.2. Concentración foliar de nutrimentos	181
3.5.3. Concentración nutrimental en tallos.....	187
3.5.4. Concentración nutrimental en raíz	193
3.5.5. Parámetros bioquímicos	199
3.5.6. Parámetros relacionados con fotosíntesis	203
3.6. CONCLUSIONES.....	211
3.7. LITERATURA CITADA	213

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

Cuadro 1. 1	Solución nutritiva universal de Steiner a 25% de su concentración.....	21
Cuadro 1. 2	Número de hojas, botones florales y flores en plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	29
Cuadro 1. 3	Área foliar por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl (mM) en la solución nutritiva.....	31
Cuadro 1. 4	Peso fresco y seco de hojas por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.....	34
Cuadro 1. 5	Pesos fresco del tallo de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.....	37
Cuadro 1. 6	Pesos seco del tallo de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	37
Cuadro 1. 7	Pesos fresco y seco de raíz de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	41
Cuadro 1. 8	Altura de planta y diámetro de tallo de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.....	44
Cuadro 1. 9	Longitud raíz y volumen raíz de plantas tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	47
Cuadro 1. 10	Concentración de macronutrientes en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.....	48
Cuadro 1. 11	Concentración de macronutrientes en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.....	49
Cuadro 1. 12	Concentración de macronutrientes en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	50
Cuadro 1. 13	Concentración de micronutrientes y sodio en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	51
Cuadro 1. 14	Concentración de micronutrientes y sodio en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.....	53
Cuadro 1. 15	Concentración de micronutrientes y sodio en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	54
Cuadro 1. 16	Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.....	55
Cuadro 1. 17	Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.....	55
Cuadro 1. 18	Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	56
Cuadro 1. 19	Concentración de micronutrientes y sodio en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.....	57
Cuadro 1. 20	Concentración de micronutrientes y sodio en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.....	57
Cuadro 1. 21	Concentración de micronutrientes y sodio en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	58
Cuadro 1. 22	Concentración de macronutrientes en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.....	58
Cuadro 1. 23	Concentración de macronutrientes en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.....	59

Cuadro 1. 24 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	60
Cuadro 1. 25 Concentración de micronutrientos y sodio en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	60
Cuadro 1. 26 Concentración de micronutrientos y sodio en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.	61
Cuadro 1. 27 Concentración de micronutrientos y sodio en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	62
Cuadro 1. 28 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	63
Cuadro 1. 29 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.	64
Cuadro 1. 30 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	64
Cuadro 1. 31 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	65
Cuadro 1. 32 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.	65
Cuadro 1. 33 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	66
Cuadro 1. 34 Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	66
Cuadro 1. 35 Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.	67
Cuadro 1. 36 Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	68
Cuadro 1. 37 Concentración intercelular de CO ₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	70
Cuadro 1. 38 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	72
Cuadro 1. 39 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	74
Cuadro 1. 40 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.	76

CAPÍTULO II

Cuadro 2. 1 Número de hojas, botones florales y flores en plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	94
Cuadro 2. 2 Área foliar por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd la solución nutritiva.	96
Cuadro 2. 3 Peso fresco y seco de hoja por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	99
Cuadro 2. 4 Peso fresco y seco de tallo de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	101
Cuadro 2. 5 Peso fresco y seco de raíz de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	104
Cuadro 2. 6 Altura de planta y diámetro de tallo en plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	107

Cuadro 2. 7 Longitud raíz y volumen raíz de plantas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	111
Cuadro 2. 8 Concentración de macronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	112
Cuadro 2. 9 Concentración de macronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.	113
Cuadro 2. 10 Concentración de macronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.	114
Cuadro 2. 11 Concentración de micronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) en la solución nutritiva.	115
Cuadro 2. 12 Concentración de micronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd (μM) en la solución nutritiva.	117
Cuadro 2. 13 Concentración de micronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.	118
Cuadro 2. 14 Concentración de macronutrientos en tallo de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) en la solución nutritiva.	119
Cuadro 2. 15 Concentración de macronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd (μM) en la solución nutritiva.	120
Cuadro 2. 16 Concentración de macronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd (μM) en la solución nutritiva.	121
Cuadro 2. 17 Concentración de micronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	122
Cuadro 2. 18 Concentración de micronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.	124
Cuadro 2. 19 Concentración de micronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.	125
Cuadro 2. 20 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	126
Cuadro 2. 21 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.	127
Cuadro 2. 22 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.	129
Cuadro 2. 23 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	130
Cuadro 2. 24 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.	132
Cuadro 2. 25 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	133
Cuadro 2. 26 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	134
Cuadro 2. 27 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.	135
Cuadro 2. 28 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	136
Cuadro 2. 29 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.	136
Cuadro 2. 30 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd (μM) en la solución nutritiva.	137
Cuadro 2. 31 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	137

Cuadro 2. 32 Concentración intercelular de CO ₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	140
Cuadro 2. 33 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	142
Cuadro 2. 34 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	144
Cuadro 2. 35 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.	146

CAPÍTULO III

Cuadro 3. 1 Número de hojas, botones florales y flores en plántulas de tomate como respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	164
Cuadro 3. 2 Área foliar por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	166
Cuadro 3. 3 Peso fresco y seco de hojas por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y (NO ₃ ⁻) en la solución nutritiva.	170
Cuadro 3. 4 Peso fresco y seco de tallo por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	173
Cuadro 3. 5 Peso fresco y seco de raíz por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	176
Cuadro 3. 6 Altura de planta y diámetro de tallo por plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	178
Cuadro 3. 7 Longitud y volumen de raíz en plántulas de tomate como respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	181
Cuadro 3. 8 Concentración de macronutrientes en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.	182
Cuadro 3. 9 Concentración de macronutrientes en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	183
Cuadro 3. 10 Concentración de macronutrientes en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	184
Cuadro 3. 11 Concentración de micronutrientes en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación Phi en la solución nutritiva.	185
Cuadro 3. 12 Concentración de cada micronutriente en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	186
Cuadro 3. 13 Concentración de micronutrientes en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	187
Cuadro 3. 14 Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.	188
Cuadro 3. 15 Concentración de cada macronutriente en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	189
Cuadro 3. 16 Concentración de macronutrientes en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	190
Cuadro 3. 17 Concentración de micronutrientes en tallo de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.	191
Cuadro 3. 18 Concentración de cada micronutriente en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	192

Cuadro 3. 19	Concentración de micronutrientos en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.....	193
Cuadro 3. 20	Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.....	194
Cuadro 3. 21	Concentración de cada macronutriente en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	195
Cuadro 3. 22	Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.....	196
Cuadro 3. 23	Concentración de cada micronutriente en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.....	197
Cuadro 3. 24	Concentración de cada micronutriente en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	198
Cuadro 3. 25	Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.....	199
Cuadro 3. 26	Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.....	200
Cuadro 3. 27	Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.	201
Cuadro 3. 28	Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.....	201
Cuadro 3. 29	Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.....	202
Cuadro 3. 30	Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.....	202
Cuadro 3. 31	Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva.....	203
Cuadro 3. 32	Concentración intercelular de CO ₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).	205
Cuadro 3. 33	Tasa de transpiración (E) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).....	206
Cuadro 3. 34	Conductancia estomática (Gs) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).....	209
Cuadro 3. 35	Tasa fotosintética (A) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO ₃ ⁻ en la solución nutritiva).....	211

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. 1 Invernadero empleado durante el desarrollo de la investigación.	19
Figura 1. 2 Lavado del sustrato perlita.	20
Figura 1. 3 Semillas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) variedad El Cid a partir de las cuales se obtuvieron las plántulas para esta investigación.	20
Figura 1. 4 Acomodo de tratamientos 2 ³ tipo factorial.	22
Figura 1. 5 Número de hojas por plántula de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.0250); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0256)] y NaCl [B: medias (P=0.0936); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0547)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	27
Figura 1. 6 Número de botones florales por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05), Phi (P=0.2457), NaCl (P=0.2528).	28
Figura 1. 7 Número de flores por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.9209), NaCl (P=0.1343).	28
Figura 1. 8 Área foliar de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.1437); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.5896)] y NaCl [B: medias (P=0.0415); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	30
Figura 1. 9 Peso fresco de hojas por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.1250), NaCl (P=0.5058).	32
Figura 1. 10 Peso seco de hojas por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.7870); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=1)] y NaCl [B: medias (P=0.0010); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	33
Figura 1. 11 Peso fresco de tallo de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.2437); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.1730)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	35
Figura 1. 12 Peso seco de tallo de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.4335); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.6023)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	36
Figura 1. 13 Peso fresco de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.4091); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.9497)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	39

Figura 1. 14 Peso seco de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.2601); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.1413)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	40
Figura 1. 15 Altura de planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.1374), NaCl (P<0.0001).	42
Figura 1. 16 Diámetro de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.1868), NaCl (P=0.0022).	43
Figura 1. 17 Longitud de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.2063), NaCl (P=0.2496).	45
Figura 1. 18 Volumen de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.2036); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0251)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	46
Figura 1. 19 Concentración intercelular de CO ₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.6931); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.3626)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	69
Figura 1. 20 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.6556), NaCl (P<0.0001).	71
Figura 1. 21 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) [A: medias (P=0.9624); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.8624)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	73
Figura 1. 22 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) [A: medias (P=0.2273); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.6792)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	75

CAPITULO II

Figura 2. 1 Número de hojas de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.8550); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=1.0)] y Cd [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).	92
Figura 2. 2 Número de botones florales por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de	

cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.0934$), Cd ($P=0.0004$).....	93
Figura 2. 3 Número de flores por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0079$), Cd ($P=0.0038$).	94
Figura 2. 4 . Área foliar de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0503$), Cd ($P < 0.0001$).....	95
Figura 2. 5 Peso fresco de hojas por plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0508$), Cd ($P < 0.0001$).	97
Figura 2. 6 Peso seco de hojas por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.0707$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=1271$)] y Cd [B: medias ($P < 0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).	98
Figura 2. 7 Peso fresco de tallo por plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0117$), Cd ($P=0.7596$).	100
Figura 2. 8 Peso seco de tallo por plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0809$), Cd ($P=0.0032$).	101
Figura 2. 9 Peso fresco de raíz por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0005$), Cd ($P=0.0168$).	102
Figura 2. 10 Peso seco de raíz por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P < 0.0001$), Cd ($P=0.0021$).	103
Figura 2. 11 Altura de planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.8406$), Cd ($P=0.2946$).	105
Figura 2. 12 Diámetro de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.2080$), Cd ($P < 0.0001$).	107
Figura 2. 13 Longitud de raíz de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.0037$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0089$)] y Cd [B: medias ($P=0.0130$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0123$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).	109
Figura 2. 14 Volumen de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.0004$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] y Cd [B: medias ($P=0.0009$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).	110
Figura 2. 15 Concentración intercelular de CO_2 (Ci) en plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.1975$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.3016$)] y Cd [B: medias ($P=0.0704$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0386$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).	139

Figura 2. 16 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.8062$), Cd ($P=0.1225$)..... 141

Figura 2. 17 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.5597$), Cd ($P=0.6053$)..... 143

Figura 2. 18 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.8786$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.7728$)] y Cd [B: medias ($P=0.0277$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0170$)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). 145

CAPÍTULO III

Figura 3. 1 Número de hojas de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.6398$), NO_3^- ($P < 0.0001$)..... 161

Figura 3. 2 Número de botones florales por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.8003$), NO_3^- ($P=0.6383$)..... 162

Figura 3. 3 Número de flores por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.0519$), NO_3^- ($P=0.0024$)..... 163

Figura 3. 4 Área foliar de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.7203$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.3719$)] y NO_3^- [B: medias ($P < 0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). 165

Figura 3. 5 Peso fresco de hojas de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.2007$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1335$)] y NO_3^- [B: medias ($P < 0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$)..... 167

Figura 3. 6 Peso seco de hojas de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.2449$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1913$)] y Nitrógeno (NO_3^-) [B: medias ($P < 0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). 169

Figura 3. 7 Peso fresco de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.1910$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1764$)] y Nitrógeno (NO_3^-) [B: medias ($P < 0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). 171

Figura 3. 8 Peso seco de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.1231$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1203$)] y NO_3^- [B: medias ($P < 0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P < 0.0001$)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$)..... 172

Figura 3. 9 Peso fresco de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.2458); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.2779)] y NO ₃ ⁻ [B: medias (P=0.1367); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.287)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).....	174
Figura 3. 10 Peso seco de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.2765); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.2346)] y NO ₃ ⁻ [B: medias (P=0.0188); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.006)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).....	175
Figura 3. 11 Altura por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO ₃ ⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05), Phi (P=0.0019), NO ₃ ⁻ (P<0.0001).....	177
Figura 3. 12 Diámetro de tallo por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO ₃ ⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05), Phi (P=0.0002), NO ₃ ⁻ (P=0.1657).....	178
Figura 3. 13 Longitud de raíz por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO ₃ ⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05), Phi (P=0.0012), NO ₃ ⁻ (P=0.0037).....	179
Figura 3. 14 Volumen de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.0038); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0015)] y NO ₃ ⁻ [B: medias (P=0.0182); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.112)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).....	180
Figura 3. 15 Concentración intercelular de CO ₂ (Ci) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO ₃ ⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P<0.0001), NO ₃ ⁻ (P<0.0001).....	204
Figura 3. 16 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO ₃ ⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.3500), NO ₃ ⁻ (P=0.0018).....	206
Figura 3. 17 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.0098); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0890)] y NO ₃ ⁻ [B: medias (P=0.0385); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0036)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).....	208
Figura 3. 18. Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO ₃ ⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.0014), NO ₃ ⁻ (P<0.0001).....	210

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Fosfito como bioestimulante

Fosfito (Phi) es un análogo estructural del fosfato (Pi) que es eficientemente absorbido por el sistema de transporte de Pi y rápidamente movilizado por el xilema y el floema de las plantas (López-Arredondo *et al.*, 2013).

Los fosfitos (Phi) son sales metálicas de ácido fosforoso que son capaces de provocar resistencia adquirida sistémica (SAR) en algunas especies de plantas y también pueden presentar toxicidad directa contra diferentes patógenos, *Phytophthora spp.*, *Streptomyces scabies*, *Rhizoctonia solani* y *Fusarium solani*, la aplicación de Phi a las plantas las protege de las infecciones especialmente por los oomycetes y también contra otros patógenos de la planta, tales como *Venturia inaequalis*, *V. pirina*, *F. solani* y *Erwinia carotovora*. Muchos de estos compuestos se denominan frecuentemente biopesticidas y son respetuosos con el medio ambiente (Simonetti *et al.*, 2015), varios estudios de laboratorio recientes demuestran que la aplicación de compuestos de fosfito mejoran la defensa de las plantas (Liljeroth *et al.*, 2016) incluso han dado como resultado mejores rendimientos para algunas especies vegetales, estos efectos beneficiosos han llevado a la hipótesis de que Phi también tiene propiedades nutricionales como fuente de fósforo (P) para las plantas, sin embargo numerosos informes han demostrado que las células vegetales son incapaces de metabolizar el Phi, evitando su uso como una fuente directa de P, además se han reportado efectos negativos del tratamiento Phi en el crecimiento de plantas para muchas especies, incluyendo *Arabidopsis*, tomate, *Brassica nigra*, pimiento y maíz; Los efectos negativos mediados por Phi se han observado tanto en condiciones de cultivo de tejidos como cuando se incorporan al suelo o se aplican como tratamientos foliares en condiciones de campo (López-Arredondo *et al.*, 2013).

Liljeroth *et al.* (2016) Realizaron un estudio en papa y concluyeron que el fosfito de potasio es absorbido y tiene un alto grado de movilidad en el floema además de que

se transloca a diferentes partes de la planta incluyendo los tubérculos, también hallaron que los residuos de Phi están presentes en el tejido de los tubérculos de las plantas tratadas con dicho bioestimulante durante la temporada de cultivo incluso después de varios meses de almacenamiento, por tanto las plantas no transforman el Phi en Pi y no poseen la capacidad de utilizarlo directamente como una fuente P en los procesos metabólicos.

Entender las consecuencias de la acumulación de Phi en las plantas se complica por los diferentes procesos moleculares que Phi puede afectar y sus posibles interacciones, varios estudios han reportado un efecto inhibitorio de Phi sobre el crecimiento de plantas sin embargo, el conocimiento sobre la causa del efecto inhibitorio de Phi sobre el crecimiento de las plantas es limitado y tampoco se dispone de estudios detallados sobre la interacción de Pi y Phi en la arquitectura de las raíces, además Phi influye en la compartimentación subcelular de Pi y ambos procesos afectarán a la homeostasis de Pi con efectos posteriores sobre el metabolismo dependiente de Pi al mismo tiempo, el Phi pseudo-piramidal se asemeja a Pi tetraédrico en su geometría, lo que sugiere un potencial de Phi para imitar Pi y perjudicar los mecanismos de detección de Pi o reacciones enzimáticas dependientes de Pi y su regulación alostérica ([Berkowitz et al., 2013](#)).

2. Factores de estrés abiótico en plantas

El estrés se define como cualquier restricción abiótica externa (salinidad, calor, agua, etc.) o biótica (herbívoro) que limita la tasa de fotosíntesis y reduce la capacidad de una planta para convertir energía en biomasa ([Parihar et al., 2015](#)), También se puede entender como una desviación negativa de las condiciones de vida que son óptimas para una planta ([Gerszberg y Hnatuszko - Konka, 2017](#))

El estrés abiótico afecta negativamente la fisiología y la bioquímica de las plantas perjudicando significativamente su crecimiento y reduciendo el rendimiento por debajo de los niveles normales, también desencadena una serie de respuestas de las plantas comenzando con la percepción del estrés lo que conduce a la activación

de vías de señalización y a la alteración de los niveles de expresión génica, alterando la fisiología, el crecimiento y el desarrollo de las plantas (ElSayed *et al.*, 2013).

Debido a su estilo de vida sésil, las plantas están continuamente expuestas a una amplia gama de tensiones ambientales, los principales tipos de estrés abióticos que afectan a las plantas y cultivos en el campo están siendo ampliamente estudiados e incluyen la sequía, la salinidad, el calor, el frío, el enfriamiento, la congelación, los nutrientes, la alta intensidad de la luz, el ozono y las tensiones anaeróbicas, sin embargo, las condiciones de campo son diferentes de las condiciones controladas utilizadas en el laboratorio, en condiciones naturales las combinaciones de dos o más tensiones, como la sequía y la salinidad, la salinidad y el calor y las combinaciones de sequía con temperaturas extremas o de alta intensidad de luz son comunes en muchas áreas agrícolas de todo el mundo y podrían afectar la productividad de los cultivos (Suzuki *et al.*, 2014).

Bajo la influencia del calentamiento global en el mundo, los cambios en las condiciones climáticas están creando fenómenos inusuales a menudo en forma de estrés hídrico; desde el punto de vista agrícola la sequía es un periodo con una precipitación inferior a la media, con menos lluvias frecuentes o por evaporaciones encima de la normalidad, la limitación de la humedad afecta casi todos los procesos de la planta, desde la conformación de la membrana, la organización del cloroplasto y la actividad enzimática a nivel celular, hasta el crecimiento y la reducción del rendimiento en toda la planta; Por lo cual el estrés por sequía induce el cierre estomático, disminuye la transpiración y las tasas fotosintéticas, conduce a una madurez temprana de los cultivos y a una baja productividad, así que para minimizar los efectos negativos del estrés hídrico las plantas tienen varias vías de señalización y responden cambiando su patrón de crecimiento, regulación de antioxidantes, acumulación de solutos compatibles y producción de proteínas de estrés y chaperones (Kaur y Asthir, 2017).

En caso contrario las plantas tolerantes al frío y a la congelación se adaptan metabólicamente para sobrevivir al estrés por congelamiento, mientras que las plantas tropicales y subtropicales carecen de estas adaptaciones y generalmente mueren al haber una disminución drástica de la temperatura, las plantas de las regiones templadas muestran grados variables de tolerancia al congelamiento dicha tolerancia no es una propiedad constante, sino que cambia a lo largo del año en respuesta a las cambiantes condiciones ambientales. La base molecular de las respuestas adaptativas a las bajas temperaturas se denomina aclimatación en frío, no se entiende completamente, sino que incluye cambios en los componentes de la membrana, producción de proteínas protectoras y biosíntesis de protectores de bajo peso molecular tales como sacarosa y prolina (Kim *et al.*, 2016).

El estrés salino afecta a la fisiología de las plantas tanto a nivel de plantas enteras como a nivel celular a través del estrés osmótico e iónico, interrumpe las relaciones de agua de la planta lo que resulta en una sequía fisiológica, acumulaciones de sal hasta cantidades tóxicas en el apoplasto de la hoja conducen a la pérdida de deshidratación y turgencia dando como resultado la muerte de células y tejidos, entre los procesos más afectados durante el estrés por salinidad se encuentra la fotosíntesis, que se acompaña de una disminución del pigmento clorofílico, la inhibición de la rubisco y el cierre de los estomas, disminuyendo la presión de CO₂; Además, se afirma que el estrés por salinidad afecta al metabolismo del nitrógeno al afectar varias enzimas, por lo tanto todos estos y otros procesos alterados conducen a un crecimiento pobre de las plantas (Howladar, 2014).

Las plantas usan la luz solar como una fuente de energía y como una señal ambiental importante para regular su crecimiento y desarrollo, una planta modelo como *Arabidopsis thaliana* (*Arabidopsis*) utiliza señales de luz solar para regular toda una serie de procesos de desarrollo y adaptaciones incluyendo germinación, de-etiolación, evitación de sombra, desarrollo estomático, ritmo circadiano y floración. Además de la regulación del crecimiento y el desarrollo ahora denominado fotomorfogénesis "normal", la luz alta y en particular su parte integral ultravioleta

(UV) provoca un estrés que conduce a graves daños al ADN, proteínas y otros componentes celulares (Müller *et al.*, 2014).

El estrés por metales pesados conduce a la pérdida de la productividad agrícola y a efectos peligrosos para la salud, varias industrias y actividades del campo contribuyen a la contaminación de tierras en las zonas periurbanas, entre los metales pesados conocidos como nocivos el cadmio es un contaminante no esencial y se encuentra naturalmente presente en el medio ambiente; Fertilizantes fosfatados, lodos de depuradora y las emisiones industriales son las principales fuentes antropogénicas que contienen Cd también se liberan cantidades sustanciales de este metal al medio ambiente en las industrias mineras y de fundición, las plantas absorben fácilmente el Cd del suelo por lo que sí están expuestas a altas concentraciones hay inhibición de las tasas de fotosíntesis, crecimiento, absorción de agua y de nutrientes, clorosis y finalmente ocurre la muerte (Howladar, 2014).

La adaptación de las plantas a las tensiones abióticas es un proceso complejo, que se caracteriza por la activación de múltiples respuestas que implican la interacción de genes compuestos y la "diafonía" entre muchas vías moleculares. Estas respuestas celulares complejas se explicaron por los avances realizados en la investigación y comprensión de las respuestas abióticas de plantas en diferentes niveles. En general, se distinguen tres etapas durante el estrés abiótico: (1) la etapa de alarma; (2) la etapa de resistencia; y (3) la etapa de agotamiento. Sin embargo, Lichtenthaler 1988 añadió la cuarta etapa, la etapa de regeneración. Esta etapa particular aparece exclusivamente cuando se elimina el factor de estrés antes de que el fallo sea demasiado drástico y permita la recuperación total o parcial de la función fisiológica de la planta (Gerszberg y Hnatuszko-Konka, 2017).

3. Salinidad y su impacto en plantas superiores

El efecto adverso del exceso de minerales como Na⁺ y / o Cl⁻ en la planta se llama estrés salino, se ha demostrado que la salinidad del suelo subsistió mucho antes de

los humanos y la agricultura; sin embargo, el problema ha surgido por prácticas agrícolas como el riego, el estrés salino es uno de los factores limitantes más importantes para el crecimiento y la producción de los cultivos ([Parihar et al., 2015](#)).

La salinidad es la palabra que describe a los suelos que contienen altas concentraciones de sales solubles en agua, principalmente NaCl, y que causa graves pérdidas en el rendimiento agrícola, la salinidad es hostil a la mayoría de las formas de vida porque es responsable de un desequilibrio de la homeostasis de los iones celulares, lo que requiere un ajuste rápidamente osmótico a través de la flexibilidad morfológica y la biosíntesis de los metabolitos secundarios como los solutos compatibles, que la acumulación en las plantas en la gama milimolar juega un papel importante en la tolerancia de las plantas al estrés salino ([Leitao et al., 2016](#)), los cultivos muestran un gradiente de tolerancia a la salinidad como resultado de una combinación anatómica, fisiológica y de estrategias moleculares más o menos eficientes para minimizar sus efectos perjudiciales, la salinidad no solamente afecta a la producción de cultivos agrícolas, si no también varios aspectos fisiológicos y bioquímicos de las plantas en general, por lo que altos niveles de iones en la solución del suelo inducen rápidamente efectos osmóticos reduciendo la absorción de agua por las raíces (sequía fisiológica) y el creciente exceso de absorción de iones comienza a producir citotoxicidad problemas de pH que ocasionan interferencia en el balance nutrimental ([Michele et al., 2016](#)).

Al aumentar la salinidad se reporta un bloqueo en la absorción de agua por las raíces lo que limita la absorción de nutrientes, influyendo así la apertura estomática y por lo tanto presentando una disminución en las reacciones bioquímicas, el estrés salino reduce la fotosíntesis en las plantas y provoca alteraciones en la actividad de algunas enzimas afectando la síntesis de clorofila lo que resulta en la pérdida de pigmentos, por lo que una tremenda pérdida en el contenido de la clorofila y desequilibrio de nutrientes es uno de los efectos adversos de la salinidad en el crecimiento de las plantas, también la falta de disponibilidad de CO₂ conduce a un mayor cierre estomático debido al consumo reducido de NADPH producido por el

ciclo de Calvin, así que podemos concluir que el estrés por salinidad afecta negativamente a todos los diferentes parámetros, es decir, clorofila, crecimiento, biomasa, estado de agua, absorción de nutrientes (Leitao *et al.*, 2016; Hammed *et al.*, 2014).

En un nivel básico la respuesta de las plantas a la salinidad se puede describir en dos fases principales: la respuesta independiente de iones de brote ocurre primero en cuestión de minutos a días y se piensa que está relacionada con la detección y señalización de Na^+ en esta primera fase, los efectos de la salinidad en las relaciones hídricas pueden ser importantes causando el cierre estomático y la inhibición de la expansión foliar. La segunda fase es la respuesta dependiente de los iones a la salinidad y se desarrolla durante un período más largo (días a semanas) e implica la acumulación de iones en el brote a concentraciones tóxicas, particularmente en hojas viejas, causando la senescencia prematura de las hojas y en última instancia reduce el rendimiento o incluso la muerte de la planta (Negrão *et al.*, 2017).

4. Estrés por Cd en plantas superiores

Metales pesados tóxicos como el cadmio (Cd) son contaminantes importantes debido a su liberación al medio ambiente de las actividades antropogénicas, por su naturaleza no biodegradable los metales pesados pueden acumularse en plantas y en última instancia afectar la salud humana; El Cd se encuentra a bajas concentraciones en el suelo siendo la forma predominante Cd_2^+ , su baja concentración combinada con el bajo coeficiente de difusión del metal en la solución del suelo sugiere que el flujo de masas es el mecanismo predominante de contacto del ión con la raíz para su captación por las plantas (Correa *et al.*, 2016) las cuales han desarrollado diversos mecanismos que regulan la acumulación de dichos metales, uno de estos mecanismos implica la síntesis de proteínas de transporte tales como canales, portadores o bombas que transportan metales pesados a través de los sistemas de membrana celular, se han aislado y caracterizado los genes que codifican transportadores de metales incluyendo ATPasas de metales pesados y

proteínas de macrófagos asociados a la resistencia natural (NRAMPs) (Ding *et al.*, 2017).

El cadmio es un metal altamente tóxico fácilmente absorbido por las plantas y que en consecuencia afecta en términos de crecimiento y productividad a los cultivos, este metal es también conocido por inhibir la germinación de las semillas y el crecimiento de las raíces, inducir aberraciones en los cromosomas y la formación de micronúcleos, puede causar despolarización de la membrana citoplasmática y acidificación, conduciendo así a la alteración de la homeostasis celular; En la mayoría de los casos los síntomas de toxicidad de este elemento en las plantas toman la forma de unión del metal a grupos sulfhidrilo de proteínas, lo que crea un complejo metal-proteína que interfiere con la biosíntesis de la clorofila y puede inhibir la actividad de la enzima fotosintética en el ciclo de Calvin (Correa *et al.*, 2016). Además, un exceso de Cd y otros metales tóxicos pueden estimular la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) que son tóxicas para los seres vivos y que a su vez pueden causar peroxidación lipídica, inactivación enzimática, daño al ADN, pérdida de selectividad de la membrana, también reduce el crecimiento interfiriendo con la fotosíntesis, la respiración y las relaciones hídricas así como también puede influir en la absorción de otros elementos presentes en el medio de crecimiento especialmente los micronutrientes catiónicos potencialmente competidores como el cobre (Cu), el hierro (Fe), el manganeso (Mn) y el zinc (Zn), afecta a las fitoquelatinas, el glutamato, los péptidos ricos en cisteína y algunas actividades enzimáticas implicadas en el metabolismo de nitrógeno y azufre (Bagheri *et al.*, 2017; Correa *et al.*, 2016).

El estrés oxidativo causado por el efecto tóxico de este elemento causa daño celular que es irreversible y desencadena el proceso de muerte celular programada, esto puede reflejar la acción de ROS sobre las macromoléculas que promueve la modificación de los ácidos nucleicos, incluida la ruptura cromosómica. El cadmio puede causar una oxidación incontrolada que puede ser mitigada por el sistema de defensa antioxidante que consiste en enzimas como la superóxido dismutasa,

ascorbato peroxidasa, catalasa, glutatión reductasa, glutatión S-transferasa y guaiacol peroxidasa, entre otros (Correa *et al.*, 2016).

5. Nitrógeno, toxicidad y deficiencia en plantas

El nitrógeno (N) es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas es un nutrimento principal por que se requiere en muchas biomoléculas tales como aminoácidos, proteínas, enzimas, clorofilas, fitohormonas y ácidos nucleicos, estos componentes celulares están envueltos en el metabolismo, transformación de energía, expresión de genes y actividad proteica (Li *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2015).

La disponibilidad de N es un factor importante que determina el crecimiento y la productividad de las plantas, estas pueden adquirir N a través de sus raíces en el suelo bajo formas inorgánicas (nitrato NO_3^- y amonio NH_4^+) y orgánicas (urea, aminoácidos, péptidos), el NO_3^- y el NH_4^+ son las formas universales en la mayoría de los suelos y su disponibilidad es generalmente baja, pero también puede ser muy variable dependiendo de diversos factores incluyendo las propiedades físicas del suelo, la lixiviación y la actividad microbiana. Dichos iones son absorbidos por transportadores específicos, tales como nitratos (NRTs) y transportadores de amonio (AMTs), y pueden ser asimilados localmente, almacenados en vacuolas o transportados a otras partes de plantas. (Kibba *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2015), fisiológicamente cuando el NO_3^- es absorbido por las plantas existe una absorción simultánea de protones (H^+) dando como resultado un aumento del pH de la rizósfera, por el contrario cuando NH_4^+ es absorbido el protón (H^+) se libera en la rizósfera lo que resulta en una disminución en el pH de la zona radicular (Hu *et al.*, 2013).

Las plantas han desarrollado múltiples estrategias, incluyendo adaptaciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas para responder a las variaciones de la disponibilidad de N en el suelo (Li *et al.*, 2016; Zeng *et al.*, 2014)

La implementación excesiva de fertilizantes nitrogenados reducen la eficiencia del uso de N por las plantas y pueden causar contaminación ambiental severa ([Li et al., 2016](#)).

6. Tomate como planta modelo en estudios fisiológicos y moleculares

El tomate cultivado *Solanum lycopersicum*, es miembro del género *Solanum* de la familia *Asterid* derivada *Solanaceae* pertenece a una gran variedad de especies que se encuentran en hábitats áridos en la costa occidental de América del Sur, los tomates son hermanos de las patatas, y comenzaron a diversificarse muy recientemente después del surgimiento de los Andes y el desarrollo de los áridos desiertos occidentales probablemente los tomates fueron llevados a Europa por los españoles de Mesoamérica y de ahí distribuidos en todo el mundo ([Knapp y Peralta, 2016](#)).

El tomate es una planta de gran importancia económica y alimenticia siendo la séptima especie de cultivo más importante su producción así como la superficie dedicada a su cultivo se ha duplicado en los últimos 20 años, además esta especie se ha convertido en un modelo vegetal en programas de investigación agronómica una característica altamente valorada al elegirla como una planta modelo es gracias a la simplicidad de su genética ya que cuenta con un genoma relativamente pequeño ([García – Abellan et al., 2015](#)), contiene licopeno un compuesto que posee propiedades antioxidantes y anticancerígenas ([Gerszberg y Hnatuszko - Konka, 2017](#)) los principales países productores de esta hortaliza son China, Estados Unidos, India, Turquía y Egipto ([FAOSTAT, 2017](#); datos actualizados al 13 de febrero de 2017).

México por su volumen de producción al año 2014 (3 536 305.00 ton) se consolidó entre los primeros diez lugares ([FAOSTAT, 2017](#); datos actualizados al 13 de febrero de 2017). En el periodo 2004 a 2014, en México se observó una reducción de 32% en la superficie sembrada con tomate, se registró la mayor superficie (75

160.76 ha) en el año 2004 tanto que en el 2014 se reportaron (51 300.01 ha) cultivadas con esta hortaliza. (SIAP, 2017).

LITERATURA CITADA

- Bagheri R, Ahmad J, Bashir H, Iqbal M, Qureshi MI. 2017. Changes in rubisco, cysteine-rich proteins and antioxidant system of spinach (*Spinacia oleracea L.*) due to sulphur deficiency, cadmium stress and their combination. *Protoplasma*. 254 : 1031-1043. Doi: 10.1007/s00709-016-1012-9
- Correa NR, Monteiro FA, Lupino GP, Kussumoto ASB, Antunes AR. 2016. Cadmium Application in Tomato: Nutritional Imbalance and Oxidative Stress. *Water, air and soil pollution*. 210-227. Doi: 10.1007/s11270-016-2895-y
- Ding Y, Wang Y, Jiang Z, Wang F, Jiang Q, Sun J, Chen Z, Zhu C. 2017. MicroRNA268 Overexpression Affects Rice Seedling Growth under Cadmium Stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 65 (29): 5860-5867 Doi: 10.1021/acs.jafc.7b01164
- EISayed AI, Rafudeen MS, Gollack D. 2013. Physiological aspects of raffinose family oligosaccharides in plants: protection against abiotic stress. *Plant biology*. 16:1-8. Doi: 10.1111/plb.12053
- FAOSTAT.2017.Datos-Cultivos. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC..>
Consultado: Febrero 13, 2017
- García – Abellan JO, Fernandez – García N, Lopez – Berenguer IE, Flores FB, Angosto T, Caspel J, Lozano R, Pineda B, Moreno V, Olmos E, Bolarin MC. 2015. The tomato res mutant which accumulates JA in roots in non-stressed conditions restores cell structure alterations under salinity. *Physiologia Plantarum*. 155: 296-314. Doi: 10.1111/ppl.12320
- Gerszberg A, Hnatuszko-Konka K. 2017. Tomato tolerance to abiotic stress: a review of most often engineered target sequences. *Plant Growth Regulation*. 83: 175-198. Doi: 10.1007/s10725-017-0251-x
- Hammed A, Dilfuza E, Abd-Allah EF, Hashem A, Kumar A, Ahmad P, Miransari M. 2014. Salinity Stress and Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Plants - Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses. 1 : 139-159. Ed.: Miransari M. Springer New York. New York, NY. Doi: 10.1007/978-1-4614-9466-9_7

- Howladar SM. 2014. A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 100: 69-75. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.11.022
- Hu Y, Wang NS, Hu XJ, Lin XY, Feng Y, Jin CW. 2013. Nitrate nutrition enhances nickel accumulation and toxicity in arabisopsis plants. *Plant and Soil*. 371: 105 -115. Doi: 10.1007/s11104-013-1682-4
- Kaur G, Asthir B. 2017. Molecular responses to drought stress in plants. *Biología Plantarum*. 61: 201-209. Doi: 10.1007/s10535-016-0700-9
- Knapp S, Peralta EI. 2016. The Tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) and Its Botanical Relatives. The Tomato Genome edited Causse M, Giovannoni J, Bouzayen M, Zouine M. Springer – Verlag. Berlin. 7-22. Doi: 10.1007/978-3-662-53389-5_2
- Kiba T, Krapp A. 2016. Plant Nitrogen Acquisition Under Low Availability: Regulation of Uptake and Root Architecture. *Plant and Cell Physiology* 57: 707–714. Doi: 10.1093/pcp/pcw052
- Kim YH, Kim MD, Park SC, Jeong JC, Kwak SS, Lee HS. 2016. Transgenic potato plants expressing the cold inducible transcription factor SCOF-1 display enhanced tolerance to freezing stress. *Plant Breeding*. 135: 513 – 518. Doi: 10.1111/pbr.12390
- Leitao AL, Enguita FJ. 2016. Gibberellins in *Penicillium* strains: Challenges for endophyte-plant host interactions under salinity stress. *Microbiological Research*. 183: 8 – 18. Doi: 10.1016/j.micres.2015.11.004
- Li C, Yu X, Bai L, He C, Li Y. 2016. Responses of miRNAs and their target genes to nitrogen- or phosphorus-deficiency in grafted cucumber seedlings. *Hortic. Environ. Biotechnol*. 57: 97-112. Doi: 10.1007/s13580-016-0092-y
- Liljeroth E, Lankinen A, Wiik L, Dhar BD, Alexandersson E, Andreasson E. 2016. Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials. *Crop Protection*. 86: 42-55. Doi: 10.1016/j.cropro.2016.04.003
- López-Arredondo DL, Herrera-Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse condition based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnology Journal*. 11(4): 516-525. Doi: 10.1111/pbi.12063
- Luo J, Zhou J, Li H, Shi W, Polle A, Lu M, Sun X, Luo ZB. 2015. Global poplar root and leaf transcriptomes reveal links between growth and stress responses under nitrogen

- starvation and excess. *Tree Physiology*. 35: 1283 – 1302. Doi: 10.1093/treephys/tpv091
- Michele MT, Pompeiano A, Huarancca RT, Scartazza A, Guglielminetti L. 2016. The efficient physiological strategy of a tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 109: 262-272. Doi: 10.1016/j.plaphy.2016.10.008
- Müller-Xing R, Xing Q, Goodrich J. 2014 Footprints of the sun: memory of UV and light stress in plants. *Front. Plant Sci*. 5 (474) 1-12. Doi:10.3389/fpls.2014.00474
- Negrão S, Schmöckel SM, Tester M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany*. 119: 1 – 11. Doi:10.1093/aob/mcw191
- Parihar P, Singh S, Singh R, Singh VP, Prasad SM. 2015. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 22: 4056-4075. Doi: 10.1007/s11356-014-3739-1
- Simonetti E, Pin VN, Montecchia M, Zilli C, Balestrasse K, Carmona M. 2015. Evaluation of native bacteria and manganese phosphite for alternative control of charcoal root rot of soybean. *Microbiological Research*. 180: 40 – 48. Doi: 10.1016/j.micres.2015.07.004
- Suzuki N, Rivero RM, Shulaev V, Blumwald E, Mittler R. 2014. Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist*. 203: 32-43. Doi: 10.1111/nph.12797
- Zeng H, Wang G, Hu X, Wang H, Du L, Zhu Y. 2014. Role of microRNAs in plant responses to nutrient stress. *Plant and Soil*. 374: 1005 – 1021. Doi: 10.1007/s11104-013-1907-

CAPÍTULO I. FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS SALINO EN TOMATE

RESUMEN

FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS SALINO EN TOMATE

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo un experimento de tipo factorial 2^3 con el objetivo de evaluar el efecto del fosfito (Phi) en parámetros de crecimiento, concentración nutrimental y de sodio en hoja, tallo y raíz, en parámetros bioquímicos y por último en parámetros relacionados con la fotosíntesis de plántulas de tomate variedad Cid expuestas a diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl). Esta investigación se realizó durante el verano de 2016 bajo condiciones protegidas en un invernadero tipo túnel con cubierta de plástico en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Las dos concentraciones de fosfito evaluadas fueron 0 y $0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$; mientras que las de NaCl fueron 0, 50 y 100 mM; las concentraciones de ambos factores de estudio se suministraron vía radicular a las plántulas de tomate adicionándolas a la nutritiva de Steiner al 25% durante 21 días. La adición de Phi a la solución nutritiva incrementó de manera significativa el número de hojas por plántula, y estimuló la acumulación de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz; por el contrario, redujo de manera significativa la concentración de aminoácidos libres totales en hojas. El efecto de NaCl redujo de manera significativa el área foliar, peso seco de hoja, peso fresco y seco de tallo, peso fresco y seco de raíz, altura de planta, diámetro de tallo y volumen de raíz; así como la concentración de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz; en los parámetros bioquímicos, la presencia de NaCl en la solución nutritiva redujo significativamente la concentración de clorofila a, b y total e incrementó de manera significativa la concentración de prolina en hojas; asimismo los parámetros fotosintéticos como son la concentración intercelular de CO_2 , la tasa de transpiración, la conductancia estomática y la tasa fotosintética se redujeron de forma significativa conforme se incrementó la concentración de NaCl en la solución nutritiva; respecto a la interacción de los factores de estudio Phi y NaCl en la solución nutritiva, se observa que el aporte de Phi afectó significativamente la acumulación de macro y micronutrientes en hojas, tallo y raíz a diferentes niveles de salinidad; respecto a los parámetros bioquímicos el Phi provocó una reducción significativa en la concentración de aminoácidos libres totales a una concentración de 50 mM de NaCl, y causó un incremento significativo en la concentración de prolina a 100 mM de NaCl en hojas de plántulas de tomate.

Palabras clave: Fosfito, estrés abiótico, cloruro de sodio, *Solanum lycopersicum*.

ABSTRACT

PHOSPHITE AND ITS RELATION WITH SALINE STRESS IN TOMATO

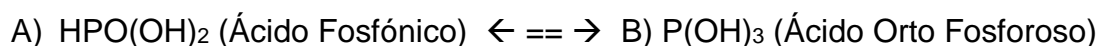
In the present work, a factorial type 2^3 experiment was carried out with the objective of evaluating the effect of phosphite (Phi) on the parameters growth, nutrient concentrations in leaf, stem and root, in biochemical parameters and finally in parameters related to the photosynthesis of tomato seedlings variety Cid exposed to different concentrations of sodium chloride (NaCl). This research was carried out during the summer of 2016 under protected conditions in a tunnel greenhouse with plastic cover belonging to the Colegio de Postgraduados Montecillo Campus. We evaluated the effect of two concentrations of phosphite (0 and $0.0375 \text{ mol } (+) \text{ m}^{-3}$) and three concentrations of saline stress (0, 50 and 100 mM NaCl) supplied to the tomato seedlings by Steiner's nutrient solution to 25% for 21 days of treatment. There is enough evidence to show that the addition of Phi to the nutrient solution showed a significant increase in the leaves numbers, as well as in the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root; in the biochemical parameters a significant reduction in the concentration of total free amino acids on tomato leaves was observed. Tomato seedlings induced to a saline-type stress by the addition of sodium chloride showed significant decreases as the concentration of 0 to 50 and 100 mM NaCl increased in growth parameters such as leaf area, leaf dry weight, fresh and dry weight of stem, fresh and dry weight of root, plant height, stem diameter and root volume; as well as in the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root; in the biochemical parameters a significant reduction in the concentration of chlorophyll a, b and total was observed, as well as a significant increase in the concentration of proline in leaves; as well as the photosynthetic parameters such as the intercellular CO_2 concentration, the transpiration rate, the stomatal conductance and the photosynthetic rate were significantly reduced as the NaCl in the nutrient solution increased.

Key words: Phosphite, abiotic stress, sodium chloride, *Solanum lycopersicum*.

1.1. INTRODUCCIÓN

El vertiginoso cambio climático a nivel mundial, el uso indiscriminado de fertilizantes e insecticidas está afectando la productividad de los cultivos agrícolas y por ende la disponibilidad de alimentos. Las plantas no son capaces de soportar varios tipos de tensiones ambientales, como son la sequía, las bajas temperaturas, la radiación, la salinidad, etc., lo que en última instancia limita el rendimiento total. La salinidad es uno de los principales factores de estrés abiótico que afecta negativamente el crecimiento y la productividad de las plantas, y que conduce a una serie de cambios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y moleculares de las mismas para adaptarse y sobrevivir a esta condición ([Singhal et al., 2016](#)).

Por otro lado, en la actualidad, en la horticultura está emergiendo como un nuevo bioestimulante el fosfito (Phi), una forma reducida de fosfato (Pi) ([Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015](#)); Cuando se habla de Phi, se debiera en estricto sentido indicar como fosfonato ya que independientemente del país de origen se sabe que el ácido fosforoso (nombre antiguo común) presenta tautomerismo, es decir son dos especies químicas que se convierten simultáneamente una en otra, predominando la forma A sobre la B, a saber:



Por tanto, al presentar tautomerismo natural la International Union of Pure and Applied Chemistry, autoridad mundial reconocida en el desarrollo de estándares para denominación de compuestos químicos a nivel científico más conocida por su acrónimo I.U.P.A.C., establece que en estos casos el compuesto se debe llamar de acuerdo a la especie predominante por lo tanto debiese llamar ácido fosfónico y así las sales que origina este ácido se debiesen llamar fosfonatos, sin embargo I.U.P.A.C. dada la antigüedad del nombre ácido fosforoso, se acepta como sinónimo a sus sales el nombre fosfito ([Mardonez, 2014](#)).

El ion fosfito (PO_3^-) es un ion poliatómico con un átomo central de fósforo, geométricamente es un tetraedro y el ácido conjugado del anión fosfito es el ácido fosforoso (H_3PO_3^- ; [NCBI, 2017](#)). El Phi es un análogo de fosfato (Pi) en el que un grupo hidroxilo está reemplazado por un átomo de hidrógeno ([Berkowitz et al., 2013](#)). Es usado comúnmente como fungicida y también como una fuente alternativa de fósforo (P) para el crecimiento de las plantas aún cuando no puede ser metabolizado por éstas y sus efectos ya han sido documentados ([Torres et al., 2013](#)), sin embargo, también existen informes sobre los efectos nutricionales positivos del Phi en las plantas que casi con toda seguridad se deben a la oxidación microbiana del Phi a Pi en el suelo ([Kariman et al., 2016](#)), o bien a plantas genéticamente modificadas capaces de metabolizar Phi ([López-Arredondo y Herrera-Estrella, 2013](#)).

En el presente trabajo de investigación se evaluaron los efectos del fosfito (Phi) como bioestimulante en variables de crecimiento, nutrimentales, bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis, de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Cid, sometidas a estrés salino inducido por NaCl en distintas concentraciones.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi, H_2PO_3^-) vía radical, en variables de crecimiento, nutrimentales, bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis de plántulas de tomate sometidas a estrés salino.

1.2.2. Objetivos particulares

- Determinar el efecto de la adición de fosfito (Phi, H_2PO_3^-) vía radical, en variables de crecimiento de plántulas de tomate sometidas a estrés salino.
- Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi, H_2PO_3^-) vía radical, en variables nutrimentales de plántulas de tomate sometidas a estrés salino.

- Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) vía radical, en parámetros bioquímicos y relacionados con fotosíntesis de plántulas de tomate sometidas a estrés salino.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

El tratamiento con H_2PO_3^- adicionado a la solución nutritiva, en plantas de tomate var. Cid sometidas a estrés salino inducido por NaCl, reduce el efecto negativo de éste en parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y relacionados con fotosíntesis.

1.3.2. Hipótesis particulares

- El suministro de H_2PO_3^- en la solución nutritiva empleada para el riego de plántulas de tomate var. Cid expuestas a distintas concentraciones de NaCl, mitiga los efectos negativos de la salinidad en el crecimiento.
- El tratamiento con H_2PO_3^- en la solución nutritiva a plántulas de tomate var. Cid, expuestas a distintas concentraciones de NaCl presenta un efecto positivo en las variables nutrimentales del cultivo.
- La adición de H_2PO_3^- a la solución nutritiva empleada en el riego de plántulas de tomate var. Cid, sometidas a un gradiente de salinidad inducido por NaCl, presenta un efecto positivo en las variables bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Localización geográfica del área experimental

El presente trabajo de investigación se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica perteneciente al área Nutrición Vegetal (**Figura 1.1**) del Posgrado de Edafología, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 28' latitud norte, 98° 54' latitud oeste, a una altitud de 2245 m).

Durante la fase experimental se registró una temperatura mínima promedio de 15.21 °C y una temperatura máxima promedio de 29.75 °C, con una HR media de 14.16% durante el día y de 36.58% durante la noche y un punto de rocío promedio de 9.13 °C.



Figura 1. 1 Invernadero empleado durante el desarrollo de la investigación.

1.4.2. Sustrato

El sustrato utilizado fue la perlita (**Figura 1.2**), silicato aluminico de origen volcánico y de composición variable, que depende de las características de la roca volcánica original es un material inerte, que no se descompone ni biológica ni químicamente, compuesto principalmente por SiO_2 (73-75%) y Al_2O_3 (11-13%). La perlita desde el punto de vista práctico, se puede considerar desprovista de nutrimentos, su pH es neutro o ligeramente alcalino (7-7.5) y su salinidad es muy baja; exhibe también valores muy bajos de capacidad de intercambio catiónico (1.5 a 2.5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) y una capacidad tampón para el pH también muy limitada (Nuez, 2001).



Figura 1. 2 Lavado del sustrato perlita.

La perlita proviene de rocas volcánicas vítreas (grupo de las riolitas) que se han formado por enfriamiento rápido, constituyendo un material amorfo, que contiene de un 2 a 5% de agua combinada. En su tratamiento industrial, este material se fragmenta en partículas de pequeño tamaño, se precalienta entre 300 y 400 °C, se deposita en hornos a temperaturas que oscilan entre 1000 y 1100 °C durante un corto periodo de tiempo (5 min), el agua combinada se evapora rápidamente, expandiéndose el producto (hasta 20 veces su volumen inicial) para formar un material particulado (agregados ligeros) (Nuez, 2001).

1.4.3. Material vegetal

Se utilizó semilla de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de la variedad El Cid, lote: E65175, material para investigación de la casa comercial Harris Moran (**Figura 1.3**).



Figura 1. 3 Semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad El Cid a partir de las cuales se obtuvieron las plántulas para esta investigación.

1.4.4. Descripción de tratamientos

En esta investigación, para la formulación de las seis soluciones nutritivas evaluadas, se consideró como referencia para la formulación de las soluciones nutritivas, la solución nutritiva universal de Steiner (Steiner, 1984); en este caso particular al 25% de su concentración (**Cuadro 1.1**). Las soluciones nutritivas se prepararon con agua destilada y con sales grado reactivo de las marcas Fermont, Meyer y J.T. Baker.

A las soluciones nutritivas se le adicionaron tres concentraciones de NaCl con la finalidad de inducir estrés salino: 0, 50 y 100 mM. Asimismo, en las soluciones nutritivas se agregaron dos concentraciones de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) a partir de ácido fosforoso (H_3PO_3): 0 y $0.0375 \text{ mol}_e \text{ m}^{-3}$, estas concentraciones corresponden a 0 y 15% del P total como fosfato en la solución de Steiner al 25%. El NaCl y el H_3PO_3 empleados fueron de las marcas J.T. Baker (USA) y Sigma Aldrich (Merck; Germany), respectivamente.

Cuadro 1. 1 Solución nutritiva universal de Steiner a 25% de su concentración.

Fuente	$\text{mol}_e \text{ m}^{-3}$	g L^{-1}
Nitrato de calcio tetrahidratado [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$]	2.25	0.2657
Sulfato de magnesio heptahidratado [$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$]	1.00	0.1232
Fosfato monobásico de potasio [KH_2PO_4]	0.25	0.0340
Nitrato de potasio [KNO_3]	0.75	0.0758
Sulfato de potasio [K_2SO_4]	0.75	0.0654

El pH de las soluciones nutritivas se calibró utilizando un medidor portátil de pH, conductividad y temperatura modelo PC18, México y fue ajustado a 5.5 utilizando NaOH 1 N o H_2SO_4 1 N.

1.4.5. Diseño experimental

Se utilizó un acomodo de tipo factorial 2^3 en un diseño experimental completamente al azar (DECA), en el que los niveles a evaluar fueron en:

Factor estrés salino (NaCl), en los niveles 0, 50 y 100 mM de NaCl adicionados a la solución nutritiva.

Factor fosfito (Phi), en los niveles 0 y $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ Phi a partir de H_3PO_3 y adicionados a la solución nutritiva.

Se obtuvieron seis tratamientos del acomodo factorial (**Figura 1.4**), para cada tratamiento se colocaron 14 repeticiones obteniéndose un total de 84 unidades experimentales las cuales fueron vasos de plástico individuales (Bosco™) con una capacidad de 60 mL cada uno.



Figura 1. 4 Acomodo de tratamientos 2^3 tipo factorial.

El modelo estadístico empleado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

$$\sim NIID(0, \sigma)$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, a$. Número de niveles el factor A.

$j = 1, 2, \dots, b$. Número de niveles del factor B.

$k = 1, 2, \dots, r$. Número de repeticiones de cada combinación A*B.

Y_{ijk} = Valor de la variable respuesta correspondiente con la repetición k del nivel i de A al nivel j de B.

μ = Media general.

A_i = Efecto del nivel i de A.

B_j = Efecto del nivel j de B.

AB_{ij} = Interacción A*B, correspondiente al nivel i de A y nivel j de B.

ϵ_{ijk} = Error experimental correspondiente a la repetición k del nivel i de A al nivel j de B.

1.4.6. Manejo del experimento

La aplicación de tratamientos inició el 18 de junio de 2016 y finalizó el 8 de julio de 2016. Durante ese tiempo se aplicaron tres riegos diarios de 50 mL cada uno a cada unidad experimental.

1.4.7. Variables evaluadas

1.4.7.1. Parámetros de crecimiento

Después de 21 días de aplicación de tratamientos (8 de julio de 2016) se determinaron las variables siguientes:

- Número de hojas, número de botones florales y número de flores.
- Altura de planta y longitud de raíz se determinaron usando una regla de 50 cm.
- Volumen de raíz, mediante el método de desplazamiento de volumen usando una probeta de vidrio (Pyrex) de 250 mL.
- Diámetro de tallo con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, México).
- Área foliar por planta con un integrador (LI-COR, LI-300, Lincoln, NE, EEUU).
- Pesos de biomasa fresca de raíz, tallos y hojas empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).
- Pesos de biomasa seca de raíz, tallos y hojas. Se determinó en muestras secadas durante 48 h a 70 °C en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-

125D, México), empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).

1.4.7.2. Concentración y acumulación de nutrimentos y de Na

Se determinó la concentración de N en los distintos órganos de la planta (raíz, tallo y hojas), empleando el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965).

Asimismo, en los órganos antes indicados se determinaron las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y Na, en el extracto resultante de la digestión húmeda del material seco con HNO₃ y HClO₄ de acuerdo a lo descrito por Alcántar y Sandoval (1999). Los extractos se leyeron en un equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma Varian 725 ES ICP (Agilent, ICP Optical Emission Spectrometer, 725-ES, USA). Para la determinación de la concentración de cloruro en tejidos vegetales se realizó digestión húmeda de las muestras con HNO₃ y H₂O₂; en el extracto resultante se realizó el método turbidimétrico empleando AgNO₃ al 10% y se leyó la absorbancia a 400 nm en un espectrofotómetro UV (Milton Roy, Spectronic 20+, USA).

Las acumulaciones de nutrimentos y Na se estimaron considerando las concentraciones de éstos y los pesos de biomasa seca del órgano en particular.

1.4.7.3. Concentración de biomoléculas

Después de 21 días de tratamiento (8 de julio de 2016) las muestras de raíz, tallo y hoja de plántulas de tomate se almacenaron a una temperatura de -20 °C en un congelador (COOL-LAB, LAB-LINE INSTRUMENTS, USA). En estas muestras se realizaron las siguientes determinaciones:

- Concentración foliar de clorofila a, b y total. Se realizó por el método descrito por Harborne (1973), se midieron absorbancias a 645 y 665 nm usando un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell changer y UK). Con los resultados se realizan las estimaciones de clorofilas utilizando las formulas siguientes:

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g/mg peso fresco}) = (5.46 \times \text{Abs}_{665}) - (2.16 \times \text{Abs}_{645})$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g/mg peso fresco}) = (9.67 \times \text{Abs}_{645}) - (3.04 \times \text{Abs}_{665})$$

- Aminoácidos libres totales en hoja. Se realizó una extracción etanólica siguiendo la metodología de [Geiger *et al.* \(1998\)](#) y se empleó el método de la ninhidrina ([Moore y Stein, 1954](#)). Se utilizó leucina para la elaboración de la curva estándar y se leyó a una longitud de onda de 570 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell changer y UK).
- Concentración de prolina. La extracción de prolina en hojas se llevó a cabo con ácido sulfosalicílico (C₇H₆O₆S) al 3% y su estimación se realizó siguiendo la metodología propuesta por [Bates *et al.* \(1973\)](#) utilizándose 200 mg de material vegetal liofilizado y tolueno como blanco.

1.4.7.4. Parámetros relacionados con fotosíntesis

Después de 20 días de tratamientos (7 de junio de 2016) entre 8:30 y 11:30 h, en la cuarta hoja de arriba hacia abajo de la planta, se realizaron las mediciones siguientes, empleando un analizador de gases en infrarrojo (IRGA) (LICOR, LI-6400XT, USA):

- Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Conductancia estomática al agua ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Concentración de CO₂ intercelular ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)
- Tasa de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

1.4.8. Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$), corroborando antes que se cumplieran los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianza. Debido a que algunas variables no cumplían con el supuesto de normalidad se recurrió al método de transformación por rangos propuesto por [Conover e Iman \(1981\)](#) para lo cual se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis System 9.0 y SAS University Edition ([SAS Institute Inc., 2011](#)).

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1. Parámetros de crecimiento

1.5.1.1. Número de hojas, de botones florales y de flores

Los datos de número de hojas no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 1.5A y 1.5B**); por tanto, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se tiene evidencia suficiente para concluir que existe un incremento significativo en cuanto el número de hojas por plántulas de tomate tratadas con Phi, respecto al testigo sin Phi (**Figura 1.5a**). Asimismo, la concentración de NaCl en la solución nutritiva no afectó el número de hojas de plántulas de tomate (**Figura 1.5b**); contrario a resultados obtenidos en otras investigaciones, como la de [Li et al. \(2015\)](#), quienes reportan una notable disminución en el número de hojas y en el área foliar de plantas de tomate bajo una concentración de 150 mM de estrés salino, comparado con el tratamiento testigo.

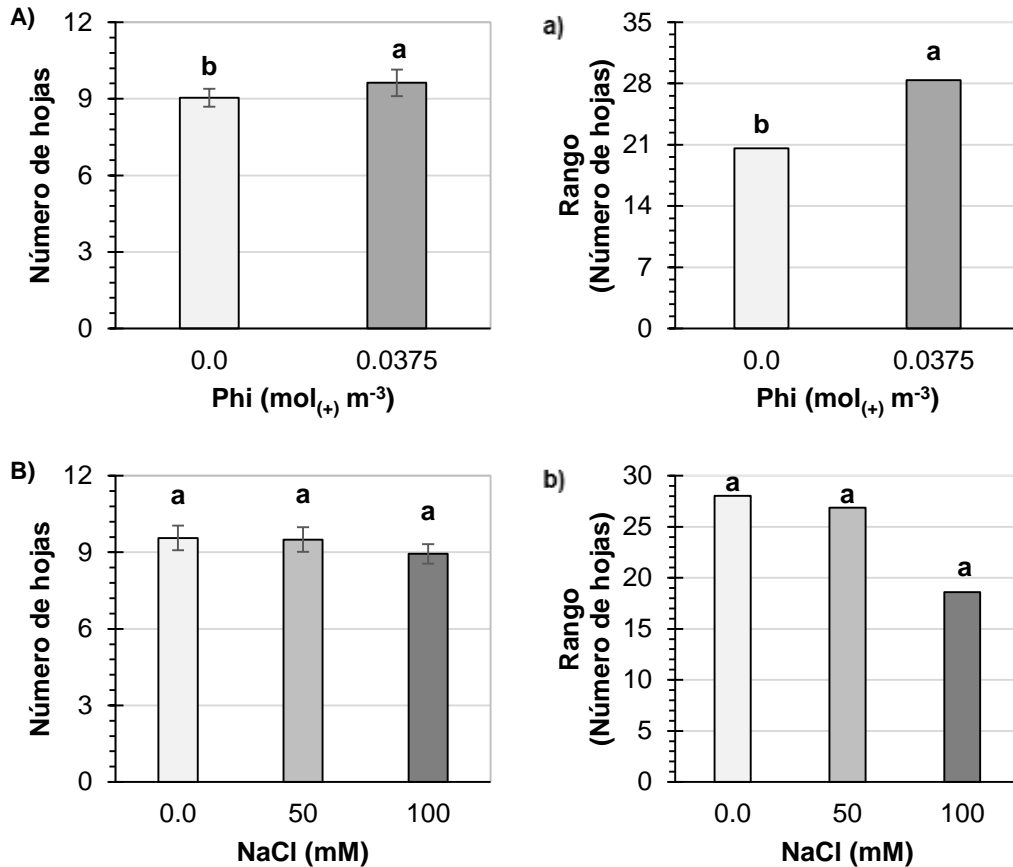


Figura 1. 5 Número de hojas por plántula de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.0250$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0256$)] y NaCl [B: medias ($P=0.0936$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0547$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

El número de botones florales (**Figuras 1.6A y 1.6B**) y de flores (**Figuras 1.7A y 1.7B**) por planta no fue afectado por los tratamientos con Phi y NaCl en la solución nutritiva. Por el contrario, [Gong et al. \(2013\)](#) reportan disminuciones significativas de los brotes florales de plántulas de tomate tratadas durante 5 y 10 días tanto con NaCl como con NaHCO₃ a concentraciones de 25, 50, 75 y 100 mM, respecto al testigo.

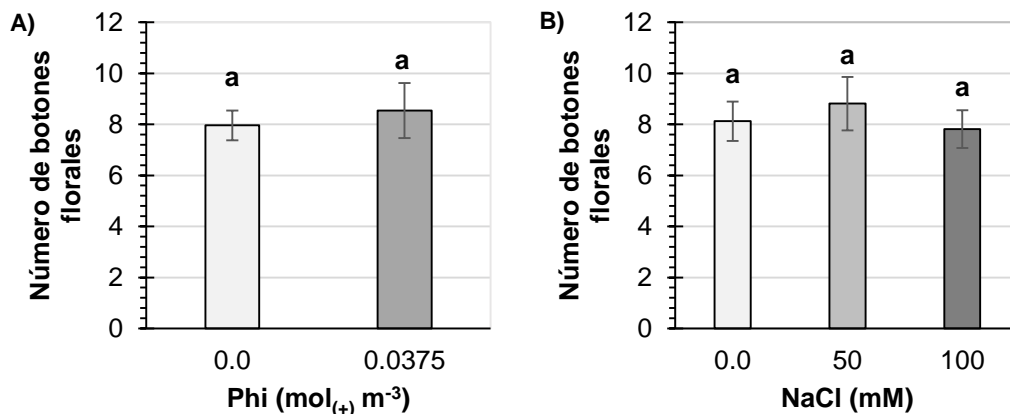


Figura 1. 6 Número de botones florales por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.2457$), NaCl ($P=0.2528$).

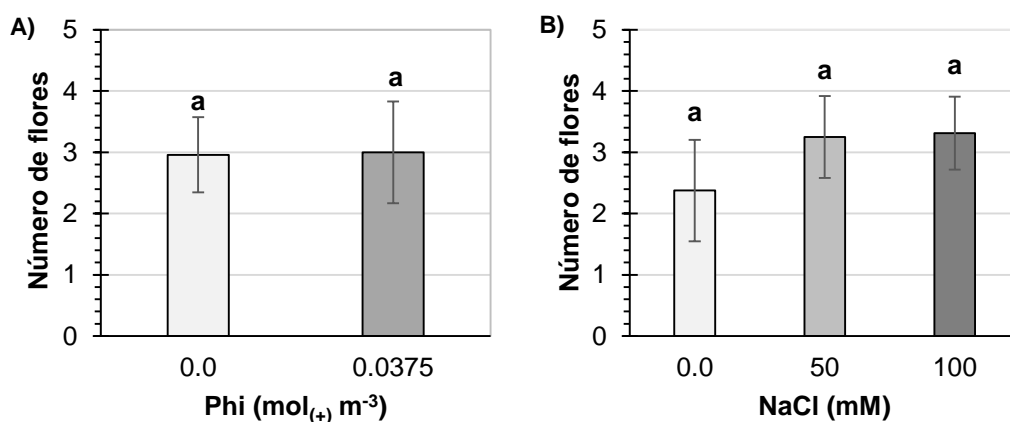


Figura 1. 7 Número de flores por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.9209$), NaCl ($P=0.1343$).

En lo que se refiere a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NaCl en la solución nutritiva), no se posee evidencia suficiente para afirmar que ésta tiene efectos significativos en los números de hojas, de botones florales y de flores en plántulas de tomate (**Cuadro 1.2**).

Cuadro 1. 2 Número de hojas, botones florales y flores en plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	NaCl (mM)	Número de hojas	Rango (Número de hojas ^δ)	Número de botones florales	Número de flores
0.0000	0	9.38 ± 0.46 a	25.688 ab	8.00 ± 0.85 a	2.63 ± 0.84 a
0.0375	0	9.75 ± 0.52 a	30.375 ab	8.25 ± 0.74 a	2.13 ± 0.86 a
0.0000	50	9.00 ± 0.27 a	20.250 ab	8.00 ± 0.38 a	3.25 ± 0.44 a
0.0375	50	10.00 ± 0.53 a	33.500 a	9.63 ± 1.36 a	3.25 ± 0.88 a
0.0000	100	8.75 ± 0.23 a	15.875 b	7.88 ± 0.50 a	3.00 ± 0.53 a
0.0375	100	9.13 ± 0.50 a	21.313 ab	7.75 ± 0.95a	3.63 ± 0.65 a
Pr > F		0.0565	0.0400	0.2796	0.3808
DMS ^ψ		1.2978	17.412	2.56	2.16
CV ^φ		9.3155		20.81	48.48

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.1.2. Área foliar

Los datos de área foliar no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.8A y 1.8B**). Por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el Phi no tuvo influencia significativa en el área foliar por planta (**Figura 1.8a**). Estos resultados concuerdan con lo reportado por [Bachiega et al. \(2017\)](#) en su investigación en árboles de naranja de 18 meses de edad bajo un manejo hidropónico con deficiencia (PD) y suficiencia de fósforo (PS), tratados con pulverizaciones foliares preparadas a partir de una solución madre que consistía en 0.16 M P adicionando 1 M de fosfato de potasio (KH₂PO₄, Pi), 1 M de fosfito de potasio (KH₂PO₃, Phi) y un control de cloruro de potasio (KCl, 0.16 M), en condiciones controladas cada 15 días durante dos meses. En este estudio no existió evidencia suficiente para demostrar que el Phi tuviera efecto en el área foliar de árboles de naranja en condiciones de PS; el efecto contrario fue observado en condiciones de PD, donde las aplicaciones de Phi y KCl afectaron negativamente el área foliar de naranja.

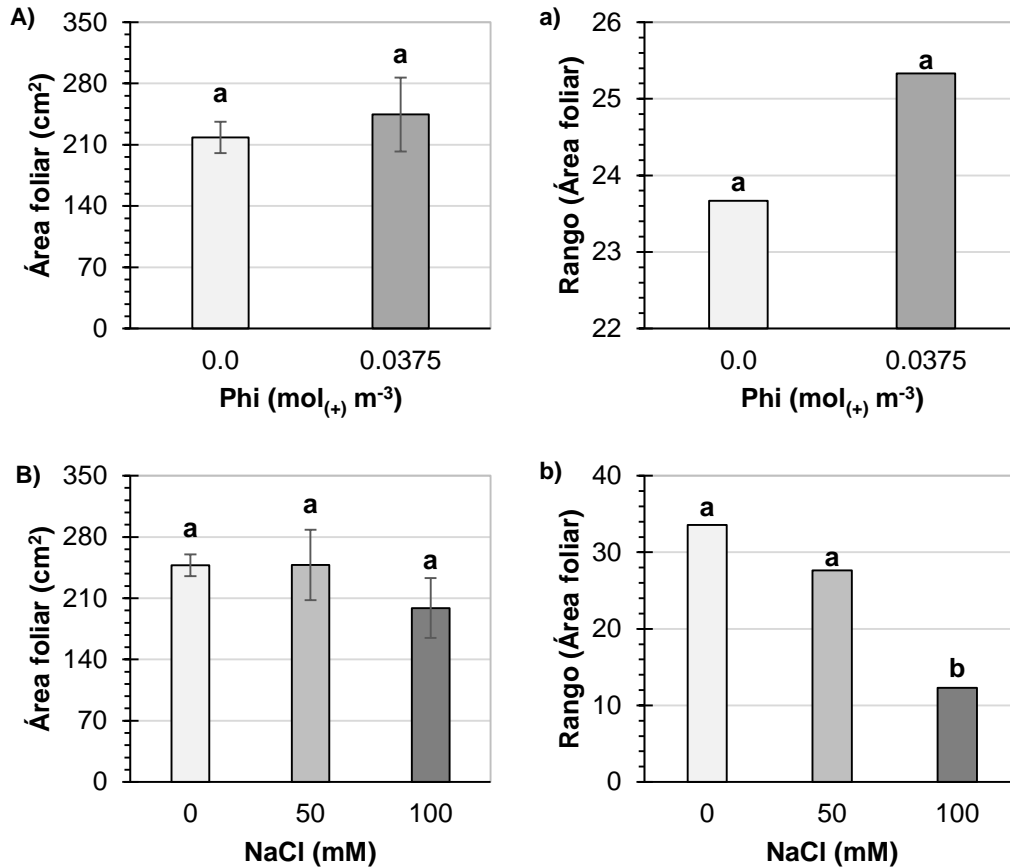


Figura 1. 8 Área foliar de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.1437$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.5896$)] y NaCl [B: medias ($P=0.0415$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

Por otro lado, se concluye que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva, disminuye significativamente el área foliar por plántula (**Figura 1.8b**). Resultados que coinciden con lo observado por [Casierra-Posada et al. \(2017\)](#) donde la salinidad afectó significativamente el tamaño de las hojas en plantas de sisal (*Furcraea* spp.) mostrando una reducción inversamente proporcional al aumentarse la concentración de NaCl en 30, 60 y 90 mM en el sustrato.

En lo que se refiere a la interacción de Phi y NaCl, no se posee evidencia suficiente para afirmar que ésta fue significativa en el área foliar de plántulas de tomate (**Cuadro 1.3**).

Cuadro 1. 3 Área foliar por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl (mM) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Área foliar (cm ²)	Rango (Área foliar ^δ)
0.0000	0	256.11 ± 8.78 ab	37.375 a
0.0375	0	239.11 ± 14.72 ab	29.750 ab
0.0000	50	223.34 ± 4.58 ab	26.000 ab
0.0375	50	272.78 ± 55.66 a	29.250 ab
0.0000	100	175.58 ± 6.17 b	7.625 c
0.0375	100	222.00 ± 46.37 ab	17.000 bc
Pr > F		0.0513	<0.0001
DMS ^ψ		91.215	15.855
CV ^φ		26.3991	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.1.3. Peso fresco y seco de hojas

Los efectos principales de Phi y NaCl no afectaron de manera significativa el peso fresco de hojas de plántulas de tomate (**Figuras 1.9A y 1.9B**). Algunos investigadores como [Manna et al. \(2015\)](#), han demostrado que el aumento de las concentraciones externas de Phi tienen un impacto negativo en el peso fresco de la plántulas de arroz utilizando KH_2PO_4 y $\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ como fuente principal de P a concentraciones de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 mM, durante 15 d de tratamiento y a una temperatura controlada de 25 °C.

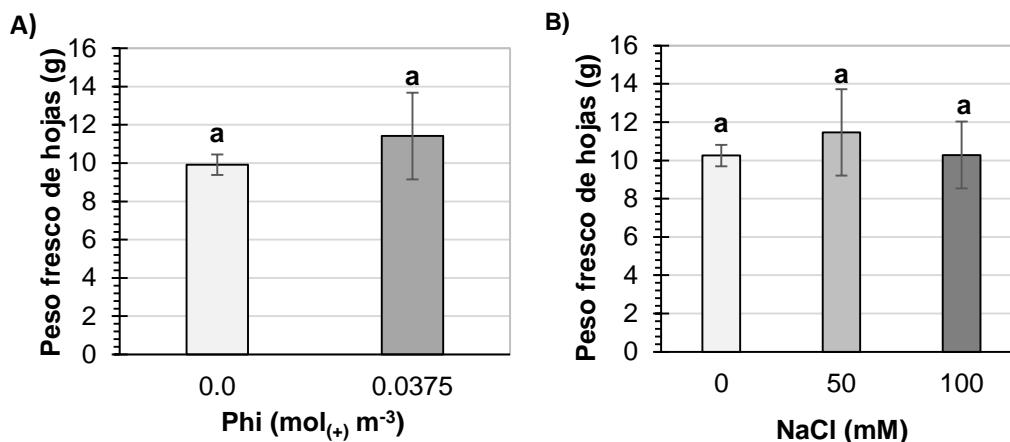


Figura 1. 9 Peso fresco de hojas por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.1250$), NaCl ($P=0.5058$).

Los datos de peso seco de hoja no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.10A y 1.10B**). Por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso seco de hoja por planta (**Figura 1.10a**), coincidiendo con lo reportado por [Bachiega et al. \(2017\)](#) en su investigación en árboles de naranja de 18 meses de edad bajo un manejo hidropónico con deficiencia (PD) y suficiencia de fósforo (PS), donde existió una disminución significativa en el peso seco de hojas tratadas con Phi bajo deficiencia de fósforo, pero no se observó alguna diferencia estadística significativa en arboles con suficiencia de fosforo.

Por otra parte, se observó que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente el peso seco de hoja en plántulas de tomate (**Figura 1.10b**), confirmando lo documentado por parte de [Michele et al. \(2016\)](#), donde el incremento en la concentración salina de 0.0, 300, 450 y 600 mM de NaCl en la solución nutritiva afectó de manera significativa y negativa el peso fresco y seco de las hojas, al igual que el peso fresco de tallo de dos variedades distintas de tomate (Ciettaicale y San Marzano).

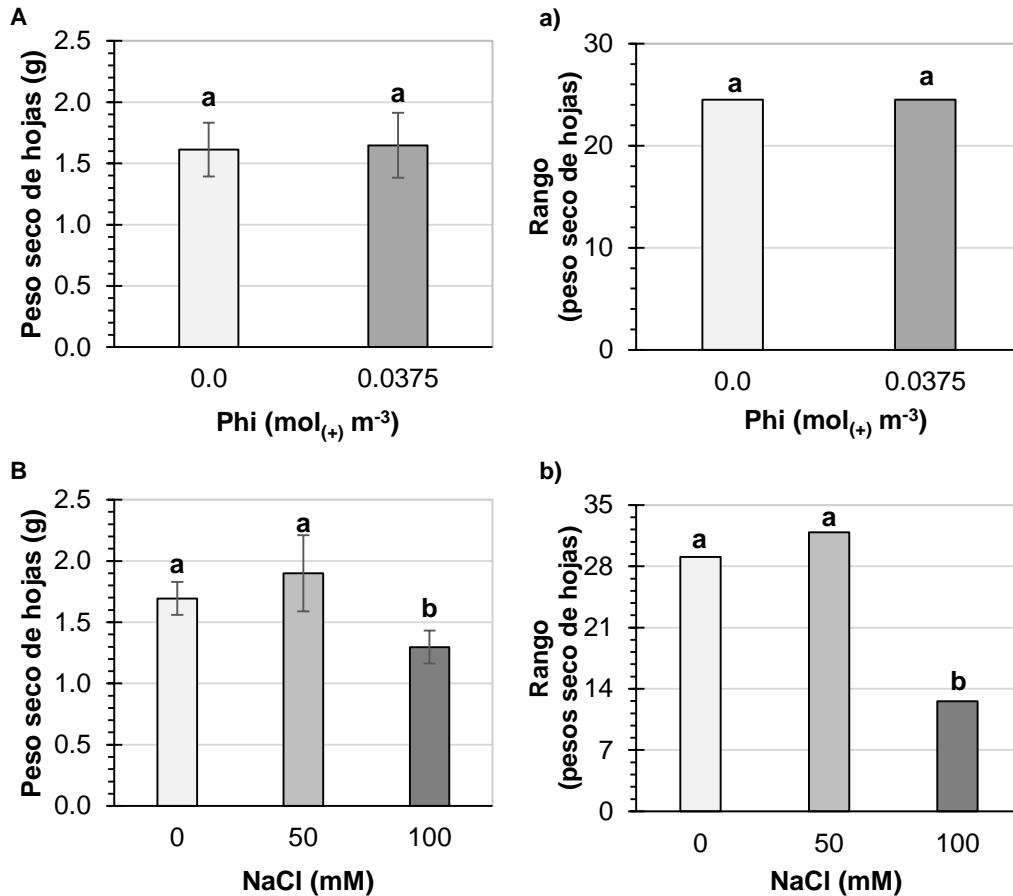


Figura 1. 10 Peso seco de hojas por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.7870); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=1)] y NaCl [B: medias (P=0.0010); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias \pm DE con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P \leq 0.05).

La interacción de Phi y NaCl no fue significativa en los pesos fresco y seco de hojas de plántulas de tomate, pero se puede apreciar que en ausencia de salinidad, el Phi provoca una disminución de las variables estudiadas; por el contrario, se observa que al inducirse estrés salino, el Phi incrementó dichas variables en comparación con los tratamientos sin Phi (**Cuadro 1.4**).

Cuadro 1. 4 Peso fresco y seco de hojas por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Peso fresco de hojas (g)	Peso seco de hojas (g)	Rango (Peso seco de hojas ^δ)
0.0000	0	10.521 ± 0.60 a	1.786 ± 0.16 ab	31.750 ab
0.0375	0	9.997 ± 0.53 a	1.601 ± 0.10 ab	26.375 ab
0.0000	50	10.146 ± 0.39 a	1.904 ± 0.20 a	35.375 a
0.0375	50	12.779 ± 3.13 a	1.894 ± 0.42 a	28.375 ab
0.0000	100	9.099 ± 0.34 a	1.149 ± 0.06 b	6.375 c
0.0375	100	11.470 ± 2.38 a	1.445 ± 0.15 ab	18.750 bc
Pr > F		0.3181	0.0002	<0.0001
DMS ^ψ		4.9334	0.6395	15.964
CV ^φ		30.98	26.27	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.1.4. Peso fresco y seco de tallo

Los datos de peso fresco de tallo no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.11A y 1.11B**). La metodología de transformación por rangos de Conover-Iman mostró que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso fresco de tallo por planta (**Figura 1.11a**). Asimismo, se observó que el aumento en la concentración de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente el peso fresco de tallo en plántulas de tomate (**Figura 1.11b**).

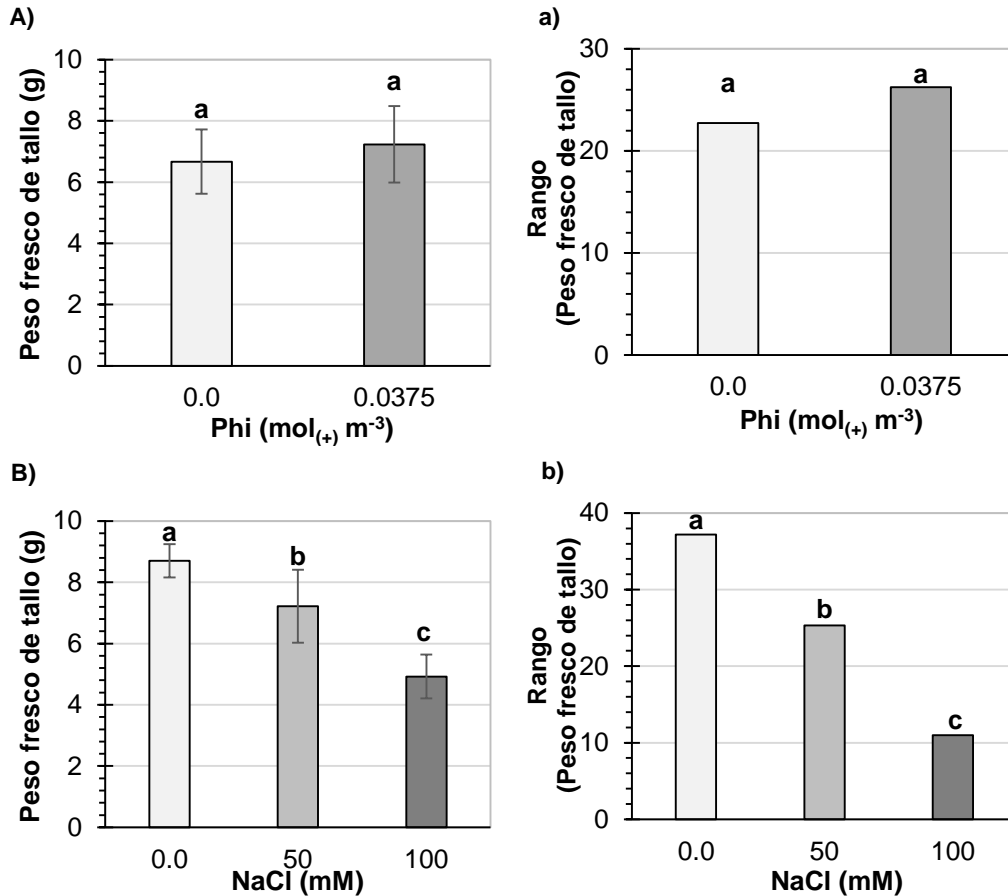


Figura 1. 11 Peso fresco de tallo de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.2437$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1730$)] y NaCl [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

Los datos de peso seco de tallo no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.12A y 1.12B**); por tanto, se aplicó en éstos la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman, misma que mostró que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso seco de tallo por planta (**Figura 1.12a**), y que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente el peso seco de tallo en plántulas de tomate (**Figura 1.12b**).

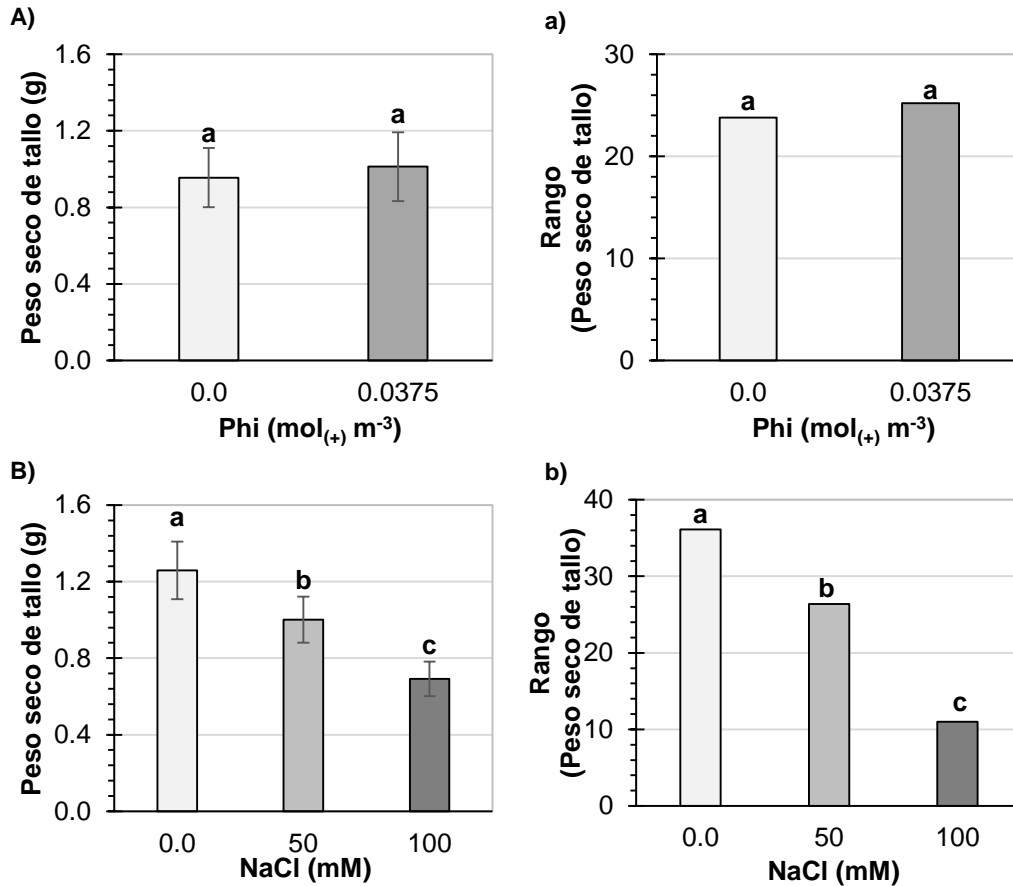


Figura 1. 12 Peso seco de tallo de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.4335$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.6023$)] y NaCl [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

En lo que refiere a la interacción de Phi y NaCl en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto al peso fresco y peso seco de tallo de plántulas de tomate, pero se puede apreciar que al inducir un estrés salino el Phi provoca un incremento en dichas variables en comparación con los niveles a los que no se les adicionó como bioestimulante (**Cuadro 1.5** y **1.6**).

Cuadro 1. 5 Pesos fresco del tallo de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	NaCl (mM)	Peso fresco de tallo (g)	Rango (Peso fresco de tallo ^δ)
0.0000	0	9.17 ± 0.51 a	39.25 a
0.0375	0	8.24 ± 0.50 a	35.13 a
0.0000	50	6.44 ± 0.24 bc	21.88 bc
0.0375	50	8.01 ± 1.62 ab	28.75 ab
0.0000	100	4.39 ± 0.19 d	7.13 d
0.0375	100	5.45 ± 0.95 cd	14.88 cd
Pr > F		<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		2.4797	13.054
CV ^φ		23.90793	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 1. 6 Pesos seco del tallo de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	NaCl (mM)	Peso seco de tallo (g)	Rango (Peso seco de tallo ^δ)
0.0000	0	1.285 ± 0.11 a	39.250 a
0.0375	0	1.233 ± 0.19 a	33.000 ab
0.0000	50	0.960 ± 0.07 abc	24.750 bc
0.0375	50	1.042 ± 0.16 ab	28.000 abc
0.0000	100	0.621 ± 0.04 c	7.375 d
0.0375	100	0.762 ± 0.12 bc	14.625 cd
Pr > F		<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		0.3743	13.95
CV ^φ		25.48	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.1.5. Peso fresco y seco de raíz

Los datos de peso fresco de raíz de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.13A y 1.13B**). La metodología de transformación por rangos de Conover-Iman muestra que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso fresco de raíz por planta (**Figura 1.13a**); por el contrario, algunos investigadores como [Manna et al. \(2015\)](#), reportaron que el incremento en la concentración externa de Phi afectó de manera negativa el peso fresco de raíz de plántulas de arroz utilizando KH_2PO_4 y $\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ como fuente principal de P a concentraciones de 5, 10, 15, 20, 25 mM, durante 15 d de tratamiento y a una temperatura controlada de 25 °C. De igual manera, [Berkowitz et al. \(2013\)](#) en su investigación observaron que la acumulación de Phi tuvo un efecto más pronunciado en la disminución del peso fresco de las raíces que en el peso fresco de la parte aérea en todos los tratamientos.

Por otra parte, los resultados observados en la **Figura 1.13b** muestran que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva, disminuye significativamente el peso fresco de raíz en plántulas de tomate.

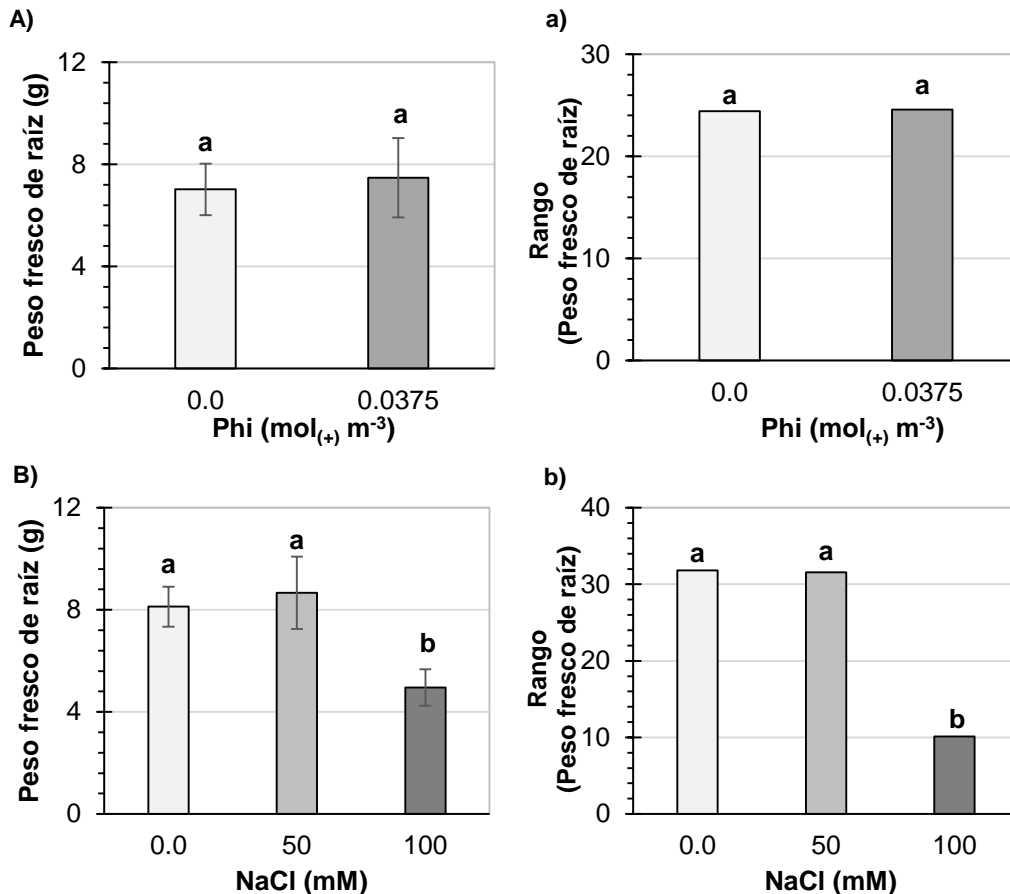


Figura 1. 13 Peso fresco de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.4091$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.9497$)] y NaCl [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

Los datos de peso seco de raíz de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.14A y 1.14B**); por tanto, mediante la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se demuestra que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso seco de raíz por planta (**Figura 1.14a**). Por el contrario, [Rossall et al. \(2016\)](#) reportaron que el Phi promueve el crecimiento de raíz en una amplia variedad de plantas como trigo, colza de semilla oleaginosa y remolacha azucarera en suelo, ya que obtienen un aumento significativo de la biomasa de las raíces después del tratamiento con Phi. Otros investigadores como [Bachiega et al. \(2017\)](#) observaron en árboles de naranja que bajo condiciones de suficiencia de fósforo en la solución nutritiva, las pulverizaciones foliares de Pi, KCl

y Phi no lograron afectar de manera significativa el peso seco de la raíz, mientras que bajo deficiencias de fósforo en la solución nutritiva el Phi produjo la mayor pérdida de peso de las raíces estudiadas.

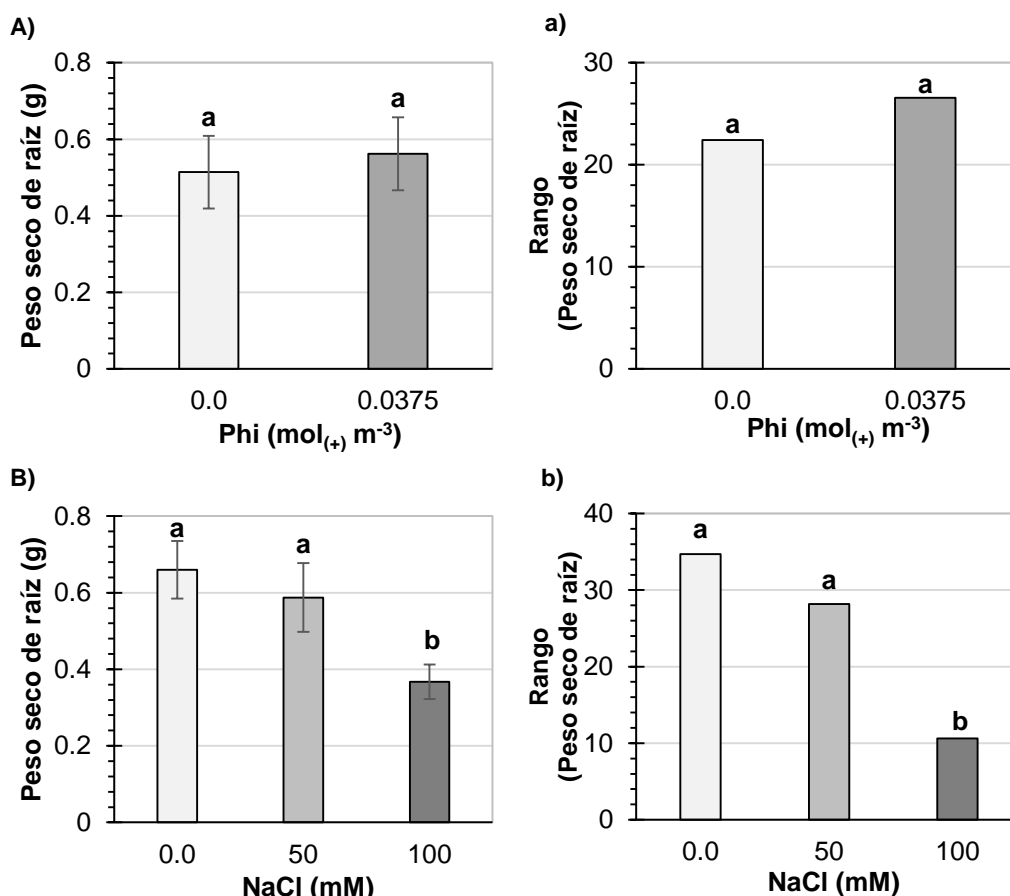


Figura 1. 14 Peso seco de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.2601); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.1413)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Por otra parte, en la **Figura 1.14b** se observa que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente el peso seco de raíz en plántulas de tomate, que corresponde a lo observado por [Gong et al. \(2013\)](#), quienes reportan disminuciones significativas en la biomasa de raíz de plántulas de tomate tratadas durante 5 y 10 d de tratamiento bajo concentraciones de 25, 50, 75 y 100 mM de NaCl al igual que 25, 50, 75 y 100 mM de NaHCO₃.

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NaCl) en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto al peso fresco; por otra parte, en lo que refiere al peso seco de raíz de plántulas de tomate se puede apreciar que al inducir un estrés salino el Phi provoca un incremento positivo en dichas variables en comparación con los niveles a los que no se adicionó como bioestimulante (**Cuadro 1.7**), sin que este incremento sea estadísticamente significativo.

Cuadro 1. 7 Pesos fresco y seco de raíz de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Peso fresco raíz (g)	Rango (Peso fresco raíz ^δ)	Peso seco raíz (g)	Rango (Peso seco raíz ^δ)
0.0000	0	8.907±0.88 a	36.750 a	0.697±0.11 a	35.563 a
0.0375	0	7.338±0.43 ab	26.875 a	0.622±0.03 a	33.813 a
0.0000	50	7.281±0.42 ab	26.625 a	0.508±0.04ab	23.750 ab
0.0375	50	10.055±1.75 a	36.500 a	0.666±0.12 a	32.625 a
0.0000	100	4.875±0.27 b	9.875 b	0.336±0.01 b	8.000 c
0.0375	100	5.028±1.02 b	10.375 b	0.397±0.07 b	13.250 bc
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		2.8074	13.568	0.217	14.226
CV ^φ		25.95011		27.01	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.1.6. Altura de planta y diámetro de tallo

El Phi adicionado a la solución nutritiva no tuvo efecto significativo en la altura de plántulas de tomate tratadas, respecto al testigo (**Figura 1.15A**). Por el contrario, algunas investigaciones como la realizada por [Manna et al. \(2015\)](#) demostraron que el aumento de las concentraciones externas de Phi tienen un impacto negativo en el crecimiento de la plántulas de arroz cuando se utilizó KH₂PO₄ o Na₂HPO₃·5H₂O a concentraciones de 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 mM, durante 15 d de tratamiento a una temperatura controlada de 25 °C.

Por otra parte, en la **Figura 1.15B** se observa que conforme incrementa la concentración desde 0 a 50 y 100 (mM) de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente la altura de plántulas de tomate, con reducciones de 11.82 y 31.26%, respectivamente. [Han et al. \(2016\)](#) al evaluar la altura de plantas de tomate 34 días después de la siembra observaron reducción en el crecimiento de 15.8, 17.9 y 31.6% en los tratamientos consistentes en agua óptima + 100 mM de NaCl, agua limitada y agua limitada + 100 mM de NaCl, respectivamente, en comparación con el testigo consistente en cantidad óptima de agua y sin salinidad.

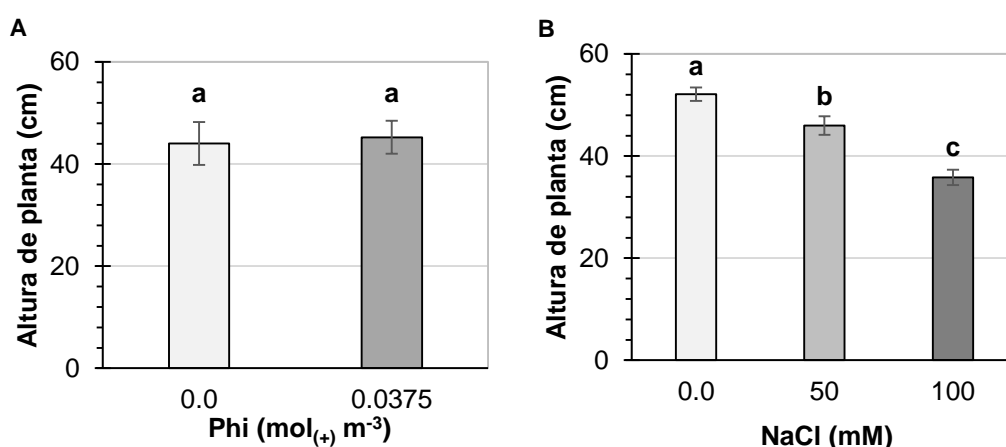


Figura 1. 15 Altura de planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.1374$), NaCl ($P < 0.0001$).

No existieron efectos significativos en el diámetro de tallos de plántulas de tomate tratadas con Phi, respecto al testigo (**Figura 1.16A**). Estudios realizados por [López-Arredondo et al. \(2013\)](#) demuestran que al evaluar previamente líneas transgénicas que expresan el gen bacteriano codificando una fosfito oxidoreductasa (PTXD) observaron diferencias notables entre plantas silvestres y transgénicas en medios que contienen Phi, por lo que decidieron utilizarlo como un marcador dominante seleccionable utilizando Phi como agente selectivo para evaluar la sensibilidad de las plantas de *Arabidopsis* a Phi y así determinar la cantidad mínima y máxima de bioestimulante que se podría utilizar cultivando semillas en un medio sólido que contenía una concentración de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3 y 5 mM Phi como la única

fente de P, y bajo todas las concentraciones de Phi probadas se observó una inhibición efectiva en el crecimiento de plantas silvestres como se informó anteriormente; asimismo, las plántulas silvestres mostraron efectos negativos inducidos por Phi incluyendo amarillamiento de hojas, tallos raquíticos, raíces primarias cortas y raíces laterales muy cortas o abortadas. Incluso en las concentraciones de Phi más bajas, el crecimiento de plantas silvestres fue detenido en la etapa cotiledonar o de 4 hojas, y las plantas murieron de 10 a 12 días después de la germinación; por el contrario, plantas transgénicas mostraron un vigoroso crecimiento en todas las concentraciones de Phi, sin diferencias notables entre las líneas con alta o baja expresión. También se observaron efectos selectivos de Phi para semillas germinadas en medio líquido suplementado con 0.05, 0.1 y 1 mM de Phi para las cuales la concentración más baja fue suficiente para matar plantas silvestres durante 7 u 8 días después de germinación.

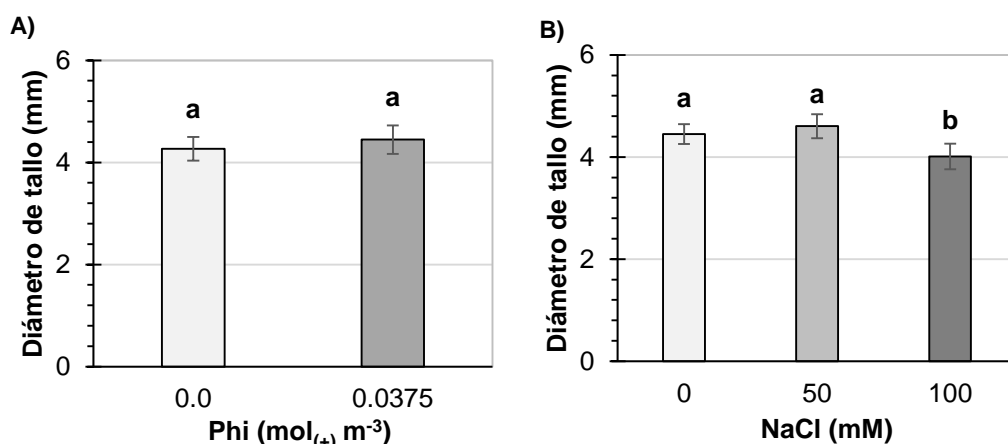


Figura 1. 16 Diámetro de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.1868$), NaCl ($P=0.0022$).

Caso contrario al documentado por [Bachiega et al. \(2017\)](#) donde en condiciones de suficiencia de fósforo (SP) en la solución nutritiva de árboles de naranja las pulverizaciones foliares de Pi, KCl y Phi no lograron afectar de manera significativa el diámetro de tallo, efecto contrario al observado bajo deficiencias de fósforo (DP) donde el Phi produjo la mayor reducción de diámetro de tallo.

Por otro lado, el tratamiento con 100 mM NaCl provoca una reducción significativa del tallo respecto al testigo; ésta del orden de 31.26% (**Figura 1.16B**).

La interacción de Phi y NaCl no tuvo influencia significativa en la altura de planta y diámetro de tallo de plántulas de tomate; pero se puede apreciar que al inducir un estrés salino el Phi provoca un aumento en dichas variables en comparación con los niveles a los que no se les adicionó como bioestimulante (**Cuadro 1.8**).

Cuadro 1. 8 Altura de planta y diámetro de tallo de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	NaCl (mM)	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)
0.0000	0	53.68 ±0.98 a	4.34 ±0.18 ab
0.0375	0	50.60 ±1.16 ab	4.56 ± 0.21 a
0.0000	50	44.40 ±1.44 c	4.62 ±0.22 a
0.0375	50	47.55 ±1.93 bc	4.60 ±0.27 a
0.0000	100	34.08 ±0.50 d	3.85 ±0.11 b
0.0375	100	37.60 ±1.72 d	4.18 ±0.33 ab
Pr > F		<0.0001	0.0108
DMS ^ψ		4.0973	0.6919
CV ^φ		6.1478	10.6405

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.1.7. Longitud y volumen de raíz

Los efectos principales del Phi y NaCl no fueron significativos en la longitud de raíz de plántulas de tomate (**Figuras 1.17A y 1.17B**). Algunos investigadores como son [Jost et al. \(2015\)](#) observaron que en plántulas de *Arabidopsis* sembradas en medios con deficiencia y suficiencia de P, las raíces crecieron a tasas similares, pero las raíces primarias de las plántulas tratadas en un medio con Phi mostraron tasas de

crecimiento mucho más bajas durante un periodo de 11 d y la elongación cesó completamente en las 48 h siguientes.

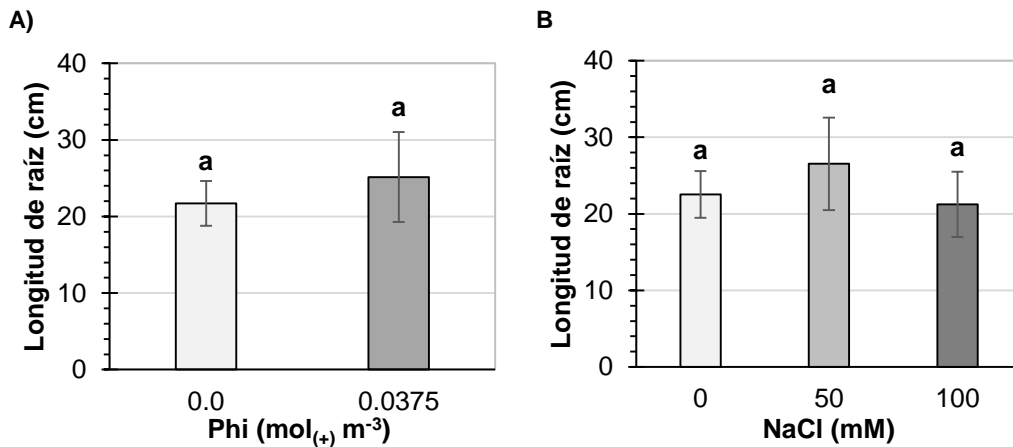


Figura 1. 17 Longitud de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.2063$), NaCl ($P=0.2496$).

Los datos de volumen de raíz de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 1.18A y 1.18B**). Por lo anterior, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el fosfito tuvo influencia significativa en el volumen de raíz por planta, respecto al testigo sin fosfito (**Figura 1.18a**). Por otra parte, se observó que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente el volumen de raíz en plántulas de tomate (**Figura 1.18b**).

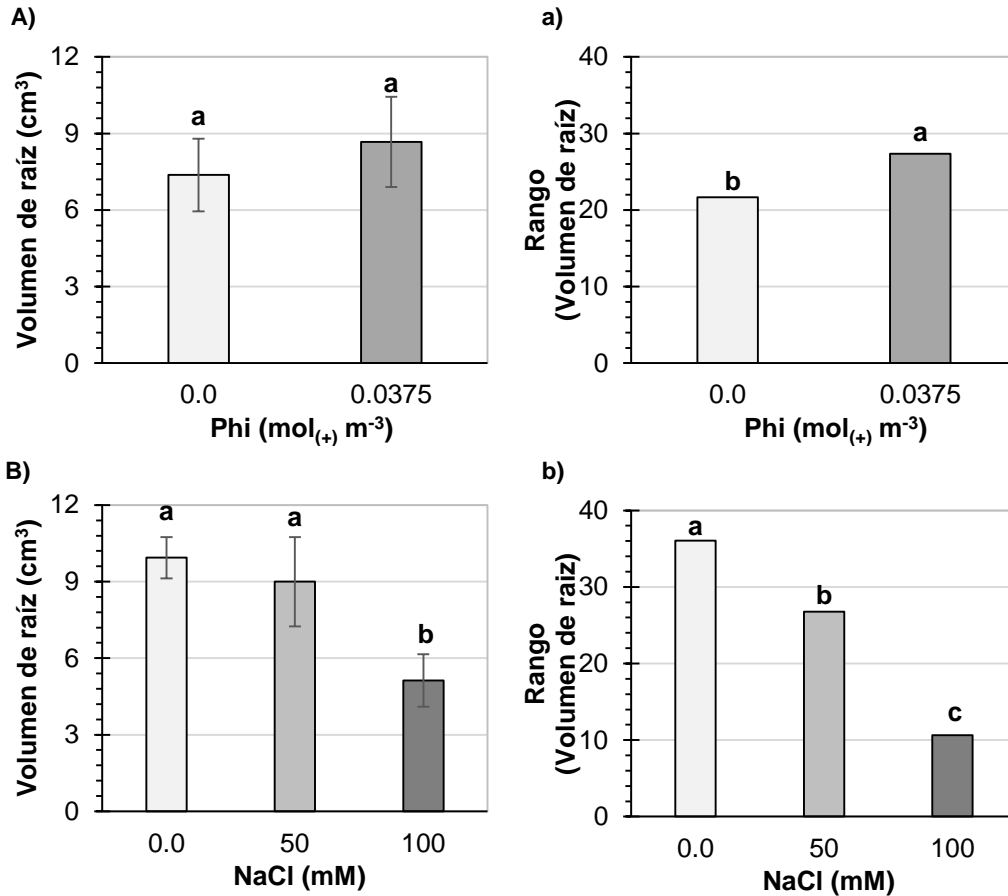


Figura 1. 18 Volumen de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.2036$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0251$)] y NaCl [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

Los efectos interactivos de los factores de estudio fosfito y NaCl no tuvieron efectos significativos en la longitud y volumen de raíz de plántulas de tomate, pero se puede apreciar una tendencia positiva en estas variables al inducir estrés salino con la adición de Phi (**Cuadro 1.9**).

Cuadro 1. 9 Longitud raíz y volumen raíz de plantas tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Longitud raíz (cm)	Volumen raíz (cm ³)	Rango (Volumen raíz ^δ)
0.0000	0.0	22.613±3.36 a	10.375±1.10 a	36.875 a
0.0375	0.0	22.475±2.97 a	9.500±0.27 a	35.250 a
0.0000	50	22.538±2.19 a	7.375±0.46 ab	21.188 bc
0.0375	50	30.525±8.02 a	10.625±2.20 a	32.375 ab
0.0000	100	20.013±3.27 a	4.375±0.37 b	6.938 d
0.0375	100	22.463±5.22 a	5.875±1.135 b	14.375 cd
Pr > F		0.3110	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		13.746	3.5109	12.618
CV ^φ		39.2921	29.3258	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.2. Concentración foliar de nutrimentos y sodio

1.5.2.1. Concentración foliar de macronutrimentos

En el **Cuadro 1.10** se observa que existe un incremento significativo en la concentración de Mg y S con la aplicación de Phi, estos aumentos son del 5.88 y 7.84% en comparación con el testigo; asimismo se observa un efecto negativo del Phi en la concentración foliar de P de plántulas de tomate, al reducirla en 5.76%, respecto al testigo. En este contexto, [Lopes et al. \(2016\)](#) reportaron que aplicaciones foliares de Phi a plántulas de frijol bajo niveles óptimos de P en la solución nutritiva, mostraba una reducción significativa en la acumulación de Mg y P en hojas comparado con las aplicaciones de Pi y KCl. Por otra parte, [Manna et al. \(2015\)](#) cuantificaron la acumulación de iones Pi y Phi en hojas de plantas de arroz crecidas en medios con relaciones de Pi/Phi con valores de 0 a 50 mM a partir de KH₂PO₄ y Na₂HPO₃ 5H₂O; el ion Pi se detectó en mayor concentración en hojas de plántulas

de arroz deficientes en P, asimismo se observó que el aumento en los niveles foliares de Pi es dependiente del tratamiento exógeno de Pi. El Pi también se detectó en plántulas tratadas con Phi sin embargo sus niveles eran menores que el nivel de Pi de plántulas deficientes en P; es decir, hubo una reducción gradual en el nivel de Pi cuando la concentración de Phi aumentó, por tanto, una mayor concentración de Phi se tradujo en una menor retención de Pi dentro de la planta.

Por otra parte, los resultados aquí obtenidos, indican que el Phi no tuvo influencia en la concentración foliar de N, K y Ca (**Cuadro 1.10**). [Lopes et al. \(2016\)](#) reportaron reducciones significativas en la acumulación de K y Ca en plántulas de frijol bajo niveles óptimos de P en la solución nutritiva, debido a aplicaciones foliares de Phi comparado con los tratamientos que aplicaron pulverizaciones de Pi y KCl.

Cuadro 1. 10 Concentración de macronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)						
	N	P	K	Rango (K ^δ)	Ca	Mg	S
0.0000	20.42±3.14 a	1.91±0.04 a	5.72±0.92 a	9.888 a	8.52±1.37 a	2.89±0.31 b	1.02±0.17 b
0.0375	19.97±2.40 a	1.80±0.08 b	5.58±0.94 a	9.111 a	8.84±1.52 a	3.06±0.36 a	1.10±0.22 a
Pr > F	0.8345	0.0021	0.5091	0.3987	0.0874	0.0079	0.0104
DMS ^ψ	5.56	0.06	0.44	1.94	0.39	0.12	0.06

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.11** se observa que conforme incrementa la concentración de NaCl en la solución nutritiva, se afecta de manera negativa la concentración de Ca, Mg y S. La concentración de Ca es menor al testigo en 41.0 y 49.8%, en los tratamientos con 50 y 100 mM; asimismo, la de Mg en un 31.9 y 36.4%, respectivamente; mientras que la de S en 44.6 y 52.9% respectivamente.

Por otra parte, los datos obtenidos de concentración de K no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que

conforme incrementa la concentración de NaCl en la solución nutritiva existe una reducción significativa en la concentración de K en hojas de plántulas de tomate. En este sentido, [García-Abellan et al. \(2015\)](#) mostraron que bajo condiciones de salinidad, la acumulación de Na⁺ induce un estrés nutrimental debido a una absorción de nutrimentos alterada.

El factor NaCl no afectó en forma significativa la concentración de N en hojas de plántulas de tomate sin embargo, algunas investigaciones como la realizada por [Gong et al. \(2013\)](#) demuestran que la concentración de N en hojas de tomate disminuyó con el aumento de la concentración salina inducida por NaCl y NaHCO₃, por encima de una concentración de 50 mM las diferencias entre los distintos niveles de sal fueron significativas y en general la concentración de N fue menor en todos los niveles de estrés bajo tratamiento con NaHCO₃ en comparación con el tratamiento con NaCl.

Cuadro 1. 11 Concentración de macronutrimentos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
	N	P	K	Rango (K ^o)	Ca	Mg	S
0	16.74±3.53a	1.89±0.05 a	8.03±0.32 a	15.50 a	12.45±0.32 a	3.85±0.11 a	1.57±0.08 a
50	22.81±2.52a	1.77±0.07 b	4.86±0.06 b	9.50 b	7.34±0.11 b	2.62±0.06 b	0.87±0.01 b
100	20.88±0.71a	1.92±0.05 a	4.06±0.09 c	3.50 c	6.25±0.12 c	2.45±0.04 b	0.74±0.01 c
Pr > F	0.1820	0.0014	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	8.332	0.090	0.657	2.904	0.575	0.179	0.087

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

La interacción de los factores de estudio fosfito y NaCl en la solución nutritiva no tuvo efectos significativos en la concentración foliar de N. Por otra parte, se posee evidencia suficiente para demostrar que sin condición salina existe un incremento significativo en la concentración de S en hojas de plántulas de tomate tratadas con Phi, dicho incremento del orden del 15.9%. Por el contrario, se observa que en los tratamientos con 50 y 100 mM de NaCl, la adición de Phi redujo significativamente

la concentración foliar de P, estas disminuciones en la concentración de P fueron de 14.2 y 9.0%, respectivamente (**Cuadro 1.12**).

Cuadro 1. 12 Concentración de macronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol _(L) m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
		N	P	K	Rango (K ⁶)	Ca	Mg	S
0.0000	0	15.75±3.16a	1.83±0.02 b	8.12±0.06 a	15.0 ab	12.08±0.16 a	3.70±0.03 a	1.45±0.03 b
0.0375	0	17.73±4.51a	1.95±0.06 ab	7.94±0.49 a	16.0 a	12.82±0.36 a	4.00±0.12 a	1.68±0.06 a
0.0000	50	24.97±3.51a	1.90±0.01 ab	4.91±0.04 b	10.3 bc	7.33±0.13 b	2.52±0.03 b	0.87±0.01 c
0.0375	50	20.65±0.18a	1.63±0.01 c	4.81±0.08 b	8.7 cd	7.35±0.11 b	2.73±0.03 b	0.86±0.01 c
0.0000	100	20.53±1.07a	2.01±0.03 a	4.13±0.07 b	4.3 de	6.14±0.15 c	2.45±0.05 b	0.73±0.02 c
0.0375	100	21.23±0.20a	1.83±0.03 b	3.99±0.10 b	2.6 e	6.37±0.01 bc	2.46±0.03 b	0.75±0.01 c
Pr > F		0.4458	0.0001	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		14.836	0.1603	1.1692	5.1713	1.0242	0.3178	0.155
CV ^φ		23.85	3.1453	7.5476		4.3028	3.8941	5.3462

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ⁶Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

1.5.2.2. Concentración foliar de micronutrientos y sodio

En el **Cuadro 1.13** se observa una reducción significativa negativa en la concentración foliar de Mn y Cl en respuesta a la aplicación de Phi en comparación con el testigo, mismas que son del orden de 8.67% y del 21.34% respectivamente. Los datos de concentración de Cu no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que hubo mayor concentración de Cu en hojas de plántulas de tomate tratadas con Phi respecto al testigo. De igual manera, [Lopes et al. \(2016\)](#) observaron que aplicaciones foliares de Phi a plántulas de frijol bajo niveles óptimos de P en la solución nutritiva, mostraron una reducción significativa en cuanto a la acumulación de Mn en hojas comparado con las aplicaciones foliares de Pi y KCl, así como también observaron un efecto negativo por parte del Phi en la acumulación de Cu en hojas de plántulas de frijol, caso contrario a lo registrado en esta investigación.

Asimismo, el efecto principal del fosfito no es significativo en la concentración de Fe, Zn, B y Na. Por el contrario, [Lopes et al. \(2016\)](#) reportaron que aplicaciones foliares de Phi a plántulas de frijol bajo niveles óptimos de P en la solución nutritiva, mostraban una reducción significativa en la acumulación de Fe, en comparación con aplicaciones foliares de Pi y KCl; y no registraron efectos del Phi en la acumulación de Zn en plántulas de frijol.

Cuadro 1. 13 Concentración de micronutrientes y sodio en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Fe	Cu	Rango (Cu ^o)	Zn
0.0000	107.73±20.61 a	5.67±0.33 b	7.89 b	16.58±0.80 a
0.0375	95.82±12.49 a	6.02±0.42 a	11.11 a	18.57±1.61 a
Pr > F	0.4717	0.0102	0.0022	0.1233
DMS ^ψ	34.906	0.255	1.812	2.610
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Mn	B	Na	Cl
0.0000	162.01±43.10 a	46.13±4.17 a	11889.8±4922.89 a	1690.97±152.01 a
0.0375	147.97±38.79 b	44.65±8.19 a	12039.7±4913.29 a	1330.17±107.83 b
Pr > F	0.0005	0.3102	0.4966	0.0005
DMS ^ψ	6.510	3.048	465.920	188.59

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna por elemento son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 1.14** se observa que conforme incrementa la concentración de NaCl desde 0 a 50 y 100 mM NaCl en la solución nutritiva, existe un incremento significativo en la concentración de Na en hojas de plántulas de tomate, dicho incremento es superior en 16 y casi 33 veces a los valores del testigo, respectivamente. Estos resultados coinciden con lo observado por [Kautz et al. \(2014\)](#) en plantas de tomate tratadas con NaCl, donde mostraron concentraciones de Na en hojas significativamente mayores en comparación con las plantas cultivadas con una solución nutritiva estándar; del mismo modo, [Gharsallah et al. \(2016\)](#) en su estudio donde suministraron 50 mM de NaCl las primeras 24 h, después 100mM de NaCl durante las siguientes 24 h y por ultimo 150 mM de NaCl

hasta completar las 168 h a la solución nutritiva, a plántulas de alta, media y baja tolerancia a la salinidad concluyeron que independientemente del genotipo de plántulas de tomate la concentración de Na en hoja seguía un patrón de incremento constante conforme aumentó la concentración de NaCl en la solución nutritiva; también indicaron que las variedades de mediana y baja tolerancia a la salinidad manifestaban mayores concentraciones de Na en hojas debido a que la raíz no era capaz de contener el paso de los iones Na^+ .

La presencia de NaCl en la solución nutritiva también afectó de manera negativa la concentración de Mn y B en hojas de plántulas de tomate. Por otra parte, los datos de concentración de Cu no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar de que también existe una reducción significativa en su concentración en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 1.14**).

El factor NaCl no afectó la concentración de Fe, Zn y Cl en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 1.14**).

Cuadro 1. 14 Concentración de micronutrientos y sodio en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Fe	Cu	Rango (Cu ⁸)	Zn
0	114.73±20.09 a	6.54±0.24 a	15.000 a	16.590±1.12 a
50	105.63±19.50 a	6.05±0.09 b	10.000 b	17.786±1.43 a
100	84.96±6.10 a	4.94±0.08 c	3.500 c	18.362±1.51 a
Pr > F	0.3325	<0.0001	<0.0001	0.4892
DMS ^ψ	52.344	0.382	2.717	3.914
NaCl (mM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Mn	B	Na	Cl
0	259.367±7.87 a	61.224±3.43 a	711.2±16.65 c	1459.8±117.75 a
50	129.719±4.97 b	39.314±2.69 b	11779.1±218.69 b	1536.0±209.55 a
100	75.895±1.10 c	35.628±1.30 b	23404.0±312.32 a	1536.0±146.54 a
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.7409
DMS ^ψ	9.762	4.571	698.680	278.82

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ⁸Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna por elemento son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

La interacción de fosfito y NaCl en la solución nutritiva fue significativa para la concentración de B, y se posee evidencia suficiente para demostrar que a un nivel de salinidad nula existe un incremento significativo (17.1% superior al testigo), así como una reducción significativa en la concentración de Mn (8.7% menor al testigo) en la concentración de estos micronutrientos en hojas de plántulas de tomate tratadas con Phi; también se aprecia que a un nivel de 50 mM NaCl la aplicación de Phi reduce significativamente la concentración de B, esto es 21.8% menor en comparación con el testigo (**Cuadro 1.15**).

Cuadro 1. 15 Concentración de micronutrientos y sodio en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		Fe	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn
0.0000	0	119.11±25.31 a	6.251±0.06 ab	13.667 a	16.845±0.23 a
0.0375	0	110.35±18.82 a	6.838±0.27 a	16.333 a	16.334±1.74 a
0.0000	50	124.96±24.26 a	5.922±0.09 b	8.000 bc	16.595±1.16 a
0.0375	50	86.30±9.04 a	6.175±0.01 ab	12.000 ab	18.978±1.64 a
0.0000	100	79.11±1.51 a	4.822±0.03 c	2.000 d	16.319±1.05 a
0.0375	100	90.82±8.07 a	5.051±0.07 c	5.000 cd	20.404±1.20 a
Pr > F		0.4967	<0.0001	<0.0001	0.3073
DMS ^ψ		93.202	0.6807	4.8373	6.9691
CV ^φ		33.3918	4.24		14.45
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		Mn	B	Na	Cl
0.0000	0	271.096±4.04 a	56.408±1.48 b	721.6±6.27 c	1635.1±80.53 a
0.0375	0	247.638±5.95 b	66.040±3.12 a	700.9±23.94 c	1284.4±74.69 a
0.0000	50	138.339±2.42 c	44.115±0.69 c	11509.5±169.08 b	1741.8±258.18 a
0.0375	50	121.099±0.31 c	34.512±0.57 d	12048.6±191.01 b	1330.2±67.32 a
0.0000	100	76.605±1.16 d	37.866±0.17 d	23438.3±264.00 a	1696.1±60.79 a
0.0375	100	75.185±1.14 d	33.389±0.67 d	23369.7±416.26 a	1375.9±167.84 a
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0194
DMS ^ψ		17.383	8.1389	1244.1	486.49
CV ^φ		4.0893	6.5384	3.7912	18.3395

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna por elemento son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.3. Concentración de nutrientes y sodio en tallos

1.5.3.1. Concentración de macronutrientos en tallos

En el **Cuadro 1.16** se observa que existe un incremento significativo del 7.4% en la concentración de Mg en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi comparada con el testigo.

El Phi no tuvo influencia significativa en la concentración de N, P, K, Ca y S en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 1.16**).

Cuadro 1. 16 Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
0.0000	16.64±0.74 a	3.08±0.19 a	8.56±1.45 a	3.55±0.41 a	2.43±0.08 b	0.52±0.06 a
0.0375	15.79±1.08 a	3.00±0.15 a	8.80±0.91 a	3.76±0.52 a	2.61±0.10 a	0.54±0.07 a
Pr > F	0.3837	0.2440	0.5255	0.1468	0.0069	0.2464
DMS ^ψ	2.062	0.145	0.787	0.294	0.118	0.027

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.17** se observa que el tratamiento con 50 y 100 mM NaCl en la solución nutritiva ocasionó incrementos significativos del 10.7 y 27.0%, respectivamente, en la concentración de P en comparación con el testigo. Por el contrario, el NaCl reduce de manera negativa la concentración de K, Ca, Mg y S en tallos de plántulas de tomate. Asimismo las concentraciones de NaCl evaluadas no tuvieron efecto en la concentración de N de tallos de plántulas de tomate conforme incrementa la concentración de NaCl en la solución nutritiva.

Cuadro 1. 17 Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
0	16.10±1.19 a	2.70±0.04 c	11.60±0.59 a	4.76±0.18 a	2.63±0.05 a	0.69±0.01 a
50	16.10±0.63 a	2.99±0.05 b	7.81±0.43 b	3.45±0.17 b	2.52±0.14 ab	0.46±0.01 b
100	16.45±1.03 a	3.43±0.10 a	6.62±0.28 c	2.74±0.14 c	2.40±0.06 b	0.44±0.01 b
Pr > F	0.9413	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0137	<0.0001
DMS ^ψ	3.092	0.218	1.180	0.440	0.177	0.040

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a los efectos de la interacción de fosfito y NaCl (mM) en la solución nutritiva, se posee evidencia suficiente para indicar que con 50 mM NaCl existe un incremento significativo en la concentración de Mg en tallos de plántulas de tomate tratadas con Phi, este incremento es del 21.1% en comparación con el testigo (**Cuadro 1.18**).

Cuadro 1. 18 Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0.0000	0	17.27±0.20 a	2.72±0.06 c	12.21±0.74 a	4.56±0.18 a	2.58±0.07 abc	0.67±0.01 a
0.0375	0	14.93±1.58 a	2.68±0.02 c	11.00±0.22 a	4.96±0.13 a	2.69±0.03 ab	0.71±0.02 a
0.0000	50	15.87±0.81 a	3.00±0.05 bc	7.23±0.25 bc	3.23±0.05 bc	2.28±0.03 c	0.44±0.01 b
0.0375	50	16.33±0.53 a	2.97±0.07 bc	6.24±0.38 c	3.67±0.18 b	2.76±0.07 a	0.47±0.02 b
0.0000	100	16.80±1.05 a	3.52±0.13 a	6.24±0.26 c	2.85±0.19 c	2.42±0.08 bc	0.45±0.02 b
0.0375	100	16.10±1.21 a	3.34±0.04 ab	7.00±0.13 cb	2.63±0.05 c	2.37±0.06 bc	0.43±0.01 b
Pr > F		0.7830	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0017	<0.0001
DMS ^ψ		5.5048	0.388	2.1006	0.7842	0.3154	0.0716
CV ^φ		12.37	4.6558	8.8268	7.832	4.5694	4.9277

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.3.2. Concentración de micronutrientes y sodio en tallos

En el **Cuadro 1.19** se observa que existe una reducción significativa en la concentración de Mn y Cl en tallos de plántulas de tomate (reducciones de 8.4 y 21.5%, respectivamente), en respuesta a la aplicación de Phi en comparación con el testigo. El Phi no tuvo efecto significativo en la concentración de Fe, Cu, Zn, B y Na en tallos de plántulas de tomate.

Cuadro 1. 19 Concentración de micronutrientos y sodio en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ⁽⁺⁾ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl
0.0000	94.50±39.26 a	6.7397±0.29 a	31.612±3.96 a	90.32±10.70 a	18.325±0.61 a	11363.2±3993.20 a	1487.7±203.27 a
0.0375	88.57±20.41 a	6.9351±0.31 a	31.214±3.18 a	82.74±9.11 b	18.056±0.88 a	11999.1±4248.84 a	1167.5±129.49 b
Pr > F	0.8451	0.2899	0.8015	0.0107	0.6329	0.1271	0.0068
DMS ^ψ	64.738	0.385	3.374	5.469	1.194	845.100	225.14

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.20** se observa que existió una relación positiva entre la concentración de NaCl en la solución nutritiva y la concentración de Na en tallo. Por el contrario, se tienen relaciones inversas entre la concentración de NaCl en la solución nutritiva y la concentración de Cu, Zn, Mn y B en los tallos. El factor NaCl no tuvo influencia en la concentración de Fe y Cl en tallos de plántulas de tomate.

Cuadro 1. 20 Concentración de micronutrientos y sodio en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl
0	60.95±22.36 a	7.00±0.28 a	39.89±1.68 a	110.75±4.38 a	19.36±0.77 a	918.6±45.56 c	1345.4±246.17 a
50	91.02±18.44 a	7.19±0.30 a	28.33±1.40 b	81.63±2.22 b	18.07±0.44 ab	15322.3±589.55 b	1314.9±127.88 a
100	1222.64±41.59 a	6.32±0.11 b	26.02±1.84 b	67.21±3.12 c	17.14±0.56 b	18802.6±443.52 a	1322.5±183.42 a
Pr > F	0.2757	0.0043	<0.0001	<0.0001	0.0198	<0.0001	0.9728
DMS ^ψ	97.079	0.577	5.059	8.202	1.790	1267.300	332.86

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Por otra parte, se observa que en ausencia de salinidad, existe una reducción significativa de 41.3% en la concentración de Cl en tallos de plántulas de tomate (**Cuadro 1.21**).

Cuadro 1. 21 Concentración de micronutrientos y sodio en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl
0.0000	0	44.04±5.27 a	7.27±0.33 ab	41.43±1.76 a	117.11±3.83a	19.32±0.69 a	931.0±55.09 c	1696.1±209.42 a
0.0375	0	77.86±31.74 a	6.72±0.18 abc	38.34±1.47ab	104.39±1.73a	19.41±1.00 a	906.2±45.16 c	994.8±125.25 b
0.0000	50	104.20±26.02 a	6.71±0.11 abc	26.66±0.57 c	82.87±0.79 b	17.64±0.59 a	14850.7±489.75b	1360.7±114.80 ab
0.0375	50	77.84±6.53 a	7.67±0.18 a	29.99±1.59bc	80.38±3.25 b	18.50±0.10 a	15793.9±679.89b	1269.2±146.78 ab
0.0000	100	135.27±62.02 a	6.24±0.14 c	26.75±2.25 c	70.96±3.52bc	18.02±0.26 a	18308.0±283.91a	1406.4±252.17 ab
0.0375	100	110.01±18.91 a	6.41±0.06 bc	25.31±1.73 c	63.45±1.14 c	16.26±0.37 a	19.297.2±477.1a	1238.7±78.78 ab
Pr > F		0.5941	0.0045	0.0002	<0.0001	0.0518	<0.0001	0.0294
DMS ^ψ		172.86	1.027	9.0077	14.604	3.1875	2256.5	580.77
CV ^φ		68.85	5.47	10.45	6.15	6.38	7.04	24.91

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.4. Concentración nutrimental y de sodio en raíz

1.5.4.1. Concentración de macronutrientos en raíz

La adición de Phi en la solución nutritiva no tuvo influencia en la concentración de los macronutrientos N, P, K, Ca, Mg y S en raíz de plántulas de tomate (**Cuadro 1.22**).

Cuadro 1. 22 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)							
	N	P	Rango (P ^δ)	K	Ca	Mg	S	
0.0000	18.59±2.51 a	1.94±0.29 a	9.00 a	2.86±0.81 a	3.70±0.22 a	4.60±0.33 a	0.85±0.12 a	
0.0375	20.11±1.63 a	2.04±0.25 a	10.00 a	2.95±0.82 a	3.90±0.30 a	4.80±0.29 a	0.89±0.10 a	
Pr > F		0.2053	0.4552	0.3065	0.5220	0.2787	0.3527	0.4581
DMS ^ψ		2.467	0.296	2.040	0.303	0.389	0.443	0.140

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.23** se observa que conforme incrementa la concentración de NaCl en la solución nutritiva existe un aumento significativo en la concentración de N, Ca,

Mg y S en raíz de plántulas de tomate; por el contrario, a mayor concentración de NaCl se reduce la de K.

Los datos de concentración de P no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme aumenta la concentración de NaCl, incrementa significativamente la concentración de P en raíz de plántulas de tomate (**Cuadro 1.23**).

Cuadro 1. 23 Concentración de macronutrientes en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
	N	P	Rango (P ^o)	K	Ca	Mg	S
0.0	16.28±1.0 b	1.54±0.03 b	3.50 c	5.05±0.18 a	3.52±0.10 b	4.29±0.13 b	0.72±0.02 b
50	17.73±0.96 b	1.82±0.10 b	9.67 b	1.91±0.08 b	3.52±0.09 b	4.56±0.26 b	0.77±0.04 b
100	24.03±1.60 a	2.60±0.22 a	15.33 a	1.75±0.13 b	4.34±0.28 a	5.26±0.28 a	1.12±0.10 a
Pr > F	0.0003	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0037	0.0059	0.0005
DMS ^ψ	3.700	0.444	3.059	0.454	0.584	0.665	0.210

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.24** se observa que la interacción de los factores de estudio no fue significativa en las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y S en raíz de plántulas de tomate.

Cuadro 1. 24 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
		N	P	Rango (P ^o)	K	Ca	Mg	S
0.0000	0	14.93±0.40 c	1.55±0.02 b	3.67 c	5.01±0.11 a	3.49±0.10 ab	4.25±0.12 ab	0.71±0.01 b
0.0375	0	17.62±1.19 c	1.53±0.04 b	3.33 c	5.10±0.26 a	3.55±0.13 ab	4.32±0.16 ab	0.72±0.03 b
0.0000	50	16.33±0.73 c	1.68±0.02 b	8.00 bc	1.81±0.06 b	3.43±0.04 b	4.17±0.08 b	0.72±0.02 b
0.0375	50	19.13±0.53 abc	1.97±0.08 ab	11.33 ab	2.00±0.08 b	3.62±0.12 ab	4.95±0.22 ab	0.83±0.03 ab
0.0000	100	24.50±2.12 a	2.58±0.30 a	15.33 a	1.75±0.15 b	4.16±0.25 ab	5.39±0.25 a	1.11±0.13 a
0.0375	100	23.57±1.33ab	2.62±0.15 a	15.33 a	1.75±0.15 b	4.52±0.34 a	5.13±0.35 ab	1.13±0.08 a
Pr > F		0.0017	0.0009	<0.0001	<0.0001	0.0217	0.0173	0.0044
DMS ^ψ		6.588	0.79	5.446	0.807	1.039	1.183	0.373
CV ^φ		12.416	14.482		10.145	9.994	9.180	15.679

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.4.2. Concentración de micronutrientos y sodio en raíz

En el **Cuadro 1.25** se observa un incremento del 15.3% en la concentración de Fe en raíz, lo anterior en respuesta a la aplicación de Phi en comparación con el testigo.

El Phi no tuvo influencia en la concentración de los micronutrientos Cu, Zn, Mn, B, y Cl, así como de Na en raíces de plántulas de tomate (**Cuadro 1.25**).

Cuadro 1. 25 Concentración de micronutrientos y sodio en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)							
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl	
0.0000	414.90±62.83 b	23.81±2.20 a	31.59±5.38 a	154.19±10.20 a	15.58±1.37 a	12170.6±3471.19 a	1299.7±102.89 a	
0.0375	478.19±113.72 a	25.63±2.42 a	31.98±2.54 a	146.77±8.51 a	16.40±1.33 a	12656.5±3612.55 a	1208.2±148.31 a	
Pr > F		0.0468	0.1280	0.8271	0.1632	0.3813	0.5375	0.3889
DMS ^ψ		62.252	2.426	3.786	10.881	1.950	1667.900	216.62

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.26** se observa que el tratamiento con 50 y 100 mM NaCl en la solución nutritiva, incrementó en la concentración de Fe en 136.31 y un 83.05%, Cu de un 10.99% y un 38.66%, respectivamente, la de B en 4.68 y 30.01%, respectivamente; la de Na en cuatro y cinco veces, respectivamente, en raíces de plántulas de tomate; en todos los casos en comparación con el testigo. Gharsallah *et al.* (2016) evaluaron tres variedades de tomate de alta, mediana y baja tolerancia al estrés salino y observaron que las variedades de mediana y baja tolerancia manifestaban menores concentraciones de Na en raíz debido a que existía mayor acumulación en hojas.

Cuadro 1. 26 Concentración de micronutrientos y sodio en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹)						
	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl
0	257.94±20.97 c	21.21±0.99 b	40.92±2.40 a	166.30±6.80 a	14.33±0.80 b	3435.5±156.84 c	1193.0±138.36 a
50	609.54±83.82 a	23.54±2.09 b	25.79±2.16 b	143.85±7.39 b	15.00±0.67 b	14969.4±612.27 b	1314.9±112.03 a
100	472.16±40.09 b	29.41±1.34 a	28.65±2.73 b	141.30±8.97 b	18.63±1.31 a	18835.9±1139.09 a	SMS
Pr > F	<0.0001	0.0002	<0.0001	0.0027	0.0043	<0.0001	0.2540
DMS ^ψ	93.352	3.637	5.677	16.317	2.925	2501.200	216.62

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), SMS: Sin muestra suficiente.

Por otra parte, el NaCl afecta de manera negativa la concentración de Zn y Mn observando una reducción de 36.97 y 29.99% así como un 13.50y 15.03%, respectivamente, en plantas tratadas con 50 y 100 mM.

El factor de estudio NaCl no tuvo efecto significativo en la concentración de Cl en raíz de plántulas de tomate (**Cuadro 1.26**).

Respecto a los efectos de interacción de los factores de estudio, se observa que con un nivel de salinidad de 50 mM existe un incremento significativo en la concentración de Fe en raíz de plántulas de tomate tratadas con Phi, este aumento es del orden de 63.2% (**Cuadro 1.27**).

Cuadro 1. 27 Concentración de micronutrientos y sodio en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración (g kg ⁻¹ de materia seca)						
		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl
0.0000	0.0	275.81±28.65 cd	22.20±0.91 bc	45.12±0.83 a	176.90±4.54 a	13.26±0.80 b	3454±100.77 c	1284.4± 89.94 a
0.0375	0.0	240.08±6.28 d	20.22±0.95 c	36.71±0.62 ab	155.70±3.29 ab	15.39±0.31 ab	3417±226.01 c	1101.5± 170.31 a
0.0000	50	463.10±28.11 b	20.14±0.60 c	22.16±0.36 c	132.55±1.99 b	15.61±0.12 ab	14369±563.63 b	1314.9± 122.72 a
0.0375	50	755.98±26.28 a	26.95±1.37 ab	29.42±1.27 bc	155.16±6.07 ab	14.40±0.91 ab	15570±590.79 ab	1314.9± 112.03 a
0.0000	100	505.80±54.37 b	29.09±1.32 a	27.49±2.53 bc	153.13±4.74 ab	17.87±1.69 ab	18689±1277.09 ab	SMS
0.0375	100	438.53±14.60 bc	29.73±1.63 a	29.81±3.34 bc	129.47±8.58 b	19.39±0.98 a	18983±1263.59 a	SMS
Pr > F		<0.0001	0.0005	0.0001	0.0015	0.0186	<0.0001	0.4233
DMS ^ψ		166.22	6.4766	10.109	29.054	5.2079	4453.5	411.06
CV ^φ		13.5727	9.5529	11.5971	7.0398	11.88	13.0816	20.2861

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φC.V.: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$) SMS: Sin muestra suficiente.

1.5.5. Parámetros bioquímicos

1.5.5.1. Concentración de clorofilas

La adición de Phi en la solución nutritiva no tuvo influencia significativa en las concentraciones de clorofilas a, b y total en hojas de plántulas de tomate; (**Cuadro 1.28**). Estas tendencias coinciden con lo reportado por [Manna et al. \(2015\)](#), quienes observaron que el contenido de clorofila total en hojas de plántulas de arroz carentes de P fue 10% menor en comparación con las plántulas tratadas con 2 mM Pi; el aumento posterior de la concentración de Pi en el medio a 50 mM redujo de manera gradual en el nivel de contenido de clorofila total 20% menor en comparación con el de plántulas tratadas con 2 mM Pi; por otra parte, a medida que la concentración de Phi aumentó en los medios a 50 mM hubo una reducción drástica en la formación de clorofila total; esta reducción fue del 57%, en comparación con las plántulas deficientes en P, lo que indica que el Phi podría interferir con la ruta de biosíntesis de clorofila. Por otra parte, [Bachiega et al. \(2017\)](#) no encontraron diferencias significativas en el contenido de clorofila en naranja dulce tratada con aplicaciones foliares de Pi, Phi y KCl bajo suficiencia de fósforo; mientras que, cuando la solución nutritiva fue deficiente en fósforo, las aspersiones con Phi tuvieron un efecto

significativo negativo en la concentración de clorofila en comparación con los otros dos tratamientos pulverizados.

Cuadro 1. 28 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	mg 100 g ⁻¹ de peso fresco		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0	32.877±8.71 a	18.562±6.98 a	51.435±13.60 a
0.0375	29.530±5.80 a	14.192±7.58 a	43.722±12.33 a
Pr > F	0.1517	0.2815	0.0854
DMS ^ψ	4.7584	8.4433	8.964

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.29** se observa que el tratamiento con 50 y 100 mM NaCl redujo significativamente las concentraciones de clorofila; en particular, para clorofila a las reducciones fueron de 35.9 y 67.2%, respectivamente; las de clorofila b de 80.4 y 67.7%, respectivamente; y la de clorofila total de 53.9 y un 67.4%, respectivamente, en comparación con el testigo en todos los casos. Estos resultados concuerda con los hallazgos de [Gong et al. \(2013\)](#), donde las plántulas de tomate que crecieron en una solución salina de 25, 50, 75 y 100 mM de NaCl y en una solución alcalina 25, 50, 75 y 100 mM de NaHCO₃, presentaron concentraciones menores de clorofila a, b y clorofila total en hojas respecto al tratamiento testigo, después de 5 y 10 d de tratamiento. De igual manera [Kautz et al. \(2014\)](#) mostraron que la salinidad condujo a una concentración significativamente menor de clorofila total en tomate, al igual que [Abbasi et al. \(2015\)](#) quienes señalan el estrés salino redujo significativamente los contenidos de clorofila a y b en las hojas de dos híbridos de maíz en todas las etapas de crecimiento.

Cuadro 1. 29 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	mg 100 g ⁻¹ de peso fresco		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0	47.540±2.83 a	32.337±5.54 a	79.877±7.19 a
50	30.492±3.68 b	6.344±2.81 b	36.835±2.28 b
100	15.573±1.59 c	10.451±4.31 b	26.024±2.94 b
Pr > F	<0.0001	0.0003	<0.0001
DMS ^ψ	7.1356	12.661	13.442

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de fosfito y NaCl en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas en cuanto a la concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 1.30**).

Cuadro 1. 30 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	mg 100 g ⁻¹ de peso fresco		
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0	0.0	52.184±1.63 a	34.756±0.54 a	86.943±1.21 a
0.0375	0.0	42.896±1.07 ab	29.915±8.48 ab	72.810±9.50 a
0.0	50	33.470±3.33 bc	3.890±0.85 c	37.361±3.02 b
0.0375	50	27.513±4.01 cd	8.797±3.80 bc	36.310±1.90 b
0.0	100	12.966±0.89 e	17.036±3.73 abc	30.002±3.08 b
0.0375	100	18.181±0.63 de	3.865±0.11 c	22.045±0.55 b
Pr > F		<0.0001	0.0017	<0.0001
DMS ^ψ		12.705	22.545	23.935
CV ^φ		14.84	50.19	18.34

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.5.2. Concentración de aminoácidos totales

En el **Cuadro 1.31** se observa que el aporte de Phi a la solución nutritiva afectó de manera significativa y negativa la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate, reduciendo la concentración de aminoácidos totales

en 15.7% respecto al testigo. Estos resultados son coincidentes con lo descrito por Berkowitz *et al.* (2013) en plantas de *Arabidopsis* tratadas con Phi, donde observan que nueve metabolitos, especialmente los aminoácidos centrales asparagina, ácido aspártico, serina y ácido glutámico y su producto de degradación ácido piroglutámico, fueron menos abundantes a comparación con las plantas tratadas con Pi como fuente de P.

Cuadro 1. 31 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Aminoácidos totales
	µg g ⁻¹ de peso fresco
0.0000	4.3932±0.32 a
0.0375	3.7013±0.40 b
Pr > F	0.0234
DMS ^ψ	0.6524

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.32** se observa la adición de NaCl en la solución nutritiva no afectó la concentración foliar de aminoácidos solubles totales en las plántulas de tomate.

Cuadro 1. 32 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Aminoácidos totales
	µg g ⁻¹ de peso fresco
0	4.0529±0.40 a
50	3.9772±0.57 a
100	4.1577±0.25 a
Pr > F	0.6159
DMS ^ψ	0.9825

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Por otra parte, se observó que con una concentración NaCl de 50 mM, el Phi afectó de manera significativa y negativa la concentración de aminoácidos libres totales en las hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 1.33**).

Cuadro 1. 33 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Aminoácidos totales
		µg g ⁻¹ de peso fresco
0.0000	0	4.4551±0.43 ab
0.0375	0	3.6507±0.29 ab
0.0000	50	4.7325±0.23 a
0.0375	50	2.8443±0.33 b
0.0000	100	3.9920±0.23 ab
0.0375	100	4.3234±0.28 ab
Pr > F		0.0622
DMS ^ψ		1.7681
CV ^φ		14.99

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.5.3. Concentración de prolina

El efecto principal del Phi no fue significativo en la concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 1.34**). Resultados coincidentes con los de [Cerqueira et al. \(2017\)](#), quienes reportaron que aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 1 y 4% a árboles de pino de Monterrey (*Pinus radiata*) no tuvieron efecto en la concentración de prolina.

Cuadro 1. 34 Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Prolina
	µg g ⁻¹ de peso fresco
0.0000	13.451±3.90 a
0.0375	15.029±6.38 a
Pr > F	0.2423
DMS ^ψ	2.7952

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 1.35** se observa que el tratamiento con 50 y 100 mM NaCl ocasiona incrementos significativos en la concentración de prolina en hojas de plántulas de

tomate, estos del orden de 88.43 y de un 408.58%, respectivamente; información que concuerda con lo reportado por [Zhang et al. \(2015\)](#), donde la concentración de prolina en plántulas de tomate se incrementó conforme aumentó la concentración de NaCl en 0, 100 y 200 mM en la solución nutritiva. Del mismo modo, [Gharsallah et al. \(2016\)](#) analizaron la concentración de prolina en hojas de tres genotipos de tomate de alta, media y baja tolerancia a la salinidad a los cuales se les suministro 150 mM de NaCl en solución nutritiva durante 0, 6, 12 y 168 h; observando que la concentración de prolina en hoja de plántulas de tomate con alta tolerancia a la salinidad se incrementó conforme transcurría el tiempo hasta alcanzar $17 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco; del mismo modo, las plántulas con una tolerancia media y baja manifestaron incrementos en la concentración de prolina 168 h después de seguir expuestas al estrés salino obteniendo niveles de 13 y $10 \mu\text{g g}^{-1}$ por gramo de peso fresco.

Cuadro 1. 35 Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NaCl en la solución nutritiva.

NaCl (mM)	Prolina
	$\mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco
0	5.360 ± 1.68 c
50	10.100 ± 0.62 b
100	27.260 ± 2.67 a
Pr > F	<0.0001
DMS ^ψ	4.1917

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Por otro lado, con una concentración de NaCl de 100 mM, el Phi afectó de manera significativa y positiva la concentración foliar de prolina en plántulas de tomate (**Cuadro 1.36**).

Cuadro 1. 36 Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Prolina
		µg g ⁻¹ de peso fresco
0.0000	0.0	6.900±2.23 c
0.0375	0.0	3.820±0.95 c
0.0000	50	10.350±0.50 c
0.0375	50	9.850±0.57 c
0.0000	100	23.103±0.12 b
0.0375	100	31.417±2.15 a
Pr > F		<0.0001
DMS ^ψ		7.4636
CV ^φ		19.1113

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

1.5.6. Parámetros relacionados con fotosíntesis

1.5.6.1. Concentración intercelular de CO₂ (Ci)

Los datos de concentración intercelular de CO₂ (Ci) de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.19A y 1.19B**); por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman fue posible evidenciar que el fosfito no tuvo influencia significativa en esta variable (**Figura 1.19a**). Estos resultados coinciden con los de [Monteiro *et al.* \(2014\)](#), quienes reportaron que pulverizaciones foliares de fosfato de manganeso (Reforce Mn, Agrichem), un fungicida que contenía ciproconazol y azoxistrobina (PrioriXtra), y fosfito de potasio con residuos de pulpa cítrica (ADB 120, Agrichem) no presentaron diferencias estadísticas significativas en la concentración intercelular de CO₂ (Ci), la tasa fotosintética (A), tasa de transpiración (E) y la conductancia estomática (Gs) en plántulas de café de 6 meses de edad tratadas durante 7, 14, 21 y 28 d.

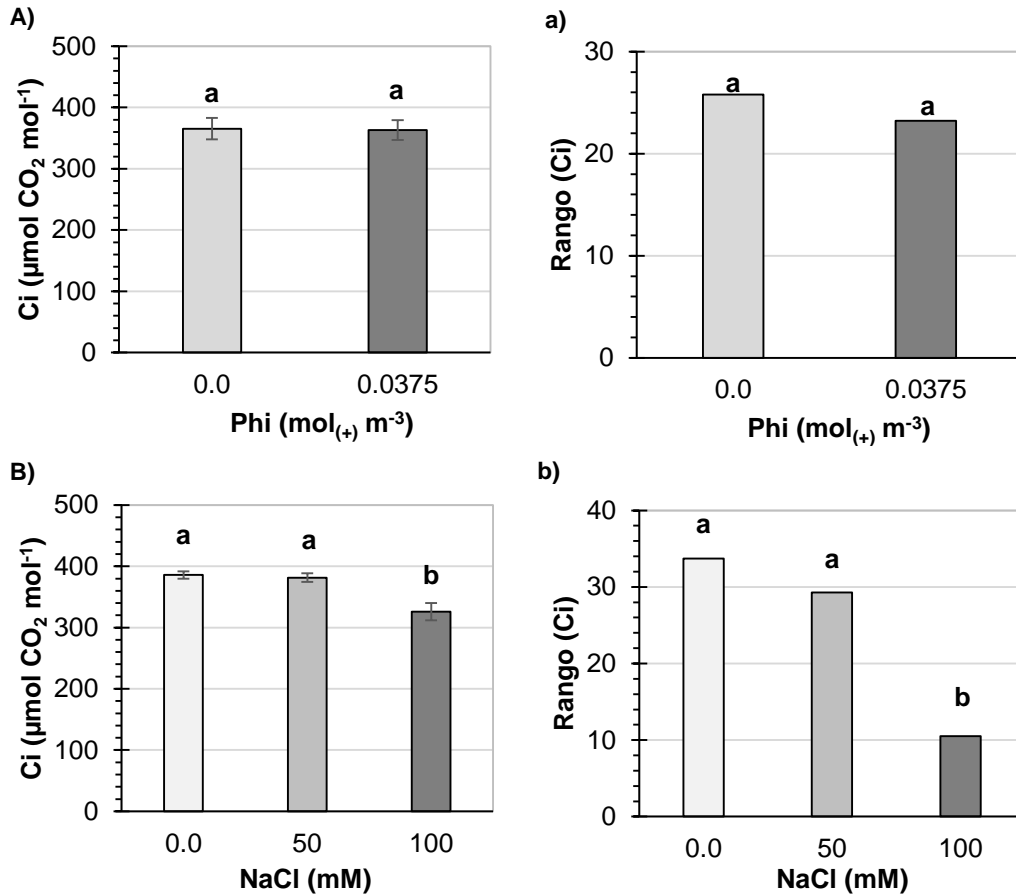


Figura 1. 19 Concentración intercelular de CO₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.6931); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.3626)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Por otro lado, también se posee evidencia suficiente para concluir que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva, disminuye significativamente la concentración intercelular de CO₂ en plántulas de tomate (**Figura 1.19b**). [Rivero et al. \(2013\)](#) determinaron la respuesta fisiológica de plantas de tomate bajo una combinación de estrés abiótico (salinidad + calor), evaluando variables como crecimiento de planta, asimilación de CO₂, tasa de transpiración, máxima eficiencia cuántica y eficiencia fotosintética durante 72 h de tratamientos; los resultados mostraron que la salinidad fue el tratamiento que más afectó a las plantas obteniendo las lecturas más bajas de asimilación de CO₂ y tasa de transpiración, en comparación con las plantas testigo. De la misma manera, [Michele](#)

et al. (2016) observan una limitación en la tasa fotosintética (A) con una disminución en C_i y una reducción de G_s como resultado del estrés salino inducido en su experimento.

En lo referente a la interacción de fosfito y NaCl en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a la concentración intercelular de CO_2 (C_i) en plántulas de tomate; sin embargo, se puede apreciar que al inducir estrés salino con 50 mM NaCl, el Phi provoca un efecto positivo en dichas variables (**Cuadro 1.37**).

Cuadro 1. 37 Concentración intercelular de CO_2 (C_i) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Concentración intercelular de CO_2	
		C_i ($\mu\text{mol } CO_2 \text{ mol}^{-1}$)	Rango (C_i^{δ})
0.0000	0	389.625±2.95 a	35.875 a
0.0375	0	382.000±7.61 a	31.563 a
0.0000	50	385.250±6.70 a	33.063 a
0.0375	50	377.625±7.15 a	25.500 ab
0.0000	100	321.500±11.25 b	8.438 c
0.0375	100	330.000±16.95 b	12.563 bc
Pr > F		<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		29.272	14.512
CV ^φ		5.3827	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5.6.2. Tasa de transpiración (E)

El Phi no afectó de manera significativa la tasa de transpiración de plántulas de tomate tratadas con Phi (**Figura 1.20A**); por el contrario, se observa que conforme se incrementa la concentración de NaCl a 50 y 100 mM en la solución nutritiva existe una reducción en la transpiración de hojas de plántulas de tomate en 16.55 y

65.24%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 1.20B**). [Casierra-Posada et al. \(2017\)](#) mencionan que las plantas de *Furcraea* spp. reducen la transpiración bajo condiciones salinas para así poder reducir el transporte de iones tóxicos a la parte aérea; por su parte [Negrão et al. \(2017\)](#) señalan que la capacidad de las plantas para mantener las velocidades normales de transpiración bajo condiciones salinas es un indicador importante de la tolerancia a la salinidad, particularmente porque la transpiración está relacionada con las tasas normales de absorción de CO₂ para la fotosíntesis, sin embargo la evaluación de la tasa de transpiración de una planta utilizando los porómetros y los analizadores de gases infrarrojos pueden ser difíciles debido a cambios rápidos en la conductancia estomática que pueden ocurrir tanto en el espacio como en el tiempo.

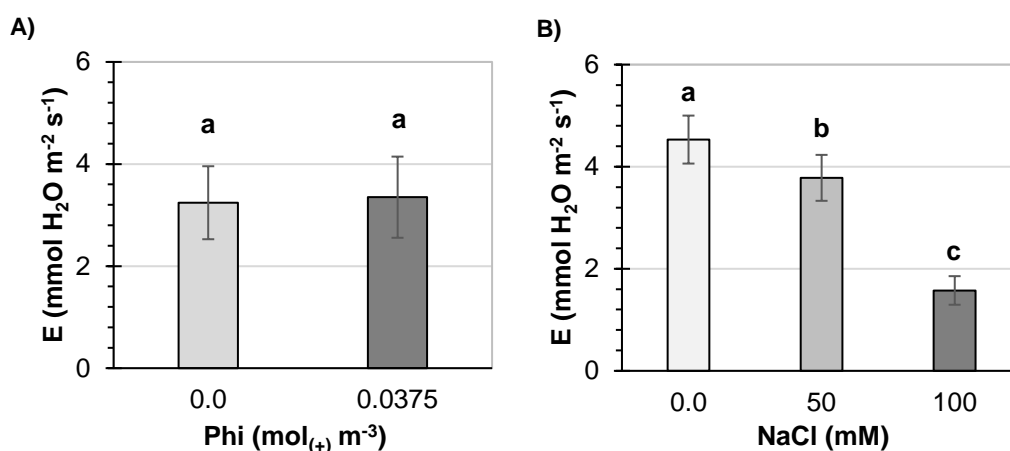


Figura 1. 20 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y NaCl (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.6556), NaCl (P<0.0001).

En lo referente a la interacción de fosfito y NaCl en la solución nutritiva, se observa que la tasa de transpiración (E) en plántulas de tomate es reducida fuertemente con la concentración alta de NaCl evaluada, independientemente de la concentración de Phi (**Cuadro 1.38**).

Cuadro 1. 38 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Tasa de transpiración (E)
		E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
0.0000	0	4.2750±0.31 a
0.0375	0	4.7875±0.59 a
0.0000	50	3.8750±0.48 a
0.0375	50	3.6875±0.45 a
0.0000	100	1.5750±0.40 b
0.0375	100	1.5750±0.12 b
Pr > F		<0.0001
DMS ^ψ		1.2471
CV ^φ		25.3497

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

1.5.6.3. Conductancia estomática (Gs)

Los datos de conductancia estomática (Gs) de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 1.21A y 1.21B**); por tanto, se realizó la transformación de éstos por rangos de Conover-Iman, los resultados muestran que el fosfito no tuvo influencia significativa en la conductancia estomática (**Figura 1.21a**). Resultados coincidentes con los de [Scott et al. \(2016\)](#) quienes realizaron aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 0, 12, 24 y 48 kg ha⁻¹ diluidas en agua desionizada a partir de la formulación comercial de Agrifos, a especies de coníferas y angiospermas leñosas de 1.5 años de edad y entre 20 y 90 cm de altura dependiendo la especie, las lecturas de conductancia estomática se realizaron en dos días consecutivos entre las 9:00 y 11:30 h dos semanas después de la aplicación de Phi, y se observó que no existió efecto significativo por parte del Phi en el Gs de tejido foliar de cuatro especies maderables nativas y dos especies silvícolas.

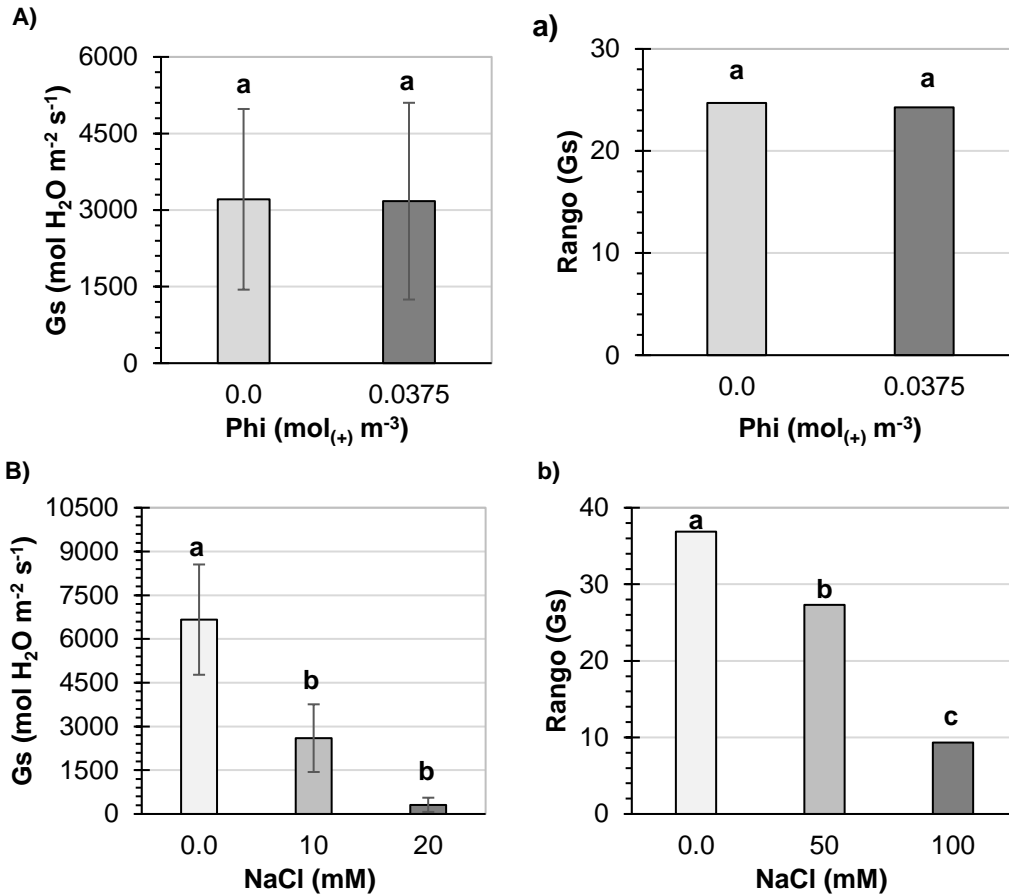


Figura 1. 21 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) [A: medias (P=0.9624); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.8624)] y NaCl [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Por otra parte, se posee evidencia suficiente para concluir que conforme aumenta la concentración de NaCl (mM) en la solución nutritiva disminuye significativamente la conductancia estomática en plántulas de tomate (**Figura 1.21b**); de igual manera [Abbasi et al. \(2015\)](#) reportaron que en comparación con la condición no salina, el estrés de la salinidad condujo a una disminución significativa en todos los parámetros de intercambio de gases, la tasa fotosintética (A), la velocidad de transpiración (E), la conductancia estomática (Gs) y la concentración interna de CO₂ (Ci) en las tres etapas de crecimiento de dos híbridos de maíz. Asimismo [Michele et al. \(2016\)](#), indican que las plantas tienen la capacidad de regular la biofísica celular promoviendo la disminución de la turgencia celular y el cierre estomático de

la hoja para evitar pérdidas de agua debido a la evapotranspiración, así como un sistema radicular de gran tamaño para alcanzar y absorber el agua accesible que conserva el equilibrio hídrico interno, en consecuencia una reducción de la conductancia estomática limita la absorción de CO₂ y su disponibilidad como sustrato para la fotosíntesis, como lo podemos constatar de igual manera en la presente investigación.

En lo referente a la interacción de fosfito y NaCl, se observa que solo con alta salinidad, la conductancia estomática es fuertemente reducida, lo anterior de manera independiente al nivel de Phi (**Cuadro 1.39**).

Cuadro 1. 39 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Conductancia estomática (Gs)	
		Gs (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	Rango (Gs ^δ)
0.0000	0	6765±1901.29 a	37.250 a
0.0375	0	6562±2010.83 ab	36.500 a
0.0000	50	2465±730.05 c	27.750 a
0.0375	50	2734±1529.88 bc	26.875 a
0.0000	100	401±345.65 c	9.125 b
0.0375	100	226±64.04 c	9.500 b
Pr > F		<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		3978.2	12.356
CV ^φ		83.4959	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

1.5.6.4. Tasa fotosintética (A)

Los datos de tasa fotosintética (A) de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figuras 1.22A y 1.22B**). Por lo anterior, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el fosfito no tuvo influencia significativa en la tasa fotosintética por plantas (**Figura**

1.22a), caso contrario con lo reportado por [Cerqueira et al. \(2017\)](#) quienes reportaron que aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 1 y 4% a árboles de pino de Monterrey redujeron significativamente su tasa fotosintética (A) comparada con el testigo. Por otra parte, se posee evidencia suficiente para concluir que conforme aumenta la concentración de NaCl en la solución nutritiva disminuye significativamente la tasa fotosintética en plántulas de tomate (**Figura 1.22b**), información que concuerda con la obtenida por [Gong et al. \(2013\)](#), quienes registraron disminuciones significativas en el crecimiento de plántulas de tomate, tasa fotosintética (A) y tasa de transpiración (E) con el aumento de la intensidad del estrés de 25, 50, 75 y 100 mM de NaCl al igual que 25, 50, 75 y 100 mM de NaHCO₃ en periodos de tratamiento de 5 y 10 d.

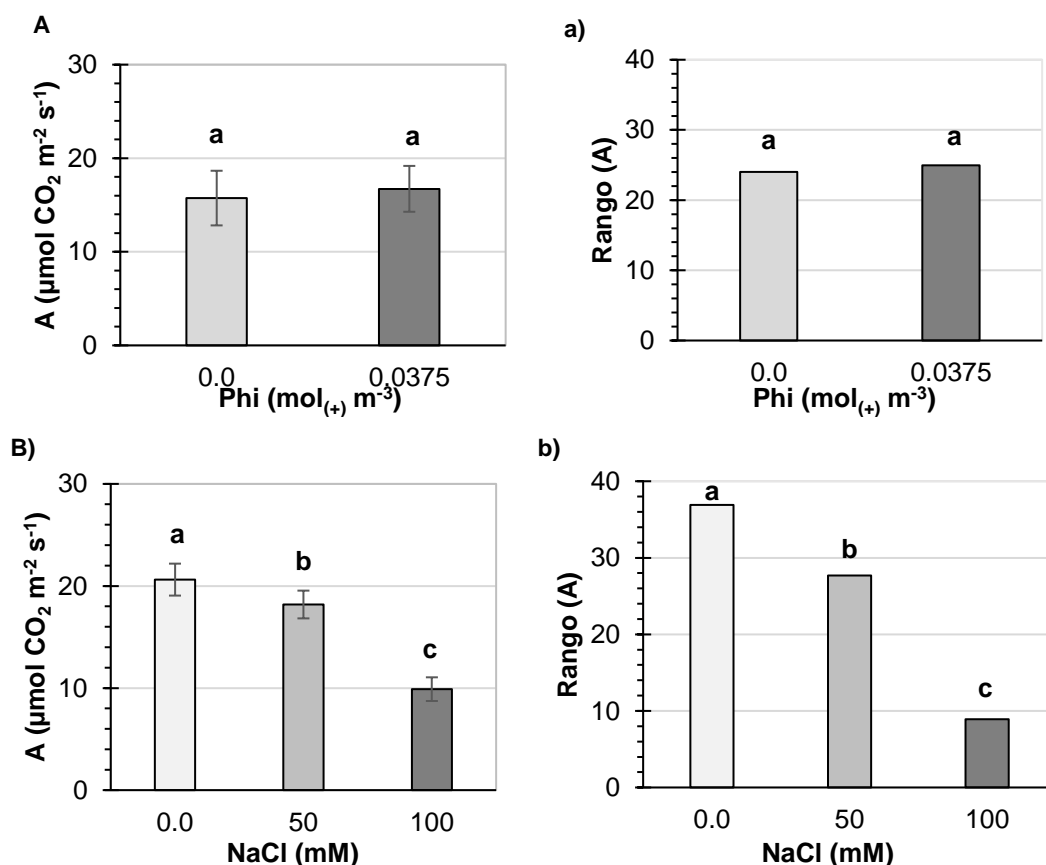


Figura 1. 22 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.2273$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.6792$)] y NaCl [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de fosfito y NaCl, ésta mostró los mismos efectos registrados para las variables transpiración y conductancia estomática (**Cuadro 1.40**).

Cuadro 1. 40 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y NaCl en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NaCl (mM)	Tasa fotosintética (A)	
		A (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Rango (A ^δ)
0.0000	0	20.125±2.04 a	36.000 a
0.0375	0	21.125±0.99 a	37.813 a
0.0000	50	17.850±1.76 a	27.938 a
0.0375	50	18.525±0.90 a	27.438 a
0.0000	100	9.250±1.43 b	8.125 b
0.0375	100	10.538±0.79 b	9.688 b
Pr > F		<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		4.1673	11.9
CV ^φ		17.1965	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.6. CONCLUSIONES

En el presente estudio de investigación se posee evidencia suficiente para demostrar que aporte de fosfito (Phi) a dos concentraciones 0.0 y 0.0375 (mol₍₊₎ m⁻³) vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 25% afectó de manera significativa los parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y fotosintéticos de la siguiente manera:

- El Phi incrementó significativamente el número de hojas, la concentración de Mg, Cu y S en hojas, de Mg en tallo y de Fe en raíz; por el contrario, redujo

significativamente la concentración de P, Mn y Cl en hojas, de Mn y Cl en tallos de plántulas de tomate.

- También se posee evidencia suficiente para demostrar que el aporte de Phi a la solución nutritiva afectó de manera significativa y negativa la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate teniendo una reducción del 15.7% respecto al testigo al cual no se le añadió dicho bioestimulante.

En lo referente a la inducción de estrés salino mediante el aporte de cloruro de sodio (NaCl) a tres concentraciones 0, 50, y 100 mM vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 25%, estos tratamientos afectaron de manera significativa los parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y fotosintéticos de la siguiente manera:

- Conforme se incrementó la concentración de NaCl en la solución nutritiva se redujo significativamente el área foliar, peso seco de hojas, peso fresco y seco de tallo, peso fresco y seco de raíz, altura, diámetro de tallo y volumen de raíz en plántulas de tomate.
- El suministro de NaCl incrementó significativamente la concentración de Na en hojas y tallos; así como afectó de manera significativa y negativa la concentración de K, Ca, Mg, S, Cu, Mn y B en hojas y tallos de plántulas de tomate.
- También se posee evidencia suficiente para demostrar que el incremento en la concentración salina en la solución nutritiva afectó de manera negativa y significativa la concentración de clorofila a, b y total; así como incrementó significativamente la concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate.
- Respecto a los parámetros fotosintéticos evaluados en la presente investigación se posee evidencia suficiente para demostrar que la Ci, E, Gs y A disminuye significativamente conforme se incrementa la concentración salina en la solución nutritiva de plántulas de tomate.

En lo referente a la interacción de fosfito en ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$) y NaCl (mM) en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a parámetros de crecimiento y fotosintéticos en plántulas de tomate, pero se aprecian diferencias significativas en parámetros nutrimentales y bioquímicos de la siguiente manera:

- Se observó que el suministro de Phi en ausencia de salinidad, incrementó significativamente la concentración de S, y redujo la concentración de Mn y B en hojas, así como la de Cl en tallos de plántulas de tomate.
- La adición de Phi en combinación con 50 mM NaCl a la solución nutritiva redujo significativamente la concentración foliar de aminoácidos libres totales y de B en hojas e incrementó la de Mg en tallos y la de Fe en raíces de plántulas de tomate.
- Asimismo, la adición de Phi en conjunto con 50 y 100 mM NaCl en la solución nutritiva, redujo significativamente la concentración foliar de P.
- El tratamiento con Phi y 100 mM NaCl incrementó significativamente la concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate.

1.7. LITERATURA CITADA

- Abbasi GH, Akhtar J, Ahmad R, Jamil M, Anwar-ul-Haq M, Ali S, Ijaz M. 2015. Potassium application mitigates salt stress differentially at different growth stages in tolerant and sensitive maize hybrids. *Plant Growth Regulation* 76: 111–125. Doi: 10.1007/s10725-015-0050-1
- Alcántar GC, Sandoval VM. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Chapingo, México.
- Bachiega ZFC, Mesquita GL, Menino G, Tanaka FAO, Mattos DJ, Quaggio JA. 2017. Anatomical and ultrastructural damage to citrus leaves from phosphite spray depends on phosphorus supply to roots. *Plant Soil*. Vol.: 418. pp.: 557-569. Doi.: 10.1007/s11104-017-3314-x
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39(1): 205-207.
- Berkowitz O, Jost R, Kollehn DO, Fenske R, Finnegan PM, O'Brien PA, Hardy Giles E St J, Lambers H. 2013. Acclimation responses of *Arabidopsis thaliana* to sustained

- phosphite treatments, *Journal of Experimental Botany* 64 1731–1743. Doi: 10.1093/jxb/ert037
- Bremner JM. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C. A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9*. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. pp. 1149-1178.
- Casierra-Posada F, Carreño-Patiño A, Cutler J. 2017. Growth, Fiber and Nitrogen Content in Sisal Plants (*Furcraea* sp.) Under NaCl Salinity. *Gesunde Pflanzen* 69: 83–90. Doi: 10.1007/s10343-017-0390-z
- Cerqueira A, Alves A, Berenguer H, Correia B, Gómez-Cadenas A, Javier DJ, Monteiro P, Pinto G. 2017. Phosphite shifts physiological and hormonal profile of Monterey pine and delays *Fusarium circinatum* progression. *Plant Physiology and Biochemistry* 114: 88-99. Doi: 10.1016/j.plaphy.2017.02.020
- Conover WJ, Iman RL. 1981. Rank transformation as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician* 35(3): 124-129.
- FAOSTAT.2017.Datos-Cultivos. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>. Consultado: Febrero 13, 2017
- García-Abellan JO, Fernandez-García N, Lopez–Berenguer IE, Flores FB, Angosto T, Caspel J, Lozano R, Pineda B, Moreno V, Olmos E, Bolarin MC. 2015. The tomato res mutant which accumulates JA in roots in non-stressed conditions restores cell structure alterations under salinity. *Physiologia Plantarum* 155: 296-314. Doi: 10.1111/ppl.12320
- Geiger MP, Walch-Liu C, Engels J, Harnecker ED, Schulze F, Ludewig U, Sonnewald WR, Scheible, Stitt M. 1998. Enhanced carbon dioxide leads to a modified diurnal rhythm of nitrate reductase activity and higher levels of amino acids in Young tobacco plants. *Plant Cell Environ.* 21: 253-268.
- Gharsallah C, Fakhfakh H, Grubb D, Gorsane F. 2016. Effect of salt stress on ion concentration, proline content, antioxidant enzyme activities and gene expression in tomato cultivars. *AoB PLANTS*. 8:1. Doi: 10.1093/aobpla/plw055
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2015. Bioestimulant activity of phosphite in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196: 82-90. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.035
- Gong B, Wen D, VandenLangenberg K, Wei M, Yang F, Shi Q, Wang X. 2013. Comparative effects of NaCl and NaHCO₃ stress on photosynthetic parameters, nutrient metabolism, and the antioxidant system in tomato leaves. *Scientia Horticulturae* 157: 1-12. Doi: 10.1016/j.scienta.2013.03.032
- Han P, Wang ZJ, Lavoit AV, Thomas M, Seassau A, Zheng WY, Niu CY, Desneux N. 2016. Increased water salinity applied to tomato plants accelerates the development of the leaf miner *Tuta absoluta* through bottom-up effects. *Scientific Reports* 6: 32403. Doi: 10.1038/srep32403
- Harborne J. B. 1973. Chlorophyll extraction. *In*: Harborne, J.B. (ed.), *Phytochemical Methods. Recommended technique*. Chapman and Hall, London. pp. 205-207
- Jost R, Pharmawati M, Lapis-Gaza HR, Rossig C, Berkowitz O, Lambers H, Finnegan FM. 2015. Differentiating phosphate-dependent and phosphate-independent systemic phosphate-starvation response networks in *Arabidopsis thaliana* through the

- application of phosphite. *Journal of Experimental Botany* 66: 2501-2514. Doi: 10.1093/jxb/erv025
- Kariman K, Barker SJ, Jost R, Finnegan PM, Tibbett M. 2016. Sensitivity of jarrah (*Eucalyptus marginata*) to phosphate, phosphite, and arsenate pulses as influenced by fungal symbiotic associations. *Mycorrhiza* 26: 401-415. Doi: 10.1007/s00572-015-0674-z
- Kautz B, Noga G, Hunsche M. 2014. Sensing drought- and salinity-imposed stresses on tomato leaves by means of fluorescence techniques. *Plant Growth Regulation* 73: 279-288. Doi: 10.1007/s10725-014-9888-x
- 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
- Lopes AJ, William de Ávila F, Faquin V. 2016. Phosphite and phosphate in the accumulation and translocation of nutrients in common bean. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 46: 357-366. Doi: 10.1590/1983-40632016v4640810
- López-Arredondo DL, Herrera-Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse condition based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnology Journal* 11(4): 516-525. Doi: 10.1111/pbi.12063
- Manna M, Islam T, Kaul T, Subramanyam RC, Fartyal D, James D, Reddy MK. 2015. A comparative study of effects of increasing concentrations of phosphate and phosphite on rice seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum* 37: 258. Doi: 10.1007/s11738-015-2016-3
- Mardonez R. 2014. El Contenido de P₂O₅ en Fosfitos no es suficiente variable de decisión para adquirir un producto. *Publicaciones COMPO EXPERT. Red Agrícola N°62*. pp.: 22-23. Consultado en: <http://www.compo-expert.com/cl/novedades/publicaciones-compo-expert.html>
- Michele MT, Pompeiano A, Huarancca RT, Scartazza A, Guglielminetti L. 2016. The efficient physiological strategy of a tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 109: 262-272. Doi: 10.1016/j.plaphy.2016.10.008
- Monteiro FLH, Rezende de Oliveira SH, Rezende DK, Vilela RML, Donizeti AJ. 2014. Inducers of Resistance and Their Role in Photosynthesis and Antioxidant System Activity of Coffee Seedlings. *American Journal of Plant Sciences* 5: 3710-3716. Doi: 10.4236/ajps.2014.525387
- Moore S, Stein WH. 1954. A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids and related compounds. *J. Biol. Chem.* 211: 893-906.
- National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Database; CID=107908, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/107908> (accessed June 24, 2017).
- Negrão S, Schmöckel SM, Tester M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany*. 119: 1-11. Doi:10.1093/aob/mcw191

- Nuez, F. 2001. El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. pp 156-159.
- Rivero RM, Mestre T C, Mittler R, Rubio F, Garcia-Sanchez F, Martinez V. 2014. The combined effect of salinity and heat reveals a specific physiological, biochemical and molecular response in tomato plants. *Plant Cell Environ.* 37: 1059-1073. Doi: 10.1111/pce.12199
- Rossall S, Qing C, Paneri M, Bennett M, Swarup R. 2016. A 'growing' role for phosphites in promoting plant growth and development. *Acta Hortic. ISHS.* 1148: 61-68. Doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1148.7
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3 User's Guide. Cary, North Carolina: SAS Institute Inc.
- Scott P, Bader MKF, Williams NM. 2016. Foliar phosphite application has minor phytotoxic impacts across a diverse range of conifers and woody angiosperms. *Physiologia Plantarum* 158: 124-134. Doi: 10.1111/ppl.12442
- Singhal P, Jan AT, Azam M, Haq QMR. 2016. Plant abiotic stress: a prospective strategy of exploiting promoters as alternative to overcome the escalating burden. *Frontiers in Life Science* 9(1): 52-63. Doi: 10.1080/21553769.2015.1077478
- Steiner A. 1984. The universal nutrient solution. *In: I.S.O.S.C. Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture.* pp. 633-649. The Netherlands.
- Torres EJC, Yañez BE, Wrobel K, Wrobel K. 2013. Monitoring of Phosphorus Oxide Ion for Analytical Speciation of Phosphite and Phosphate in Transgenic Plants by High-Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61: 6622-6628. Doi: 10.1021/jf4012278
- Zhang ZP, Miao MM, Wang CL. 2015. Effects of ALA on Photosynthesis, Antioxidant Enzyme Activity, and Gene Expression, and Regulation of Proline Accumulation in Tomato Seedlings Under NaCl Stress. *J Plant Growth Regul.* 34: 637-650 Doi: 10.1007/s00344-015-9499-4

CAPÍTULO II. FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS POR CADMIO EN TOMATE

RESUMEN

FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS POR CADMIO EN TOMATE

Se realizó un experimento de tipo factorial 2^3 con el objetivo de evaluar el efecto del fosfito (Phi) en los parámetros de crecimiento, de concentración nutrimental de hoja, tallo y raíz, bioquímicos y fisiológicos en plántulas de tomate variedad Cid expuestas a diferentes concentraciones de cadmio (Cd). Este estudio se realizó en el verano de 2016 bajo condiciones protegidas en un invernadero tipo túnel con cubierta de plástico perteneciente al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Se estudiaron dos concentraciones de fosfito (0 y $0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$) y tres concentraciones de Cd (0, 10 y $20 \mu\text{M}$ a partir de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), suministradas vía radicular a las plántulas de tomate en la solución nutritiva de Steiner al 25% durante 21 días de tratamiento. Los resultados indican que la adición de Phi a la solución nutritiva incrementó el crecimiento, número de flores, así como en la acumulación de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz de plántulas de tomate. El incremento en la concentración de Cd en la solución nutritiva redujo el número de hojas, botones florales y flores, área foliar, peso fresco de hoja y raíz, peso seco de hoja, tallo y raíz, diámetro de tallo, longitud y volumen de raíz; así como en la acumulación de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz; en los parámetros bioquímicos se observó una reducción significativa en la concentración de clorofila a y total; así mismo los parámetros fotosintéticos como son la concentración intercelular de CO_2 y la tasa fotosintética se redujeron de forma significativa conforme se incrementó la concentración de Cd en la solución nutritiva. Respecto a la interacción de los factores de estudio Phi y Cd en la solución nutritiva, se observa que el aporte de Phi afectó de manera significativa el peso fresco y seco de raíz a niveles de cero toxicidad, de igual manera incrementó el volumen de raíz y el diámetro de tallo a concentraciones de 10 y $20 \mu\text{M}$ de Cd y afectó de manera significativa la concentración de macro y micronutrientes en hojas, tallo y raíz de plántulas de tomate a diferentes niveles de toxicidad.

Palabras clave: Fosfito, estrés abiótico, cadmio, *Solanum lycopersicum*.

ABSTRACT

PHOSPHITE AND ITS RELATION WITH STRESS BY CADMIUM IN TOMATO

In the present research work, a factorial 2^3 experiment was carried out with the objective of evaluating the effect of phosphite (Phi) in the parameters of growth, nutritional concentration of leaf, stem and root, in biochemical parameters and finally in parameters related to the photosynthesis of tomato seedlings variety Cid exposed to different concentrations of cadmium (Cd). This research was carried out during the summer of 2016 under protected conditions in a tunnel-type greenhouse with plastic cover belonging to the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Assessing the effect of two concentrations of phosphite (0 y $0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$) and three concentrations of heavy metal stress (0, 10 y $20 \text{ } \mu\text{M}$ from $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) supplied via the root to the tomato seedlings by the Steiner nutrient solution at 25% for 21 days of treatment. There is sufficient evidence to demonstrate that the addition of Phi to the nutrient solution showed a significant increase in the parameter of growth number of flowers, as well as in the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root of tomato seedlings. Tomato seedlings induced to stress caused by a heavy metal such as Cd showed significant decreases as the concentration increased from 0 to 10 and $20 \text{ } \mu\text{M}$ of $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ in growth parameters such as number of leaves, flower buds and flowers, foliar area, fresh weight of leaf and root, dry weight of leaf, stem and root, diameter of stem, length and volume of root; as well as in the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root; in the biochemical parameters a significant reduction in the concentration of chlorophyll a and total is observed. Likewise, the photosynthetic parameters such as the intercellular concentration of CO_2 and the photosynthetic rate were reduced significantly as the concentration of Cd in the nutrient solution increased, regarding the interaction of the study factors Phi and Cd in the nutrient solution, it is observed that the contribution of Phi significantly affected the fresh and dry weight of root to levels of zero toxicity, in the same way increased the volume of root and stem diameter at concentrations of 10 and $20 \text{ } \mu\text{M}$ of Cd and significantly affected the concentration of macro and micronutrients in leaves, stem and root of tomato seedlings at different levels of toxicity.

Key words: Phosphite, abiotic stress, cadmium, *Solanum lycopersicum*.

2.1. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son algunos de los contaminantes ambientales más importantes y su presencia en el ecosistema ha aumentado considerablemente en las últimas décadas debido a las actividades antropogénicas como la minería, la fundición, la aplicación de fertilizantes fosfatados, distribución de lodos cloacales, precipitaciones atmosféricas de las actividades industriales y municipales, así como la eliminación de bacterias y residuos (Nogueirol *et al.*, 2016; Jia *et al.*, 2015). Estos metales son dañinos debido a su larga vida biológica y a su potencial para acumularse en la naturaleza, el cadmio (Cd), el plomo (Pb), el cobre (Cu), el mercurio (Hg) y el níquel (Ni), son los metales pesados más comunes y algunos son tóxicos para los ciclos de vida de las plantas tales como Cd y Pb, otros son esenciales para el desarrollo de la planta pero dañinos por encima de la cantidad requerida (Kisa *et al.*, 2017).

Aunque no se conoce una función biológica del Cd en las plantas, éste es absorbido fácilmente por las raíces y trasladado a los órganos aéreos, además es uno de los contaminantes más tóxicos en el medio ambiente y afecta muchos procesos metabólicos en las plantas, altera el sistema de transporte de electrones y la concentración de aquellos compuestos responsables de la oligomerización del complejo de proteínas de la clorofila, lo que resulta en su degradación y la consecuente clorosis de las hojas; las reducciones en la concentración y la consecuente alteración de la síntesis de clorofila pueden ser la causa principal de la disminución de la actividad fotosintética en las plantas expuestas a Cd, muchos estudios han demostrado que la toxicidad por Cd tiene efectos nocivos sobre la biosíntesis de la clorofila, la transpiración, y los procesos de respiración, apertura de estomas y transporte de electrones, lo que finalmente ralentiza la tasa de fotosíntesis (Jia *et al.*, 2015).

Asimismo hablando en términos de la calidad general del agua en el mundo, la escorrentía superficial en los sistemas agrícolas que se infiltran en los sistemas acuáticos es una de las formas más extendidas de contaminación por metales

pesados (Nogueirol *et al.*, 2016); por tanto, los metales pesados que se acumulan pueden permanecer en el medio ambiente por un largo tiempo y eventualmente acumularse a niveles que podrían dañar a los humanos (Nogueirol *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2016). El Cd no es un elemento esencial para los humanos y causa toxicidad en la salud humana, incluso en concentraciones no fitotóxicas en el suelo (Nogueirol *et al.*, 2016).

Por otra parte, las sales de fosfito (Phi) son sales inorgánicas del ácido fosforoso formuladas con potasio, manganeso, cobre o zinc y que se han utilizado como inductores de resistencia para activar los mecanismos subyacentes a la defensa de las plantas (Monteiro *et al.*, 2016), químicamente hablando el Phi es una forma reducida de Pi en la cual un átomo de oxígeno es reemplazado por uno de hidrógeno, sustitución que afecta de manera prominente el comportamiento de este compuesto en organismos vivos, en fosfato (Pi) el átomo de P está presente en el centro de un tetraedro con los átomos de oxígeno bien distribuidos por lo que la estructura de Pi es totalmente simétrica debido a su distribución de carga uniforme en el ion; En cambio en Phi, el átomo de P también está dispuesto en el centro del tetraedro pero se pierde su simetría perfecta lo que altera en gran medida su actividad biológica (Achary *et al.*, 2017), estudios sugieren que Phi tiene un modo de acción complejo, que incluye efectos en la estimulación de los mecanismos de defensa de las plantas, como una producción aumentada de fitoalexinas y ROS, la inducción de proteínas relacionadas con la partenogénesis y fortalecimiento de la pared celular (Monteiro *et al.*, 2016).

Considerando lo anterior, en el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación de los efectos del uso de fosfito (Phi) como bioestimulante en el cultivo de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Cid, sometido a un estrés inducido por Cd adicionado a distintas concentraciones (0, 10 y 20 μM a partir de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) en la solución nutritiva, analizando así las variables de crecimiento, nutrimentales, bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis del cultivo como respuesta.

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) vía radical, en variables de crecimiento, nutrimentales, bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis de plántulas de tomate sometidas a estrés por cadmio.

2.2.2. Objetivos particulares

- Determinar el efecto de la adición de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) vía radical, en variables de crecimiento de plántulas de tomate sometidas a estrés por cadmio.
- Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) vía radical, en variables nutrimentales de plántulas de tomate sometidas a estrés por cadmio.
- Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) vía radical, en parámetros bioquímicos y relacionados con fotosíntesis de plántulas de tomate sometidas a estrés por cadmio.

2.3. HIPÓTESIS

2.3.1. Hipótesis general

El tratamiento con H_2PO_3^- adicionado a la solución nutritiva, en plantas de tomate var. Cid sometidas a estrés por cadmio, reduce el efecto negativo de éste en parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y relacionados con fotosíntesis.

2.3.2. Hipótesis particulares

- El suministro de H_2PO_3^- en la solución nutritiva empleada para el riego de plántulas de tomate var. Cid expuestas a estrés por cadmio, mitiga los efectos negativos de toxicidad por metal pesado en el crecimiento.

- El tratamiento con H_2PO_3^- en la solución nutritiva a plántulas de tomate var. Cid, expuestas a estrés por cadmio, presenta un efecto positivo en las variables nutrimentales del cultivo.
- La adición de H_2PO_3^- a la solución nutritiva empleada en el riego de plántulas de tomate var. Cid, sometidas a un gradiente de toxicidad cadmio, presenta un efecto positivo en las variables bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Localización geográfica del área experimental

El presente trabajo de investigación se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica perteneciente al área Nutrición Vegetal del Posgrado de Edafología, en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, localizado a 19° 28' latitud norte, 98° 54' latitud oeste, a una altitud de 2245 m. El sitio tiene una temperatura mínima promedio de 15.48 °C y una temperatura máxima promedio de 26.31 °C, con una HR media de 16.35% durante el día y de 34.19% durante la noche y un punto de rocío promedio de 8.25 °C.

2.4.2. Sustrato

El sustrato utilizado fue la perlita un silicato alumínico de origen volcánico cuyas características se mencionan en el Capítulo I de esta tesis (Capítulo I. Fosfito y su relación con estrés salino en tomate).

2.4.3. Material vegetal

Se utilizó semilla de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de la variedad El Cid, lote: E65175, material para investigación de la casa comercial Harris Moran.

2.4.4. Descripción de tratamientos

En esta investigación, para la formulación de las seis soluciones nutritivas evaluadas, se consideró como referencia para la formulación de las soluciones nutritivas, la solución nutritiva universal de Steiner ([Steiner, 1984](#)); En este caso

particular al 25% de su concentración, como se explica detalladamente en el Capítulo I de la presente tesis; de igual manera, las soluciones nutritivas se prepararon con agua destilada y con sales grado reactivo (Fermont, Meyer, J.T. Baker; México).

A las soluciones nutritivas se adicionaron las tres concentraciones de Cd siguientes, a partir de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$: 0, 10 y 20 μM . Asimismo, en las soluciones nutritivas se agregaron dos concentraciones de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) a partir de ácido fosforoso (H_3PO_3): 0 y 0.0375 $\text{mol}_e \text{ m}^{-3}$, estas concentraciones corresponden a 0 y 15% del P total como fosfato en la solución de Steiner al 25%, respectivamente. El $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ y el H_3PO_3 empleados fueron de las marcas J. T. Baker (USA) y Sigma Aldrich (Merck; Germany), respectivamente.

El pH de las soluciones nutritivas se calibró utilizando un medidor portátil de pH, conductividad y temperatura modelo PC18, México y fue ajustado a 5.5 utilizando NaOH 1 N o H_2SO_4 1 N.

2.4.5. Diseño experimental

Se utilizó un acomodo de tipo factorial 2^3 en un diseño experimental completamente al azar (DECA), en el que los factores y niveles a evaluar fueron:

Factor cadmio (Cd) en los niveles 0, 10 y 20 μM .

Factor fosfito (Phi), en los niveles 0 y 0.0375 $\text{mol}_e \text{ m}^{-3}$.

Se obtuvieron seis tratamientos del acomodo factorial, para cada tratamiento se colocaron 14 repeticiones obteniéndose un total de 84 unidades experimentales las cuales fueron vasos de plástico individuales (Bosco™) con una capacidad de 60 mL cada uno.

El modelo estadístico empleado se describe a detalle en el Capítulo I de la presente investigación.

2.4.6. Manejo del experimento

La aplicación de tratamientos tuvo una duración de 21 días (del 04 de julio al 24 de julio de 2016). Durante ese tiempo se aplicaron tres riegos diarios de 50 mL cada uno a cada unidad experimental.

2.4.7. Variables evaluadas

2.4.7.1. Parámetros de crecimiento

Después de 21 días de aplicación de tratamientos se determinaron las variables siguientes:

- Número de hojas, número de botones florales y número de flores.
- Altura de planta y longitud de raíz se determinaron usando una regla de 50 cm.
- Volumen de raíz, mediante el método de desplazamiento de volumen usando una probeta de vidrio (Pyrex) de 250 mL.
- Diámetro de tallo con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, México).
- Área foliar por planta con un integrador (LI-COR, LI-300, Lincoln, NE, EEUU).
- Pesos de biomasa fresca de raíz, tallos y hojas empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).
- Pesos de biomasa seca de raíz, tallos y hojas. Se determinó en muestras secadas durante 48 h a 70 °C en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, México), empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).

2.4.7.2. Concentración y acumulación de nutrimentos y de Cd

Se determinó la concentración de N en los distintos órganos de la planta (raíz, tallo y hojas), empleando el método Semimicro-Kjeldahl ([Bremner, 1965](#)).

Asimismo, en los órganos antes indicados se determinaron las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y Cd, en el extracto resultante de la digestión húmeda del material seco con HNO₃ y HClO₄ de acuerdo a lo descrito por [Alcántar y Sandoval \(1999\)](#). Los extractos se leyeron en un equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma Varian 725 ES ICP (Agilent, ICP Optical

Emission Spectrometer, 725-ES, USA). Las acumulaciones de nutrientes y Cd se estimaron considerando las concentraciones de éstos y los pesos de biomasa seca del órgano en particular.

2.4.7.3. Concentración de biomoléculas

Las muestras de raíz, tallo y hoja de plántulas de tomate se almacenaron a una temperatura de -20 °C en un congelador (COOL-LAB, LAB-LINE INSTRUMENTS, USA). En estas muestras se realizaron las siguientes determinaciones:

- Concentración foliar de clorofila a, b y total. Se realizó por el método descrito por [Harborne \(1973\)](#), se midieron absorbancias a 645 y 665 nm usando un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell changer y UK). Con los resultados se realizan las estimaciones de clorofilas utilizando las formulas siguientes:

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g/mg peso fresco}) = (5.46 \times \text{Abs}_{665}) - (2.16 \times \text{Abs}_{645})$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g/mg peso fresco}) = (9.67 \times \text{Abs}_{645}) - (3.04 \times \text{Abs}_{665})$$

- Aminoácidos libres totales en hoja. Se realizó una extracción etanólica siguiendo la metodología de [Geiger et al. \(1998\)](#) y se empleó el método de la ninhidrina ([Moore y Stein, 1954](#)). Se utilizó leucina para la elaboración de la curva estándar y se leyó a una longitud de onda de 570 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell changer y UK).

2.4.7.4. Parámetros relacionados con fotosíntesis

En la cuarta hoja de arriba hacia debajo de la planta, se realizaron las mediciones siguientes, empleando un analizador de gases en infrarrojo (IRGA) (LICOR, LI-6400XT, USA):

- Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Conductancia estomática al agua ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Concentración de CO_2 intercelular ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)
- Tasa de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

2.4.8. Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$), corroborando antes que se cumplieran los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianza. Debido a que algunas variables no cumplían con el supuesto de normalidad se recurrió al método de transformación por rangos propuesto por [Conover y Iman \(1981\)](#) para lo cual se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis System 9.0 y SAS University Edition ([SAS Institute Inc., 2011](#)).

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Parámetros de crecimiento

2.5.1.1. Número de hojas, de botones florales y de flores

Los datos de número de hojas no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 2.1A y 2.1B**); Por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman fue posible observar que el fosfito no tuvo influencia significativa en el número de hojas de plántulas de tomate (**Figura 2.1a**); asimismo se observa que, conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva disminuye significativamente el número de hojas por plántula (**Figura 2.1b**).

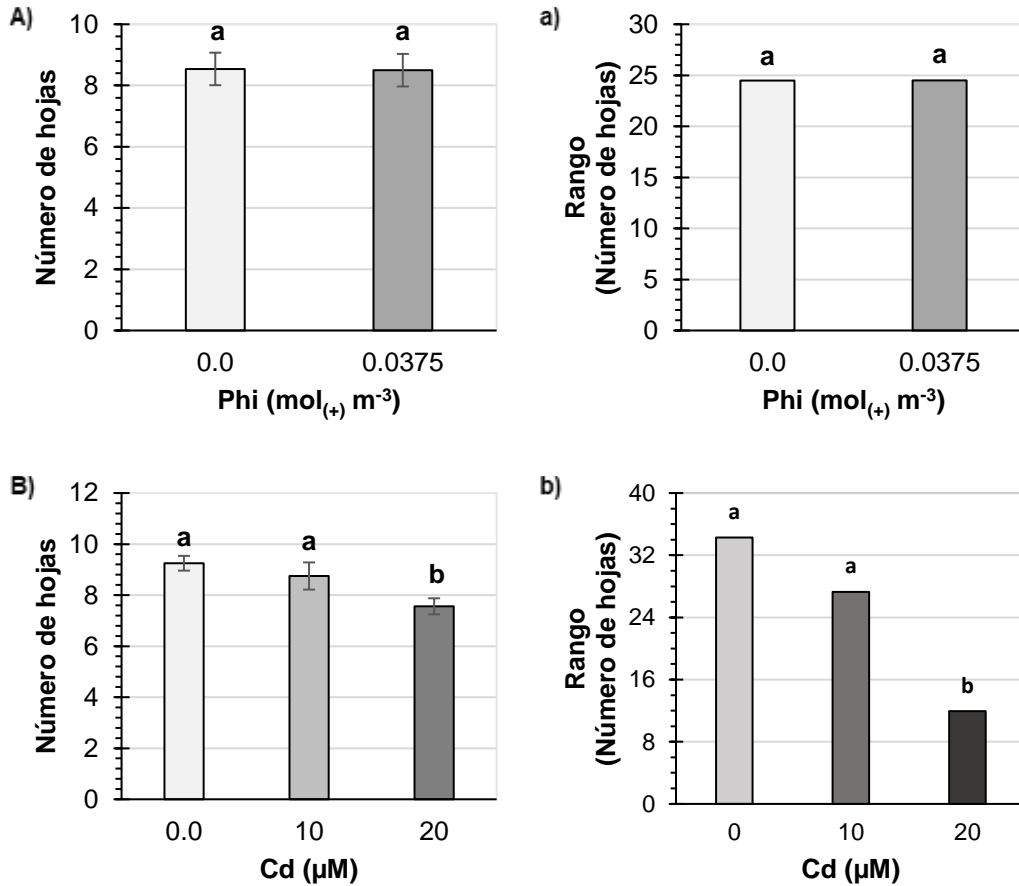


Figura 2. 1 Número de hojas de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.8550$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=1.0$)] y Cd [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

El número de botones florales (**Figura 2.2A**) por planta no fue afectado significativamente por los tratamientos con Phi; mientras que, se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme incrementa la concentración de Cd en la solución nutritiva disminuye significativamente el número de botones florales por plántulas (**Figura 2.2B**).

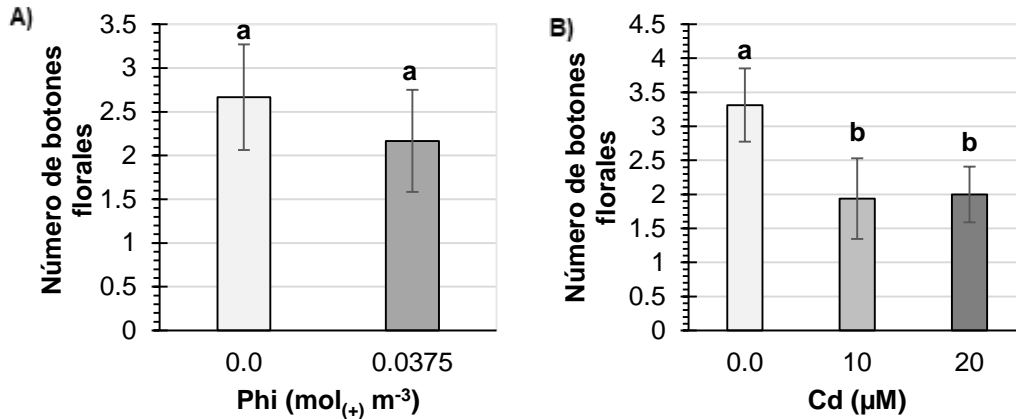


Figura 2. 2 Número de botones florales por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.0934$), Cd ($P=0.0004$).

Existe un incremento significativo del 25.61% en el número de flores (**Figura 2.3A**) de plántulas de tomate tratadas con Phi respecto al testigo; caso contrario a lo documentado por [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#), quienes reportaron que en condiciones óptimas de fosfato (1 mM Pi) en la solución nutritiva, se reduce de manera significativa el número de flores en pepino (*Cucumis sativus*) cv. Conil conforme se realizaron aplicaciones foliares e incrementó la concentración de Phi desde 0.1, 0.25, 0.5 y hasta 1.0 mM. De igual manera se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme incrementa la concentración de Cd en la solución nutritiva aumenta en 38.78% el número de flores por plántulas de tomate (**Figura 2.3B**); caso contrario a lo observado por [Hédiji et al. \(2015\)](#), quienes reportaron una reducción significativa en el número de flores maduras en tomate, conforme se incrementa la concentración de Cd suministrado como CdCl₂ en la solución nutritiva desde 0, 20 y hasta 100 μM.

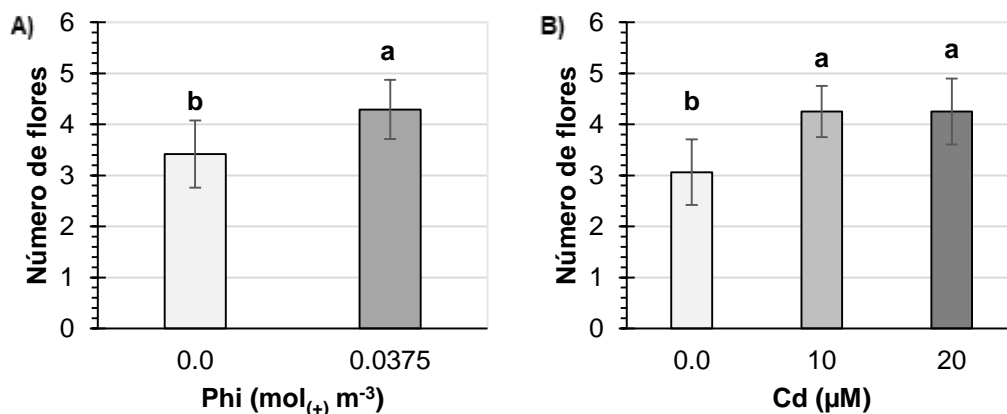


Figura 2. 3 Número de flores por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0079$), Cd ($P=0.0038$).

En lo que se refiere a la interacción de fosfito y Cd, es evidente que el número de flores fue superior en 51.78% en plantas de tomate con la mayor concentración de Cd tratadas con Phi, respecto al testigo sin Cd y sin Phi (**Cuadro 2.1**).

Cuadro 2. 1 Número de hojas, botones florales y flores en plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Cd (μm)	Número de hojas	Rango (Número de hojas ^δ)	Número de botones florales	Número de flores
0.0000	0	9.00 \pm 0.27 a	30.813 a	3.63 \pm 0.53 a	2.62 \pm 0.70 c
0.0375	0	9.50 \pm 0.27 a	37.750 a	3.00 \pm 0.53 ab	3.50 \pm 0.53 bc
0.0000	10	9.00 \pm 0.60 a	29.813 a	1.88 \pm 0.56 b	4.25 \pm 0.44 ab
0.0375	10	8.50 \pm 0.46 ab	24.750 ab	2.00 \pm 0.65 b	4.25 \pm 0.58 ab
0.0000	20	7.63 \pm 0.37 b	12.875 b	2.50 \pm 0.38 ab	3.38 \pm 0.59 bc
0.0375	20	7.50 \pm 0.27 b	11.000 b	1.50 \pm 0.27 b	5.13 \pm 0.32 a
Pr > F		<0.0001	<0.0001	0.0013	0.0009
DMS ^ψ		1.1716	14.134	1.5059	1.6225
CV ^φ		9.21		41.74	28.2

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.1.2. Área foliar

El tratamiento con Phi no tuvo influencia en el área foliar de plántulas de tomate (**Figura 2.4A**). [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#) reportaron que en condiciones óptimas de fosfato (1 mM Pi) en la solución nutritiva, el área foliar de plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) cv. Conil no fue afectada por el suministro de Phi a concentraciones de 0.1 y 0.25 mM Phi; no obstante, conforme se incrementó la concentración de Phi en dichas aplicaciones a 0.5 y 1.0 mM, se redujo significativamente el área foliar.

Por otro lado, se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con 10 y 20 μM Cd en la solución nutritiva, disminuye significativamente el área foliar de las plántulas de tomate, dichas reducciones del orden de 8.07 y 34.28%, respectivamente (**Figura 2.4B**). En este sentido, [Hussain et al. \(2017\)](#) registraron una reducción significativa en el área foliar de dos variedades de tomate Roma y Nagina al momento de que se incrementa la concentración de Cd adicionado como CdCl_2 en la solución nutritiva de 0, 160, 320, 640 y 1280 μM .

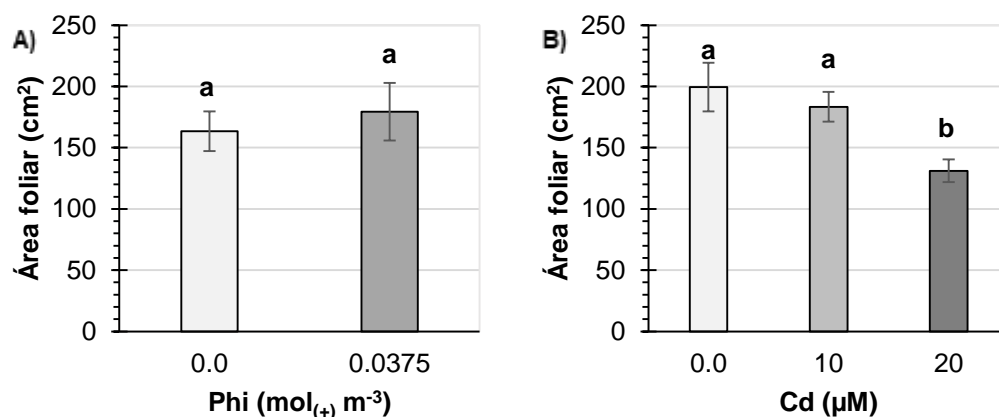


Figura 2. 4 . Área foliar de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0503$), Cd ($P < 0.0001$).

En lo que se refiere a la interacción de fosfito y Cd, ésta fue significativa, observándose reducción significativa del área foliar en los tratamientos con 20 μM Cd, independientemente del tratamiento con Phi (**Cuadro 2.2**).

Cuadro 2. 2 Área foliar por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Cd (μm)	Área foliar (cm ²)
0.0000	0	181.11±12.87 a
0.0375	0	217.93±21.94 a
0.0000	10	178.26±9.81 a
0.0375	10	188.56±14.44 a
0.0000	20	130.70±11.89 b
0.0375	20	131.54±6.31 b
Pr > F		<0.0001
DMS ^ψ		41.023
CV ^φ		16.03

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.1.3. Peso fresco y seco de hojas

El Phi no tuvo influencia significativa en el peso fresco de hojas de plántulas de tomate (**Figura 2.5A**), caso contrario a los reportado por [Manna et al. \(2016\)](#) donde se observa una reducción significativa en el peso fresco de hojas en plántulas de arroz tratadas con Phi a partir de $\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ a una concentración de 0.6 mM en la solución nutritiva durante 65 días, respecto a un testigo que fue tratado con fosfato como fuente de P. [Mofidnakhai et al. \(2016\)](#) observaron que al suministrar de manera foliar fosfito de potasio en concentraciones de 0, 2 y 4 g L⁻¹ durante 72 h, existió un incremento significativo en el peso fresco de hojas en plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) inoculadas con *Pythium ultimum* en condiciones óptimas.

Por el contrario se observa que el tratamiento con 10 y 20 μM Cd en la solución nutritiva, disminuye significativamente el peso fresco de hojas de plántulas de

tomate en 7.25 y 23.54%, respectivamente (**Figura 2.5B**). Estos resultados coinciden con lo reportado por [Singh y Prasad \(2017\)](#) quienes observaron una reducción significativa en el peso fresco de hojas de *Solanum lycopersicum* var. NS-2535 tratado con 3 y 9 mg Cd kg⁻¹, respecto al testigo. De igual manera [Roychoudhury et al. \(2016\)](#) observaron una reducción significativa en el peso fresco de hojas de plantas *Vigna radiata* L. tratadas con 1 mM Cd suministrado como CdCl₂ durante 72 h, respecto al testigo.

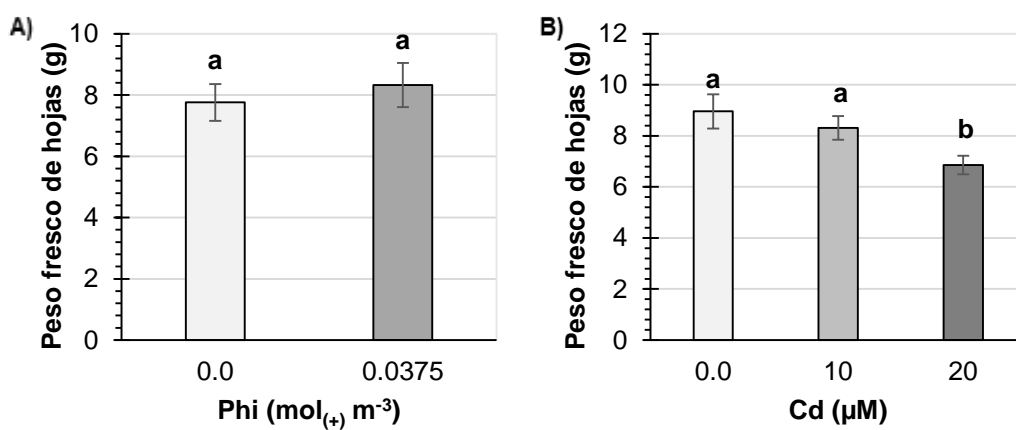


Figura 2. 5 Peso fresco de hojas por plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0508$), Cd ($P < 0.0001$).

Los datos de peso seco de hojas no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 2.6A y 2.6B**); por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman fue posible mostrar que el fosfito no tuvo influencia significativa en el peso seco de hoja por planta (**Figura 2.6a**). Estos resultados son coincidentes con lo reportado por [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#), quienes observaron que en condiciones con tasas deficientes y subóptimas de fosfato (0.1 y 0.5 mM Pi, respectivamente), en la solución nutritiva plántulas de *Cucumis sativus* cv. Conil no presentaron diferencias estadísticas significativas respecto a las aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 mM, mientras que en condiciones óptimas de Pi (1 mM) las aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 0.1 y 1.0 mM reportaron reducciones significativas en la biomasa seca de hojas

en plántulas de pepino. Otros investigadores como [Mofidnakhai et al. \(2016\)](#) observaron que al suministrar de manera foliar aspersiones de fosfito de potasio en concentraciones de 0, 2 y 4 g L⁻¹ durante 72 h, se incrementó de manera significativa en el peso seco de hojas en plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) inoculadas con *Pythium ultimum* en condiciones óptimas. Por su parte, [Bachiega \(2016\)](#) observó una reducción significativa en el peso seco de hojas de *Avena sativa* L. cv. IAC 7 al suministrarse 0.5 mmol Phi L⁻¹, contra un tratamiento Pi-deficiente (0.05 mmol Pi L⁻¹) y Pi-suficiente (0.5 mmol Pi L⁻¹) durante 2 meses.

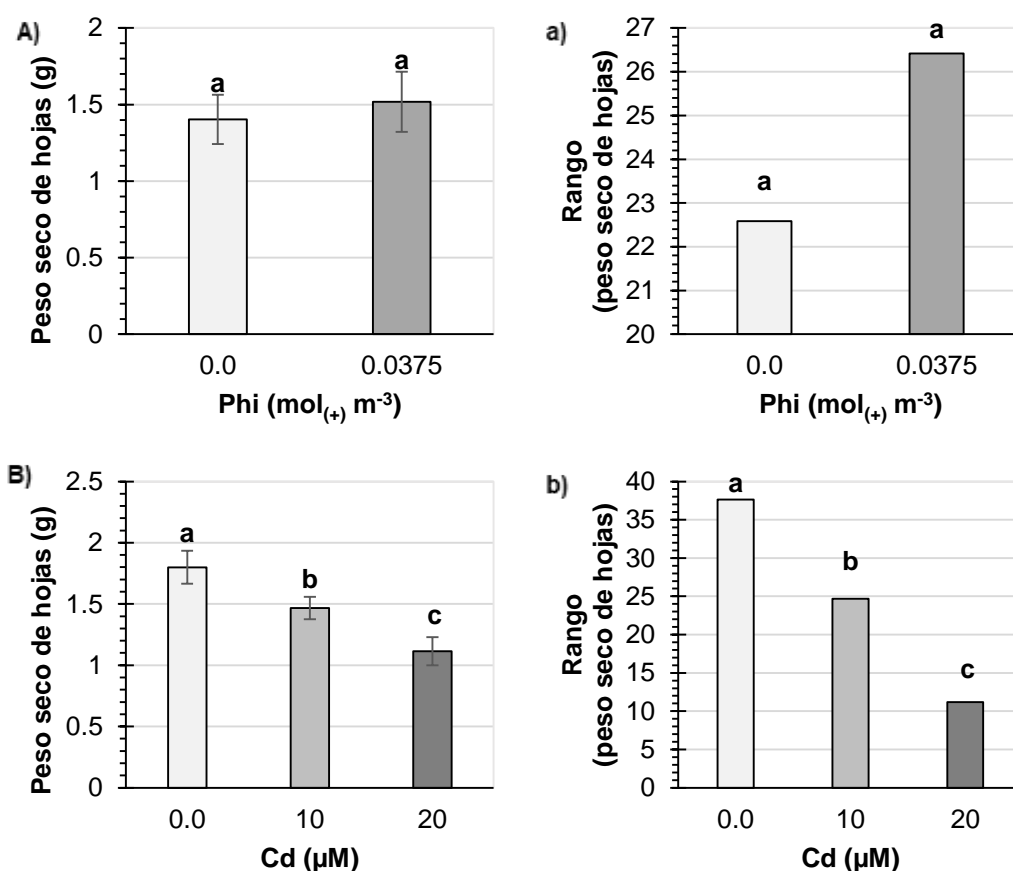


Figura 2. 6 Peso seco de hojas por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.0707); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=1271)] y Cd [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Por otra parte, se observa que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva existe una reducción significativa en el peso seco de hojas (**Figura 2.6b**). Wang *et al.* (2016) documentaron una reducción significativa en el peso seco de la parte aérea así como en la parte subterránea de plantas de ajo cultivadas en macetas al suministrarles 20 mg Cd kg⁻¹ de suelo, empleando como fuente de Cd el CdCl₂, comparado contra las plantas testigo; asimismo, Roychoudhury *et al.* (2016) observaron una reducción significativa en el peso seco de hojas de plantas de *Vigna radiata* L. tratadas con 1 mM CdCl₂ durante 72 h, respecto al testigo.

El peso fresco de hojas es significativamente menor en el tratamiento con 20 µM Cd y sin Phi; mientras que el menor peso fresco de hojas fue registrado en el tratamiento con 20 µM Cd y con adición de Phi (**Cuadro 2.3**).

Cuadro 2. 3 Peso fresco y seco de hoja por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (µM)	Peso fresco de hojas (g)	Peso seco de hojas (g)	Rango (Peso seco de hojas ^δ)
0.0000	0	8.252± 0.52 ab	1.642±0.13 ab	32.250 ab
0.0375	0	9.674±0.63 a	1.956±0.09 a	43.000 a
0.0000	10	8.258±0.54 ab	1.421±0.09 bc	22.750 bc
0.0375	10	8.368±0.40 ab	1.512±0.09 b	26.625 b
0.0000	20	6.777±0.45 c	1.145±0.16 cd	12.750 cd
0.0375	20	6.929±0.27 bc	1.084±0.06 d	9.625 d
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		1.4443	0.3195	12.736
CV ^φ		12.02	14.65	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.5.1.4. Peso fresco y seco de tallo

Existe un incremento significativo del 7.31% en el peso fresco de tallo de plántulas de tomate tratadas con Phi, en comparación con plantas del tratamiento testigo (**Figura 2.7A**). Asimismo, existió una relación inversa entre la concentración de Cd

en la solución nutritiva y el peso fresco del tallo; sin embargo, no se observan diferencias significativas entre tratamientos (**Figura 2.7B**).

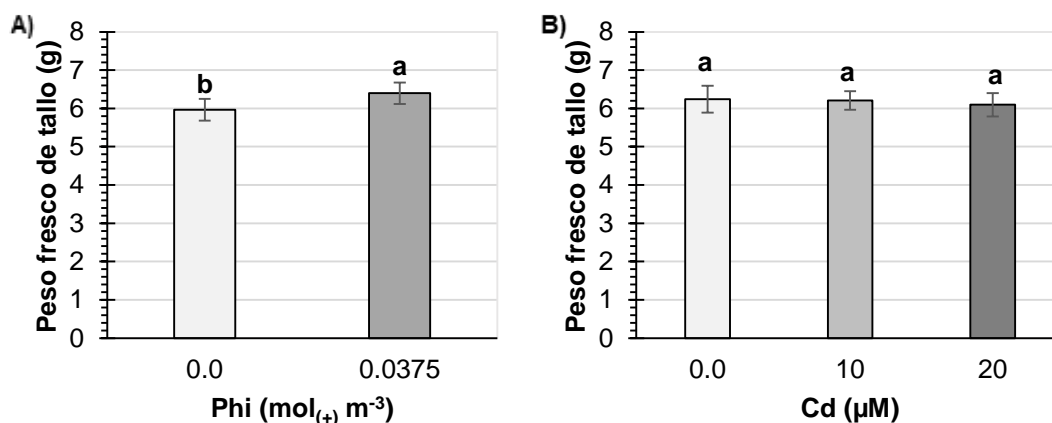


Figura 2. 7 Peso fresco de tallo por plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0117$), Cd ($P=0.7596$).

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que exista efecto significativo por parte del Phi en el peso seco de tallo de plántulas de tomate contra el testigo (**Figura 2.8A**).

Por otro lado, se observa que dosis de 10 y 20 μM Cd en la solución nutritiva disminuye el peso seco de tallo de plántulas de tomate en 0.3 y 9.88%, respectivamente (**Figura 2.8B**). [Jia et al. \(2015\)](#) estudiaron el efecto hormético del Cd en el crecimiento y el rendimiento fotosintético de la planta hiperacumuladora *Lonicera japonica*. Después de 90 días de exposición a 25 mg Cd kg⁻¹, no se mostraron efectos visibles de daño en las plantas, asimismo, bajas concentraciones de Cd (menores o iguales a 10 mg kg⁻¹), incrementaron de manera significativa la biomasa de la planta, la tasa neta fotosintética, el contenido de clorofila y carotenoides, entre otras variables.

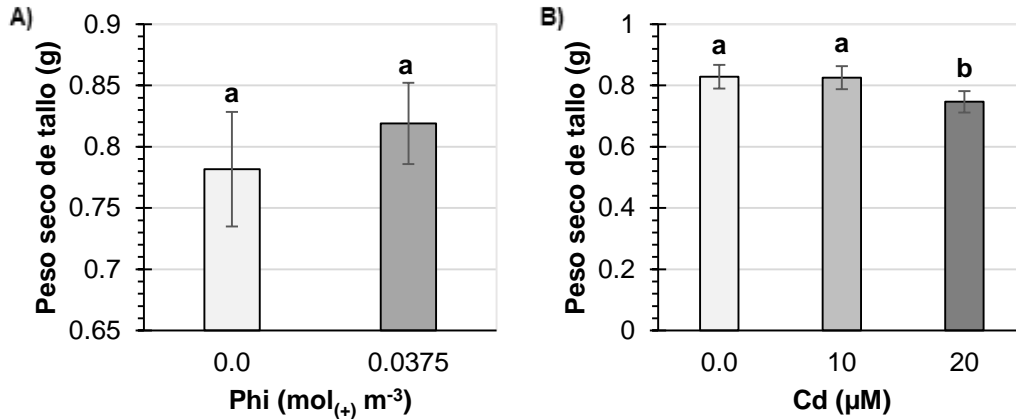


Figura 2. 8 Peso seco de tallo por plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0809$), Cd ($P=0.0032$).

El efecto de la interacción de fosfito y Cd (μM) no fue significativo en el peso fresco del tallo; mientras que sí lo fue en el peso seco de tallo de plántulas de tomate, donde se observan mayores efectos negativos con las dosis más altas de Cd en la solución nutritiva (**Cuadro 2.4**).

Cuadro 2. 4 Peso fresco y seco de tallo de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Cd (μm)	Peso fresco de tallo (g)	Peso seco de tallo (g)
0.0000	0	5.963 \pm 0.28 a	0.811 \pm 0.04 ab
0.0375	0	6.515 \pm 0.38 a	0.846 \pm 0.04 a
0.0000	10	6.146 \pm 0.24 a	0.827 \pm 0.04 a
0.0375	10	6.266 \pm 0.26 a	0.823 \pm 0.04 a
0.0000	20	5.777 \pm 0.32 a	0.706 \pm 0.04 b
0.0375	20	6.413 \pm 0.20 a	0.787 \pm 0.02 ab
Pr > F		0.1195	0.0061
DMS ^ψ		0.8553	0.1078
CV ^φ		9.27	9.02

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.1.5. Peso fresco y seco de raíz

Existe un incremento significativo del 13.02% en el peso fresco de raíz de plántulas de tomate tratadas con Phi comparado con el testigo (**Figura 2.9A**). [Mofidnakhaei et al. \(2016\)](#) observaron que al suministrar de manera foliar aspersiones de fosfito de potasio en concentraciones de 0, 2 y 4 g L⁻¹ durante 72 h, hubo un incremento significativo en el peso fresco de raíz en plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) inoculadas con *Pythium ultimum* bajo condiciones óptimas; por el contrario, [Manna et al. \(2016\)](#) reportaron una reducción significativa en el peso fresco de raíz en plántulas de arroz tratadas con 0.6 mM Na₂HPO₃ · 5H₂O en la solución nutritiva durante 65 días contra un testigo con Pi como fuente de P.

Asimismo, la adición de 10 y 20 μM Cd en la solución nutritiva disminuyó significativamente el peso fresco de raíz en un 5.95 y 11.24%, respectivamente (**Figura 2.9B**). [Ferri et al. \(2017\)](#) observaron una reducción significativa en el peso fresco de raíz de plántulas de *Arabidopsis* de 19 días de edad al ser expuestas durante 72 h a concentraciones de Cd de 0.1, 1.0 y 10 μM.

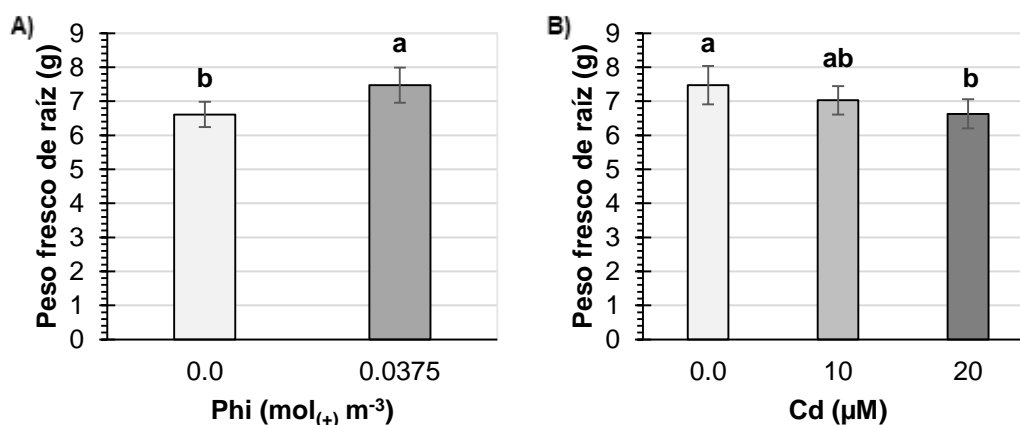


Figura 2. 9 Peso fresco de raíz por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.0005), Cd (P=0.0168).

Se observa un incremento significativo del 17.80% en el peso seco de raíz de plántulas de tomate tratadas con Phi comparado con el testigo (**Figura 2.10A**).

Constán-Aguilar *et al.* (2014) bajo condiciones deficientes (0.1 mM Pi) y subóptimas (0.5 mM Pi) de P en la solución nutritiva con plántulas de *Cucumis sativus* cv. Conil, observaron que existe un incremento significativo en la biomasa seca de raíz respecto a las aplicaciones foliares de Phi a una concentración de 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 mM; mientras que, en condiciones óptimas de Pi (1 mM Pi) no existió diferencia estadística significativa en la biomasa seca de raíz en plántulas de pepino debido a las aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 0, 0.1, 0.25, 0.50 y 1.0 mM. Por otra parte, Mofidnakhai *et al.* (2016) observaron que aspersiones foliares de fosfito de potasio a concentraciones de 0, 2 y 4 g L⁻¹ durante 72 h, produjeron un incremento significativo en el peso seco de raíz en plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) inoculadas con *Pythium ultimum* en condiciones óptimas. Mientras que, Bachiega (2016) registró una reducción significativa en el peso seco de raíz en *Avena sativa* L. cv. IAC 7 al suministrarse 0.5 mmol de P L⁻¹ como Phi, contra un tratamiento de Pi-deficiente (0.05 mmol L⁻¹ de P como Pi) y Pi-suficiente (0.5 mmol L⁻¹ de P como Pi) durante 2 meses.

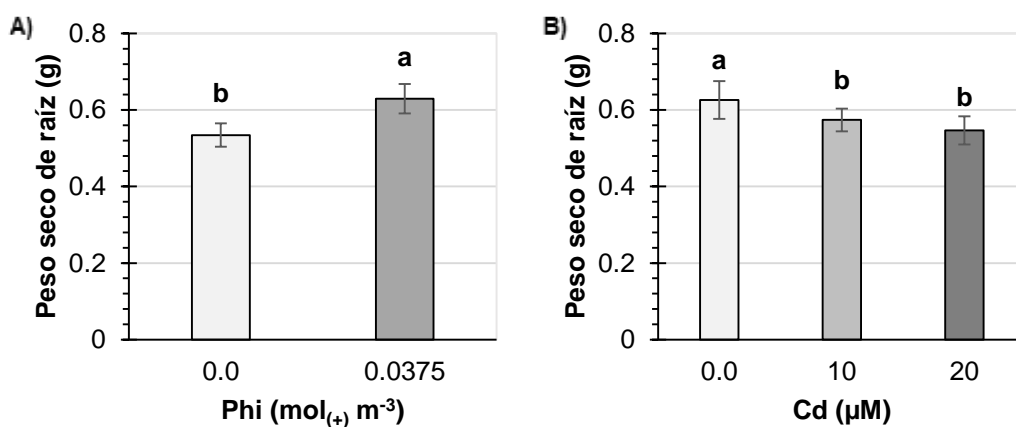


Figura 2. 10 Peso seco de raíz por planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P < 0.0001$), Cd ($P = 0.0021$).

El tratamiento con 10 y 20 μM Cd disminuye significativamente el peso seco de raíz en 8.30 y 12.69%, respecto al testigo (**Figura 2.10B**). Li *et al.* (2013) en su investigación con dos genotipos de plántulas de *Hibiscus cannabinus* L., registraron

una reducción significativa en el peso seco de raíz conforme se incrementa la concentración de Cd en la solución nutritiva de 0, 20, 50, 80 y 120 $\mu\text{M L}^{-1}$.

La interacción de Phi y Cd en la solución nutritiva tuvo efectos significativos en las biomásas fresca y seca de raíz. En particular, el Phi incrementó ambas variables solo en ausencia de Cd; estos incrementos fueron del orden de 25.78% y 27.04% para el peso fresco y seco de raíz, respectivamente, en comparación con el testigo (**Cuadro 2.5**).

Cuadro 2. 5 Peso fresco y seco de raíz de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Cd (μm)	Peso fresco raíz (g)	Peso seco raíz (g)
0.0000	0	6.617 \pm 0.22 b	0.551 \pm 0.02 bc
0.0375	0	8.323 \pm 0.46 a	0.700 \pm 0.04 a
0.0000	10	6.645 \pm 0.32 b	0.542 \pm 0.03 bc
0.0375	10	7.407 \pm 0.43 ab	0.605 \pm 0.02 b
0.0000	20	6.573 \pm 0.55 b	0.510 \pm 0.04 c
0.0375	20	6.687 \pm 0.29 b	0.582 \pm 0.03 bc
Pr > F		0.0002	<0.0001
DMS $^{\Psi}$		1.1814	0.0901
CV $^{\Phi}$		11.23	10.36

$^{\Psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. $^{\Phi}$ CV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.1.6. Altura de planta y diámetro de tallo

La altura de planta no fue influenciada por Phi (**Figura 2.11A**). [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#) observaron en su investigación que la aplicación foliar de Phi a una concentración de 1 mM bajo condiciones óptimas de Pi redujo significativamente la tasa de crecimiento relativo de raíz, hoja y de la planta entera de *Cucumis sativus*. cv. Conil. De igual manera algunos investigadores como [Deepa et al. \(2002\)](#) observaron que el Phi inhibe significativamente el crecimiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) VFNT “Cherry” a una concentración de 1, 2 y 3

mM Phi contra el testigo a niveles de deficiencia de fósforo y notando que en niveles de suficiencia de fósforo en la solución nutritiva también existe una reducción significativa del crecimiento de plántulas de tomate hasta un nivel de 3 mM Phi en comparación con el testigo.

Por otra parte, el Cd en la solución nutritiva no afectó significativamente la altura de plántula (**Figura 2.11B**); caso contrario a lo documentado por [Nogueirol et al. \(2016\)](#), quienes reportaron que la tasa de crecimiento de dos genotipos de tomate variedad Calabash Rouge y CNPH0082 disminuyó a medida que la concentración de Cd aplicada al suelo aumentó de 6 a 12 mg kg⁻¹.

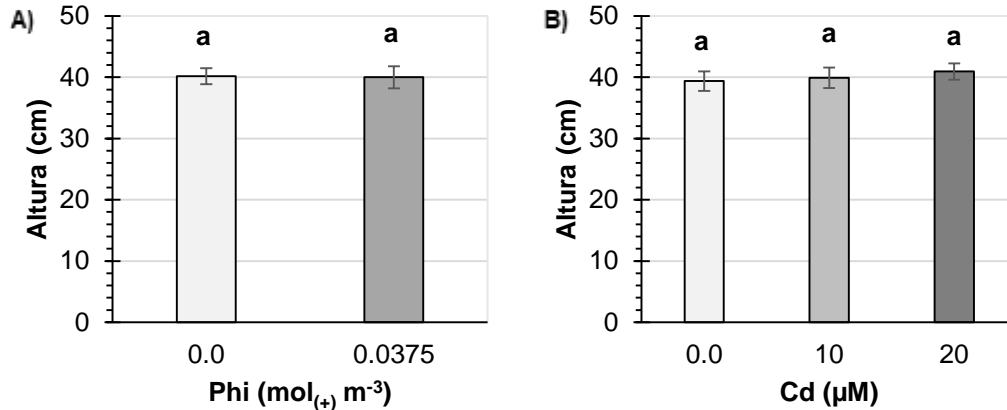


Figura 2. 11 Altura de planta de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.8406$), Cd ($P=0.2946$).

El diámetro de tallo tampoco fue afectado de manera significativa por la concentración de Phi (**Figura 2.12A**). Estudios realizados por [López-Arredondo et al. \(2013\)](#) demuestran que al evaluar previamente líneas transgénicas de *Arabidopsis*, se observaron diferencias notables entre plantas silvestres (WT) y plantas transgénicas en medios que contienen Phi, por lo que decidieron evaluar la sensibilidad de las plantas de *Arabidopsis* a Phi y así determinar la cantidad mínima y máxima de bioestimulante que se podría utilizar cultivando semillas en un medio sólido que contenía una concentración de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3 y 5 mM Phi como

la única fuente de P, y bajo todas las concentraciones de Phi probado se observó una inhibición efectiva en el crecimiento de plantas WT, mostraron efectos negativos inducidos por Phi incluyendo amarillamiento de hojas, tallos raquíticos, raíces primarias cortas y raíces laterales muy cortas o abortadas incluso en las concentraciones de Phi más bajas, el crecimiento de plantas WT fue detenido en la etapa cotiledonar o de cuatro hojas, y las plantas murieron 10 - 12 días después de la germinación, por el contrario, plantas transgénicas mostraron un vigoroso crecimiento en todas las concentraciones de Phi, sin diferencias notables entre las líneas con alta o baja expresión, también se observaron efectos selectivos de Phi para semillas germinadas en medio líquido suplementado con 0.05, 0.1 y 1 mM Phi para las cuales la concentración más baja fue suficiente para matar plantas WT durante 7-8 días después de germinación; mientras que, [Bachiega et al. \(2017\)](#) reporta en condiciones de suficiencia de fósforo en la solución nutritiva, que la aplicación a árboles de naranja de pulverizaciones foliares de Pi, KCl y Phi no lograron afectar de manera significativa el diámetro de tallo; mientras que, bajo deficiencias de fósforo, el Phi produjo la mayor reducción de diámetro de tallo.

Por otra parte, se observa que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva, se reduce de manera significativa el diámetro de tallo. Con 10 y 20 μ M Cd la reducción fue de 8.26% y un 11.06%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 2.12B**).

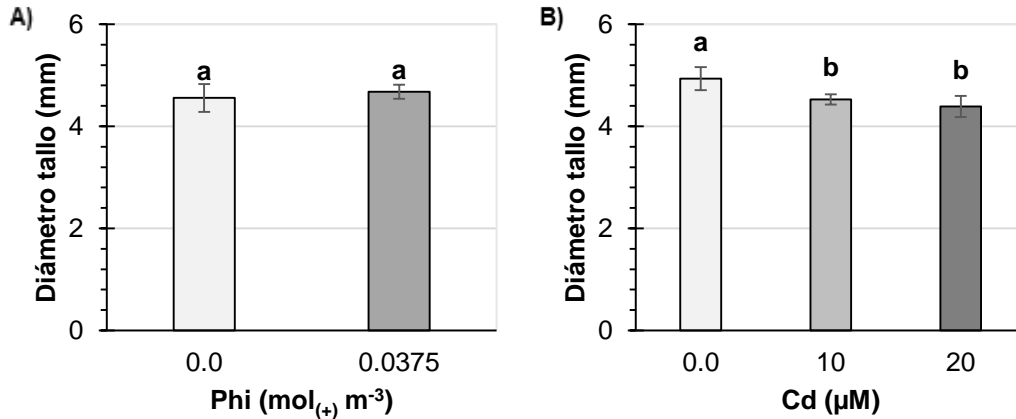


Figura 2. 12 Diámetro de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.2080$), Cd ($P < 0.0001$).

La interacción de los factores de estudio (Phi y Cd) afectó significativamente la altura de planta. En particular, solo fueron diferentes los tratamientos con Phi y sin Cd y aquel consistente en 20 μM Cd con Phi; siendo éste último superior estadísticamente al primero. Mientras que el diámetro de tallo fue estadísticamente superior en los tratamientos sin Cd, independientemente del suministro de Phi (Cuadro 2.6).

Cuadro 2. 6 Altura de planta y diámetro de tallo en plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Cd (μm)	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)
0.0000	0	40.325 \pm 1.11 ab	5.071 \pm 0.27 a
0.0375	0	38.438 \pm 1.93 b	4.798 \pm 0.17 ab
0.0000	10	41.000 \pm 1.78 ab	4.510 \pm 0.12 bc
0.0375	10	38.788 \pm 1.47 ab	4.545 \pm 0.08 bc
0.0000	20	39.150 \pm 0.82 ab	4.090 \pm 0.14 c
0.0375	20	42.750 \pm 1.11 a	4.688 \pm 0.14 ab
Pr > F		0.0384	<0.0001
DMS ^ψ		4.2577	0.4869
CV ^φ		7.11	7.06

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.1.7. Longitud y volumen de raíz

Los datos de longitud de raíz no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 2.13A y 2.13B**), por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el fosfito tuvo influencia significativa en la longitud de raíz por planta (**Figura 2.13a**). De manera contraria, [Manna *et al.* \(2016\)](#) observaron una reducción significativa en el desarrollo radicular de plántulas de arroz al suministrar Phi a una concentración de 0.6 mM $\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ como fuente de P en la solución nutritiva durante 15 días contra un testigo que utiliza fosfato como fuente de fósforo. Mientras que, [Hoang *et al.* \(2008\)](#) observaron una reducción significativa en la longitud de raíz (cm) en plántulas de *Spinacia oleracea* L. cv. F1 tratadas con pulverizaciones foliares de K_3PO_4 respecto al testigo al cual no se le aplicó dicho bioestimulante. Otros investigadores como [Deepa *et al.* \(2002\)](#) observaron también que el Phi inhibe significativamente la longitud de raíz en *Arabidopsis*, al aumentar las concentraciones de 0, 1, 2 y 3 mM Phi en la solución nutritiva, esta reducción fue de mayor magnitud bajo niveles de deficiencia de fósforo que en niveles de suficiencia.

Por otra parte, la concentración de Cd suministrada se relacionó de manera inversa con la longitud de raíz de plántulas de tomate (**Figura 2.13b**). Estos resultados coinciden con lo reportado por [Roychoudhury *et al.* \(2016\)](#), quienes observaron una reducción significativa en la longitud de raíz de plantas de *Vigna radiata* L. tratadas con 1 mM CdCl_2 durante 72 h, respecto al testigo en agua. De igual manera [Li *et al.* \(2013\)](#) observaron en su investigación con dos genotipos de *Hibiscus cannabinus* L., una reducción significativa en la longitud de raíz conforme se incrementó la concentración de Cd en la solución nutritiva, en el rango de 0, 20, 50, 80 y 120 $\mu\text{M L}^{-1}$.

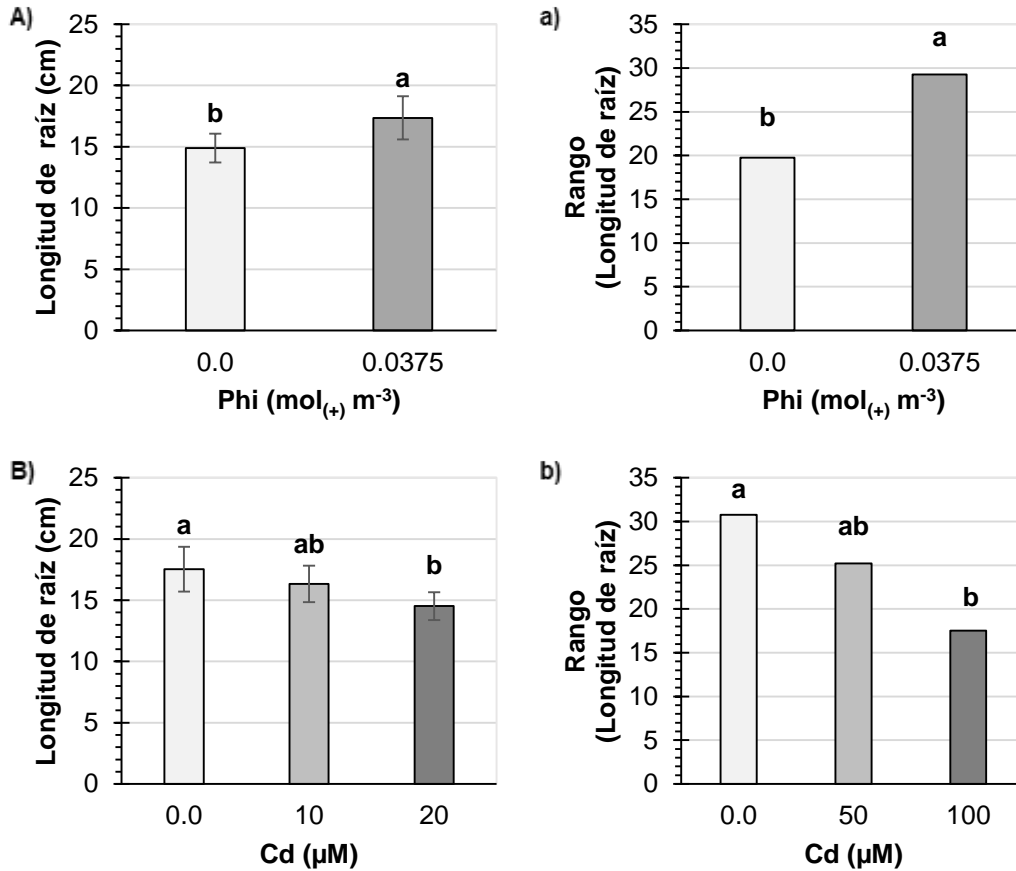


Figura 2. 13 Longitud de raíz de plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.0037); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0089)] y Cd [B: medias (**P=0.0130**); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (**P=0.0123**)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Los datos de volumen de raíz no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 2.14A y 2.14B**); por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el fosfito tuvo influencia significativa en el volumen de raíz por planta (**Figura 2.14a**). Aunque [Estrada-Ortiz et al. \(2016\)](#) documentaron una reducción significativa en el volumen de raíz al incrementar la concentración de 0, 0.25 y 0.50 mM Phi en plántulas de *Beta vulgaris* L. y una reducción no significativa en plántulas de *Lactuca sativa* L.

Mientras que, el tratamiento con Cd ocasionó una reducción significativa en el volumen de raíz de plántulas de tomate (**Figura 2.14b**).

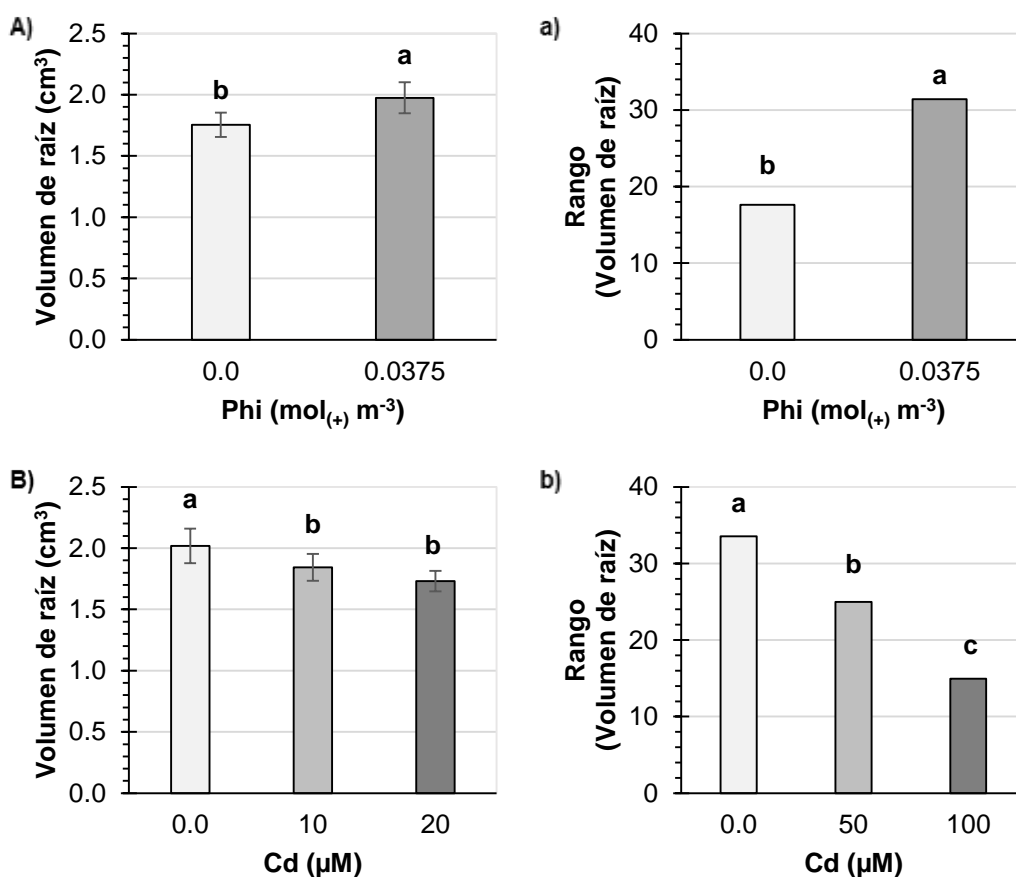


Figura 2. 14 Volumen de raíz por planta de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias ($P=0.0004$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] y Cd [B: medias ($P=0.0009$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

En lo que refiere a los efectos de la interacción de Phi y Cd en la solución nutritiva se observa que los datos de longitud y volumen de raíz no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Cuadro 2.7**). Por tanto, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se observa que al inducir un estrés de 10 μM Cd, el Phi provocó un incremento significativo en el volumen de raíz en comparación con el tratamiento al que no se le adicionó dicho bioestimulante.

Cuadro 2. 7 Longitud raíz y volumen raíz de plantas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Cd (µm)	Longitud raíz (cm)	Rango (Longitud raíz ^δ)	Volumen raíz (cm ³)	Rango (Volumen raíz ^δ)
0.000	0.0	15.725±1.12 ab	24.500 ab	1.900±0.05 abc	27.500 ab
0.0375	0.0	19.350±2.01 a	37.000 a	2.137±0.18 a	39.625 a
0.0000	10.0	15.950±0.83 ab	25.563 ab	1.700±0.11 bc	14.063 c
0.0375	10.0	16.713±2.01 ab	24.875 ab	1.987±0.04 ab	35.938 a
0.0000	20.0	13.025±1.05 b	9.188 b	1.662±0.09 c	11.250 c
0.0375	20.0	16.013±0.60 ab	25.875 ab	1.800±0.06 bc	18.625 bc
Pr > F		0.003	0.0027	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		4.1311	17.917	0.2991	13.231
CV ^φ		17.15		10.74	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.5.2. Concentración foliar de nutrientes

2.5.2.1. Concentración foliar de macronutrientos

La concentración de los macronutrientos en hojas de plántulas de tomate de los tratamientos no fue afectada por el factor de estudio fosfito (**Cuadro 2.8**), coincidiendo con lo reportado por [Hoang *et al.* \(2009\)](#) quienes reportaron que el Phi no influyó en las concentraciones foliares de K, Ca y Mg en lechuga, a diferentes concentraciones 0, 0.05, 0.2, 2 mM Phi bajo un suministro óptimo de Pi (0.3 mM).

Cuadro 2. 8 Concentración de macronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)				
	N	P	Rango (P ^o)	K	Ca
0.0000	19.43±1.42 a	2.06±0.10 a	12.583 a	8.51±0.72 a	13.72±0.29 a
0.0375	18.73±0.96 a	2.21±0.28 a	12.417 a	9.02±1.26 a	14.60±1.92 a
Pr > F	0.1091	0.3704	0.9353	0.5810	0.4595
DMS ^ψ	0.8723	0.3386	4.2526	1.9146	2.447
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)				
	Rango (Ca ^o)	Mg	Rango (Mg ^o)	S	Rango (S ^o)
0.0000	13.17 a	4.10±0.11 a	13.98 a	2.00±0.13 a	12.17 a
0.0375	11.83 a	4.28±0.58 a	11.08 a	2.09±0.26 a	12.83 a
Pr > F	0.5786	0.6133	0.1905	0.5395	0.7296
DMS ^ψ	4.9519	0.718	4.3758	0.306	3.9898

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 2.9** se observa que conforme incrementa la concentración de Cd en la solución nutritiva existe un aumento significativo (de 27.38%) en la concentración foliar de N en el tratamiento 20 μM Cd, en comparación con el testigo. [Haghighi et al. \(2013\)](#) observaron un incremento no significativo en la concentración de N en hojas de plantas de lechuga al momento de incrementar la concentración de Cd en 0, 2 y 4 mg CdCl₂ L⁻¹. En esta investigación, las concentraciones de P, Ca, Mg y S no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se demostró que conforme incrementa la concentración de Cd en la solución nutritiva existe un aumento significativo en dichos macronutrientos en hojas de plántulas de tomate, coincidiendo también con lo reportado por [Haghighi et al. \(2013\)](#) donde se apreció un incremento significativo en la concentración de P en hojas de lechuga al momento de incrementar la concentración de Cd en 0, 2 y 4 mg CdCl₂ L⁻¹. Por el contrario, [Hédiji et al. \(2015\)](#) evidenciaron toxicidad por Cd en plantas de tomate en un experimento a largo plazo, con la dosis de 20 μM; asimismo, este tratamiento influenció el contenido de varios macronutrientos; el contenido de K y Mg no mostraron variaciones significativas en comparación con el testigo, mientras que el

de Ca aumentó significativamente en hojas de tomate. Por otra parte, Ali *et al.* (2015) reportaron que el suministro de Cd causó una disminución significativa en la concentración de Ca y Mg en hojas de tres genotipos de *Brassica napus* (Zheshuang-72, Zhejiang 619 y Zheshuang-758), obteniendo el efecto más marcado a una concentración de 300 mg CdCl₂ kg⁻¹.

En la presente investigación no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas en cuanto a la concentración de K en hojas de plántulas de tomate conforme incrementa la concentración de Cd en la solución nutritiva (**Cuadro 2.9**).

Cuadro 2. 9 Concentración de macronutrientes en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.

Cd (µM)	Concentración (g kg ⁻¹)				
	N	P	Rango (P ^o)	K	Ca
0	17.24±0.36 b	2.05±0.33 a	7.38 b	8.71±1.36 a	14.64±2.43 a
10	18.03±0.48 b	1.95±0.03 a	10.63 b	8.72±0.26 a	13.70±0.13 a
20	21.96±0.82 a	2.41±0.06 a	19.50 a	8.86±1.19 a	14.13±0.22 a
Pr > F	<0.0001	0.0768	0.0003	0.9892	0.8027
DMS ^ψ	1.2979	0.5038	6.327	2.849	3.640
Cd (µM)	Concentración (g kg ⁻¹)				
	Rango (Ca ^o)	Mg	Rango (Mg ^o)	S	Rango (S ^o)
0	6.66 b	4.34±0.72 a	9.00 b	1.87±0.29 b	6.50 b
10	13.00 ab	3.98±0.12 a	10.38 b	1.88±0.03 b	11.50 b
20	17.88 a	4.25±0.04 a	18.13 a	2.38±0.03 a	19.50 a
Pr > F	0.0040	0.6747	0.0044	0.0147	0.0001
DMS ^ψ	7.3675	1.068	6.5102	0.4548	5.939

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

La interacción de los factores de estudio tuvo efectos significativos en la concentración foliar de N; donde se observa que el factor con mayor influencia es el Cd, dado que los tratamientos con 20 µM tuvieron la media más alta en esta variable, independientemente del tratamiento con Phi. Mientras que, la

concentración foliar de K no fue afectada por la interacción de los factores de estudio. Por otra parte, los resultados de la interacción de Phi y Cd no cumplieron el supuesto de normalidad para los nutrientes P, Ca, Mg y S; por lo que, se realizó con éstos la transformación por rangos de Conover-Iman, donde se observó de manera general que, existió mayor concentración de estos elementos a medida que incrementó la concentración de Cd, al igual que para la concentración foliar de N (Cuadro 2.10).

Cuadro 2. 10 Concentración de macronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ⁽⁺⁾ m ⁻³)	Cd (µM)	Concentración (g kg ⁻¹)				
		N	P	Rango (P ^δ)	K	Ca
0.0000	0	17.15±0.43 b	1.87±0.03 a	7.25 b	8.00±0.25 a	13.05±0.08 a
0.0375	0	17.33±0.34 b	2.22±0.48 a	7.50 b	9.417±1.99 a	16.25±3.48 a
0.0000	10	18.03±0.34 b	2.00±0.03 a	13.00 ab	8.77±0.37 a	13.84±0.06 a
0.0375	10	18.03±0.65 b	1.90±0.01 a	8.250 b	8.67±0.16 a	13.56±0.15 a
0.0000	20	23.10±0.43 a	2.31±0.04 a	17.50 ab	8.75±1.26 a	14.27±0.21 a
0.0375	20	20.83±0.74 a	2.51±0.01 a	21.50 a	8.97±1.31 a	13.99±0.23 a
Pr > F		<0.0001	0.2066	0.0024	0.9707	0.6999
DMS ^ψ		2.2856	0.8872	11.142	5.016	6.4102
CV ^φ		5.33	18.49		1.57	20.14
Phi (mol ⁽⁺⁾ m ⁻³)	Cd (µM)	Concentración (g kg ⁻¹)				
		Rango (Ca ^δ)	Mg	Rango (Mg ^δ)	S	Rango (S ^δ)
0.0000	0	5.75 b	3.85±0.07 a	7.50 ab	1.73±0.03 a	5.50 c
0.0375	0	7.50 ab	4.82±1.02 a	10.50 ab	2.01±0.43 a	7.50 bc
0.0000	10	14.75 ab	4.20±0.06 a	16.25 a	1.92±0.03 a	13.50 abc
0.0375	10	11.25 ab	3.76±0.01 a	4.50 b	1.84±0.01 a	9.50 bc
0.0000	20	19.00 a	4.25±0.05 a	18.00 a	2.34±0.03 a	17.50 ab
0.0375	20	16.75 ab	4.25±0.03 a	18.25 a	2.42±0.02 a	21.50 a
Pr > F		0.0274	0.5639	0.0038	0.0742	0.0008
DMS ^ψ		12.974	1.881	11.465	0.8009	10.453
CV ^φ			19.98		17.44	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.5.2.2. Concentración foliar de micronutrientos

En el **Cuadro 2.11** se observa que las concentraciones de Cu, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que el aporte de Phi en la solución nutritiva incrementó significativamente la concentración de Mn y Cd en hojas de plántulas de tomate respecto al testigo; caso contrario a lo reportado por [Lopes *et al.* \(2016\)](#), quienes observaron que aplicaciones foliares de Phi a plántulas de frijol bajo niveles óptimos de P en la solución nutritiva, mostraron una reducción significativa en cuanto a la acumulación de Mn en hojas comparado con las aplicaciones de fosfato (Pi) y KCl.

La concentración foliar de los micronutrientos Fe y Zn no fue influenciada por el Phi, coincidiendo con lo reportado por [Hoang *et al.* \(2009\)](#) quien reportó que las concentraciones foliares de elementos minerales como son Fe y Zn no fueron afectadas por el Phi en lechuga, cuando fue suministrado a concentraciones de 0.05, 0.2 y 2 mM Phi bajo un suministro óptimo de Pi (0.3 mM).

Cuadro 2. 11 Concentración de micronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Fe	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn	Mn
0.0000	134.92±17.81 a	10.01±2.98 a	13.67 a	24.57±1.38 a	218.61±13.73 a
0.0375	124.91±13.71 a	8.72±1.31 a	11.33 a	23.71±2.66 a	236.99±31.60 a
Pr > F	0.4657	0.4921	0.2387	0.6214	0.3290
DMS ^ψ	28.213	3.8922	4.023	3.6047	38.4930
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Rango (Mn ^δ)	B	Rango (B ^δ)	Cd	Rango (Cd ^δ)
0.0000	10.67 b	58.58±2.45 a	12.17 a	112.11±56.80 b	11.67 b
0.0375	14.33 a	63.60±7.62 a	12.83 a	135.51±65.89 a	13.33 a
Pr > F	0.0104	0.2735	0.7318	<0.0001	0.0177
DMS ^ψ	2.6934	9.3342	4.023	4.2589	1.341

^ψDMS: Diferencia mínima significativa.. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.12** se observa que las concentraciones de Cu, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva existe un incremento significativo en la concentración de Cu, B y Cd concordando con los estudiado por [Ali et al. \(2015\)](#), quienes observaron un incremento significativo en el contenido de Cd en tres genotipos de *Brassica napus*, Zheshuang-72, Zhejiang 619 y Zheshuang-758, al momento de adicionar distintas concentraciones de Cd 0, 75, 150, 300 mg kg⁻¹ en forma de CdCl₂; así como una reducción significativa en la concentración de Mn en hojas de plántulas de tomate. En la presente investigación no existió efecto significativo del Cd en la concentración de los micronutrientes Fe y Zn en hojas de plántulas de tomate, concordando con lo documentado por [Ali et al. \(2015\)](#) en su investigación donde tampoco se observó evidencia suficiente para manifestar diferencias estadísticas significativas en la concentración de Fe y Zn en hojas de tres genotipos de *Brassica napus* (Zheshuang-72, Zhejiang 619 y Zheshuang-758) al momento de suministrar Cd en la solución del suelo. Por el contrario, [Hédiji et al. \(2015\)](#) en su investigación a largo plazo si contaron con evidencia suficiente para demostrar que la toxicidad por Cd a una exposición de 20 µM alteró el contenido de varios micronutrientes de la planta y observó que el contenido de Fe, Zn y Mn en hojas disminuyó significativamente en comparación con el testigo.

Cuadro 2. 12 Concentración de micronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd (μM) en la solución nutritiva.

Cd (μM)	Concentración (mg kg^{-1})				
	Fe	Cu	Rango (Cu°)	Zn	Mn
0.0	135.24 \pm 20.49 a	8.08 \pm 1.27 a	10.63 b	23.60 \pm 3.13 a	241.95 \pm 39.38 a
10.0	138.89 \pm 14.67 a	9.61 \pm 3.75 a	8.38 b	24.05 \pm 1.88 a	233.77 \pm 10.73 a
20.0	115.61 \pm 9.52 a	10.40 \pm 0.70 a	18.50 a	24.77 \pm 0.85 a	207.69 \pm 9.43 a
Pr > F	0.3363	0.5926	0.0011	0.8548	0.3044
DMS $^{\Psi}$	41.976	5.7908	5.9854	5.3630	57.2700
Cd (μM)	Concentración (mg kg^{-1})				
	Rango (Mn°)	B	Rango (B°)	Cd	Rango (Cd°)
0.0	12.50 ab	59.06 \pm 9.10 a	6.63 b	0.05 \pm 0.02 c	4.50 c
10.0	15.63 a	57.06 \pm 1.10 a	11.38 b	89.91 \pm 6.99 b	12.50 b
20.0	9.38 b	67.14 \pm 2.40 a	19.50 a	281.47 \pm 12.46 a	20.50 a
Pr > F	0.0034	0.1748	0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS $^{\Psi}$	4.0072	13.8870	5.9854	6.3364	1.9951

$^{\Psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. $^{\circ}$ Método de transformación por rangos. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd, no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar diferencias estadísticas significativas en la concentración de Fe y Zn en hojas de plántulas de tomate. También se observa que las concentraciones de Cu, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que en condiciones óptimas la adición de Phi en la solución nutritiva provocó un incremento significativo en la concentración de Mn en hojas de plántulas de tomate, así como en condiciones de estrés a un nivel de 10 μM Cd el Phi ocasionó una reducción significativa en la concentración de Cu y Mn, y a un nivel de 20 μM Cd el Phi aumentó de manera significativa la concentración de Mn en las hojas de plántulas de tomate; así como también se observó que la concentración de Cd en hojas de plántulas de tomate siempre fue mayor al momento de adicionar Phi a un nivel de 10 y 20 μM Cd en la solución nutritiva (**Cuadro 2.13**).

Cuadro 2. 13 Concentración de micronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Fe	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn	Mn
0.0000	0	144.09±19.84 a	7.20±0.20 a	9.00 ab	21.83±1.00 a	211.18±1.43 a
0.0375	0	126.39±23.12 a	8.97±1.78 a	12.25 ab	25.36±4.45 a	272.71±54.64 a
0.0000	10	144.01±20.03 a	12.67±5.15 a	14.25 a	26.49±0.90 a	253.52±1.81 a
0.0375	10	133.77±9.12 a	6.55±0.04 a	2.50 b	21.62±1.87 a	214.03±2.31 a
0.0000	20	116.66±14.18 a	10.17±0.92 a	17.75 a	25.40±1.09 a	191.14±3.16 a
0.0375	20	114.57±3.07 a	10.63±0.50 a	19.25 a	24.14±0.49 a	224.24±3.88 a
Pr > F		0.6867	0.4410	0.0010	0.4917	0.1663
DMS ^ψ		73.92	10.198	10.54	9.44	100.85
CV ^φ		25.32	48.45		17.41	19.7
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Rango (Mn ^δ)	B	Rango (B ^δ)	Cd	Rango (Cd ^δ)
0.0000	0	8.00 cd	53.31±0.86 a	5.25 c	0.07±0.01 e	6.00 e
0.0375	0	17.00 a	64.81±13.05 a	8.00 bc	0.03±0.01 e	3.00 e
0.0000	10	21.50 a	58.70±0.96 a	13.50 abc	76.94±0.42 d	10.50 d
0.0375	10	9.75 bc	55.42±0.34 a	9.25 bc	102.88±1.26 c	14.50 c
0.0000	20	2.50 d	63.72±1.49 a	17.75 ab	259.32±3.18 b	18.50 b
0.0375	20	16.25 ab	70.56±1.84 a	21.25 a	303.62±5.01 a	22.50 a
Pr > F		<0.0001	0.2674	0.0010	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		7.0568	24.456	10.54	11.159	3.5135
CV ^φ			17.81		4.01	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.5.3. Concentración nutrimental en tallos

2.5.3.1. Concentración de macronutrientos en tallos

En el **Cuadro 2.14** se observa que existen incrementos significativos en la concentración de Ca, Mg y S en tallos de plántulas de tomate; estos aumentos del orden de 4.12, 4.36% y 3.85%, respectivamente en comparación con el testigo. Así también se observó una reducción significativa del 6.12% en la concentración de N

causada por la aplicación de Phi. También se observa que las concentraciones de P y K en tallo no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que el Phi ocasionó un aumento significativo en la concentración de K en tallo de plántulas de tomate.

Cuadro 2. 14 Concentración de macronutrientos en tallo de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	N	P	Rango (P ^o)	K
0.0000	11.43±0.41 a	2.39±0.05 b	8.58 b	10.65±.56 a
0.0375	10.73±0.72 b	2.51±0.05 a	16.42 a	11.35±0.41 a
Pr > F	0.0203	0.0008	0.7589	0.0691
DMS ^ψ	0.578	0.063	3.9693	0.761
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Rango (K ^o)	Ca	Mg	S
0.0000	10.00 b	5.58±0.19 b	2.98±0.06 b	0.78±0.04 b
0.0375	15.00 a	5.81±0.23 a	3.11±0.15 a	0.81±0.04 a
Pr > F	0.0311	0.0157	0.0031	0.0042
DMS ^ψ	4.4933	0.184	0.084	0.021

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 2.15** se observa que el tratamiento con 10 y 20 μM Cd en la solución nutritiva incrementó en 17.86 y 21.43% respectivamente, la concentración de N en tallo; asimismo, la de S en 5.48% y 20.56%, respectivamente; en ambos casos respecto al tratamiento testigo. Por el contrario, se registró una reducción significativa en la concentración de Ca con dichos tratamientos, estas reducciones del orden de 11.38% y 10.89%, respectivamente. La concentración de Mg en tallo se redujo en al 11.42% y 6.48% en los tratamientos con 10 y 20 μM Cd, respectivamente. Por otra parte, las concentraciones de P y K no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para afirmar que el Cd no afectó sus concentraciones en tallo. Por otra parte, [Hédiji et al. \(2015\)](#) en su

investigación a largo plazo donde no encontró alguna diferencia estadística significativa en la concentración de macronutrientes como el K, Mg y Ca en tallos de plántulas de tomate tratadas con 20 μM Cd.

Cuadro 2. 15 Concentración de macronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd (μM) en la solución nutritiva.

Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
	N	P	Rango (P°)	K
0	9.80 \pm 0.53 b	2.45 \pm 0.03 a	13.50 a	11.26 \pm 0.51 a
10	11.55 \pm 0.25 a	2.43 \pm 0.05 a	12.00 a	11.22 \pm 0.26 a
20	11.90 \pm 0.33 a	2.45 \pm 0.09 a	12.00 a	10.52 \pm 0.66 a
Pr > F	<0.0001	0.8694	0.0006	0.1943
DMS $^{\psi}$	0.860	0.093	5.9055	1.132
Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
	Rango (K°)	Ca	Mg	S
0	13.75 a	6.15 \pm 0.17 a	3.24 \pm 0.14 a	0.73 \pm 0.02 c
10	14.25 a	5.45 \pm 0.16 b	2.87 \pm 0.06 c	0.77 \pm 0.01 b
20	9.50 a	5.48 \pm 0.10 b	3.03 \pm 0.04 b	0.88 \pm 0.01 a
Pr > F	0.1662	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS $^{\psi}$	6.6851	0.274	0.125	0.031

$^{\psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. $^{\circ}$ Método de transformación por rangos. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente al efecto de la interacción de fosfito y Cd no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar diferencias estadísticas significativas en la concentración de N y S en tallo de plántulas de tomate. Por otra parte, se aprecia que el aporte de Phi en ausencia de Cd incrementó significativamente la concentración de Mg en tallos de plántulas de tomate, este aumento fue de 17.33% respecto al testigo; así como el tratamiento con Phi y 10 μM Cd incrementó la concentración de Ca en tallos de plántulas de tomate en 9.67%, respecto al testigo. También se observa que las concentraciones de P y K no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que en ausencia de Cd, la adición de Phi en la solución nutritiva incrementó de manera significativa la concentración de K en

tallos de plántulas de tomate; asimismo, en el tratamiento con 20 μM Cd, el Phi ocasiono un incremento significativo en la concentración de P (**Cuadro 2.16**).

Cuadro 2. 16 Concentración de macronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd (μM) en la solución nutritiva.

Phi ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
		N	P	Rango (P°)	K
0.0000	0	10.500 \pm 0.29 bc	2.395 \pm 0.01 bc	9.000 bc	10.361 \pm 0.14 a
0.0375	0	9.100 \pm 0.49 c	2.508 \pm 0.01 ab	18.000 ab	12.168 \pm 0.19 a
0.0000	10	11.666 \pm 0.16 ab	2.461 \pm 0.06 bc	13.250 abc	11.296 \pm 0.27 a
0.0375	10	11.433 \pm 0.33 ab	2.407 \pm 0.04 bc	10.750 abc	11.146 \pm 0.29 a
0.0000	20	12.1333 \pm 0.16 a	2.300 \pm 0.01 c	3.500 c	10.294 \pm 0.91 a
0.0375	20	11.666 \pm 0.44 ab	2.600 \pm 0.04 a	20.500 a	10.737 \pm 0.37 a
Pr > F		<0.0001	0.0004	0.0008	0.0700
DMS $^{\psi}$		1.5137	0.1636	10.4	1.994
CV $^{\phi}$		6.07	2.97		8.066
Phi ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
		Rango (K°)	Ca	Mg	S
0.0000	0	5.500 b	5.932 \pm 0.17 ab	2.977 \pm 0.05 b	0.704 \pm 0.01 c
0.0375	0	22.000 a	6.365 \pm 0.10 a	3.493 \pm 0.02 a	0.755 \pm 0.01 bc
0.0000	10	14.750 ab	5.199 \pm 0.08 d	2.899 \pm 0.07 b	0.763 \pm 0.02 b
0.0375	10	13.750 ab	5.702 \pm 0.10 bc	2.837 \pm 0.05 b	0.774 \pm 0.01 b
0.0000	20	9.750 b	5.598 \pm 0.11 bcd	3.056 \pm 0.03 b	0.866 \pm 0.01 a
0.0375	20	9.250 b	5.366 \pm 0.01 cd	3.010 \pm 0.04 b	0.902 \pm 0.01 a
Pr > F		0.0059	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS $^{\psi}$		11.773	0.4832	0.2195	0.0541
CV $^{\phi}$			3.77	3.2	3.02

$^{\psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. $^{\phi}$ CV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.3.2. Concentración de micronutrientos en tallos

En el **Cuadro 2.17** se observa que el aporte de Phi incrementó significativamente la concentración de Zn, siendo 9.29% superior al valor del testigo. Así también se observa que las concentraciones de Cu, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto

de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que el aporte de Phi aumentó significativamente la concentración de Cu y Cd en tallo de plántulas de tomate. Por el contrario, no existen diferencias estadísticas significativas del tratamiento con Phi en la concentración de los micronutrientes Fe, Mn y B en tallos de plántulas de tomate.

Cuadro 2. 17 Concentración de micronutrientes en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Fe	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn	Mn
0.0000	83.78±7.22 a	10.22±1.80 a	10.42 b	56.17±2.22 b	92.23±8.56 b
0.0375	93.72±33.54 a	9.74±0.35 a	14.58 a	61.39±4.29 a	97.32±8.79 a
Pr > F	0.6043	0.5794	0.0322	<0.0001	0.0001
DMS ^ψ	39.606	1.806	3.7713	2.100	2.157
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Rango (Mn ^δ)	B	Rango (B ^δ)	Cd	Rango (Cd ^δ)
0.0000	11.83 a	19.21±0.79 a	11.17 a	60.96±29.05 b	11.08 b
0.0375	13.17 a	19.46±0.32 a	13.83 a	72.59±33.75 a	13.92 a
Pr > F	0.1102	0.4824	0.1625	<0.0001	0.0015
DMS ^ψ	1.6671	0.723	3.8464	2.691	1.5854

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

El tratamiento con 10 y 20 μ M Cd redujo en 11.51 y 21.68%, respectivamente, la concentración de Zn en tallos, respecto al tratamiento testigo (**Cuadro 2.18**). Estos resultados coinciden con lo reportado por Hédiji *et al.* (2015), donde demostraron en su investigación a largo plazo que la toxicidad por Cd a una exposición de 20 μ M alteró el contenido de varios micronutrientes en la planta y observó que el contenido de Zn en tallos de plántulas de tomate se redujo significativamente en comparación con el testigo. También se observa que las concentraciones de Cu, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia

suficiente para demostrar que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva disminuye significativamente la concentración de Mn y B, de igual manera [Hédiji et al. \(2015\)](#) reportaron una disminución significativa en la concentración de Mn en tallo de plántulas de tomate con la exposición a 20 μM Cd; así también se observa un incremento significativo en la concentración de Cd en tallos de plántulas de tomate coincidiendo con lo documentado por [Nogueirol et al. \(2016\)](#) donde se observa que la concentración de Cd en los brotes de dos genotipos de tomate variedad Calabash Rouge y CNPH0082 se incrementó significativamente conforme aumentó la concentración de Cd en dos tipos de suelo estudiados, concluyendo además que la absorción y transporte de Cd a los brotes fue mayor cuando la textura del suelo fue arcillosa en comparación con la arenosa. De la misma manera [Xin y Huang \(2013\)](#) observaron que la concentración de Cd en tallos de dos variedades de chile YCT y JFZ incrementó significativamente al momento que aumentó la concentración de Cd a 0.3, 2.0 y 3.0 mg kg^{-1} en la solución del suelo, además de notar que al igual que en la presente investigación la concentración de Cd en tallos de plántulas de chile fue menor que en hojas y raíz.

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que exista una diferencia estadística significativa en cuanto a la concentración de Fe y Cu en tallos causada por el tratamiento con Cd (**Cuadro 2.18**); caso contrario a lo documentado por [Hédiji et al. \(2015\)](#) en su investigación a largo plazo donde demostraron que la exposición a 20 μM Cd alteró el contenido de varios micronutrientes de la planta y observó que el contenido de Cu en tallos de plántulas de tomate se incrementó significativamente pero la concentración de Fe se redujo en comparación con el testigo.

Cuadro 2. 18 Concentración de micronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.

Cd (µM)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Fe	Cu	Rango (Cu ^o)	Zn	Mn
0	69.45±8.62 a	9.31±0.48 a	11.38 a	66.09±3.11 a	113.19±4.17 a
10	89.80±5.90 a	11.37±2.02 a	15.25 a	58.48±1.65 b	94.49±4.20 b
20	107.00±39.49 a	9.25±0.45 a	10.88 a	51.76±0.90 c	76.63±3.99 c
Pr > F	0.2905	0.0995	0.1217	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	58.926	2.688	5.6109	3.124	3.209
Cd (µM)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Rango (Mn ^o)	B	Rango (B ^o)	Cd	Rango (Cd ^o)
0	20.25 a	20.34±0.57 a	18.63 a	0.37±0.10 c	4.50 c
10	12.25 b	18.76±0.40 b	8.88 b	54.11±3.41 b	12.50 b
20	5.00 c	18.91±0.48 b	10.00 b	145.84±6.49 a	20.50 a
Pr > F	<0.0001	0.0024	0.0007	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	2.4803	1.075	5.7226	4.003	2.3587

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar diferencias estadísticas significativas en la concentración de Fe en tallo de plántulas de tomate; por el contrario se aprecia que el aporte de Phi en ausencia de Cd incrementó significativamente la concentración de Zn en tallo de plántulas de tomate, con valores superiores al testigo en 17.40%.

También se observa que las concentraciones de Cu, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que en ausencia de Cd, la adición de Phi a la solución nutritiva provocó un incremento significativo en la concentración de Cu y Mn en tallo de plántulas de tomate. Por el contrario, con el tratamiento con 10 µM Cd, el Phi redujo significativamente la concentración de Cu y Mn en tallos, y a un nivel de 20 µM Cd disminuyó significativamente la concentración de Mn e incrementó de manera significativa la concentración de B en tallos de plántulas de tomate (**Cuadro 2.19**).

Cuadro 2. 19 Concentración de micronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ⁽⁺⁾ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Fe	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn	Mn
0.0000	0	81.91±7.81 a	8.56±0.29 b	5.25 c	60.80±0.72 b	105.47±0.73 b
0.0375	0	57.00±3.01 a	13.55±0.26 ab	17.50 ab	71.38±1.84 a	120.91±0.59 a
0.0000	10	92.14±4.80 a	10.07±2.50 a	20.25 a	56.36±1.18 bc	101.76±1.88 b
0.0375	10	87.46±7.39 a	9.19±0.30 ab	10.25 bc	60.60±1.40 b	87.22±1.53 c
0.0000	20	77.29±8.28 a	8.55±0.11 b	5.75 c	51.33±1.09 c	69.45±1.64 d
0.0375	20	136.71±54.61 a	9.95±0.38 ab	16.00 ab	52.19±0.75 c	83.82±0.14 c
Pr > F		0.3026	0.0324	0.0003	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		103.77	4.7329	9.8809	5.5016	5.6508
CV ^φ		52.03	21.107		4.1651	2.6533
Phi (mol ⁽⁺⁾ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Rango (Mn ^δ)	B	Rango (B ^δ)	Cd	Rango (Cd ^δ)
0.0000	0.0	18.00 b	20.79±0.76 a	19.75 a	0.34±0.10 e	4.25 d
0.0375	0.0	22.50 a	19.90±0.22 ab	17.50 ab	0.40±0.10 e	4.75 d
0.0000	10	15.00 b	18.79±0.59 b	10.00 abc	48.07±1.52 d	10.50 c
0.0375	10	9.50 c	18.73±0.17 b	7.75 bc	60.16±0.66 c	14.50 bc
0.0000	20	2.50 d	18.07±0.20 b	3.75 c	134.46±3.39 b	18.50 ab
0.0375	20	7.50 c	19.75±0.13 b	16.25 ab	157.21±0.71 a	22.50 a
Pr > F		<0.0001	0.0031	0.0005	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		4.3678	1.893	10.078	7.05	4.1538
CV ^φ			4.3561		4.6983	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.4. Concentración nutrimental en raíz

2.5.4.1. Concentración de macronutrientos en raíz

En el **Cuadro 2.20** se observa que las concentraciones de P, K, Ca, Mg y S no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que el aporte de Phi redujo significativamente la concentración de Ca en

raíz de plántulas de tomate. Por otra parte, el Phi no tuvo influencia significativa en la concentración de N en raíz; por el contrario, [Bachiega \(2016\)](#) observó un incremento significativo en la concentración de N de hojas de *Avena sativa* L. cv. IAC 7 al suministrarse 0.5 mmol L⁻¹ de P como Phi, en comparación con un tratamiento deficiente en fosfato (0.05 mmol L⁻¹ de P como Pi) y con uno suficiente en fosfato (0.5 mmol L⁻¹ de P como Pi) durante 2 meses.

Cuadro 2. 20 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	N	P	Rango (P ^o)	K
0.0000	13.300±1.58 a	1.949±0.26 a	12.583 a	7.534±0.11 a
0.0375	14.561±0.92 a	1.797±0.09 a	12.417 a	6.725±0.41 a
Pr > F	0.1867	0.2446	0.9009	0.1253
DMS ^ψ	1.930	0.266	2.7719	1.058
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Rango (K ^o)	Ca	Rango (Ca ^o)	Mg
0.0000	11.250 a	5.041±0.63 a	18.000 a	6.987±1.35 a
0.0375	13.750 a	4.106±0.08 b	7.000 b	5.941±0.21 a
Pr > F	0.1435	0.0085	<0.0001	0.0559
DMS ^ψ	3.4338	0.665	2.3662	1.076
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Rango (Mg ^o)	S	Rango (S ^o)	
0.0000	12.083 a	1.305±0.22 a	11.333 a	
0.0375	12.917 a	1.241±0.05 a	13.667 a	
Pr > F	0.5062	0.4591	0.0915	
DMS ^ψ	2.581	0.177	2.7497	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 2.21** se observa que las concentraciones de P, K, Ca, Mg y S no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva se

incrementa significativamente la concentración de K, Ca, Mg y S en raíz de plántulas de tomate concordando con lo reportado por Hédiji *et al.* (2015) en su investigación donde la exposición a 20 μM Cd alteró el contenido de varios macronutrientes de la planta y se observó que el contenido de K y Mg no mostraron variaciones significativas en comparación con el testigo, pero el contenido de Ca en raíz aumentó significativamente.

Cuadro 2. 21 Concentración de macronutrientes en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.

Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
	N	P	Rango (P°)	K
0	14.900 \pm 0.82 a	1.825 \pm 0.08 a	13.500 a	6.296 \pm 0.31 b
10	12.075 \pm 1.44 a	1.800 \pm 0.05 a	12.625 a	6.273 \pm 0.15 b
20	14.817 \pm 1.18 a	1.994 \pm 0.33 a	11.375 a	8.819 \pm 1.30 a
Pr > F	0.0345	0.4134	0.4344	0.0007
DMS $^{\psi}$	2.872	0.395	4.124	1.574
Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
	Rango (K°)	Ca	Rango (Ca°)	Mg
0	9.125 b	4.198 \pm 0.13 b	9.000 b	5.391 \pm 0.14 b
10	8.625 b	4.485 \pm 0.12 a	15.125 a	5.919 \pm 0.19 b
20	19.750 a	5.039 \pm 0.82 a	13.375 a	8.082 \pm 1.40 a
Pr > F	<0.0001	0.1163	0.0010	0.0010
DMS $^{\psi}$	5.1088	0.990	3.5205	1.601
Cd (μM)	Concentración (g kg^{-1})			
	Rango (Mg°)	S	Rango (S°)	
0	5.125 c	1.084 \pm 0.07 b	7.000 b	
10	12.500 b	1.175 \pm 0.03 b	10.250 b	
20	19.875 a	1.561 \pm 0.20 a	20.250 a	
Pr > F	<0.0001	0.0005	<0.0001	
DMS $^{\psi}$	3.84	0.263	4.091	

$^{\psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. $^{\circ}$ Método de transformación por rangos. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

El Cd no influyó de manera significativa la concentración de N; sin embargo, algunas investigaciones como la realizada por Nogueirol *et al.* (2016) observaron que la

concentración de N en las raíces de los dos genotipos de tomate estudiados aumentó significativamente en un suelo arenoso en condiciones de gran disponibilidad de Cd cuyos tratamientos iban de 0, 3, 6 y 12 mg kg⁻¹ de suelo.

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar diferencias estadísticas significativas en la concentración de N en raíz de plántulas de tomate. Asimismo, las concentraciones de P, K, Ca, Mg y S no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que en ausencia de Cd la adición de Phi incrementó de manera significativa la concentración de P y S en raíz de plántulas de tomate, así como en el tratamiento con 10 µM Cd, el Phi provocó una reducción significativa en la concentración de Ca en raíz, y a un nivel de 20 µM Cd disminuyó significativamente la concentración de P y Ca en raíz de plántulas de tomate (**Cuadro 2.22**).

Cuadro 2. 22 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y de Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		N	P	Rango (P ^δ)	K
0.0000	0	14.233±0.16 ab	1.683±0.04 b	7.250 cd	6.053±0.1 b
0.0375	0	15.567±1.12 a	1.967±0.02 ab	19.750 a	6.539±0.41 b
0.0000	10	10.500±1.51 b	1.750±0.01 ab	10.500 bc	6.061±0.02 b
0.0375	10	13.650±0.94 ab	1.850±0.06 ab	14.750 ab	6.486±0.16 b
0.0000	20	15.167±1.67 ab	2.414±0.37 a	20.000 a	10.489±1.44 a
0.0375	20	14.467±0.59 ab	1.574±0.02 b	2.750 d	7.149±0.13 b
Pr > F		0.0617	0.0179	<0.0001	0.0006
DMS ^ψ		5.0574	0.6964	7.2625	2.7726
CV ^φ		16.15	16.54		17.30
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		Rango (K ^δ)	Ca	Rango (Ca ^δ)	Mg
0.0000	0	6.000 c	4.379±0.13 ab	13.750 bc	5.280±0.18 b
0.0375	0	12.250 bc	4.016±0.02 b	4.250 d	5.502±0.08 b
0.0000	10	5.250 c	4.672±0.08 ab	18.250 ab	5.741±0.12 b
0.0375	10	12.000 bc	4.297±0.08 b	12.000 c	6.097±0.21 b
0.0000	20	22.500 a	6.073±0.93 a	22.000 a	9.941±1.50 a
0.0375	20	17.000 ab	4.004±0.04 b	4.750 d	6.223±0.06 b
Pr > F		<0.0001	0.0129	<0.0001	0.0005
DMS ^ψ		8.9966	1.7425	6.1997	2.8197
CV ^φ			16.95		19.41
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		Rango (Mg ^δ)	S	Rango (S ^δ)	
0.0000	0	3.500 d	0.971±0.04 b	2.500 d	
0.0375	0.0	6.750 d	1.196±0.03 b	11.500 bc	
0.0000	10	10.250 cd	1.159±0.02 b	9.250 cd	
0.0375	10	14.750 bc	1.191±0.04 b	11.250 bc	
0.0000	20	22.500 a	1.785±0.24 a	22.250 a	
0.0375	20	17.250 ab	1.337±0.05 ab	18.250 ab	
Pr > F		<0.0001	0.0007	<0.0001	
DMS ^ψ		6.7624	0.4638	7.2043	
CV ^φ			16.21		

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.5.4.2. Concentración de micronutrientos en raíz

En el **Cuadro 2.23** se observa que las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que el aporte de Phi incrementó significativamente la concentración de Fe y Cu, así como redujo significativamente la concentración de B y Cd en raíz de plántulas de tomate. Por otra parte, no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que exista una diferencia estadística significativa en cuanto a la concentración de Zn y Mn en raíz de plántulas de tomate de los tratamientos a los que se les adicionó Phi en la solución nutritiva respecto a los que no.

Cuadro 2. 23 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Rango (Cu ^δ)
0.0000	338.54±108.85 a	10.3333 b	37.173±6.49 b	10.250 b
0.0375	358.86±62.57 a	14.6667 a	43.285±6.38 a	14.750 a
Pr > F	0.3671	0.0002	0.0287	0.0021
DMS ^ψ	46.126	1.9808	5.401	2.632
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Zn	Rango (Zn ^δ)	Mn	Rango (Mn ^δ)
0.0000	93.636±14.03 a	12.417 a	216.44±31.30 a	13.083 a
0.0375	86.602±3.47 a	12.583 a	198.03±14.94 a	11.917 a
Pr > F	0.2487	0.9080	0.2257	0.3913
DMS ^ψ	12.395	2.9883	30.854	2.7903
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	B	Rango (B ^δ)	Cd	Rango (Cd ^δ)
0.0000	20.744±2.45 a	15.500 a	266.53±159.24 a	12.500 a
0.0375	22.931±8.75 a	9.500 b	195.00±86.58 a	12.500 b
Pr > F	0.6529	0.0178	0.0603	1.0000
DMS ^ψ	10.047	4.8329	74.964	1.5918

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.24** se observa que las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva se incrementa significativamente la concentración de Fe, Cu y Cd en raíz de plántulas de tomate, coincidiendo con lo reportado con [Zhao *et al.* \(2016\)](#) quienes reportan que al momento de incrementar gradualmente las concentraciones de Cd en el rango de 0, 5, 25 y 50 mg kg⁻¹ en la solución nutritiva, se obtuvo un incremento significativo en la concentración de Cd contenida en las raíces de las plántulas de tomate variedad Castlemart y Spr2; y concordando con [Hédiji *et al.* \(2015\)](#) donde en su investigación a largo plazo contaron con evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con 20 µM Cd alteró el contenido de varios micronutrientes de la planta y observó que el contenido de Cu en raíz se incrementó significativamente pero la concentración de Fe se redujo; en ambos casos respecto al testigo.

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que exista una diferencia estadística significativa en cuanto a la concentración de Zn, Mn y B en raíz de plántulas de tomate conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva (**Cuadro 2.24**); sin embargo, [Hédiji *et al.* \(2015\)](#) reportan que la exposición a 20 µM Cd alteró el contenido de varios micronutrientes de la planta y observó que el contenido de Zn en raíz se incrementó significativamente en comparación con el testigo.

Cuadro 2. 24 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.

Cd (μM)	Concentración (mg kg^{-1})			
	Fe	Rango (Fe^{δ})	Cu	Rango (Cu^{δ})
0	211.46 \pm 24.94 b	6.75 c	32.45 \pm 2.49 b	8.50 b
10	264.33 \pm 26.39 b	10.25 b	32.60 \pm 1.39 b	8.50 b
20	570.31 \pm 45.74 a	20.50 a	55.64 \pm 5.31 a	20.50 a
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	68.627	2.947	8.036	3.9159
Cd (μM)	Concentración (mg kg^{-1})			
	Zn	Rango (Zn^{δ})	Mn	Rango (Mn^{δ})
0	82.34 \pm 5.83 b	10.25 a	202.24 \pm 17.98 a	12.88 a
10	87.06 \pm 2.75 ab	12.88 a	199.74 \pm 8.34 a	12.75 a
20	100.967 \pm 15.61 a	14.38 a	219.72 \pm 38.76 a	11.88 a
Pr > F	0.0486	0.0826	0.4942	0.8012
DMS ^ψ	18.441	4.446	45.892	4.1514
Cd (μM)	Concentración (mg kg^{-1})			
	B	Rango (B^{δ})	Cd	Rango (Cd^{δ})
0	17.76 \pm 0.89 a	10.63 a	3.21 \pm 0.41 c	4.50 c
10	27.77 \pm 10.14 a	15.13 a	153.74 \pm 12.57 b	12.50 b
20	19.99 \pm 3.41 a	11.75 a	535.33 \pm 97.85 a	20.50 a
Pr > F	0.2276	0.2765	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	14.948	7.1904	111.530	2.3683

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), SMS: Sin muestra suficiente.

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva se observa que las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, B y Cd no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que en condiciones óptimas, la adición de Phi en la solución nutritiva provocó un incremento significativo en la concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en raíz de plántulas de tomate, así como en condiciones de estrés a un nivel de 10 μM Cd, el Phi causó un incremento significativo en la concentración de Fe en raíz; a un nivel de 20 μM Cd, el Phi redujo significativamente la concentración de Zn, Mn y B en raíz de plántulas de tomate (**Cuadro 2.25**).

Cuadro 2. 25 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito en (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Rango (Cu ^δ)
0.0	0.0	175.00±22.74 c	3.500 e	28.393±1.79 b	3.500 d
0.0375	0.0	247.92±6.89 cb	10.000 cd	36.506±0.40 b	13.500 bc
0.0	10	222.15±9.41 cb	6.000 de	32.087±1.01 b	7.750 cd
0.0375	10	306.51±18.73 b	14.500 bc	33.110±1.82 b	9.250 cd
0.0	20	618.48±57.29 a	21.500 a	51.039±7.19 a	19.500 ab
0.0375	20	522.15±7.22 a	19.500 ab	60.239±0.20 a	21.500 a
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		120.85	5.1897	14.151	6.8959
CV ^φ		15.42		15.65	
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		Zn	Rango (Zn ^δ)	Mn	Rango (Mn ^δ)
0.0	0.0	71.71±0.58 b	2.500 d	170.19±8.24 b	5.250 c
0.0375	0.0	92.96±1.94 ab	18.000 ab	234.29±1.30 ab	20.500 a
0.0	10	87.87±1.99 b	13.500 abc	208.20±6.74 ab	14.500 ab
0.0375	10	86.25±3.64 b	12.250 bc	191.29±8.33 ab	11.000 bc
0.0	20	121.34±17.04 a	21.250 a	270.95±41.86 a	19.500 a
0.0375	20	80.60±1.24 b	7.500 cd	168.50±1.80 b	4.250 c
Pr > F		0.0031	<0.0001	0.0053	<0.0001
DMS ^ψ		32.474	7.8295	80.816	7.3106
CV ^φ		16.03		17.35	
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		B	Rango (B ^δ)	Cd	Rango (Cd ^δ)
0.0	0.0	18.307±1.19 a	11.750 ab	3.33±0.58 c	4.500 d
0.0375	0.0	17.213±0.48 a	9.500 ab	3.10±0.21 c	4.500 d
0.0	10	19.270±0.63 a	15.250 ab	132.73±3.35 c	10.500 c
0.0375	10	36.260±13.83 a	15.000 ab	174.76±7.94 c	14.500 bc
0.0	20	24.654±3.52 a	19.500 a	663.52±106.66 a	22.500 a
0.0375	20	15.321±0.42 a	4.000 b	407.14±2.91 b	18.500 ab
Pr > F		0.176	0.0188	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		26.323	12.662	196.41	4.1706
CV ^φ		53.64		37.87	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φC.V.: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05) SMS: Sin muestra suficiente.

2.5.5. Parámetros bioquímicos

2.5.5.1. Concentración de clorofilas

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que la adición de Phi en la solución nutritiva ocasione diferencias estadísticas significativas en cuanto a la concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate comparado con los tratamientos a los que no se les adicionó Phi (**Cuadro 2.26**). Por el contrario, [Manna et al. \(2016\)](#) reportan una reducción significativa en la concentración total de clorofila en hojas de plántulas de arroz al tratarlas con 25 mM Phi ($\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) en el medio de crecimiento durante 14 días bajo condiciones controladas (25 °C, 12:12 h con ciclos de luz y oscuridad), respecto al testigo el cual fue tratado con Pi. De igual manera realizaron una caracterización fisiológica de plantas de arroz transgénicas comparada contra las WT (no transgénicas) cultivadas hidropónicamente en soluciones suplementadas con Phi (0.6 mM $\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) durante 65 días, después de lo cual midieron varios parámetros morfológicos, fisiológicos y bioquímicos; observando nuevamente una reducción significativa en la concentración de clorofila total en hojas, un muy escaso y un severo retraso en el crecimiento en las plantas de arroz WT.

Cuadro 2. 26 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi ($\text{mol}_{(+) } \text{m}^{-3}$)	mg 100 g ⁻¹ de peso fresco		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0000	40.124±3.38 a	41.035±3.17 a	81.159±5.23 a
0.0375	41.868±4.14 a	36.999±6.56 a	78.867±9.74 a
Pr > F	0.4434	0.4225	0.7066
DMS ^ψ	4.7956	10.59	12.956

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.27** se observa que el tratamiento con 10 y 20 μM Cd redujo la concentración foliar de clorofila a en 22.43 y 26.50%, respectivamente en comparación con el testigo; mientras que la de clorofila b en 21.68 y 20.18% y la de clorofila total en 22.07 y 23.46%, respectivamente en hojas de plántulas de tomate.

De igual manera, Hussain *et al.* (2017) documentaron una reducción significativa en el contenido de clorofila a, b y total de dos variedades de tomate Roma y Nagina cuando se trataron con distintas concentraciones de Cd (0, 160, 320, 640 y 1280 μM CdCl₂). Alí *et al.* (2015) observaron una reducción significativa en el contenido de clorofila a, b y total en tres genotipos de *Brassica napus* (Zheshuang-72, Zhejiang 619 y Zheshuang-758) tratadas con 75, 150, 300 mg Cd kg⁻¹ en forma de CdCl₂.

Cuadro 2. 27 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd en la solución nutritiva.

Cd (μM)	mg 100 g ⁻¹ de peso fresco		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0	48.987±2.61 a	45.343±2.96 a	94.330±5.22 a
10	37.997±2.24 b	35.513±7.35 a	73.509±8.11 b
20	36.004±2.29 b	36.195±2.80 a	72.199±3.35 b
Pr > F	0.0009	0.2238	0.0172
DMS ^ψ	7.1914	15.881	19.428

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas en cuanto a la concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 2.28**).

Cuadro 2. 28 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	mg 100 g ⁻¹ de peso fresco		
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0000	0	46.278±2.16 ab	45.152±3.43 a	91.43±5.38 a
0.0375	0	51.697±2.62 a	45.534±3.18 a	97.23±5.73 a
0.0000	10	39.761±2.97 ab	37.358±3.75 a	77.12±3.52 a
0.0375	10	36.232±1.18 b	33.668±10.88 a	69.90±11.92 a
0.0000	20	34.333±2.31 b	40.595±1.73 a	74.93±2.79 a
0.0375	20	37.675±2.38 b	31.794±1.46 a	69.47±3.83 a
Pr > F		0.0049	0.4911	0.086
DMS ^ψ		12.805	28.278	34.593
CV ^φ		11.3891	26.4268	15.7645

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.5.2. Concentración de aminoácidos totales

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que la adición de Phi en la solución nutritiva exprese diferencias estadísticas significativas en cuanto a la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 2.29**). Estrada-Ortiz *et al.* (2016) reportaron una reducción significativa en la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de *Lactuca sativa* L. tratada con Phi.

Cuadro 2. 29 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Phi) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Aminoácidos totales (μg g ⁻¹ de peso fresco)
0.0000	4.5988±0.36 a
0.0375	5.4152±0.41 a
Pr > F	0.0503
DMS ^ψ	0.8178

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.30** se observa que no existe evidencia suficiente para demostrar que el Cd en la solución nutritiva afecte significativamente la concentración foliar de

aminoácidos libres totales en plántulas de tomate. En contraste, Roychoudhury *et al.* (2016) observaron una reducción significativa en el contenido de aminoácidos totales en plantas *Vigna radiata* L. tratadas con 1 mM CdCl₂ durante 72 h, respecto al testigo tratado con agua.

Cuadro 2. 30 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Cd (μM) en la solución nutritiva.

Cd (μM)	Aminoácidos totales ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco)
0	5.4261 \pm 0.42 a
10	4.9691 \pm 0.41 a
20	4.6257 \pm 0.44 a
Pr > F	0.2568
DMS $^{\Psi}$	1.2264

$^{\Psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas en cuanto a la concentración libres totales en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 2.31**).

Cuadro 2. 31 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de fosfito (Φ) y Cd en la solución nutritiva.

Phi ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Cd (μM)	Aminoácidos totales ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco)
0.0000	0	5.0599 \pm 0.08 a
0.0375	0	5.7924 \pm 0.58 a
0.0000	20	4.4651 \pm 0.17 a
0.0375	10	5.4731 \pm 0.45 a
0.0000	20	4.2715 \pm 0.61 a
0.0375	20	4.9800 \pm 0.11 a
Pr > F		0.2381
DMS $^{\Psi}$		2.1836
CV $^{\Phi}$		15.9021

$^{\Psi}$ DMS: Diferencia mínima significativa. $^{\Phi}$ CV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

2.5.6. Parámetros relacionados con fotosíntesis

2.5.6.1. Concentración intercelular de CO₂ (Ci)

Los datos de concentración intercelular de CO₂ (Ci) en plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 2.15A y 2.15B**); apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el Phi no tuvo influencia significativa en la concentración intercelular de CO₂ por plantas, respecto al testigo (**Figura 2.15a**). Contrario a lo anterior, [Bachiega et al. \(2011\)](#) observaron que los valores más altos de Ci en plántulas de *Citrus sinensis* y *Citrus aurantium* se manifestaron en tratamientos con concentraciones de 0 y 0.5 mM Phi en comparación con un tratamiento con concentración de 0.5 mM Pi en la solución nutritiva.

Por otra parte, se posee evidencia suficiente para concluir que conforme incrementó la concentración de Cd en la solución nutritiva, aumentó de manera significativa la concentración intercelular de CO₂ en plántulas de tomate (**Figura 2.15b**) concordando con lo reportado por [Jia et al. \(2015\)](#) en su investigación sobre los efectos horméticos inducidos por Cd en *Lonicera japonica*, donde se observó una curva bifásica en la concentración intercelular de CO₂ notando que conforme aumenta el Cd agregado al suelo se incrementó significativamente la concentración de Ci de 2.5 a 10 mg kg⁻¹ de Cd; de igual manera, disminuyó significativamente la concentración de Ci a concentraciones superiores a los 25 mg Cd kg⁻¹ suministrado a partir de CdCl₂ 2.5H₂O. Por el contrario, [Alí et al. \(2015\)](#) observaron una reducción significativa en la concentración intercelular de CO₂ (Ci) en tres genotipos de *Brassica napus* (Zheshuang-72, Zhejiang 619 y Zheshuang-758) cuando son tratados con Cd a concentraciones de 75, 150 y 300 mg kg⁻¹ en forma de CdCl₂.

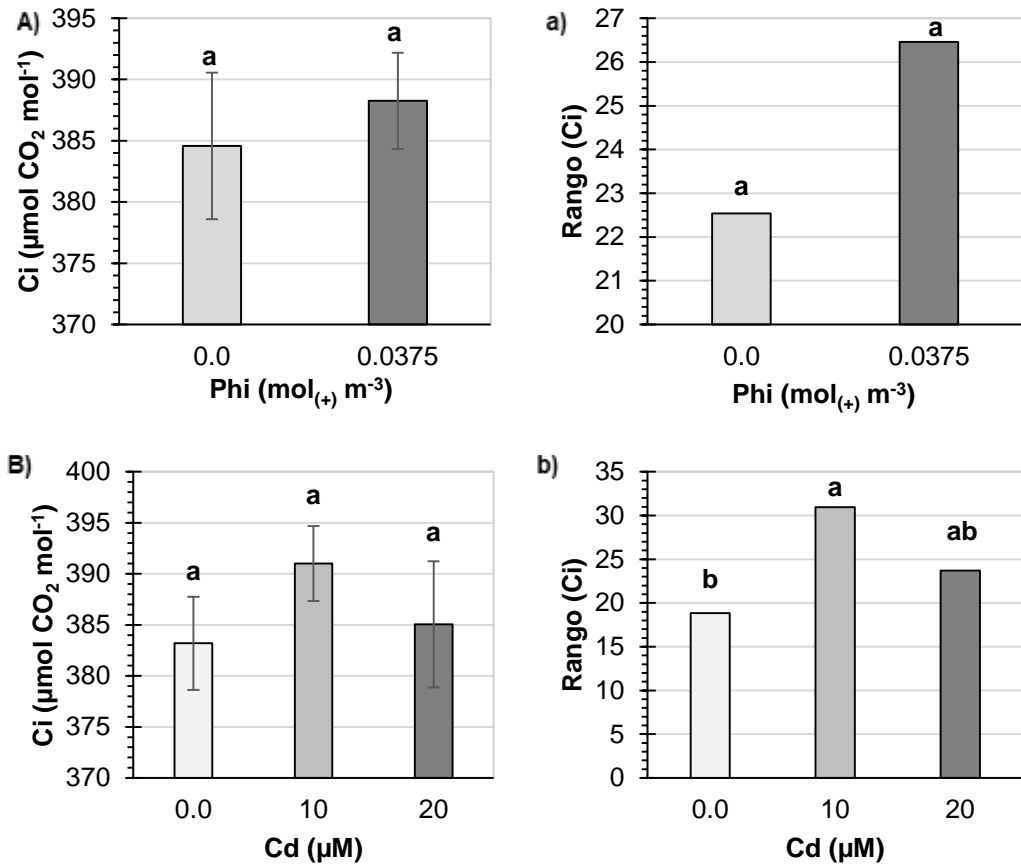


Figura 2. 15 Concentración intercelular de CO₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a fosfito (Phi) [A: medias (P=0.1975); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.3016)] y Cd [B: medias (P=0.0704); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0386)]. Medias \pm DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P \leq 0.05).

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a la concentración intercelular de CO₂ (Ci) en plántulas de tomate (**Cuadro 2.32**).

Cuadro 2. 32 Concentración intercelular de CO₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol(+) m ⁻³)	Cd (μM)	Concentración intercelular de CO ₂	
		Ci (μmol CO ₂ mol ⁻¹)	Rango (Ci ^δ)
0.0000	0	384.375±11.3381 a	21.750 ab
0.0375	0	382.000± 6.7823 a	15.938 b
0.0000	10	387.125± 7.6240 a	24.250 ab
0.0375	10	394.875± 4.7940 a	37.625 a
0.0000	20	382.250±16.4208 a	21.625 ab
0.0375	20	387.875± 6.2664 a	25.813 ab
Pr > F		0.1048	0.0452
DMS ^ψ		14.479	19.364
CV ^φ		2.5103	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.6.2. Tasa de transpiración (E)

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que existan efectos significativos respecto a la tasa de transpiración de plántulas de tomate tratadas con Phi, comparada con el testigo sin fosfito (**Figura 2.16A**). [Bachiega et al. \(2011\)](#) observaron que la menor tasa de transpiración se presenta en plantas de *Citrus sinensis* L. y *Citrus aurantium* tratadas con 0.5 mM Phi como fuente de P en la solución nutritiva, comparado contra los otros tratamientos que utilizaron 0 y 0.5 mM Pi así como el tratamiento consistente en la combinación de ambas fuentes de P (0.5 mM Pi + 0.5 mM Phi).

Por otro lado, tampoco se posee evidencia para demostrar que exista algún efecto significativo al incrementar la concentración de Cd que afecte la tasa de transpiración (**Figura 2.16B**); [Jia et al. \(2015\)](#) observaron una curva bifásica en la transpiración causada por Cd en *Lonicera japonica*, notándose que conforme

aumentó el Cd agregado al suelo se incrementó significativamente la tasa de transpiración a concentraciones de 2.5 y 10 mg Cd kg⁻¹ y de igual manera disminuyó significativamente la tasa de transpiración a concentraciones superiores a los 25 mg kg⁻¹ de Cd como CdCl₂ · 2.5H₂O. Alí *et al.* (2015) observaron una reducción significativa en la tasa de transpiración (E) en tres genotipos de *Brassica napus* (Zheshuang-72, Zhejiang 619 y Zheshuang-758) tratadas con distintas concentraciones de Cd (75, 150, 300 mg kg⁻¹ en forma de CdCl₂).

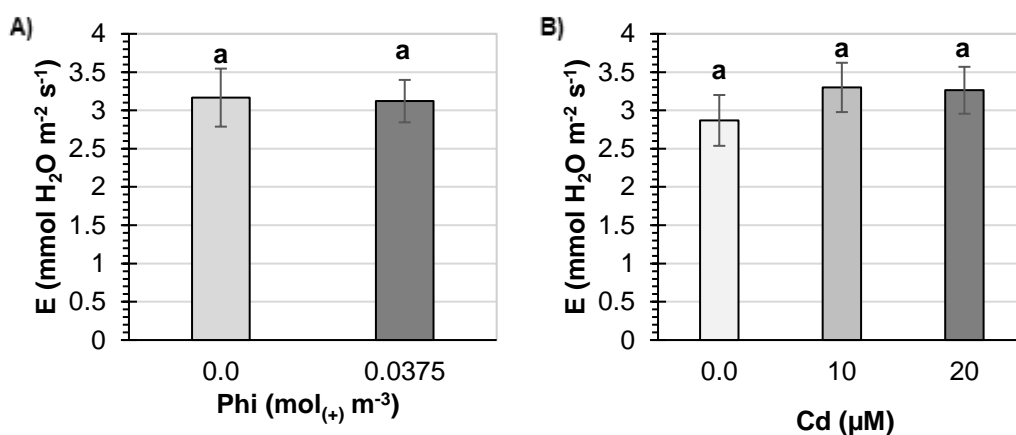


Figura 2. 16 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P=0.8062), Cd (P=0.1225).

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a la tasa de transpiración (E) en plántulas de tomate (**Cuadro 2.33**).

Cuadro 2. 33 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Tasa de transpiración (E)
		E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
0.0000	0	2.9750±0.7146 a
0.0375	0	2.7625±0.6391 a
0.0000	10	3.4500±0.8635 a
0.0375	10	3.1500±0.3024 a
0.0000	20	3.0750±0.6985 a
0.0375	20	3.4500±0.4870 a
Pr > F		0.2380
DMS ^ψ		0.9599
CV ^φ		20.4555

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.5.6.3. Conductancia estomática (Gs)

No se cuenta con evidencia suficiente para demostrar que existan efectos significativos respecto a la conductancia estomática de plántulas de tomate tratadas con Phi, comparada con el testigo sin fosfito (**Figura 2.17A**). [Bachiega et al. \(2011\)](#) reportaron que los valores de Gs en plántulas de *Citrus sinensis L.* y *Citrus aurantium* se redujeron significativamente al suministrar 0.5 mM Phi como fuente de P en comparación con los tratamientos que utilizaron 0.5 mM Pi y 0.25 mM Pi + 0.25 mM Phi en la solución nutritiva.

De la misma manera, tampoco se posee evidencia para demostrar que exista algún efecto significativo al incrementar la concentración de Cd que afecte la Gs (**Figura 2.17B**); mientras que, [Jia et al. \(2015\)](#) observaron que el Cd adicionado a concentraciones de 2.5 a 10 mg Cd kg⁻¹ de suelo, incrementa la conductancia estomática en *Lonicera japonica*, y la disminuye significativamente con concentraciones superiores a los 25 mg kg⁻¹. [Khan et al. \(2014\)](#) registraron una

reducción significativa en la conductancia estomática de tres tipos de tomate (*Solanum lycopersicum* Rheinlands, Sitiens y Mill) al tratarles con 100 μM Cd respecto al testigo; del mismo modo, Li *et al.* (2015) observaron un incremento y al mismo tiempo una reducción significativa en la Gs en hojas de plántulas de *Elsholtzia argyi* al incrementar la concentración de Cd desde 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 hasta 100 $\mu\text{M L}^{-1}$.

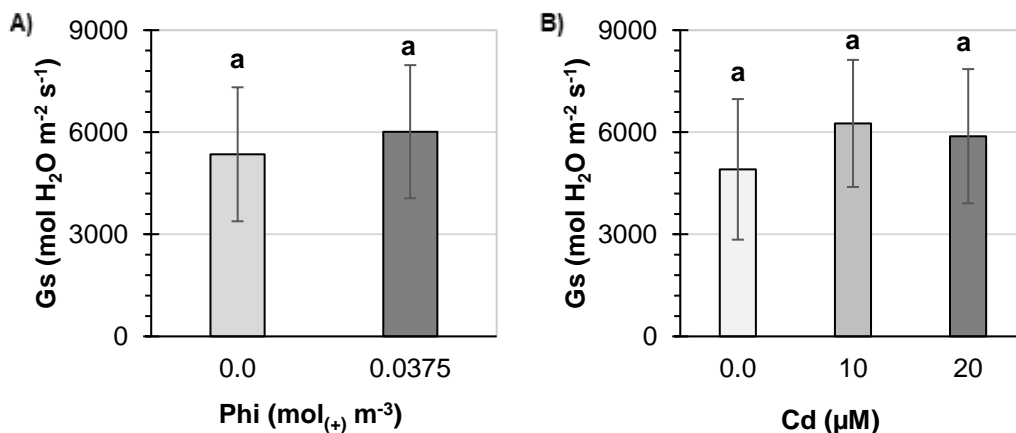


Figura 2. 17 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) (A) y Cd (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.5597$), Cd ($P=0.6053$).

En lo referente a la interacción de Phi y Cd en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a la conductancia estomática (Gs) en plántulas de tomate (**Cuadro 2.34**).

Cuadro 2. 34 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Conductancia estomática (Gs) (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
0.0000	0	5968±4374.32 a
0.0375	0	3851±3856.69 a
0.0000	10	4832±3838.06 a
0.0375	10	7686±3241.58 a
0.0000	20	5256±4043.87 a
0.0375	20	6510±4014.45 a
Pr > F		0.4612
DMS ^ψ		5835.8
CV ^φ		68.7853

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.5.6.4. Tasa fotosintética (A)

Los datos de tasa fotosintética (A) de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 2.18A y 2.18B**); por tanto apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el fosfito no tuvo influencia significativa en la tasa fotosintética por plantas, respecto al testigo sin fosfito (**Figura 2.18a**). [Bachiega et al. \(2011\)](#) en su investigación donde se observa que los valores de fotosíntesis en plántulas de *Citrus sinensis L.* y *Citrus aurantium* se redujeron significativamente al suministrar 0.5 mM Phi como fuente de P contra los tratamientos que utilizaron 0.5 mM Pi y 0.25 mM Pi + 0.25 mM Phi en la solución nutritiva.

Por otra parte, se posee evidencia suficiente para concluir que conforme aumenta la concentración de Cd en la solución nutritiva disminuye significativamente la tasa fotosintética en plántulas de tomate (**Figura 2.18b**), coincidiendo con lo reportado con [Zhao et al. \(2016\)](#) donde se observa que el incremento gradual de las

concentraciones de Cd (5, 25 y 50 mg kg⁻¹ en la solución nutritiva) reduce de manera significativa la clorofila total y la tasa neta fotosintética en plántulas de tomate variedad Castlemart y Spr2; del mismo modo, [Haghighi et al. \(2013\)](#) observaron una reducción significativa en la tasa fotosintética de hojas de plantas de lechuga al momento de incrementar la concentración de Cd (0, 2 y 4 mg L⁻¹ en forma de CdCl₂).

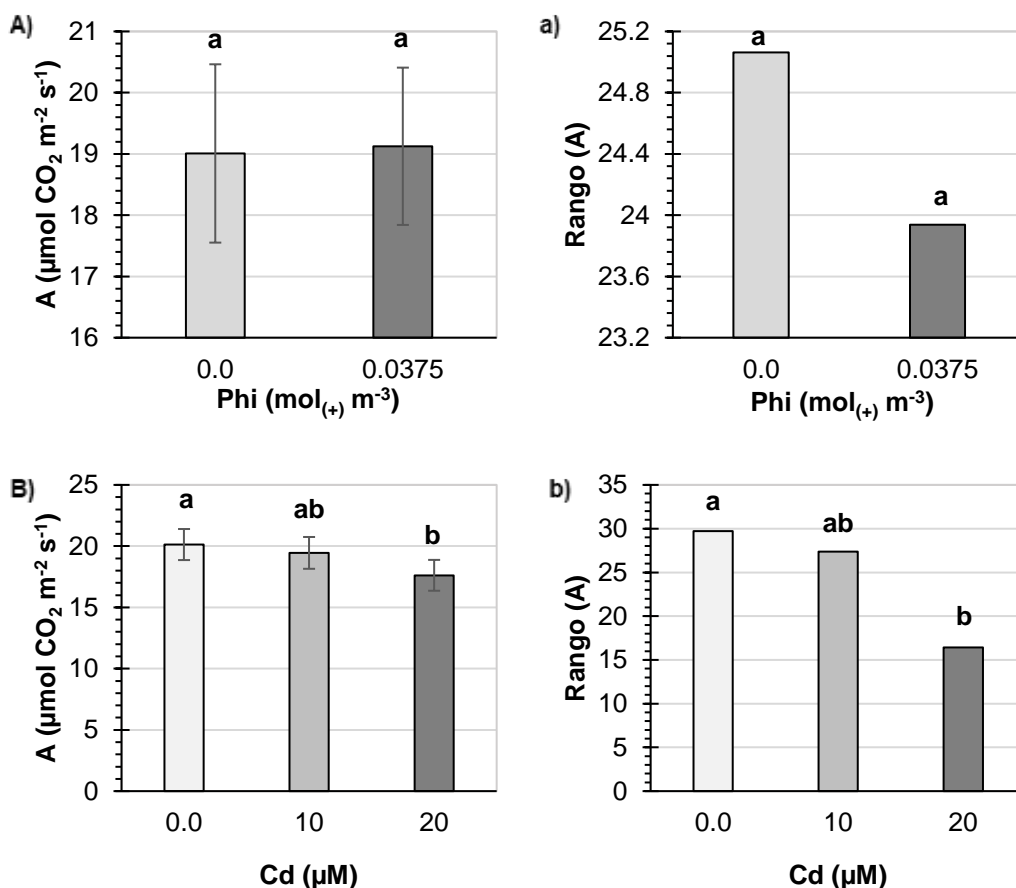


Figura 2. 18 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con fosfito (Phi) [A: medias (P=0.8786); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.7728)] y Cd [B: medias (P=0.0277); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0170)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Cuadro 2. 35 Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio fosfito (Phi) y Cd en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Cd (μM)	Tasa fotosintética (A)	
		(μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Rango (A ^δ)
0.0000	0	19.850±2.4588 a	29.563 a
0.0375	0	20.413±2.7493 a	29.875 a
0.0000	10	19.313±3.6073 a	28.125 a
0.0375	10	19.588±1.1753 a	26.625 a
0.0000	20	17.863±2.5253 a	17.500 a
0.0375	20	17.375±2.6628 a	15.313 a
Pr > F		0.1715	0.1279
DMS ^ψ		3.9239	20.016
CV ^φ		13.7877	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

2.6. CONCLUSIONES

En el presente estudio se muestra que el fosfito (Phi) afectó de forma significativa los parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y fotosintéticos de la siguiente manera:

- Incrementó significativamente el número de flores en comparación con el tratamiento testigo.
- Aumentó de manera significativa el peso fresco de tallo y raíz, el peso seco de raíz, así como la longitud y volumen radicular.
- Incrementó significativamente la concentración de Mn y Cd en hojas, P, K, Ca, S, Cu, Zn y Cd en tallo así como Cu y Fe en raíz; también redujo significativamente la concentración de N en tallo así como Ca y B en raíz de plántulas de tomate.

- Respecto a los parámetros bioquímicos y fotosintéticos evaluados en la presente investigación no se cuenta con evidencia suficiente para demostrar exista alguna diferencia estadística significativa respecto al aporte de Phi en la solución nutritiva comparada con el testigo.

En lo referente al factor Cd, éste afectó de manera significativa los parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y fotosintéticos de la siguiente forma:

- Conforme se incrementó la concentración de Cd en la solución nutritiva hay una reducción significativa del número de hojas, botones florales y flores, área foliar, peso fresco y seco de hojas, peso seco de tallo, peso fresco y seco de raíz, diámetro de tallo, longitud y volumen de raíz en plántulas de tomate.
- El suministro de Cd incrementó significativamente la concentración foliar de N, P, Ca, Mg, S, Cu, B y Cd, de S y Cd en tallos así como K, Ca, Mg, S, Fe y Cd en raíz; asimismo afectó de manera significativa y negativa la concentración de Ca, Mg, Zn, Mn, y B en tallos de plántulas de tomate.
- El incremento en la concentración de Cd en la solución nutritiva reduce significativamente la concentración de clorofila a y clorofila total en hojas de plántulas de tomate.
- Respecto a los parámetros fotosintéticos evaluados, el incremento en la concentración de Cd reducen la Ci y A en plántulas de tomate.

En lo referente a la interacción de fosfito y Cd en la solución nutritiva no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a parámetros bioquímicos y fotosintéticos en plántulas de tomate, pero se aprecian diferencias significativas en parámetros de crecimiento y nutrimentales de la siguiente manera:

- El aporte de Phi en ausencia de Cd incrementó significativamente el peso fresco y seco de raíz en plántulas de tomate.

- El suministro de Phi y 10 μM Cd en la solución nutritiva incrementó significativamente el volumen de raíz; asimismo, con 20 μM Cd, incrementó significativamente el número de flores como el diámetro de tallo en plántulas de tomate.
- El suministro de Phi sin Cd incrementó significativamente la concentración de Mg en hojas, de K, Mg, Cu, Zn y Mn en tallos así como P, S, Fe, Cu, Zn y Mn en raíz de plántulas de tomate. De igual manera se observa una reducción significativa en la concentración de Ca en raíz de plántulas de tomate.
- El Phi y 10 μM Cd en la solución nutritiva incremento significativamente la concentración de Cd en hojas, de Ca en tallo y de Fe en raíz de plántulas de tomate, así como una reducción significativa en la concentración de Cu en hojas, de Cu y Mn en tallos, así como Ca en raíz de plántulas de tomate.
- El aporte de Phi y de 20 μM Cd en la solución nutritiva incrementó significativamente la concentración de Mn y Cd en hojas, de P, Cu, Mn y B en tallo, así como una reducción significativa en la concentración de P, Ca, Zn, Mn y B en raíz de plántulas de tomate.

2.7. LITERATURA CITADA

- Achary VMM, Ram B, Manna M, Datta D, Bhatt A, Reddy MK, Agrawal PK. 2017. Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnology Journal* 15(12): 1493-1508. Doi: 10.1111/pbi.12803
- Alcántar GC, Sandoval VM. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Chapingo, México.
- Ali E, Maodzeka A, Hussain N, Haider SI, Jiang L. 2015. The alleviation of cadmium toxicity in oilseed rape (*Brassica napus*) by the application of salicylic acid. *Plant Growth Regulation* 75(3): 641-655. Doi: 10.1007/s10725-014-9966-0
- Bachiega ZFC, Mattos D, Syvertsen JP. 2011. Plant growth, leaf photosynthesis, and nutrient-use efficiency of citrus rootstocks decrease with phosphite supply. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(3): 487-495. Doi: 10.1002/jpln.201000320

- Bachiega ZFC. 2016. Phosphite and Phosphate Have Contrasting Effects on Nutrient Status of Plants. *Journal of crop improvement* 30(4): 421-432. Doi: 10.1080/15427528.2016.1173611
- Bachiega ZFC, Mesquita GL, Menino G, Tanaka FAO, Mattos DJ, Quaggio JA. 2017. Anatomical and ultrastructural damage to citrus leaves from phosphite spray depends on phosphorus supply to roots. *Plant and Soil* 418: 557-569. Doi: 10.1007/s11104-017-3314-x
- Bremner JM. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C. A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9*. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. pp. 1149-1178.
- Conover WJ, Iman RL. 1981. Rank transformation as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician* 35(3): 124-129.
- Constán-Aguilar C, Sánchez-Rodríguez E, Rubio-Wilhelmi MM, Camacho MA, Romero L, Ruiz JM, Blasco B. 2014. Physiological and Nutritional Evaluation of the Application of Phosphite as a Phosphorus Source in Cucumber Plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45(2): 204-222. Doi: 10.1080/00103624.2013.854374
- Deepa KV, Athikkattuvalasu SK, Paino DM, Kashchandra GR. 2002. Phosphite, an Analog of Phosphate, Suppresses the Coordinated Expression of Genes under Phosphate Starvation. *Plant Physiology* 129(3): 1232-1240.
- Estrada-Ortiz E, Trejo-Télez LI, Gómez-Merino FC, Silva-Rojas HV, Castillo-González AM, Avitia-García E. 2016. Physiological Responses of Chard and Lettuce to Phosphite Supply in Nutrient Solution. *Journal of Agricultural Science and Technology* 18(4): 1079-1090.
- Ferri A, Lancilli C, Maghrebi M, Lucchini G, Sacchi GA, Nocito FF. 2017. The Sulfate Supply Maximizing Arabidopsis Shoot Growth Is Higher under Long- than Short-Term Exposure to Cadmium. *Frontiers in Plant Science* 8: 854. Doi:10.3389/fpls.2017.00854
- Geiger M, Walch-Liu P, Engels C, Harnecker J, Schulze ED, Ludewig F, Sonnewald U, Scheible WR, Stitt M. 1998. Enhanced carbon dioxide leads to a modified diurnal rhythm of nitrate reductase activity and higher levels of amino acids in Young tobacco plants. *Plant, Cell & Environment*. 21(3): 253-268.
- Haghighi M, Kafi M, Khoshgoftarmanesh A. 2013. Effect of humic acid application on cadmium accumulation by lettuce leaves. *Journal of Plant Nutrition* 36(10): 1521-1532. Doi: 10.1080/01904167.2013.799182
- Harborne, J. B. 1973. Chlorophyll extraction. *In*: Harborne, J.B. (ed.), *Phytochemical Methods. Recommended technique*. Chapman and Hall, London. Pp. 205-207.
- Hédiji H, Djebali W, Belkadhi A, Cabasson C, Moing A, Rolin D, Brouquisse R, Gallusci P, Chaïbia W. 2015. Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany* 97: 176-181.
- Hoang TBT, Takeo Y, Aung KM, Papa SS. 2008. Effects of phosphite, a reduced form of phosphate, on the growth and phosphorus nutrition of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal Soil Science and Plant Nutrition* 54(5): 761-768. Doi: 10.1111/j.1747-0765.2008.00290.x

- Hoang TBT, Takeo Y, Katsuhiko S. 2009. Effect of phosphite-phosphate interaction on growth and quality of hydroponic lettuce (*Lactuca sativa*). Journal Plant Nutrition Soil Science 172(3): 378-384. Doi: 10.1002/jpln.200800192
- Hussain I, Arslan AM, Rizwan R, Iqbal M, Ibrahim M, Tanzella Z, Saeed F. 2017. Cadmium-induced Perturbations in Growth, Oxidative Defense System, Catalase Gene Expression and Fruit Quality in Tomato. International Journal of agriculturae and biology-19(1): 61-68. Doi: 10.17957/IJAB/15.0242
- Jia L, Liu Z, Chen W, Ye Y, Yu S, He X. 2015. Hormesis Effects Induced by Cadmium on Growth and Photosynthetic Performance in a Hyperaccumulator, *Lonicera japonica* Thunb. Journal of Plant Growth Regulation 34(1): 13-21. Doi: 10.1007/s00344-014-9433-1
- Khan AL, Waqas M, Hussain J, Al-Harrasi A, Lee IJ. 2014. Fungal endophyte *Penicillium janthinellum* LK5 can reduce cadmium toxicity in *Solanum lycopersicum* (Sitiens and Rhe). Biology and Fertility of Soils 50(1): 75-85. Doi: 10.1007/s00374-013-0833-3.
- Kisa D, Öztürk L, Doker S, Gökçe İ. 2017. Expression analysis of metallothioneins and mineral contents in tomato (*Lycopersicon esculentum*) under heavy metal stress. Journal of the Science of Food and Agriculture 97(6): 1916-1923. Doi:10.1002/jsfa.7995
- Li FT, Qi JM, Zhang G, Lin LH, Fang PP, Tao AF, Xu JT. 2013. Effect of Cadmium Stress on the Growth, Antioxidative Enzymes and Lipid Peroxidation in Two Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) Plant Seedlings. Journal of Integrative Agriculture 12(4): 610-620. Doi: 10.1016/S2095-3119(13)60279-8
- Li S, Yang W, Yang T, Chen Y, Ni W. 2015. Effects of Cadmium Stress on Leaf Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis of *Elsholtzia argyi*—A Cadmium Accumulating Plant. International Journal of Phytoremediation 17(1): 85-92. Doi: 10.1080/15226514.2013.828020
- Li MQ, Hasan MdK, Li CX, Ahammed GJ, Xia XJ, Shi K, Zhou YH, Reiter RJ, Yu JQ, Xu MX, Zhou J. 2016. Melatonin mediates selenium-induced tolerance to cadmium stress in tomato plants. Journal of Pineal Research 61(3): 291-302. Doi: 10.1111/jpi.12346
- Lopes AJ, William de Ávila F, Faquin V. 2016. Phosphite and phosphate in the accumulation and translocation of nutrients in common bean. Pesquisa Agropecuária Tropical 46(4): 357-366. Doi: 10.1590/1983-40632016v46a40810
- López-Arredondo DL, Herrera-Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse condition base don phosphite metabolism. Plant Biotechnology Journal 11(4): 516-525. Doi: 10.1111/pbi.12063
- Manna M, Achary VM, Islam T, Agrawal PK, Reddy MK. 2016. The development of a phosphite-mediated fertilization and weed control system for rice. Scientific Reports (Nature Publisher Group) 6: 24941. Doi: 10.1038/srep24941
- Mofidnakhai M, Abdossi V, Dehestani A, Pirdashti H, Babaeiza V. 2016. Potassium phosphite affects growth, antioxidant enzymes activity and alleviates disease damage in cucumber plants inoculated with *Pythium ultimum*. Archives of

- Phytopathology and Plant Protection 49: 207-221. Doi: 10.1080/03235408.2016.1180924
- Monteiro ACA, De Resende MLV, Valente TCT, Ribeiro Junior PM, Pereira VF, Da Costa JR, Da Silva JAG. 2016. Manganese Phosphite in Coffee Defence against *Hemileia vastatrix*, the Coffee Rust Fungus: Biochemical and Molecular Analyses. *Journal of Phytopathology* 164: 1043-1053. Doi: 10.1111/jph.12525
- Moore S, Stein WH. 1954. A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids and related compounds. *Journal of Biological Chemistry* 211: 907-913.
- Nogueirol RC, Monteiro FA, Gratão PL, Da Silva BK, Azevedo RA. 2016. Cadmium Application in Tomato: Nutritional Imbalance and Oxidative Stress. *Water Air Soil Pollution* 227(6): 210. Doi: 10.1007/s11270-016-2895-y
- Roychoudhury A, Ghosh S, Paul S, Mazumdar S, Das G, Das S. 2016. Pre-treatment of seeds with salicylic acid attenuates cadmium chloride-induced oxidative damages in the seedlings of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Acta Physiologiae Plantarum* 38(1): 11. Doi: 10.1007/s11738-015-2027-0
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3 User's Guide. Cary, North Carolina: SAS Institute Inc.
- Singh S, Prasad SM. 2017. Effects of 28-homobrassinoloid on key physiological attributes of *Solanum lycopersicum* seedlings under cadmium stress: Photosynthesis and nitrogen metabolism. *Plant Growth Regulation* 82(1): 161-173. Doi: 10.1007/s10725-017-0248-5
- Steiner A. 1984. The universal nutrient solution. In: I.S.O.S.C. Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Pp. 633-649. The Netherlands.
- Wang Y, Hu Y, Duan Y, Feng R, Gong H. 2016. Silicon reduces long-term cadmium toxicities in potted garlic plants. *Acta Physiologiae Plantarum* 38(8): 211. Doi: 10.1007/s11738-016-2231-6
- Xin JL, Huang BF. 2013. Subcellular Distribution and Chemical Forms of Cadmium in Two Hot Pepper Cultivars Differing in Cadmium Accumulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62(2): 508-515. Doi: 10.1021/jf4044524
- Zhao S, Ma Q, Xu X, Li G, Hao L. 2016. Tomato Jasmonic Acid-Deficient Mutant spr2 Seedling Response to Cadmium Stress. *Journal of Plant Growth Regulation* 35(3): 603-610. Doi: 10.1007/s00344-015-9563-0

CAPÍTULO III. FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS NUTRIMENTAL EN TOMATE

RESUMEN

FOSFITO Y SU RELACIÓN CON ESTRÉS NUTRIMENTAL EN TOMATE

En este estudio se condujo durante 21 días un experimento de tipo factorial 2^3 con el objetivo de evaluar el efecto del fosfito (Phi) como bioestimulante ante una situación de estrés nutricional inducida por un déficit y un exceso de nitrógeno (N) en los parámetros de crecimiento, concentración nutricional de hoja, tallo y raíz, en parámetros bioquímicos y relacionados con la fotosíntesis de plántulas de tomate variedad Cid. La investigación se hizo en verano de 2016 bajo condiciones protegidas en un invernadero tipo túnel con cubierta de plástico perteneciente al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. La adición de Phi a la solución nutritiva ocasionó un incremento significativo en altura de planta, diámetro de tallo, longitud y volumen de raíz, así como en la acumulación de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz de plántulas de tomate; así mismo en los parámetros fotosintéticos hubo un incremento significativo en la concentración intercelular de CO_2 (C_i), conductancia estomática (G_s) y tasa fotosintética (A). Por otra parte, conforme se incrementó la concentración de NO_3^- de 1.5 a 3.0 y 6.0 $\text{mol}^{(+)} \text{m}^{-3}$, aumentó el número de hojas y flores, área foliar, peso fresco y seco de hoja, tallo y raíz, altura de planta, volumen y longitud de raíz; así como en la acumulación de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz; en los parámetros bioquímicos se observa un incremento significativo en la concentración de clorofila a y total; así como en los parámetros fotosintéticos tasa de transpiración (E) y A y hubo una reducción en la concentración intercelular de C_i . En lo que respecta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^-) se posee evidencia suficiente para demostrar diferencias estadísticas significativas en lo que respecta al número de flores, longitud de raíz, peso seco y diámetro de tallo, así como en la acumulación de macro y micronutrientes en hoja, tallo y raíz; así como en los parámetros fotosintéticos C_i , E y A en hojas de plántulas de tomate.

Palabras clave: Fosfito, estrés abiótico, nitrato, tomate.

ABSTRACT

PHOSPHITE AND ITS RELATION WITH NUTRIMENTAL STRESS IN TOMATO

In this study, a factorial 2^3 experiment was conducted for 21 days with the objective of evaluating the effect of phosphite (Phi) as a biostimulant in a nutritional stress situation induced by a deficit and an excess of nitrogen (N) in the parameters of growth, nutrimental concentration of leaf, stem and root, in biochemical parameters and related to the photosynthesis of tomato seedlings variety Cid. The investigation was made in the summer of 2016 under protected conditions in a tunnel-type greenhouse with plastic cover belonging to the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. The addition of Phi to the nutrient solution caused a significant increase in plant height, stem diameter, root and volume length, as well as the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root of tomato seedlings. Likewise in the photosynthetic parameters there was a significant increase in the intercellular concentration of CO_2 (C_i), stomatal conductance (G_s) and photosynthetic rate (A). On the other hand, as the NO_3^- concentration increased from 1.5 to 3.0 and 6.0 mol $(+)$ m^{-3} , the number of leaves and flowers, foliar area, fresh and dry weight of leaf, stem and root, height of plant, volume and length of root also increased; as well as in the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root; in the biochemical parameters a significant increase in the concentration of chlorophyll a and total is observed; as well as in the photosynthetic parameters transpiration rate (E) and A and there was a reduction in the intercellular concentration of C_i . Regarding the interaction of the study factors (Phi and NO_3^-) there is sufficient evidence to demonstrate significant statistical differences regarding the number of flowers, root length, dry weight and stem diameter, as well as in the accumulation of macro and micronutrients in leaf, stem and root; as well as in the photosynthetic parameters C_i , E and A in leaves of tomato seedlings.

Key words: Phosphite, abiotic stress, nitrate, tomato.

3.1. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para plantas superiores, como tal desempeña un papel importante en el crecimiento. La deficiencia de N en particular en tomate, disminuye la calidad y el rendimiento del cultivo, y un exceso de éste puede aumentar notablemente el contenido de nitrato (NO_3^-) en el tejido foliar. Si bien, la acumulación de nitrato en las plantas es inofensivo, en el cuerpo humano éste se reduce a nitrito (NO_2^-), el cual es un agente cancerígeno. De manera adicional, el exceso de fertilizantes nitrogenados conduce a la contaminación ambiental y aumenta el costo de producción (Meiqing *et al.*, 2017).

Las plantas absorben tanto amonio (NH_4^+) como NO_3^- , y estas dos formas inorgánicas de N son las más importantes. La absorción y asimilación de amonio por las plantas requiere menos energía que la absorción y la reducción del asimilación del NO_3^- a NH_4^+ para su posterior asimilación (Liu *et al.*, 2017).

El nivel de N afecta los rasgos fisiológicos de las plantas. La tasa de fotosíntesis y la conductancia estomática están fuertemente influenciadas por el nivel de suministro de nitrógeno. La deficiencia de N interrumpe el funcionamiento del aparato fotosintético y reduce la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII); asimismo, reduce la tasa fotosintética a menudo atribuida a la disminución en el contenido de clorofila, y en la actividad de la nitrato reductasa (NR) y la ribulosa bisfosfato carboxilasa oxigenasa en su función carboxilasa (Rubisco) (Janusauskaite *et al.*, 2017). La clorofila es un pigmento importante involucrado en la fotosíntesis de plantas; se ha demostrado que los aumentos en la disponibilidad de N corresponden con un mayor contenido de clorofila foliar y que la reducción del contenido de clorofila puede restringir el proceso fotosintético y, en consecuencia, la disminución de la producción de asimilados (Janusauskaite *et al.*, 2017). El contenido de clorofila está altamente relacionado con el contenido de N en hojas, por lo que el estrés por N puede manifestar rápidamente su efecto en el contenido de clorofila en hojas frescas (Qinglin *et al.*, 2017). Los niveles de N y P afectan la

microestructura de la hoja, incluido el grosor, la cantidad de clorofila y otros pigmentos así como el tricoma y las densidades estomáticas.

Por otra parte, las sales de fosfito (Phi) son sales inorgánicas del ácido fosforoso que se han utilizado como inductores de resistencia para activar los mecanismos subyacentes a la defensa de las plantas (Monteiro *et al.*, 2016). Desde el punto de vista químico, el Phi es una forma reducida de Pi en la cual un átomo de oxígeno es reemplazado por uno de hidrógeno, esta sustitución afecta de manera prominente el comportamiento de este compuesto en organismos vivos (Achary *et al.*, 2017).

Considerando lo anterior, en el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación de los efectos del uso de fosfito (Phi) como bioestimulante en el cultivo de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Cid, sometido a un estrés nutrimental por nitrógeno (niveles deficiente, óptimo y excesivo), analizando variables de crecimiento, nutrimentales, bioquímicas y parámetros relacionados con fotosíntesis.

3.2. OBJETIVOS

3.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi, $H_2PO_3^-$) vía radical, en variables de crecimiento, nutrimentales, bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis de plántulas de tomate sometidas a estrés nutrimental causado por nitrógeno.

3.2.2. Objetivos particulares

- Determinar el efecto de la adición de fosfito (Phi, $H_2PO_3^-$) vía radical, en variables de crecimiento de plántulas de tomate sometidas a estrés por nitrógeno.
- Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi, $H_2PO_3^-$) vía radical, en variables nutrimentales de plántulas de tomate sometidas a estrés por nitrógeno.

- Evaluar el efecto de la adición de fosfito (Phi , H_2PO_3^-) vía radical, en parámetros bioquímicos y relacionados con fotosíntesis de plántulas de tomate sometidas a estrés por nitrógeno.

3.3. HIPÓTESIS

3.3.1. Hipótesis general

El tratamiento con H_2PO_3^- adicionado a la solución nutritiva, en plantas de tomate var. Cid sometidas a estrés por N, reduce el efecto negativo de éste en parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y relacionados con fotosíntesis.

3.3.2. Hipótesis particulares

- El suministro de H_2PO_3^- en la solución nutritiva empleada para el riego de plántulas de tomate var. Cid expuestas a distintas concentraciones de nitrógeno, mitiga los efectos negativos del estrés causado por deficiencia o exceso de N.
- El tratamiento con H_2PO_3^- en la solución nutritiva a plántulas de tomate var. Cid expuestas a deficiencia y exceso de N, presenta un efecto positivo en las variables nutrimentales del cultivo.
- La adición de H_2PO_3^- a la solución nutritiva empleada en el riego de plántulas de tomate var. Cid, sometidas a deficiencia y exceso de N, presenta un efecto positivo en las variables bioquímicas y relacionadas con fotosíntesis.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Localización geográfica del área experimental

El presente trabajo de investigación se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica localizado a 19° 28' latitud norte, 98°54' latitud oeste, a una altitud de 2245 m, en Montecillo, Estado de México. Durante el estudio se registró una

temperatura mínima promedio de 15.49 °C y una temperatura máxima promedio de 26.43 °C; 16.28% de humedad relativa media durante el día y de 34.32% durante la noche y un punto de rocío promedio de 8.32 °C.

3.4.2. Sustrato

El sustrato utilizado fue perlita (silicato alumínico de origen volcánico), cuyas características se mencionan en el Capítulo I. Fosfito y su relación con estrés salino en tomate, de esta tesis.

3.4.3. Material vegetal

Se utilizaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de la variedad El Cid, lote: E65175, material para investigación de la casa comercial Harris Moran.

3.4.4. Descripción de tratamientos

En la presente investigación, en la formulación de las seis soluciones nutritivas evaluadas, se consideró como referencia la solución nutritiva universal de Steiner ([Steiner, 1984](#)); en este caso particular al 25% de su concentración, como se explica detalladamente en el Capítulo I. De igual manera las soluciones nutritivas se prepararon con agua destilada y con sales grado reactivo (Fermont, Meyer y J.T. Baker).

Las seis soluciones nutritivas variaron en la concentración de N y en la presencia o ausencia de Phi. Las tres concentraciones de NO_3^- evaluadas fueron: 1.5 (deficiente), 3.0 (óptimo) y 6.0 (excesivo) $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$. Las dos concentraciones de fosfito (Phi, H_2PO_3^-) evaluadas a partir de ácido fosforoso (H_3PO_3) fueron: 0 y 0.0375 $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$, estas concentraciones corresponden a 0 y 15% del P total en la solución de Steiner al 25%. El H_3PO_3 empleado fue de la marca Sigma Aldrich (Merck; Germany).

3.4.5. Diseño experimental

Se utilizó un acomodo de tipo factorial 2^3 en un diseño experimental completamente al azar (DECA), en el que los niveles a evaluar fueron en:

Factor estrés por N, en los niveles 1.5, 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³ de NO₃⁻ adicionados a la solución nutritiva.

Factor fosfito (Phi), en los niveles 0 y 0.0375 mol l₍₊₎ m⁻³ de Phi a partir de H₃PO₃ adicionados a la solución nutritiva.

Se obtuvieron seis tratamientos del acomodo factorial, para cada tratamiento se colocaron 14 repeticiones obteniéndose un total de 84 unidades experimentales las cuales fueron vasos de plástico individuales (Bosco™) con una capacidad de 60 mL cada uno.

El modelo estadístico empleado se describe a detalle en el Capítulo I. de la presente investigación.

3.4.6. Manejo del experimento

La aplicación de tratamientos inició el 05 de julio de 2016 y finalizó el 25 de julio de 2016. Durante ese tiempo se aplicaron tres riegos diarios de 50 mL cada uno por unidad experimental.

3.4.7. Variables evaluadas

3.4.7.1. Parámetros de crecimiento

Después de 21 días de aplicación de tratamientos (26 de julio de 2016) se determinaron las variables siguientes:

- Número de hojas, número de botones florales y número de flores.
- Altura de planta y longitud de raíz se determinaron usando una regla de 50 cm.
- Volumen de raíz, mediante el método de desplazamiento de volumen usando una probeta de vidrio (Pyrex) de 250 mL.

- Diámetro de tallo con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, México).
- Área foliar por planta con un integrador (LI-COR, LI-300, Lincoln, NE, EEUU).
- Pesos de biomasa fresca de raíz, tallos y hojas empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).
- Pesos de biomasa seca de raíz, tallos y hojas. Se determinó en muestras secadas durante 48 h a 70 °C en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, México), empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).

3.4.7.2. Concentración y acumulación de nutrimentos

Se determinó la concentración de N en los distintos órganos de la planta (raíz, tallo y hojas), empleando el método Semimicro-Kjeldahl ([Bremner, 1965](#)).

Asimismo, en los órganos antes indicados se determinaron las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo y B en el extracto resultante de la digestión húmeda del material seco con HNO₃ y HClO₄ de acuerdo a lo descrito por [Alcántar y Sandoval \(1999\)](#). Los extractos se leyeron en un equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma Varian 725 ES ICP (Agilent, ICP Optical Emission Spectrometer, 725-ES, USA). Las acumulaciones de nutrimentos y Cd se estimaron considerando las concentraciones de éstos y los pesos de biomasa seca del órgano en particular.

3.4.7.3. Concentración de biomoléculas

Después de 21 días de tratamiento (26 de julio de 2016) las muestras de raíz, tallo y hoja de plántulas de tomate se almacenaron a una temperatura de -20 °C en un congelador (COOL-LAB, LAB-LINE INSTRUMENTS, USA). En estas muestras se realizaron las siguientes determinaciones:

- Concentración foliar de clorofila a, b y total. Se realizó por el método descrito por [Harborne \(1973\)](#), se midieron absorbancias a 645 y 665 nm usando un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell

changer y UK). Con los resultados se realizan las estimaciones de clorofilas utilizando las formulas siguientes:

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g/mg peso fresco}) = (5.46 \times \text{Abs}_{665}) - (2.16 \times \text{Abs}_{645})$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g/mg peso fresco}) = (9.67 \times \text{Abs}_{645}) - (3.04 \times \text{Abs}_{665})$$

- Aminoácidos libres totales en hoja. Se realizó una extracción etanólica siguiendo la metodología de [Geiger et al. \(1998\)](#) y se empleó el método de la ninhidrina ([Moore y Stein, 1954](#)). Se utilizó leucina para la elaboración de la curva estándar y se leyó a una longitud de onda de 570 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell changer y UK).

3.4.7.4. Parámetros relacionados con fotosíntesis

Después de 24 días de tratamientos (27 de julio de 2016) entre 8:30 y 11:30 h, en la cuarta hoja de arriba hacia debajo de la planta, se realizaron las mediciones siguientes, empleando un analizador de gases en infrarrojo (IRGA) (LICOR, LI-6400XT, USA):

- Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Concentración intercelular de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)
- Tasa de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

3.4.8. Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$), corroborando antes que se cumplieran los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianza. Debido a que algunas variables no cumplían con el supuesto de normalidad se recurrió al método de transformación por rangos propuesto por [Conover y Iman \(1981\)](#) para lo cual se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis System 9.0 y SAS University Edition ([SAS Institute Inc., 2011](#)).

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Parámetros de crecimiento

3.5.1.1. Número de hojas, de botones florales y de flores

El número de hojas por planta de tomate no fue afectado significativamente por los tratamientos con Phi (**Figura 3.1A**). De igual manera se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme incrementa la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva, aumenta significativamente el número de hojas por plántulas; en particular en 9.24 y 20.67% en los tratamientos con 3 y 6 $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$, respectivamente, en comparación con el tratamiento al que se le suministró la concentración más baja de NO_3^- (**Figura 3.1B**). Estos resultados coinciden con los reportados por Mastalerczuk *et al.* (2017), quienes 180 días después de la siembra, observaron un incremento significativo en el número de hojas de plántulas de las variedades Felopa y Sulino de *Festulolium* [híbrido intergenérico natural o sintético entre especies obligatorias de mestizaje de los géneros *Festuca* (festuca) y *Lolium* (ballico)], al momento de incrementar la concentración de nitrato de amonio desde 0 a 90 y 180 kg ha^{-1} .

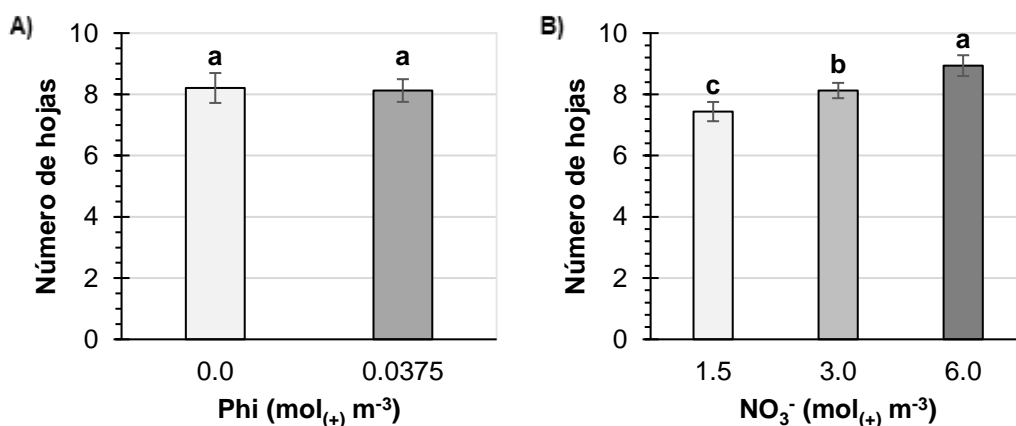


Figura 3. 1 Número de hojas de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.6398$), NO_3^- ($P < 0.0001$).

El número de botones florales por planta no fue afectado significativamente por los tratamientos con Phi (**Figura 3.2A**); así también, los niveles de NO_3^- no afectaron el número de botones florales por plántulas (**Figura 3.2B**).

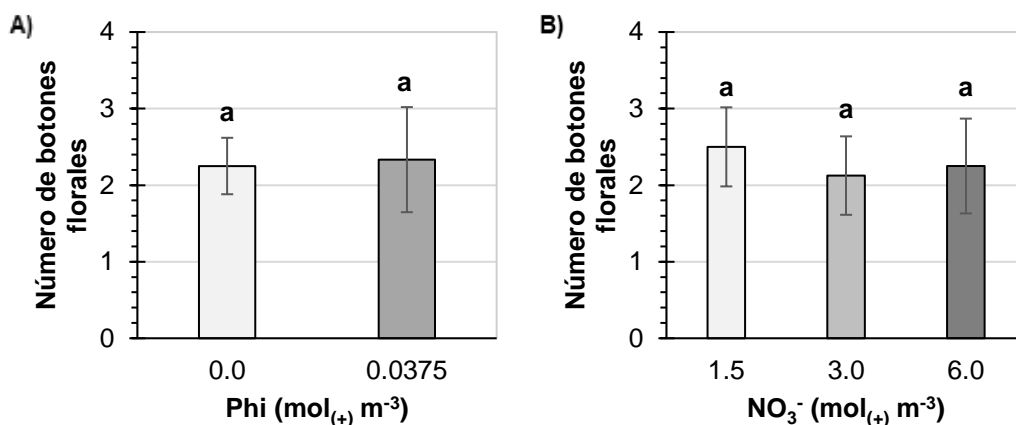


Figura 3. 2 Número de botones florales por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.8003$), NO_3^- ($P=0.6383$).

El número de número de flores por planta de tomate no fue afectado significativamente por el Phi (**Figura 3.3A**); mientras que, [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#), reportaron que a una tasa óptima de Pi en la solución nutritiva (1 mM), existió una reducción significativa en el número de flores de plántulas de *Cucumis sativus* cv. Conil al realizar aplicaciones foliares de Phi en concentraciones de 0.1, 0.25, 0.5 y 1.0 mM.

Por otro lado, se posee evidencia suficiente para mostrar incrementos de 9.24 y 20.67% en el número de flores por plántula con las concentración 3.0 y 6.0 mol(+) $\text{NO}_3^- \text{ m}^{-3}$, respecto al tratamiento al que se le suministró 1.5 mol(+) $\text{NO}_3^- \text{ m}^{-3}$ la fuente más baja de nitrógeno (**Figura 3.3B**).

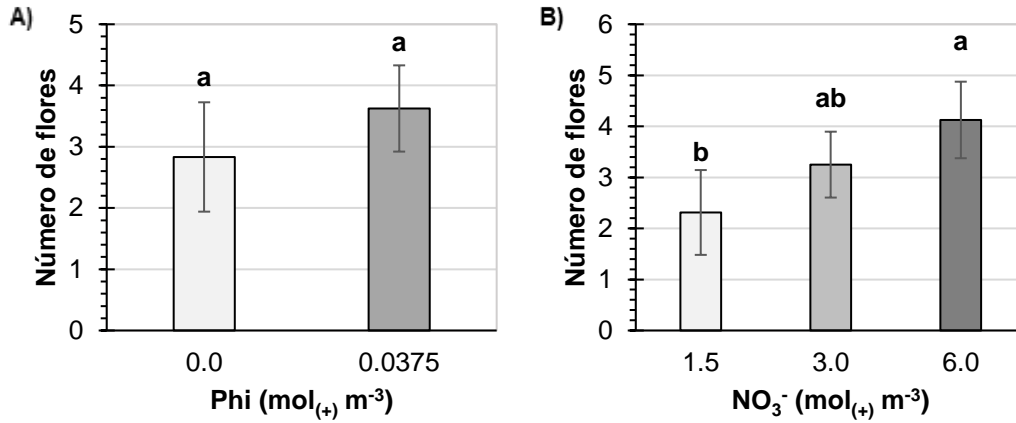


Figura 3. 3 Número de flores por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO₃⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05), Phi (P=0.0519), NO₃⁻ (P=0.0024).

En lo que se refiere a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NO₃⁻), se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a un nivel deficitario de NO₃⁻ en la solución nutritiva, incrementó significativamente el número de hojas; dicho incremento fue de 170% respecto al tratamiento al que no se le suministro dicho bioestimulante (**Cuadro 3.1**).

Cuadro 3. 1 Número de hojas, botones florales y flores en plántulas de tomate como respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol(+) m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol(+) m ⁻³)	Número de hojas	Número de botones florales	Número de flores
0.0000	1.5	7.500±0.38 c	2.625±0.37 a	1.2500±0.64 b
0.0375	1.5	7.375±0.26 c	2.375±0.65 a	3.3750±0.65 a
0.0000	3.0	8.000±0.27 bc	2.000±0.27 a	2.8750±0.68 ab
0.0375	3.0	8.250±0.23 abc	2.250±0.69 a	3.6250±0.59 a
0.0000	6.0	9.125±0.42 a	2.125±0.42 a	4.3750±0.59 a
0.0375	6.0	8.750±0.23 ab	2.375±0.80 a	3.8750±0.90 a
Pr > F		<0.0001	0.9112	0.0010
DMS ^ψ		0.914	1.6925	2.0455
CV ^φ		7.4984	49.4789	42.4379

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.1.2. Área foliar

Los datos de área foliar no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.4A y 3.4B**); por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman es posible afirmar que el Phi no tuvo influencia significativa en el área foliar de plántulas de tomate (**Figura 3.4a**). Estos resultados concuerdan con lo reportado por [Bachiega et al. \(2017\)](#) en su investigación en árboles de naranja de 18 meses de edad bajo un manejo hidropónico con deficiencia (PD) y suficiencia de fósforo (PS) en la solución nutritiva, tratados con pulverizaciones foliares preparadas a partir de una solución nutritiva que consistía en 0.16 M P, adicionando 1 M de fosfato de potasio (KH₂PO₄, Pi), 1 M de fosfito de potasio (KH₂PO₃, Phi) y un control de cloruro de potasio (KCl, 0.16 M), en condiciones controladas cada 15 días durante dos meses y reemplazando todos los días con agua destilada el agua perdida por evapotranspiración. En este estudio no existió evidencia suficiente para demostrar que el Phi tuviera efecto en el área foliar de árboles de naranja en condiciones de PS; el efecto contrario fue observado en condiciones de PD, donde las aplicaciones de Phi y KCl afectaron negativamente el área foliar de naranja.

Por otro lado se observa que conforme incrementa la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva aumenta significativamente el área foliar de la plántula de tomate (**Figura 3.4b**).

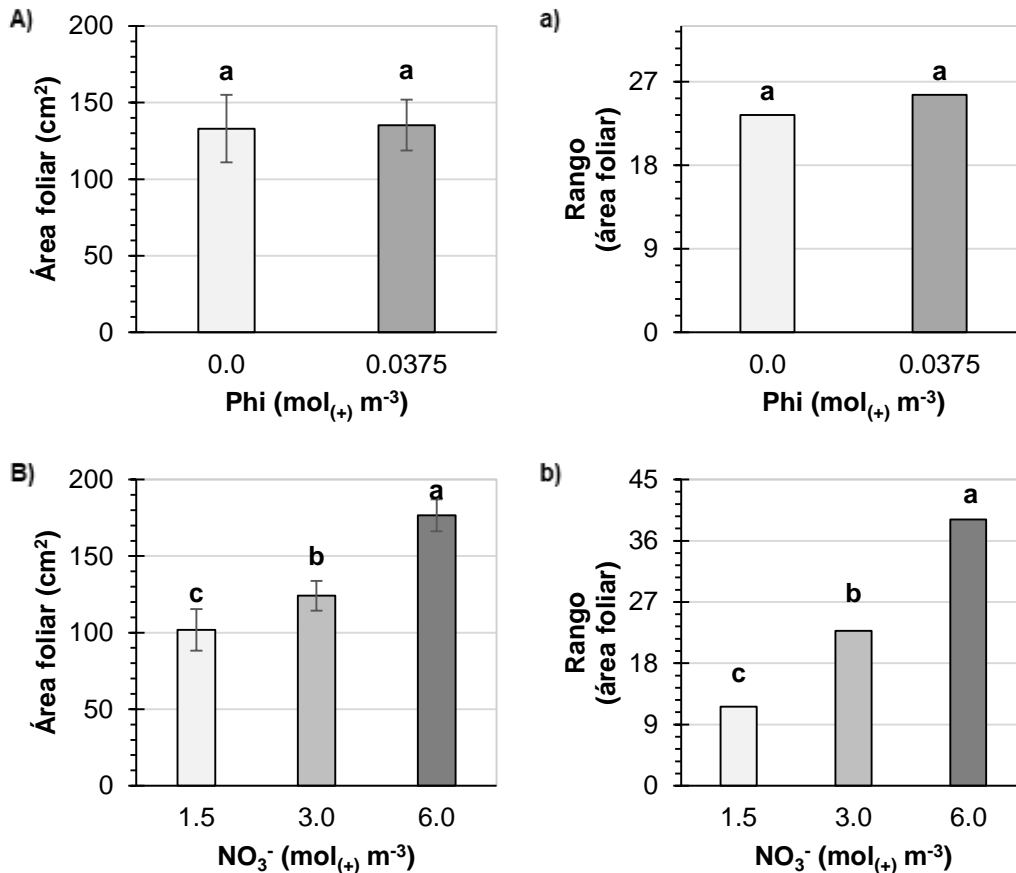


Figura 3. 4 Área foliar de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.7203$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=3719$)] y NO_3^- [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

En lo que respecta a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NO_3^- en la solución nutritiva), no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas en el área foliar de tomate (**Cuadro 3.2**).

Cuadro 3. 2 Área foliar por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Área foliar (cm ²)	Rango (área foliar ^δ)
0.0000	1.5	94.89±16.09 b	8.500 c
0.0375	1.5	108.71±10.26 b	14.750 bc
0.0000	3.0	120.40±5.41 b	21.750 b
0.0375	3.0	127.71±12.94 b	23.750 b
0.0000	6.0	183.61±10.92 a	40.000 a
0.0375	6.0	169.52±9.21 a	38.250 a
Pr > F		<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		33.709	12.412
CV ^φ		16.8343	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.1.3. Peso fresco y seco de hojas

Los datos de peso fresco de hoja no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.5A y 3.5B**); por tanto, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se observa que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso fresco de hoja de plántulas de tomate (**Figura 3.5a**). Por el contrario, [Mofidnakhai et al. \(2016\)](#) observaron un incremento significativo en el peso fresco de hojas en plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) inoculadas con *Pythium ultimum*, al suministrarles vía foliar fosfito de potasio en concentraciones de 2 y 4 g L⁻¹ durante 72 h. Por otra parte, algunos investigadores como [Manna et al. \(2015\)](#), han demostrado que el aumento en las concentraciones externas de Phi tienen un impacto negativo en el peso fresco de la plántulas de arroz, utilizando KH₂PO₄ y Na₂HPO₃ 5H₂O como fuentes de Pi y Phi a concentraciones de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 mM, durante 15 d de tratamiento y a una temperatura controlada de 25 °C.

Asimismo se observa que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva aumenta significativamente el peso fresco de hoja por plántula de tomate (**Figura 3.5b**).

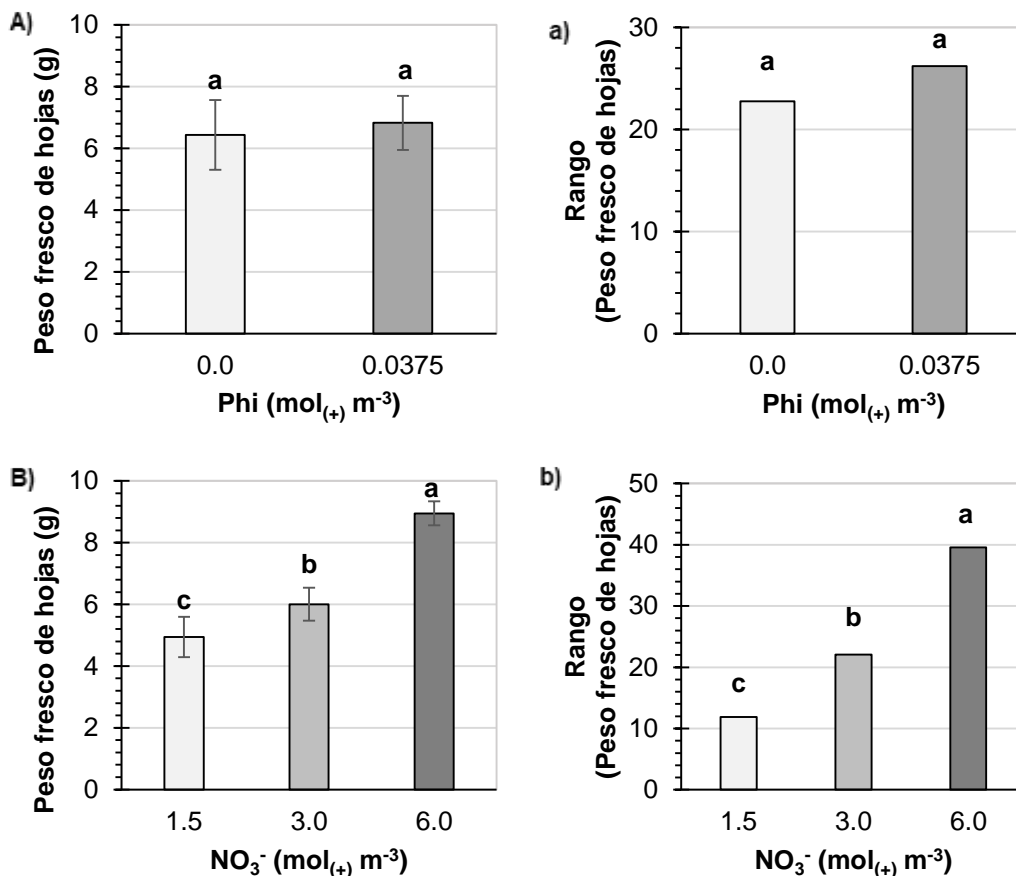


Figura 3. 5 Peso fresco de hojas de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.2007$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1335$)] y NO_3^- [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

Los datos de peso seco de hoja no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.6A y 3.6B**); por lo que, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se observa que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso seco de hoja de plántulas de tomate (**Figura 3.6a**). [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#) observaron que plántulas de *Cucumis sativus* cv. Conil no presentaron diferencias estadísticas significativas cuando fueron tratadas con aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 0.1, 0.25, 0.5 y 1.0 mM, bajo tasas deficientes y subóptimas de fósforo (0.1 y 0.5 mM Pi, respectivamente) en la solución nutritiva; sin embargo en condiciones óptimas de Pi (1mM Pi), las aplicaciones foliares de Phi

a concentraciones de 0.1 y 1.0 mM ocasionaron reducciones significativas en la biomasa seca de hojas en plántulas de pepino.

Por otra parte, se observa que conforme incrementa la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva aumenta significativamente el peso seco de hoja por plántula de tomate (**Figura 3.6b**) concordado con lo documentado por [Badr et al. \(2016\)](#) en su investigación en campo abierto donde existe un incremento significativo en el peso seco de hojas de plántulas de tomate al incrementar la dosis de nitrógeno en el rango de 0, 120, 180, 240 y 300 kg N ha⁻¹. De igual manera, [Mastalerczuk et al. \(2017\)](#) observaron en su investigación un incremento significativo en el peso seco de hojas de plántulas de dos variedades de *Festulolium* (Felopa y Sulino) evaluado 180 días después de la siembra, al momento de incrementar la concentración de nitrato de amonio de 0 a 90 y 180 kg N ha⁻¹.

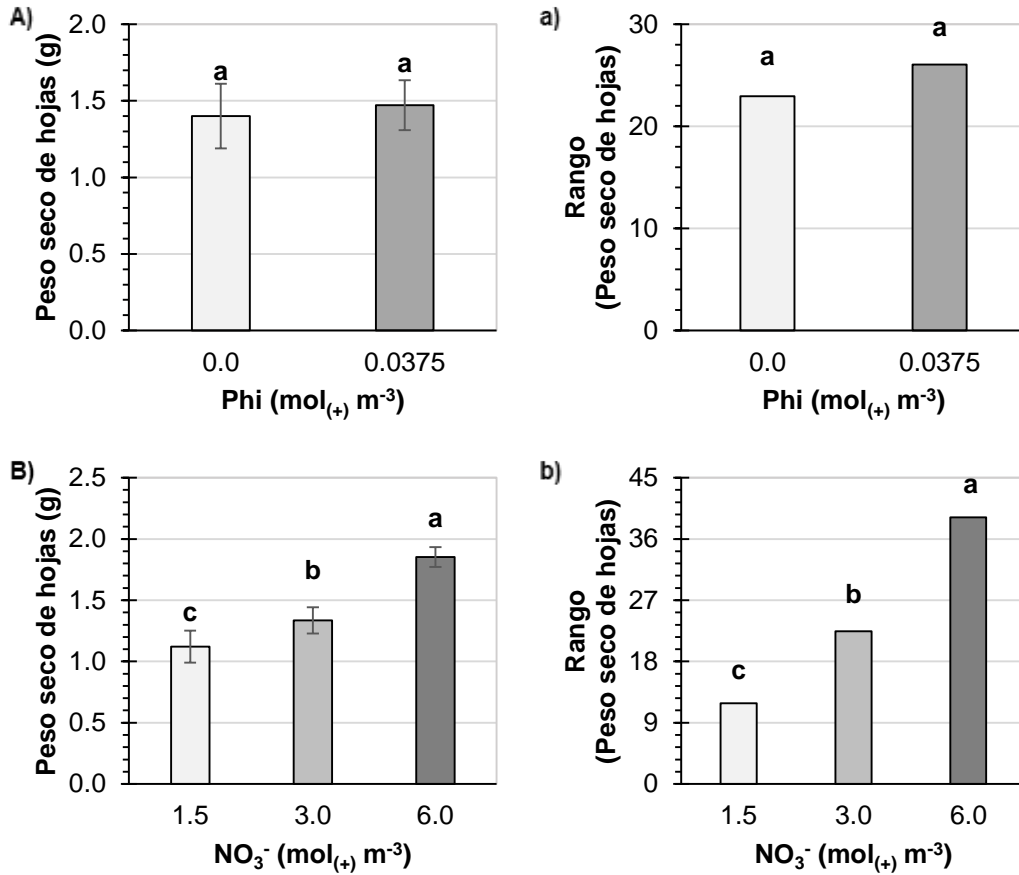


Figura 3. 6 Peso seco de hojas de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.2449$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1913$)] y Nitrógeno (NO_3^-) [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^-), no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto al peso fresco y seco de hojas en plántulas de tomate, pero se puede apreciar que a niveles deficitarios de NO_3^- así como a niveles óptimos, el Phi provoca un incremento en las variables estudiadas (**Cuadro 3.3**).

Cuadro 3. 3 Peso fresco y seco de hojas por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y (NO₃⁻) en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Peso fresco de hojas (g)	Rango (Peso fresco de hojas ^δ)	Peso seco de hojas (g)	Rango (Peso seco de hojas ^δ)
0.0000	1.5	4.524±0.78 c	7.875 c	1.056±0.16 c	8.500 d
0.0375	1.5	5.363±0.45 bc	15.875 bc	1.185±0.09 bc	15.250 cd
0.0000	3.0	5.635±0.28 bc	19.750 b	1.239±0.05 bc	19.125 cd
0.0375	3.0	6.370±0.68 b	24.375 b	1.430±0.13 b	25.750 bc
0.0000	6.0	9.146±0.42 a	40.688 a	1.906±0.06 a	41.250 a
0.0375	6.0	8.756±0.36 a	38.438 a	1.799±0.09 a	37.125 ab
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		1.5707	11.686	0.3115	12.004
CV ^φ		15.865		14.53064	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.5.1.4. Peso fresco y seco de tallo

Los datos de peso fresco de tallo no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.7A y 3.7B**); la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman mostró que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso fresco de tallo de plántulas de tomate (**Figura 3.7a**); asimismo, se observó que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva aumenta significativamente el peso fresco de tallo por plántula de tomate (**Figura 3.7b**), concordando con lo reportado por [Abro et al. \(2014\)](#) donde se observó un incremento significativo en el peso fresco de tallo de plántulas de tomate var. cw. Swanson al ser tratadas durante 2 meses con concentraciones crecientes de N (0.5, 2, 5, 10 y 20 mM NO₃⁻ L⁻¹).

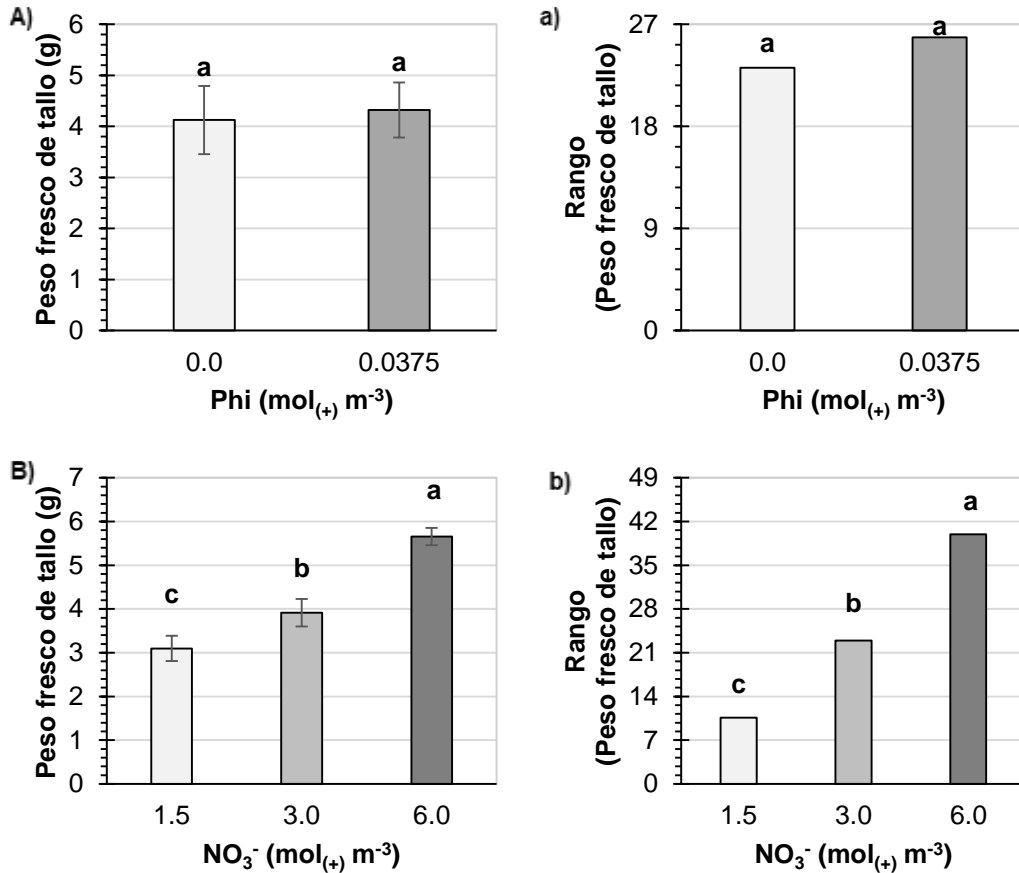


Figura 3. 7 Peso fresco de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.1910$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.1764$)] y Nitrógeno (NO_3^-) [B: medias ($P<0.0001$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P<0.0001$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P\leq 0.05$).

Los datos de peso seco de tallo no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.8A y 3.8B**); la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman mostró que el Phi no tuvo influencia significativa en esta variable (**Figura 3.8a**); asimismo, se observa que conforme incrementa la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva aumenta significativamente el peso seco de tallo por plántula de tomate (**Figura 3.8b**) concordando con lo reportado por [Abro et al. \(2014\)](#) donde se observó un incremento significativo en el peso seco de tallo de plántulas de tomate var. cw. Swanson al ser tratadas durante 2 meses con una concentración de 0.5, 2, 5, 10 y 20 mM $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$.

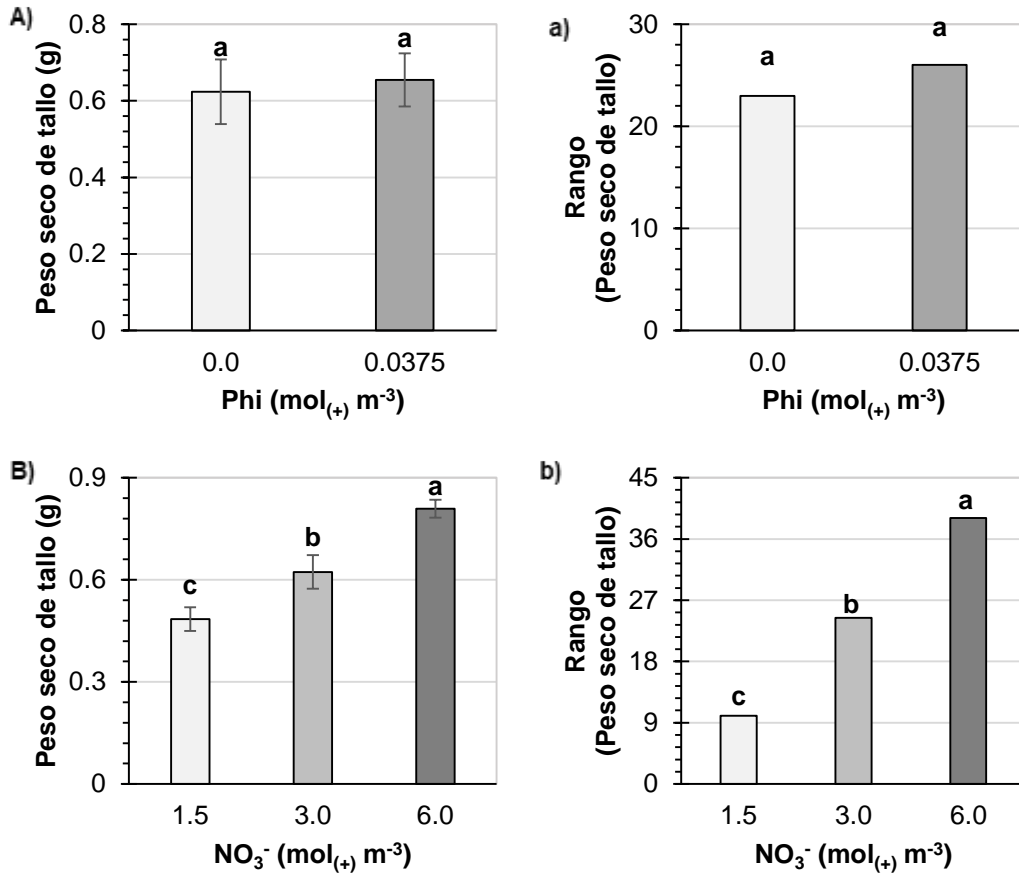


Figura 3. 8 Peso seco de tallo de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.1231); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.1203)] y NO₃⁻ [B: medias (P<0.0001); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P<0.0001)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NO₃⁻), se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a una concentración óptima de nitrógeno en la solución nutritiva incrementó significativamente el peso seco de tallo comparado en comparación con el tratamiento al que no se le suministró dicho bioestimulante (**Cuadro 3.4**).

Cuadro 3. 4 Peso fresco y seco de tallo por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Peso fresco de tallo (g)	Rango (Peso fresco de tallo ⁵)	Peso seco de tallo (g)	Rango (Peso seco de tallo ⁵)
0.0000	1.5	2.944±0.34 c	7.750 d	0.466±0.04 d	7.875 d
0.0375	1.5	3.249±0.22 c	13.500 cd	0.502±0.02 cd	12.125 cd
0.0000	3.0	3.622±0.16 bc	19.625 bc	0.569±0.02 c	19.375 c
0.0375	3.0	4.206±0.37 b	26.250 b	0.676±0.05 b	29.438 b
0.0000	6.0	5.802±0.20 a	42.125 a	0.834±0.02 a	41.688 a
0.0375	6.0	5.507±0.19 a	37.750 a	0.784±0.03 a	36.500 ab
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		0.7702	10.027	0.1025	9.9192
CV ^φ		12.221		10.751	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ⁵Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.1.5. Peso fresco y seco de raíz

Los datos de peso fresco de raíz no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.9A y 3.9B**); la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman muestra que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso fresco de raíz de plántulas de tomate (**Figura 3.9a**); del mismo modo algunos investigadores como [Manna et al. \(2015\)](#), reportaron que el incremento en el suministro de KH₂PO₄ como fuente principal de P a concentraciones de 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 mM no afectó de manera significativa el fenotipo de plántulas de arroz var. Nipponbare, en una cámara de crecimiento bajo temperatura controlada de 25°C y condiciones de humedad adecuadas, caso contrario a lo observado al momento de suministrar Na₂HPO₃·5H₂O como fuente principal de P observando una reducción significativa en el peso fresco de raíz de plántulas de arroz al incrementar la concentración de 5, 10, 15, 20 y 25 mM. Asimismo se observa que el peso fresco de raíz se incrementó significativamente con la concentración de 6.0 mol₍₊₎ NO₃⁻ m⁻³ de solución nutritiva comparada contra las concentraciones inferiores (**Figura 3.9b**).

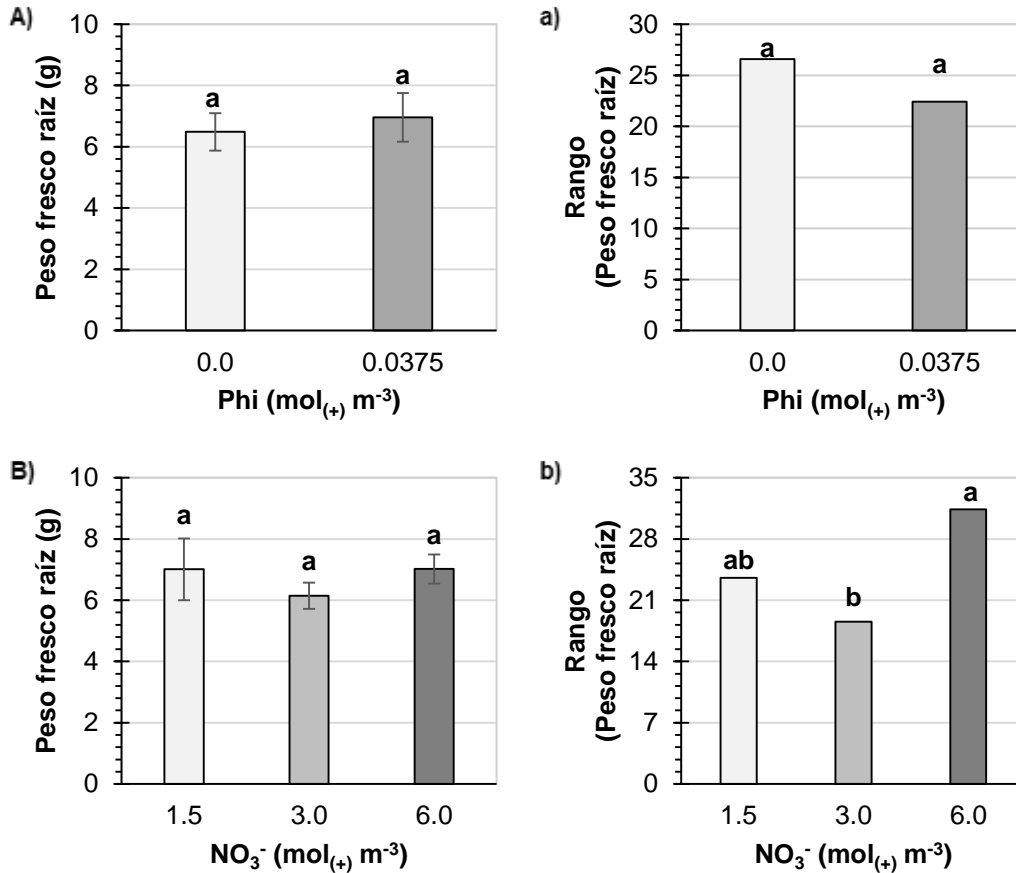


Figura 3. 9 Peso fresco de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.2458); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.2779)] y NO₃⁻ [B: medias (P=0.1367); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.287)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

Los datos de peso seco de raíz no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.10A y 3.10B**); la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman muestra que el Phi no tuvo influencia significativa en el peso seco de raíz de plántulas de tomate (**Figura 3.10a**). Del mismo modo, [Constán-Aguilar et al. \(2014\)](#) concluyeron que las aplicaciones foliares de Phi a una concentración de 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 mM y bajo condiciones óptimas de Pi (1 mM) en la solución nutritiva, tuvieron efectos significativos positivos en la biomasa seca de raíz de plántulas de *Cucumis sativus* cv. Conil; asimismo, se observa que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva, aumenta significativamente el peso seco de raíz por plántula de tomate (**Figura 3.10b**). [Mastalerczuk et al. \(2017\)](#) observaron una

reducción significativa en el peso seco de raíz de plántulas de dos variedades de *Festulolium* (Felopa y Sulino), cuando se incrementa la concentración de nitrato de amonio de 0 a 90 y 180 kg N ha⁻¹, después de 180 días después de la siembra.

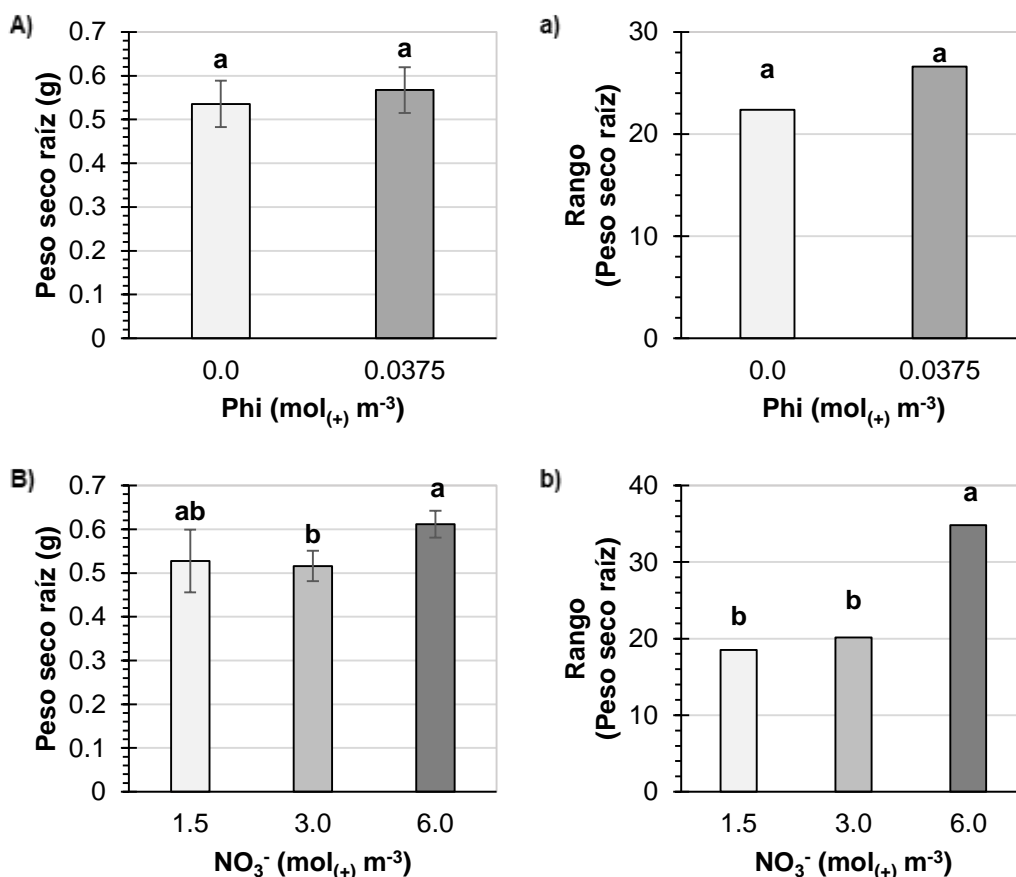


Figura 3. 10 Peso seco de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.2765); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.2346)] y NO₃⁻ [B: medias (P=0.0188); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0006)] Medias ± DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NO₃⁻), no se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas en el peso fresco y seco de raíz en plántulas de tomate (**Cuadro 3.5**).

Cuadro 3. 5 Peso fresco y seco de raíz por planta de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Peso fresco de raíz (g)	Rango (Peso fresco de raíz ^δ)	Peso seco de raíz (g)	Rango (Peso seco de raíz ^δ)
0.0000	1.5	6.512±0.97 a	17.250 a	0.494±0.07 a	13.313 b
0.0375	1.5	7.507±1.06 a	29.875 a	0.560±0.07 a	23.750 ab
0.0000	3.0	6.122±0.43 a	18.500 a	0.504±0.04 a	18.313 ab
0.0375	3.0	6.162±0.46 a	18.625 a	0.527±0.03 a	22.000 ab
0.0000	6.0	6.826±0.19 a	31.500 a	0.608±0.02 a	35.563 a
0.0375	6.0	7.212±0.66 a	31.250 a	0.614±0.04 a	34.063 a
Pr > F		0.2805	0.0630	0.0773	0.0035
DMS ^ψ		2.0801	19.597	0.1485	18.044
CV ^φ		20.725		18.033	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.1.6. Altura de planta y diámetro de tallo

Existe un incremento significativo de 5.42% en la altura de plántulas de tomate (**Figura 3.11A**) cuando se trataron con Phi respecto al testigo. [Deepa et al. \(2002\)](#) reportan que el Phi inhibe significativamente el crecimiento de plántulas de tomate VFNT “Cherry” a una concentración de 1, 2 y 3 mM Phi en comparación con el testigo a niveles deficientes de fósforo y observándose que en niveles de suficiencia de fósforo en la solución nutritiva también existe una reducción significativa de crecimiento de plántulas de tomate a un nivel de 3 mM Phi contra el testigo.

De igual manera, con las concentraciones de 3 y 6 mol₍₊₎ NO₃⁻ m⁻³ de solución nutritiva aumenta significativamente la altura de plántulas, dichos aumentos fueron de 18.14 y 30.58%, respectivamente, en comparación con el tratamiento al que se le suministro la fuente más baja de nitrógeno (**Figura 3.11B**). Estos resultados coinciden con lo reportado por [Xiaogang et al. \(2016\)](#) quienes observaron un incremento significativo en la altura de plantas de café arábica al aumentar la fertilización en nitrogenada en 60, 100 y 140 g N planta⁻¹. Del mismo modo, [Boqi et al. \(2014\)](#) observaron un aumento significativo en la altura de *Chamaecrista*

rotundifolia (Pers.) Greene cv. Minyin al incrementar la fertilización nitrogenada en 30 y 60 kg ha⁻¹ respecto al testigo (0 kg N ha⁻¹) así como también se observó una reducción significativa al tener un exceso de nitrógeno en el sustrato al suministrar 90 y 120 kg N ha⁻¹.

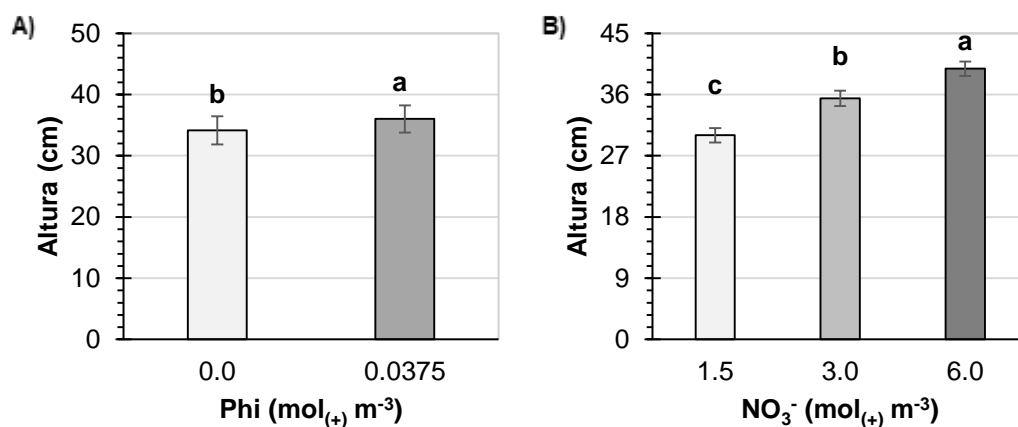


Figura 3. 11 Altura por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO₃⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05), Phi (P=0.0019), NO₃⁻ (P<0.0001).

Existe un incremento de 7.97% en el diámetro de tallo de plántulas de tomate tratadas con Phi comparado con el testigo (**Figura 3.12A**); siendo dicho aumento significativo. [Bachiega et al. \(2017\)](#) en condiciones de suficiencia de fósforo (SP) en la solución nutritiva, pulverizaciones foliares de Pi, KCl y Phi a árboles de naranja no afectaron de manera significativa el diámetro de tallo; mientras que, bajo deficiencias de fósforo (DP), el Phi produjo la mayor reducción de diámetro de tallo. Por otra parte, la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva no afectó significativamente el diámetro de tallo en plántulas de tomate (**Figura 3.12B**).

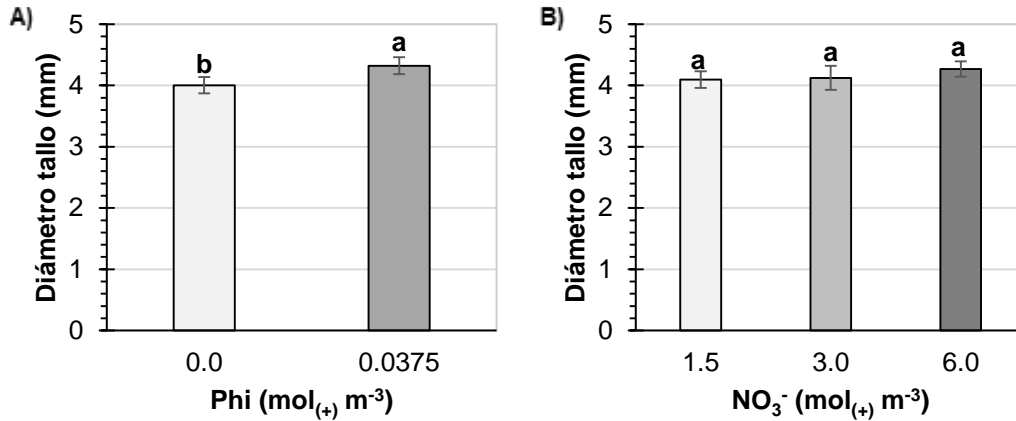


Figura 3. 12 Diámetro de tallo por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.0002$), NO_3^- ($P=0.1657$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva), se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a una concentración óptima de nitrógeno, incrementó significativamente el diámetro de tallo de plántulas de tomate en 10.78% comparado contra el tratamiento al que no se le suministró dicho bioestimulante (**Cuadro 3.6**).

Cuadro 3. 6 Altura de planta y diámetro de tallo por plántulas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva).

Phi ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Altura (cm)	Diámetro (mm)
0.0000	1.5	29.037 \pm 1.10 d	3.922 \pm 0.12 b
0.0375	1.5	30.975 \pm 0.77 d	4.273 \pm 0.09 ab
0.0000	3.0	34.050 \pm 0.64 c	3.913 \pm 0.10 b
0.0375	3.0	36.850 \pm 1.09 bc	4.335 \pm 0.22 a
0.0000	6.0	39.375 \pm 0.70 ab	4.177 \pm 0.15 ab
0.0375	6.0	40.187 \pm 1.31 a	4.362 \pm 0.08 a
Pr > F		<0.0001	0.0025
DMS ^ψ		2.8835	0.4035
CV ^φ		5.5069	6.4917

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias \pm DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.5.1.7. Longitud y volumen de raíz

Existe un incremento significativo de 21.72% en la longitud de raíz de plántulas de tomate tratadas con Phi comparado con el testigo (**Figura 3.13A**); sin embargo algunos investigadores como [Jost et al. \(2015\)](#) observaron que en plántulas de *Arabidopsis* sembradas en medios con deficiencia y suficiencia de P, las raíces crecieron a tasas similares, pero las raíces primarias de las plántulas tratadas con Phi mostraron tasas de crecimiento mucho más bajas durante un periodo de 11 d y la elongación cesó completamente en las 48 h siguientes.

Por otra parte, se posee evidencia suficiente para demostrar que concentraciones de NO_3^- de 3.0 y 6.0 $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$ de solución nutritiva, disminuyen significativamente la longitud de raíz en plántulas de tomate en 3.09 y 21.04% respectivamente, en comparación con la dosis baja de éste evaluada (1.5 $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$) (**Figura 3.13B**). [Wang et al. \(2017\)](#) observaron una reducción significativa en la longitud de raíz de *Pinus tabuliformis* de los bosques chinos de Yichuan al suministrar aplicaciones de urea en concentraciones de 0, 3, 6, 9 y 12 g N m^{-2} durante un periodo de 2010 a 2012, así como también [Abenavoli et al. \(2016\)](#) observaron una reducción en la longitud total de raíz de dos genotipos distintos de tomate *Regina Ostuni* y *UC82* al incrementar de 0.1 a 5 mM la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva.

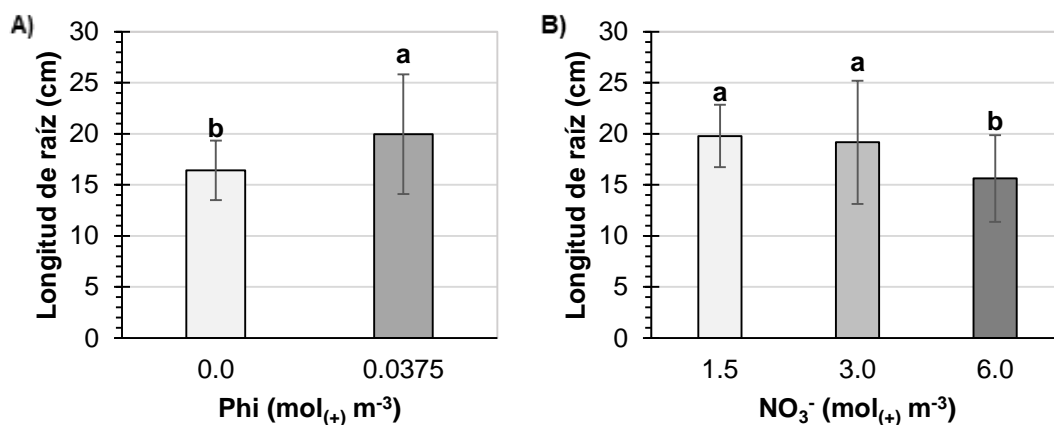


Figura 3. 13 Longitud de raíz por planta de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), Phi ($P=0.0012$), NO_3^- ($P=0.0037$).

Los datos de volumen de raíz no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.14A y 3.14B**); la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman permitió observar que el Phi aumentó de manera significativa el volumen de raíz de plántulas de tomate (**Figura 3.14a**). Por el contrario, [Estrada-Ortiz et al. \(2016\)](#) documentaron una reducción significativa en el volumen de raíz al incrementar la concentración de Phi de 0 a 0.25 y 0.50 mM Phi en plántulas de *Beta vulgaris* L. y una reducción no significativa en plántulas de *Lactuca sativa* L.

Por otro lado, se observa que conforme incrementa la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$, aumenta significativamente el volumen de raíz por plántula de tomate (**Figura 3.14b**).

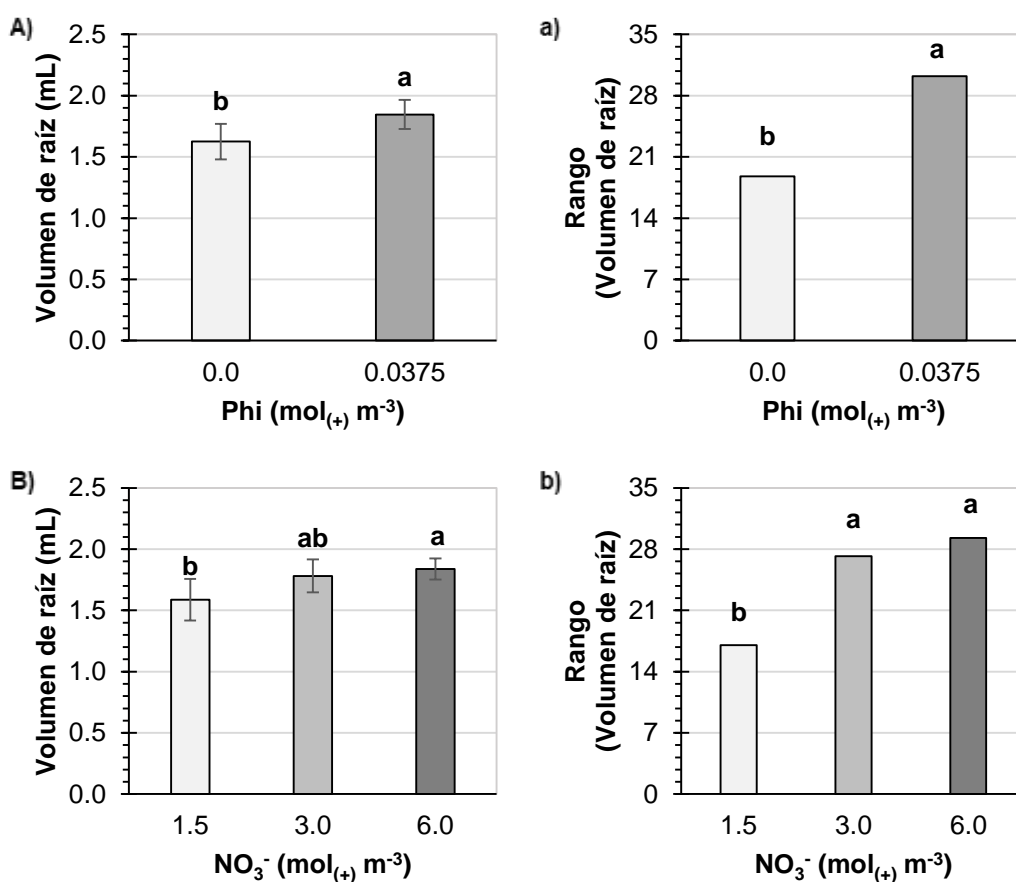


Figura 3. 14 Volumen de raíz de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias ($P=0.0038$); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0015$)] y NO_3^- [B: medias ($P=0.0182$); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman ($P=0.0112$)] Medias \pm DE y rangos con letra distinta de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (fosfito y NO_3^- en la solución nutritiva), se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a una concentración baja de nitrógeno en la solución nutritiva incrementó significativamente la longitud de raíz de plántulas de tomate (en 32.90% comparado contra el tratamiento al que no se le suministro dicho bioestimulante) (**Cuadro 3.7**).

Cuadro 3. 7 Longitud y volumen de raíz en plántulas de tomate como respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva).

Phi (mol(+) m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol(+) m ⁻³)	Longitud de raíz (cm)	Volumen de raíz (mL)	Rango (Volumen de raíz ^δ)
0.0000	1.5	16.987±1.31 bc	1.487±0.16 b	13.188 b
0.0375	1.5	22.575±2.68 a	1.687±0.17 ab	20.875 ab
0.0000	3.0	18.713±1.70 abc	1.625±0.15 ab	18.813 ab
0.0375	3.0	19.625±1.96 ab	1.937±0.06 a	35.563 a
0.0000	6.0	13.525±0.38 c	1.762±0.10 ab	24.313 ab
0.0375	6.0	17.713±1.76 abc	1.912±0.05 a	34.250 a
Pr > F		0.0004	0.0061	0.0021
DMS ^ψ		5.2932	0.3727	17.49
CV ^φ		19.4961	14.3886	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.5.2. Concentración foliar de nutrimentos

3.5.2.1. Concentración foliar de macronutrimentos

En el **Cuadro 3.8** se logra apreciar que existe un incremento significativo del 3.46% en la concentración de Ca con la aplicación de Phi en comparación con el testigo al que no se le adiciono dicho bioestimulante.

Cuadro 3. 8 Concentración de macronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	N	Rango (N ^o)	P	K
0.0000	12.95±2.23 a	11.67 a	1.89±0.11 a	6.26±0.48 a
0.0375	13.30±1.77 a	13.33 a	1.91±0.12 a	6.57±0.45 a
Pr > F	0.8300	0.4950	0.4873	0.3011
DMS ^ψ	3.376	5.027	0.057	0.621
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Ca	Mg	S	
0.0000	10.99±0.24 b	3.99±0.16 a	1.93±0.14 a	
0.0375	11.37±0.48 a	4.00±0.12 a	1.94±0.13 a	
Pr > F	0.0018	0.8183	0.5628	
DMS ^ψ	0.218	0.112	0.054	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 3.9** se aprecia que con el incremento en la concentración de NO₃⁻ de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³ de solución nutritiva se tiene un incremento significativo en la concentración foliar de K de 1.84 y un 23.69%; en la concentración de Ca de 6.23 y 15.13%. Así también se afecta de manera negativa la concentración de P con reducciones de 21.82 y 19.09%; la de Mg en 5.63 y 13.38%; y la de S en 6.42 y en un 27.09% respectivamente. También es evidente que los datos de concentración de N no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se puede demostrar que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva existe un aumento significativo en la concentración de N en hojas de plántulas de tomate. [Ucar et al. \(2017\)](#) observaron incremento significativo en la concentración foliar de N, P y K en plántulas de *Stevia rebaudiana* al aumentar la concentración de N de 0 a 50, 100, 150 y 200 kg ha⁻¹ en forma de nitrato de amonio durante los años 2012 y 2013.

Cuadro 3. 9 Concentración de macronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO_3^- en la solución nutritiva.

NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	N	Rango (N°)	P	K
1.5	11.55±2.37 a	6.750 b	2.20±0.03 a	5.74±0.29 b
3.0	13.96±2.31 a	13.813 ab	1.72±0.02 b	6.42±0.31 ab
6.0	13.87±0.86 a	16.938 a	1.78±0.04 b	7.10±0.51 a
Pr > F	0.4010	0.0082	<0.0001	0.0055
DMS ^ψ	5.023	7.479	0.085	0.923
NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	Ca	Mg	S	
1.5	10.44±0.14 c	4.26±0.06 a	2.18±0.04 a	
3.0	11.09±0.13 b	4.02±0.08 b	2.04±0.05 b	
6.0	12.02±0.30 a	3.69±0.07 c	1.59±0.03 c	
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
DMS ^ψ	0.325	0.166	0.080	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. [°]Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de Phi y NO_3^- , se posee evidencia suficiente para demostrar que a un nivel de exceso de NO_3^- existe un incremento significativo en la concentración de Ca en hojas de plántulas de tomate tratadas con Phi, este aumento fue de 9.14% en comparación con el tratamiento con el mismo nivel de nitrato sin fosfito (**Cuadro 3.10**).

Cuadro 3. 10 Concentración de macronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		N	Rango (N ^o)	P	K
0.0000	1.5	9.63±0.44 a	3.63 b	2.20±0.03 a	5.39±0.27 b
0.0375	1.5	13.48±3.24 a	9.88 ab	2.21±0.04 a	6.09±0.19 ab
0.0000	3.0	15.49±3.25 a	15.00 ab	1.73±0.03 b	6.70±0.18 ab
0.0375	3.0	12.43±0.54 a	12.63 ab	1.71±0.02 b	6.13±0.38 ab
0.0000	6.0	13.74±1.21 a	16.38 ab	1.75±0.01 b	6.69±0.60 ab
0.0375	6.0	14.00±0.49 a	17.50 a	1.81±0.05 b	7.50±0.37 a
Pr > F		0.439	0.0354	<0.0001	0.0138
DMS ^ψ		8.845	13.17	0.15	1.625
CV ^φ		29.989		3.514	11.273
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		Ca	Mg	S	
0.0000	1.5	10.53±0.19 cd	4.26±0.05 a	2.13±0.04 a	
0.0375	1.5	10.36±0.07 d	4.27±0.08 a	2.22±0.04 a	
0.0000	3.0	10.97±0.08 bc	4.10±0.09 ab	2.11±0.04 ab	
0.0375	3.0	11.21±0.14 b	3.95±0.06 bc	1.98±0.03 b	
0.0000	6.0	11.49±0.13 b	3.60±0.02 d	1.55±0.03 c	
0.0375	6.0	12.54±0.11 a	3.78±0.07 cd	1.64±0.03 c	
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	
DMS ^ψ		0.571	0.292	0.140	
CV ^φ		2.273	3.256	3.226	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.2.2. Concentración foliar de micronutrientos

En el **Cuadro 3.11** se aprecia que existe un incremento significativo en la concentración de B en respuesta a la aplicación de Phi, este aumento fue de 6.68% en comparación con el testigo al que no se le adicionó Phi.

Cuadro 3. 11 Concentración de micronutrientos en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Zn
0.0000	89.97±13.33 a	13.667 a	6.12±0.89 a	18.69±1.25 a
0.0375	88.57±18.98 a	11.333 a	6.09±0.54 a	20.22±1.39 a
Pr > F	0.9048	0.3400	0.9580	0.1247
DMS ^ψ	24.247	5.0001	1.263	1.997
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Mn	Rango (Mn ^δ)	Mo	B
0.0000	182.45±10.82 b	11.50 a	8.57±1.04 a	45.36±1.75 b
0.0375	191.49±8.98 a	13.50 a	7.88±1.13 a	48.39±1.57 a
Pr > F	0.0006	0.0549	0.3969	0.0106
DMS ^ψ	4.569	2.047	1.665	2.228

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 3.12** se observa que la concentración excesiva de NO₃⁻ en la solución nutritiva (6.0 mol₍₊₎ m⁻³) aumentó en 12.54% la concentración foliar de B; la de Zn la incrementó en 12.54%; mientras que la de B aumentó en 7.43 y 11.21% con los tratamientos con 3 y 6 mol₍₊₎ m⁻³; lo anterior respecto al tratamiento bajo de nitrato. Asimismo, los datos de concentración foliar de Mn no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman, se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva existe una reducción significativa en la concentración de Mn en hojas de plántulas de tomate.

Cuadro 3. 12 Concentración de cada micronutriente en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO_3^- en la solución nutritiva.

NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	Fe	Rango (Fe^{e})	Cu	Zn
1.5	77.24±5.40 a	11.125 a	5.894±0.63 a	19.007±1.41 ab
3.0	87.91±15.19 a	11.375 a	6.327±1.08 a	17.976±0.98 b
6.0	102.66±22.20 a	15.000 a	6.100±0.34 a	21.391±1.14 a
Pr > F	0.2234	0.3522	0.8429	0.0255
DMS ^ψ	36.074	7.440	1.879	2.971
NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	Mn	Rango (Mn^{e})	Mo	B
1.5	184.235±2.61 b	12.125 b	7.768±1.19 a	44.132±1.75 b
3.0	209.898±3.98 a	20.500 a	8.023±1.22 a	47.410±1.75 ab
6.0	166.787±6.07 c	4.875 c	8.886±0.85 a	49.081±0.93 a
Pr > F	<0.0001	<0.0001	0.4961	0.0042
DMS ^ψ	6.798	3.045	2.478	3.314

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^eMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva), se observa que los datos de concentración de Fe en hojas de plántulas de tomate no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que con un nivel de $3.0 \text{ mol}_{(+)} \text{NO}_3^- \text{ m}^{-3}$ en la solución nutritiva existe una reducción significativa en la concentración foliar de Fe (**Cuadro 3.13**).

Cuadro 3. 13 Concentración de micronutrientos en hoja de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Zn
0.0000	1.5	76.02±5.69 a	11.000 ab	5.476±0.27 a	17.597±1.49 a
0.0375	1.5	78.47±5.89 a	11.250 ab	6.314±0.85 a	20.417±1.05 a
0.0000	3.0	109.93±14.62 a	18.250 a	7.161±1.50 a	17.936±1.03 a
0.0375	3.0	65.89±1.11 a	4.500 b	5.494±0.17 b	18.016±1.08 a
0.0000	6.0	83.97±13.97 a	11.750 ab	5.734±0.19 a	20.543±0.83 a
0.0375	6.0	121.36±26.86 a	18.250 a	6.468±0.37 a	22.238±1.38 a
Pr > F		0.0853	0.0319	0.5575	0.0605
DMS ^ψ		63.528	13.103	3.309	5.2313
CV ^φ		31.666		24.109	11.9638
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		Mn	Rango (Mn ^δ)	Mo	B
0.0000	1.5	186.357±3.38 b	13.000 b	9.415±0.74 a	41.354±0.83 b
0.0375	1.5	182.114±1.21 b	11.250 bc	6.122±0.98 a	46.910±1.16 ab
0.0000	3.0	204.953±2.02 a	19.000 a	8.523±1.53 a	46.584±1.24 ab
0.0375	3.0	214.842±4.06 a	22.000 a	7.525±0.97 a	48.236±2.26 a
0.0000	6.0	156.052±2.74 c	2.500 d	7.773±0.80 a	48.148±0.72 a
0.0375	6.0	177.521±1.28 b	7.250 cd	10.001±0.45 a	50.015±0.95 a
Pr > F		<0.0001	<0.0001	0.1161	0.0040
DMS ^ψ		11.971	5.3625	4.363	5.8362
CV ^φ		2.8491		23.6013	5.6405

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.3. Concentración nutrimental en tallos

3.5.3.1. Concentración de macronutrientos en tallos

En el **Cuadro 3.14** se observa que existe un incremento significativo del 3.71% en la concentración de P, en respuesta a la aplicación de Phi; así como una reducción significativa de la concentración de Mg de 5.29% y la de S en 4.51%; en todos los casos en comparación con el testigo al que no se le adicione dicho bioestimulante.

Cuadro 3. 14 Concentración de macronutrientos en tallos de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	N	P	K	Rango (K ⁵)
0.0000	8.041± 0.71 a	2.482± 0.42 b	10.359±1.18 a	13.583 a
0.0375	7.591± 0.71 a	2.574± 0.47 a	10.311±0.22 a	11.417 a
Pr > F	0.0946	0.0052	0.9415	0.3608
DMS ^ψ	0.536	0.061	1.348	4.854
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Ca	Mg	S	
0.0000	4.682± 0.23 a	2.701± 0.21 a	0.731± 0.03 a	
0.0375	4.686± 0.17 a	2.558± 0.13 b	0.698± 0.02 b	
Pr > F	0.9656	0.0030	0.0012	
DMS ^ψ	0.209	0.088	0.018	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ⁵Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 3.15** se aprecia que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³ en la solución nutritiva, se incrementó la concentración de N en 14.68 y 34.00%, respectivamente; asimismo la de Ca en 10.20 y 18.58%; la de Mg en 6.54 y 30.84%. Por el contrario, estas concentraciones de NO₃⁻ afectan de manera negativa la concentración de P, con reducciones de 50.68 y 49.94%; la de S en 10.64 y 14.36%. [Abro et al. \(2014\)](#) reportaron un incremento significativo en la concentración de N en tallo de plántulas de tomate var. cw. Swanson al ser tratadas durante 2 meses con concentraciones crecientes de N (0.5, 2, 5, 10 y 20 mM NO₃⁻ L⁻¹).

Cuadro 3. 15 Concentración de cada macronutriente en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO_3^- en la solución nutritiva.

NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	N	P	K	Rango (K^{b})
1.5	6.725± 0.68 c	3.729± 0.08 a	9.939±1.28 a	14.375 a
3.0	7.712± 0.54 b	1.839± 0.05 c	10.047±0.18 a	8.375 a
6.0	9.012± 0.33 a	2.016± 0.04 b	11.020±0.64 a	14.750 a
Pr > F	<0.0001	<0.0001	0.3391	0.0645
DMS ^ψ	0.797	0.091	2.006	7.222
NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	Ca	Mg	S	
1.5	4.274± 0.10 c	2.338± 0.05 c	0.780± 0.01 a	
3.0	4.710± 0.12 b	2.491± 0.06 b	0.697± 0.01 b	
6.0	5.068± 0.13 a	3.059± 0.13 a	0.668± 0.01 c	
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
DMS ^ψ	0.311	0.130	0.027	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva) se posee evidencia suficiente para demostrar que a un nivel deficiente nitrógeno en la solución nutritiva, existe un incremento significativo de 6.96%, en la concentración de P, así como una reducción significativa de 25.89%, en la concentración de N. Por otro lado, también se observa que a un nivel de exceso de nitrógeno en la solución nutritiva existe una reducción significativa del 12.30% en la concentración de Mg en tallo de plántulas de tomate tratadas con Phi en comparación con las que no se les adicionó dicho bioestimulante (**Cuadro 3.16**).

Cuadro 3. 16 Concentración de macronutrientos en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		N	P	K	Rango (K ^δ)
0.0000	1.5	7.725± 0.65 bc	3.604± 0.05 b	9.056± 1.81 ab	11.75 ab
0.0375	1.5	5.725± 0.08 d	3.855± 0.02 a	10.822±0.13 ab	17.000 ab
0.0000	3.0	6.800± 0.17 ab	1.780± 0.05 e	10.054±0.24 b	8.000 b
0.0375	3.0	8.625± 0.32 ab	1.898± 0.01 de	10.040±0.14 ab	8.750 ab
0.0000	6.0	9.600± 0.17 a	2.062± 0.04 c	11.969±0.58 a	21.000 a
0.0375	6.0	8.425± 0.02 ab	1.970± 0.03 dc	10.073±0.10 ab	8.500 ab
Pr > F		<0.0001	<0.0001	0.2254	0.0201
DMS ^ψ		1.4034	0.1597	3.5328	12.718
CV ^φ		7.9896	2.8113	15.2101	
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		Ca	Mg	S	
0.0000	1.5	4.245± 0.08 b	2.430± 0.02 cd	0.803± 0.01 a	
0.0375	1.5	4.303± 0.12 b	2.247± 0.01 d	0.756± 0.01 a	
0.0000	3.0	4.686± 0.15 ab	2.413± 0.06 cd	0.707± 0.02 b	
0.0375	3.0	4.734± 0.09 ab	2.569± 0.03 c	0.687± 0.01 bc	
0.0000	6.0	5.114± 0.18 a	3.260± 0.09 a	0.684± 0.01 bc	
0.0375	6.0	5.021± 0.05 a	2.859± 0.05 b	0.652± 0.01 c	
Pr > F		<0.0003	<0.0001	<0.0001	
DMS ^ψ		0.5482	0.2296	0.0478	
CV ^φ		5.2074	3.8852	2.9738	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.3.2. Concentración de micronutrientos en tallos

En el **Cuadro 3.17** se observa que existe una reducción significativa de 6.11% en la concentración de B en respuesta a la aplicación de Phi en comparación con el testigo al que no se le adicione dicho bioestimulante. Se observa también que los datos de concentración de Cu y Mn en tallo de plántulas de tomate no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que

existe un incremento y una reducción significativa respectivamente, en respuesta a la aplicación de Phi en comparación con el testigo.

Cuadro 3. 17 Concentración de micronutrientos en tallo de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn
0.0000	5366±4297.06 a	14.000 a	1034.9±853.29 a	11.167 b	61.316±6.27 a
0.0375	204±100.49 b	11.000 a	23.0±17.56 b	13.833 a	59.954±6.98 a
Pr > F	0.0004	0.1184	0.0008	0.0207	0.2957
DMS ^ψ	2514.800	3.844	525.360	2.210	2.657
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Mn	Rango (Mn ^δ)	Mo	Rango (Mo ^δ)	B
0.0000	110.339± 10.92 a	15.6667 a	21.088±15.42 a	13.750 a	18.044±0.65 a
0.0375	92.288±5.10 b	9.3333 b	2.996±0.80 b	11.250 a	16.942±0.44 b
Pr > F	<0.0001	<0.0001	0.0009	0.2117	0.0133
DMS ^ψ	4.966	1.896	9.621	4.056	0.844

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 3.18** se aprecia que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ desde 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³ de solución nutritiva, se reduce la concentración de Zn en 26.75 y 38.18%, respectivamente. Asimismo, los datos de concentración de Cu y Mn no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva existe una reducción significativa en la concentración de estos micronutrientos en tallo de plántulas de tomate.

Cuadro 3. 18 Concentración de cada micronutriente en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO_3^- en la solución nutritiva.

NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (mg kg^{-1})				
	Fe	Rango (Fe^{δ})	Cu	Rango (Cu^{δ})	Zn
1.5	7970±4816.63 a	14.750 a	1549.1±957.85 a	18.000 a	77.382±2.01 a
3.0	141±26.20 b	10.625 a	9.4±1.89 b	6.125 c	56.685±1.41 b
6.0	243±119.26 b	12.125 a	28.3±21.41 b	13.375 b	47.837±1.20 c
Pr > F	<0.0001	0.2044	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	3741.600	5.719	781.640	3.288	3.953
NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (mg kg^{-1})				
	Mn	Rango (Mn^{δ})	Mo	Rango (Mo^{δ})	B
1.5	112.897±14.03 a	14.500 a	29.841±17.54 a	14.500 a	18.040±0.83 a
3.0	102.574±2.63 b	16.000 a	2.409±0.79 b	9.125 a	17.374±0.42 a
6.0	88.469±2.91 c	7.000 b	3.874±0.74 b	13.875 a	17.065±0.47 a
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0701	0.1575
DMS ^ψ	7.389	4.9688	14.314	10.627	1.255

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 3.19** se aprecia que con un nivel deficitario de nitrógeno en la solución nutritiva existe una reducción significativa de 12.55% en la concentración de B en tallos de plántulas de tomate al adicionar Phi a la solución nutritiva. Mientras que, los datos de concentración de Fe, Cu, Mn y Mo no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que a un nivel de déficit de nitrógeno en la solución nutritiva se posee una reducción significativa en la concentración de estos micronutrientes en tallos de plántula de tomate tratadas con Phi; de igual manera, bajo un nivel óptimo de nitrógeno en la solución nutritiva se incrementa significativamente la concentración de Fe y Mn, así como existe una reducción significativa de concentración Cu en tallos. Del mismo modo, a un nivel de exceso de nitrógeno en la solución nutritiva se tuvo un incremento significativo en la concentración de Mo y una reducción en la de Mn en tallo de plántulas de tomate tratadas con Phi.

Cuadro 3. 19 Concentración de micronutrientos en tallo de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn
0.0000	1.5	15837±3588.03 a	22.500 a	3088.0±749.64 a	22.500 a	76.913±1.14 a
0.0375	1.5	103±10.14 b	7.000 c	10.2±0.30 b	13.500 bc	77.851±2.82 a
0.0000	3.0	157±24.73 b	12.500 abc	7.7±0.11 b	2.500 d	58.681±0.89 b
0.0375	3.0	126±28.72 b	8.750 bc	11.1±2.53 b	9.750 c	54.690±1.08 bc
0.0000	6.0	102±10.95 b	7.000 c	8.9±0.02 b	8.500 c	48.354±1.66 cd
0.0375	6.0	383±141.10 b	17.250 ab	47.7±28.62 b	9.750 c	47.320±0.66 d
Pr > F		<0.0001	0.0004	<0.0001	0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		6589	10.071	1376.5	5.7902	6.9609
CV ^φ		105.2879		115.8062		5.1086
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Mn	Rango (Mn ^δ)	Mo	Rango (Mo ^δ)	B
0.0000	1.5	138.085±5.78 a	22.500 a	58.078±13.65 a	22.500 a	19.2378±0.77 a
0.0375	1.5	87.709±1.72 cd	6.500 cd	1.604±0.49 b	6.500 c	16.8423±0.26 b
0.0000	3.0	99.570±3.09 bc	13.500 b	2.206±1.03 b	8.250 bc	17.3725±0.48 ab
0.0375	3.0	105.578±0.76 b	18.500 a	2.613±0.61 b	10.000 bc	17.3758±0.44 ab
0.0000	6.0	93.362±1.81 bcd	11.000 bc	2.980±0.86 b	10.500 bc	17.5220±0.15 ab
0.0375	6.0	83.576±0.72 d	3.000 d	4.769±0.04 b	17.250 ab	16.6088±0.59 b
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0011	<0.0211
DMS ^ψ		13.012	4.9688	25.207	10.627	2.2101
CV ^φ		5.7152		93.1518		5.6221

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.4. Concentración nutrimental en raíz

3.5.4.1. Concentración de macronutrientos en raíz

En el **Cuadro 3.20** se observa que los datos de concentración de N y K no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que la adición de Phi a la solución nutritiva genera una reducción

significativa en la concentración de N en raíz de plántulas de tomate contra las que no se les adicionó dicho bioestimulante.

Cuadro 3. 20 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	N	Rango (N ^o)	P	K
0.0000	17.399±1.93 a	16.917 a	1.899±0.15 a	11.249±1.40 a
0.0375	13.093±0.59 b	8.083 b	1.825±0.11 a	9.982±1.08 b
Pr > F	<0.0001	<00001	0.1267	0.0054
DMS ^ψ	1.781	3.564	0.098	0.842
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
	Rango (K ^o)	Ca	Mg	S
0.0000	13.917 a	3.977±0.24 a	3.896±0.37 a	1.397±0.13 a
0.0375	11.083 a	3.870±0.30 a	3.942±0.49 a	1.353±0.12 a
Pr > F	0.0588	0.2559	0.7201	0.4274
DMS ^ψ	2.950	0.193	0.266	0.113

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^oMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En el **Cuadro 3.21** se observa que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³, se aumenta de manera significativa la concentración de Ca en 8.12 y 30.88%, respectivamente; del mismo modo, con exceso de NO₃⁻ en la solución nutritiva existe un incremento significativo de 39.83% en la concentración de Mg en raíz de plántulas de tomate. También se posee evidencia suficiente para demostrar un reducción significativa de 24.42 y 18.16% en la concentración de P; de 16.07 y 30.92% de S; así como un decremento de 16.07 y 30.92%; así como de Mg a un nivel óptimo de NO₃⁻ en 7.91%. También se logra apreciar que los datos de concentración de N y K en raíz de plántulas de tomate no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar un incremento significativo en la concentración de N, así como una reducción en la concentración de K en raíz de plántulas de tomate al incrementar la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Cuadro 3. 21 Concentración de cada macronutriente en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO_3^- en la solución nutritiva.

NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	N	Rango (N°)	P	K
1.5	12.988±0.78 b	8.188 b	2.170±0.09 a	13.029±0.90 a
3.0	16.099±1.86 a	13.563 a	1.640±0.06 b	10.932±0.62 b
6.0	16.651±2.03 a	15.750 a	1.776±0.04 b	7.886±0.48 c
Pr > F	0.0050	0.0056	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	2.650	5.303	0.146	1.253
NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (g kg^{-1})			
	Rango (K°)	Ca	Mg	S
1.5	18.875 a	3.472±0.16 b	3.543±0.21 b	1.630±0.07 a
3.0	13.750 b	3.754±0.16 b	3.260±0.16 b	1.368±0.09 b
6.0	4.875 c	4.544±0.07 a	4.954±0.20 a	1.126±0.04 c
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	4.390	0.286	0.396	0.168

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. [°]Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de Phi y NO_3^- en la solución nutritiva, se observa que con un nivel óptimo de nitrógeno en la solución nutritiva existe una reducción significativa en la concentración de Ca en raíz de plántulas de tomate tratadas con Phi en comparación con el testigo; esta reducción fue del 14.17%. Por otro lado, los datos de concentración de N y K en raíz de plántulas de tomate no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que con un nivel óptimo de NO_3^- , el Phi provocó una reducción significativa en la concentración de N en raíz de plántulas de tomate (**Cuadro 3.22**).

Cuadro 3. 22 Concentración de macronutrientos en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)			
		N	Rango (N ^δ)	P	K
0.0000	1.5	13.37±1.03 b	9.75 c	2.28±0.02 a	14.55±0.34 a
0.0375	1.5	12.61±0.52 b	6.63 c	2.06±0.09 a	11.51±0.47 b
0.0000	3.0	19.50±0.50 a	20.76 a	1.61±0.06 b	10.66±0.82 bc
0.0375	3.0	12.70±0.30 b	6.38 c	1.67±0.06 b	11.20±0.43 b
0.0000	6.0	19.33±2.07 a	20.25 ab	1.81±0.03 b	8.54±0.42 cd
0.0375	6.0	13.98±0.73 b	11.25 bc	1.75±0.05 b	7.24±0.28 d
Pr > F		<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		4.667	9.339	0.2563	2.2057
CV ^φ		13.6219		6.1235	9.2455
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (g kg ⁻¹)			
		Rango (K ^δ)	Ca	Mg	S
0.0000	1.5	22.50 a	3.74±0.06 b	3.86±0.05 b	1.71±0.03 a
0.0375	1.5	15.25 ab	3.21±0.10 c	3.23±0.19 bc	1.55±0.08 ab
0.0000	3.0	12.75 bc	3.62±0.14 bc	3.09±0.13 c	1.41±0.08 abc
0.0375	3.0	14.75 b	3.89±0.17 b	3.43±0.16 bc	1.41±0.10 abc
0.0000	6.0	6.50 cd	4.57±0.08 a	4.74±0.12 a	1.16±0.03 cd
0.0375	6.0	3.25 d	4.52±0.07 a	5.17±0.21 a	1.09±0.05 d
Pr > F		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		7.7303	0.5044	0.6966	0.2965
CV ^φ			5.7205	7.909	9.5957

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.4.2. Concentración de micronutrientos en raíz

En el **Cuadro 3.23** se logra apreciar que existe un incremento significativo de 11.14% en la concentración de Zn en raíz de plántulas de tomate tratadas con Phi. De igual manera, se observa que los datos de concentración de Fe, Cu y Mo no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que la adición de Phi a la solución nutritiva genera un incremento significativo en la concentración de Mo en raíz.

Cuadro 3. 23 Concentración de cada micronutriente en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn
0.0000	193.2±29.34 b	12.250 a	29.2±3.36 b	12.333 a	66.401±7.65 b
0.0375	4695.7±3493.84 a	12.750 a	893.7±677.63 a	12.667 a	73.798±11.53 a
Pr > F	<0.0001	0.8110	<0.0001	0.7401	0.0022
DMS ^ψ	1379.800	4.329	289.300	2.130	4.367
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
	Mn	Mo	Rango (Mo ^δ)	B	
0.0000	207.54±20.84 a	9.318±1.25 b	9.333 b	18.0120±1.07 a	
0.0375	21426.00±37.02 a	25.754±11.92 a	15.667 a	18.0554±1.14 a	
Pr > F	0.5379	<0.0001	0.0125	0.9587	
DMS ^ψ	22.500	4.670	4.795	1.738	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 3.24** se observa que conforme incrementa la concentración NO₃⁻ en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³, se registró una reducción significativa en la concentración de Zn de 22.38 y 53.62%, respectivamente; asimismo, se registraron decrementos de 36.50 y 37.77% en la de Mn. Además, también se logra apreciar que los datos de concentración de Fe, Cu y Mo en raíz de plántulas de tomate no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que existe una reducción significativa en la concentración de Fe y Cu en raíz de plántulas de tomate con el aumento del nivel de nitrato.

Cuadro 3. 24 Concentración de cada micronutriente en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de NO_3^- en la solución nutritiva.

NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (mg kg^{-1})				
	Fe	Rango (Fe^{δ})	Cu	Rango (Cu^{δ})	Zn
1.5	6982.8±3833.67 a	19.500 a	1334.4±7.45.05 a	20.000 a	90.944±7.10 a
3.0	164.9±30.63 b	8.625 b	29.1±2.35 b	13.000 b	70.588±2.51 b
6.0	185.6±49.34 b	9.375 b	20.7±1.03 b	4.500 c	48.768±1.31 c
Pr > F	<0.0001	0.0006	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ	2052.900	6.440	430.420	3.169	6.497
NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Concentración (mg kg^{-1})				
	Mn	Mo	Rango (Mo^{δ})	B	
1.5	282.5±20.12 a	32.597±13.56 a	14.500 a	18.158±0.92 a	
3.0	179.39±13.65 b	9.813±1.24 b	10.875 a	17.826±1.60 a	
6.0	175.81±7.60 b	10.198±1.09 b	12.125 a	18.118±0.65 a	
Pr > F	<0.0001	<0.0001	0.4366	0.9385	
DMS ^ψ	33.475	6.949	7.134	2.586	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva), se observa que a un nivel deficitario de NO_3^- en la solución nutritiva, existe un incremento significativo en la concentración de Zn de un 29.53% en raíz cuando las plántulas de tomate fueron tratadas con Phi en comparación con el testigo al que no se le adiciono dicho bioestimulante. Asimismo, se logra apreciar que los datos de concentración de Fe, Cu y Mo en raíz de plántulas de tomate no cumplen con el supuesto de normalidad por lo que apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se posee evidencia suficiente para demostrar que a un nivel deficitario de NO_3^- , el Phi provocó un incremento significativo en la concentración de Mo en raíz (**Cuadro 3.25**).

Cuadro 3. 25 Concentración de micronutrientos en raíz de plántulas de tomate como respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Fe	Rango (Fe ^δ)	Cu	Rango (Cu ^δ)	Zn
0.0000	1.5	228±21.53 b	16.500 ab	35.6±0.73 b	17.500 ab	79.245±2.94 b
0.0375	1.5	13738±1968.37 a	22.500 a	2633.2±413.09 a	22.500 a	102.643±4.20 a
0.0000	3.0	187±42.42 b	10.500 b	29.8±3.10 b	13.250 b	72.992±2.92 b
0.0375	3.0	142±7.22 b	6.750 b	28.4±1.72 b	12.750 b	68.184±1.50 b
0.0000	6.0	164±13.94 b	9.750 b	22.0±0.53 b	6.250 c	46.967±1.33 c
0.0375	6.0	207±71.95 b	9.000 b	19.3±0.99 b	2.750 c	50.569±0.20 c
Pr > F		<0.0001	0.0032	<0.0001	<0.0001	<0.0001
DMS ^ψ		3615.2	11.342	757.98	5.5804	11.442
CV ^φ		65.8132		73.1022		7.2634
Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Concentración (mg kg ⁻¹)				
		Mn	Mo	Rango (Mo ^δ)	B	
0.0000	1.5	258.11±6.70 a	8.391±0.86 b	6.500 b	19.167±1.08 a	
0.0375	1.5	306.89±22.44 a	56.804±6.13 a	22.500 a	17.149±0.37 a	
0.0000	3	177.95±15.72 b	9.876±1.62 b	11.000 ab	16.158±1.13 a	
0.0375	3	170.83±13.38 b	9.750±0.99 b	10.750 ab	19.495±1.68 a	
0.0000	6	186.56±3.13 b	9.688±1.41 b	10.500 ab	18.712±0.17 a	
0.0375	6	165.07±6.94 b	10.708±0.79 b	13.750 ab	17.523±0.85 a	
Pr > F		<0.0001	<0.0001	0.0166	0.1992	
DMS ^ψ		58.95	12.237	12.562	4.5547	
CV ^φ		12.4382	31.0521		11.2391	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.5. Parámetros bioquímicos

3.5.5.1. Concentración de clorofilas

La adición de Phi en la solución nutritiva no afectó la concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 3.26**), concordando con [Bachiega et al. \(2017\)](#) donde no se encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de clorofila en naranja dulce tratada con aplicaciones foliares de Pi, Phi y KCl bajo suficiencia de fósforo; mientras que, cuando la solución nutritiva fue

deficiente en fósforo, las aspersiones con Phi tuvieron un efecto significativo negativo en la concentración de clorofila en comparación con los otros dos tratamientos pulverizados.

Cuadro 3. 26 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	mg / 100 g de peso fresco		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0000	26.673±4.40 a	4.3524±0.40 a	31.026±4.80 a
0.0375	24.758±4.03 a	4.6020±0.54 a	29.360±4.50 a
Pr > F	0.5484	0.5540	0.6381
DMS ^ψ	6.7559	0.8933	7.5174

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 3.27** se observan incrementos de 29.65 y 60.44% en la concentración de clorofila a, asociados con el aumento de la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³; asimismo, se registraron aumentos en la concentración de clorofila total de 17.61 y 55.08%, respectivamente. Del mismo modo, [Muhammad \(2014\)](#) reporta un incremento significativo en la concentración foliar de clorofila a, b y total en plantas de *Zea mays* L. var. Pioneer 32B33 y Dekalb 979 al momento de aumentar la dosis de nitrógeno en el suelo en el rango de 0, 175, 225 y 275 kg ha⁻¹. De igual manera, [Ucar et al. \(2017\)](#) documentaron un incremento significativo en la concentración foliar de clorofila total en plantas de *Stevia rebaudiana* al incrementar la concentración de nitrógeno en el intervalo 0, 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹.

Por el contrario a los observado en las concentraciones de clorofila a y total, el nivel de NO₃⁻ en la solución nutritiva no afectó significativamente la concentración de clorofila b (**Cuadro 3.27**).

Cuadro 3. 27 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NO₃⁻ en la solución nutritiva.

NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	mg / 100 g de peso fresco		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
1.5	19.777±2.84 b	3.8827±0.25 a	23.660±2.99 b
3.0	25.640±3.54 ab	4.5880±0.54 a	30.228±4.03 ab
6.0	31.730±3.99 a	4.9608±0.44 a	36.691±4.37 a
Pr > F	0.0270	0.1349	0.0301
DMS ^ψ	10.131	1.3396	11.273

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En lo referente a la interacción Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva, ésta no fue significativa en la concentración foliar de clorofila a, b y total plántulas de tomate (**Cuadro 3.28**).

Cuadro 3. 28 Concentración de clorofila a, b y total en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	mg / 100 g de PF		
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
0.0000	1.5	18.421±0.39 b	3.5054±0.10 a	21.926±0.48 b
0.0375	1.5	21.133±4.31 ab	4.2601±0.20 a	25.393±4.46 ab
0.0000	3.0	24.273±1.21 ab	4.2778±0.01 a	28.551±1.22 ab
0.0375	3.0	27.007±5.33 ab	4.8981±0.82 a	31.906±6.09 ab
0.0000	6.0	37.326±2.39 a	5.2739±0.21 a	42.599±2.59 a
0.0375	6.0	26.135±3.25 ab	4.6478±0.61 a	30.783±3.86 ab
Pr > F		0.0577	0.2655	0.0659
DMS ^ψ		18.039	2.3853	20.072
CV ^φ		25.5779	19.4263	24.2406

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.5.2. Concentración de aminoácidos libres totales

La adición de Phi a la solución nutritiva no tuvo influencia en la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate comparado con los tratamientos a los que no se les adicionó Phi (**Cuadro 3.29**). Por el contrario, Estrada-Ortiz *et al.* (2016) demostraron en su investigación una reducción

significativa en la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de *Lactuca sativa* L, al incrementar la concentración de Phi de 0.0 a 0.50 mM.

Cuadro 3. 29 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Aminoácidos totales (µg g ⁻¹ de peso fresco)
0.0000	1.4671±0.981 a
0.0375	1.1949±0.718 a
Pr > F	0.4692
DMS ^ψ	0.7932

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 3.30** se observa que el NO₃⁻ en la solución nutritiva no afectó significativamente la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate.

Cuadro 3. 30 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de NO₃⁻ en la solución nutritiva.

NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Aminoácidos totales (µg g ⁻¹ de peso fresco)
1.5	1.1776±1.3163 a
3.0	1.2106±0.5489 a
6.0	1.6048±0.5107 a
Pr > F	0.5810
DMS ^ψ	1.1895

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. Medias ± DE con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Por otra parte, la interacción de los factores de estudio no influyeron en la concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate (**Cuadro 3.31**).

Cuadro 3. 31 Concentración de aminoácidos libres totales en hojas de plántulas de tomate en respuesta a la aplicación de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva.

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Aminoácidos totales (µg g ⁻¹ de peso fresco)
0.0000	1.5	1.9721±1.5245 a
0.0375	1.5	0.3832±0.3377 a
0.0000	3.0	1.0998±0.7565 a
0.0375	3.0	1.3214±0.3795 a
0.0000	6.0	1.3293±0.5803 a
0.0375	6.0	1.8802±0.2960 a
Pr > F		0.2151
DMS ^ψ		2.118
CV ^φ		58.0242

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.6. Parámetros relacionados con fotosíntesis

3.5.6.1. Concentración intercelular de CO₂ (Ci)

Existe un incremento significativo de 8.89% en la concentración intercelular de CO₂ en plántulas de tomate tratadas con Phi comparado contra el testigo (**Figura 3.15A**). Estos resultados son contrarios a los reportados por [Monteiro et al. \(2014\)](#), quienes concluyeron que pulverizaciones foliares de fosfato de manganeso (Reforce Mn, Agrichem), de un fungicida que contenía ciproconazol y azoxistrobina (PrioriXtra), y de fosfito de potasio con residuos de pulpa cítrica (ADB 120, Agrichem) no presentaron diferencias estadísticas significativas en la concentración intercelular de CO₂ (Ci), la tasa fotosintética (A), tasa de transpiración (E) y la conductancia estomática (Gs) en plántulas de café de 6 meses de edad tratadas durante 7, 14, 21 y 28 d.

De igual manera, el incremento en la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³, disminuye significativamente la Ci de plántulas de tomate en 1.41 y 7.04%, respectivamente, en comparación con el tratamiento al que se le suministro el nivel más bajo de nitrógeno (**Figura 3.15B**). [Mastalerczuk et al.](#)

(2017) no observaron diferencias estadísticas significativas en la Ci en lecturas tomadas en hojas de plántulas de dos variedades de *Festulolium* (Felopa y Sulino) durante 40, 80, 105, 135 y 180 días después de la siembra, al momento de suministrar nitrato de amonio a dosis de 0, 90 y 180 kg N ha⁻¹ por año.

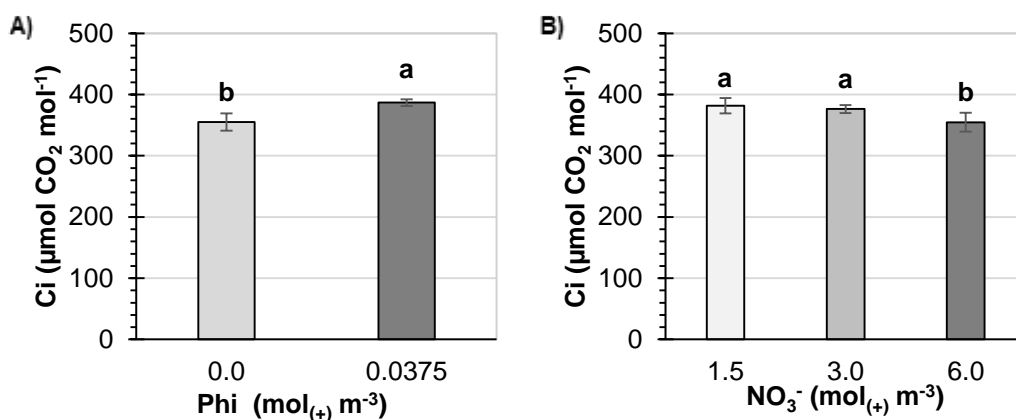


Figura 3. 15 Concentración intercelular de CO₂ (Ci) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO₃⁻ (B) en la solución nutritiva. Medias ± DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05). Phi (P<0.0001), NO₃⁻ (P<0.0001).

En lo referente a la interacción de Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva, se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a una concentración baja incrementa en 6.49% la Ci; mientras que, con una concentración de exceso de nitrógeno en la solución nutritiva incrementó significativamente la Ci de plántulas de tomate en 17.22%; en ambos casos, comparado contra el tratamiento al que no se le suministró Phi (**Cuadro 3.32**).

Cuadro 3. 32 Concentración intercelular de CO₂ (Ci) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol(+) m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol(+) m ⁻³)	Concentración intercelular de CO ₂ (Ci, μmol CO ₂ mol ⁻¹)
0.0000	1.5	369.625±14.81 b
0.0375	1.5	393.625±4.92 a
0.0000	3.0	369.000±6.05 b
0.0375	3.0	383.500±5.49 ab
0.0000	6.0	326.625±7.11 c
0.0375	6.0	382.875±4.30 ab
Pr > F		<0.0001
DMS ^ψ		23.736
CV ^φ		4.287

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.6.2. Tasa de transpiración (E)

El Phi no afectó la tasa de transpiración de plántulas de tomate (**Figura 3.16A**); por el contrario, [Bachiega et al. \(2011\)](#) observan que la menor tasa de transpiración se presenta en plantas de *Citrus sinensis* L. y *Citrus aurantium* tratadas con 0.5 mM de Phi, en comparación con los otros tratamientos que utilizaron 0 y 0.5 mM de Pi así como 0.5 mM de Pi + 0.5 mM de Phi. De igual manera, se posee evidencia suficiente para demostrar que conforme incrementa la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol(+) m⁻³, aumenta significativamente la tasa de transpiración en 31.30 y 39.06%, respectivamente, en comparación con el tratamiento al que se le suministró el nivel más bajo de nitrógeno (**Figura 3.16B**). Resultados que coinciden con lo reportado por [Janusauskaite et al. \(2017\)](#), quienes observaron un incremento significativo en la tasa de transpiración de plántulas de trigo al aumentar la dosis de NH₄NO₃ (34% de N) de 0, 90, 180, 90+30, 90+30+30 y las de CO(NH₂)₂·nNH₄NO₃·mH₂O (32% de N) en dosis de 90+30+30 kg de N ha⁻¹.

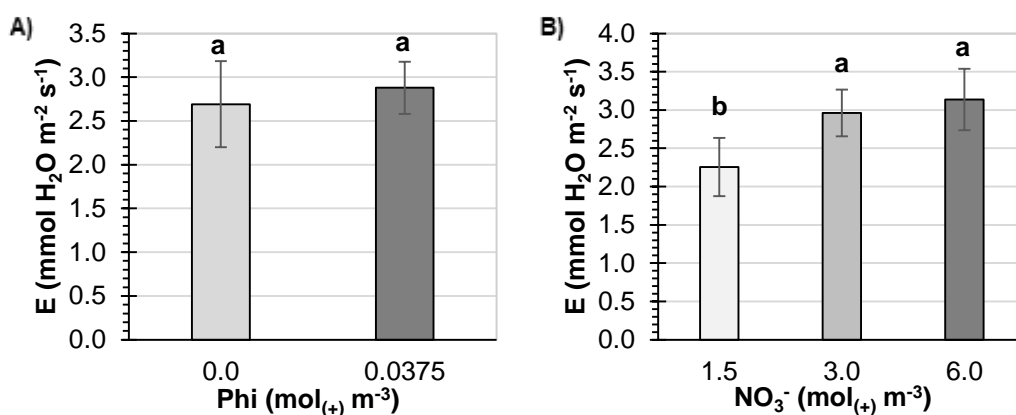


Figura 3. 16 Tasa de transpiración (E) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.3500$), NO_3^- ($P=0.0018$).

La interacción de Phi y NO_3^- no fue significativa en la tasa de transpiración de plántulas de tomate (**Cuadro 3.33**).

Cuadro 3. 33 Tasa de transpiración (E) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO_3^- en la solución nutritiva).

Phi ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$)	Tasa de transpiración (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
0.0000	1.5	1.9250 \pm 0.47 b
0.0375	1.5	2.5875 \pm 0.16 ab
0.0000	3.0	3.2625 \pm 0.28 a
0.0375	3.0	2.6625 \pm 0.27 ab
0.0000	6.0	2.8875 \pm 0.48 ab
0.0375	6.0	3.3875 \pm 0.29 a
Pr > F		0.0016
DMS ^ψ		1.0258
CV ^φ		24.6741

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias \pm DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.5.6.3. Conductancia estomática (Gs)

Los datos de conductancia estomática (Gs) de plántulas de tomate no cumplieron con el supuesto de normalidad (**Figura 3.17A y 3.17B**); por tanto, apoyados en la metodología de transformación por rangos de Conover-Iman se muestra que el Phi tuvo influencia significativa en la conductancia estomática de plantas, respecto al testigo sin Phi (**Figura 3.17a**). [Scott *et al.* \(2016\)](#) quienes realizaron aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 0, 12, 24 y 48 kg ha⁻¹ diluidas en agua desionizada a partir de la formulación comercial de Agrifos, a especies de coníferas y angiospermas leñosas de 1.5 años de edad y de entre 20 y 90 cm de altura dependiendo la especie, realizaron las lecturas de conductancia estomática dos días consecutivos entre las 9:00 y 11:30 h dos semanas después de la aplicación de Phi; se observó que no existió efecto significativo por parte del Phi en la conductancia estomática de tejido foliar de cuatro especies maderables nativas y dos especies silvícolas.

Por otra parte, se observa que no se posee evidencia suficiente para demostrar que exista algún efecto significativo de la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva en la conductancia estomática de plántulas de tomate (**Figura 3.17b**). Estos resultados coinciden con lo reportado por [Janusauskaite *et al.* \(2017\)](#), quienes registraron una diferencia mínima significativa en la conductancia estomática de hojas de plántulas de trigo al incrementar la dosis de NH₄NO₃ (34% de N) de 0, 90, 180, 90+30, 90+30+30 y de CO(NH₂)₂·nNH₄NO₃·mH₂O como urea (32% de N) en dosis de 90+30+30 kg N ha⁻¹.

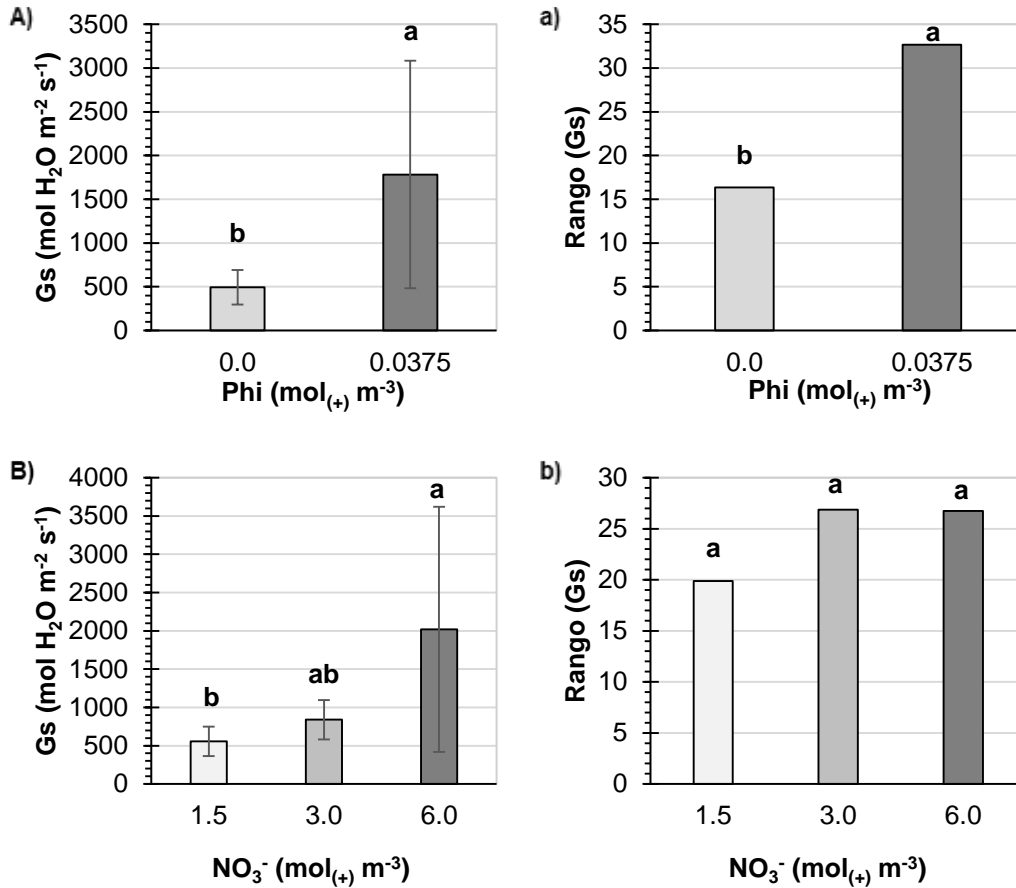


Figura 3.17 Conductancia estomática (Gs) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi [A: medias (P=0.0098); a: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0890)] y NO₃⁻ [B: medias (P=0.0385); b: medias transformadas por rangos de Conover-Iman (P=0.0036)]. Medias ± DE y rangos con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

En lo referente a la interacción de Phi y NO₃⁻ (mol₍₊₎ m⁻³) en la solución nutritiva, se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a una concentración alta de NO₃⁻ en la solución nutritiva incrementó significativamente la conductancia estomática de plántulas de tomate, en comparación con el tratamiento con el mismo nivel de NO₃⁻ sin adición de Phi (**Cuadro 3.34**).

Cuadro 3. 34 Conductancia estomática (Gs) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Conductancia estomática (Gs)	
		Gs (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	Rango (Gs ⁶)
0.0000	1.5	498.4±267.87 c	15.375 c
0.0375	1.5	617.8±73.38 bc	24.375 bc
0.0000	3.0	642.6±196.74 bc	22.375 bc
0.0375	3.0	1037.5±283.96 ab	31.375 ab
0.0000	6.0	342.4±77.35 c	11.250 c
0.0375	6.0	3694.1±1970.73 a	42.250 a
Pr > F		0.0016	<0.0001
DMS ^ψ		2463.6	14.937
CV ^φ		144.9345	

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ⁶Método de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.5.6.4. Tasa fotosintética (A)

Existe un incremento significativo de 12.18% en la tasa fotosintética (A) en plántulas de tomate tratadas con Phi en comparación con aquellas no tratadas (**Figura 3.18A**). Estos resultados son contrarios a los de [Cerqueira et al. \(2017\)](#) quienes reportaron que aplicaciones foliares de Phi a concentraciones de 1 y 4% a árboles de pino de Monterrey redujeron significativamente su tasa fotosintética, en comparación con el testigo.

De igual manera se posee evidencia suficiente para mostrar que incrementos en la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva de 1.5 a 3.0 y 6.0 mol₍₊₎ m⁻³, aumenta significativamente la tasa fotosintética de plántulas de tomate en un 58.61% y 94.31%, respectivamente (**Figura 3.18B**). Este hallazgo concuerdan con lo reportado por [Janusauskaite et al. \(2017\)](#), quienes observan un incremento significativo en la tasa fotosintética de trigo al aumentar la dosis de NH₄NO₃ (34%

de N) de 0, 90, 180, 90+30, 90+30+30 y de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot n\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (32% de N) en 90+30+30 kg de N ha^{-1} .

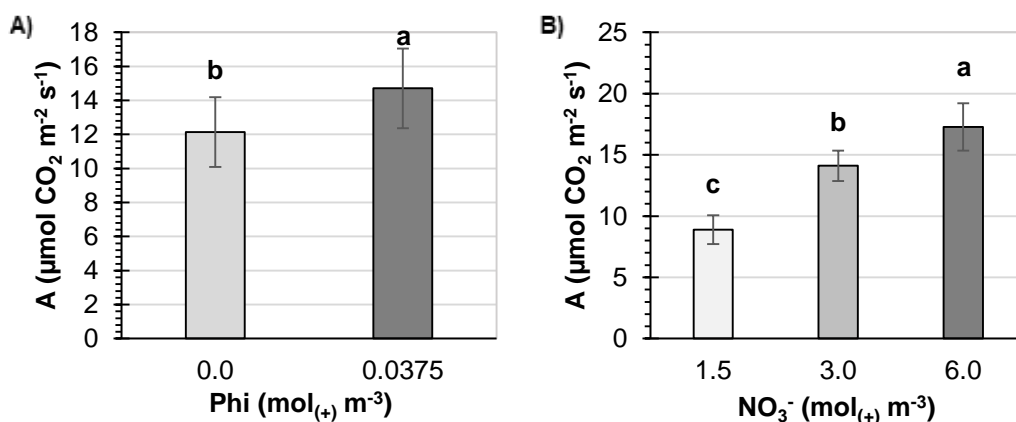


Figura 3. 18. Tasa fotosintética (A) de plantas de tomate en respuesta al tratamiento con Phi (A) y NO_3^- (B) en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas de cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Phi ($P=0.0014$), NO_3^- ($P < 0.0001$).

En lo referente a la interacción de fosfito en Phi y NO_3^- en la solución nutritiva se posee evidencia suficiente para demostrar que el tratamiento con Phi a una concentración alta de NO_3^- en la solución nutritiva, incrementó significativamente la tasa fotosintética en tomate, dicho incremento fue del 32.54% comparado contra el tratamiento al que no se le suministró Phi (**Cuadro 3.35**).

Cuadro 3. 35 Tasa fotosintética (A) en plantas de tomate en respuesta a la interacción de los factores de estudio (Phi y NO₃⁻ en la solución nutritiva).

Phi (mol ₍₊₎ m ⁻³)	NO ₃ ⁻ (mol ₍₊₎ m ⁻³)	Tasa fotosintética (A μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
0.0000	1.5	7.913±1.26 d
0.0375	1.5	9.875±0.88 cd
0.0000	3.0	13.650±0.87 bc
0.0375	3.0	14.563±1.55 b
0.0000	6.0	14.863±1.90 b
0.0375	6.0	19.700±1.01 a
Pr > F		<0.0001
DMS ^ψ		3.8845
CV ^φ		19.3823

^ψDMS: Diferencia mínima significativa. ^φCV: Coeficiente de variación. ^δMétodo de transformación por rangos. Medias ± DE y rangos con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, P≤0.05).

3.6. CONCLUSIONES

En el presente estudio de investigación se posee evidencia suficiente para demostrar que aporte de Phi a dos concentraciones 0.0 y 0.0375 mol₍₊₎ m⁻³ vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 25% afectó de manera significativa los parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y fotosintéticos de la siguiente manera:

- El Phi incrementó significativamente la altura de planta, el diámetro de tallo así como la longitud y el volumen de raíz de plántulas de tomate; incrementó significativamente la concentración de Ca y B en hoja, de P y Cu en tallo y de Zn y Mo en raíz. Por el contrario, redujo la concentración de Mg, S, Mn y B en tallo y de N en raíz de plántulas de tomate.
- Asimismo, la adición de Phi incrementó significativamente la concentración intercelular de CO₂, la apertura estomática y la tasa fotosintética de plántulas de tomate.

En lo referente a la inducción de estrés nutrimental mediante distintas dosis de NO_3^- (NO_3^- , (1.5, 3.0, y 6.0 $\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$) vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 25%, se observa que ésta afectó de manera significativa los parámetros de crecimiento, nutrimentales, bioquímicos y fotosintéticos de la siguiente manera:

- Conforme se incrementó la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva, aumentó significativamente el número de hojas y flores, al área foliar, el peso fresco y seco de hojas, tallo y raíz, así como la altura de planta y el volumen de raíz, y hubo una reducción significativa en la longitud de raíz de plántulas de tomate.
- Asimismo, incrementos en la concentración de NO_3^- aumentaron significativamente la concentración de N, K, Ca y B en hojas y la de N, Ca y Mg en tallo y raíz. De igual manera, existió una reducción significativa en la concentración foliar de P, Mg, S y Mn, de P, S, Cu, Zn y Mn en tallo, y de P, K, S, Fe, Cu Zn y Mn en raíz de plántulas de tomate.
- Por otra parte, el incremento en la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva provocó un aumento significativo en la concentración de clorofila a y total en hojas de plántulas de tomate, así como a lo que respecta en los parámetros fotosintéticos tasa de transpiración y fotosintética, de igual se registra una reducción significativa en la concentración intercelular de CO_2 .

En lo referente a la interacción de fosfito en ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$) y NO_3^- ($\text{mol}_{(+)} \text{m}^{-3}$) en la solución nutritiva se posee evidencia suficiente para demostrar que existan diferencias estadísticas significativas respecto a parámetros de crecimiento y fotosintéticos en plántulas de tomate, pero se aprecian diferencias significativas en parámetros nutrimentales y bioquímicos de la siguiente manera:

- Se observó que a un nivel de déficit de NO_3^- en la solución nutritiva hubo un incremento significativo en el número de flores y longitud de raíz, así como en un nivel óptimo de NO_3^- el Phi incremento significativamente el peso seco y diámetro de tallo de plántulas de tomate.

- Se aprecia que la adición de Phi vía radicular a plántulas de tomate bajo un nivel de déficit de NO_3^- en la solución nutritiva tuvo un incremento significativo en la concentración de P en hojas, así como de Zn y Mo en raíz; Y una reducción significativa en la concentración de Fe y Cu en hojas, de Mn, Mo y B en tallo y de Ca en raíz; en condiciones óptimas de NO_3^- en la solución nutritiva hubo un incremento significativo en la concentración de Cu en hojas, Mn en tallo así como una reducción significativa en la concentración de N en raíz; de igual manera bajo un nivel de exceso de NO_3^- hubo un incremento significativo en la concentración de Fe y una reducción en la concentración de Mg en hojas, y de Mn en tallo de plántulas de tomate.
- En lo referente a los parámetros fotosintéticos observamos que a un nivel de déficit de NO_3^- en la solución nutritiva el Phi provocó un incremento significativo en la Ci, y bajo un nivel de exceso de NO_3^- en la solución nutritiva hubo un incremento significativo en la concentración Ci, E y A en hojas de plántulas de tomate.

3.7. LITERATURA CITADA

- Abenavoli MR, Longo C, Lupini A, Miller AJ, Araniti F, Mercati F, Princi MP, Sunseri F. 2016. Phenotyping two tomato genotypes with different nitrogen use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry* 107: 21-32. Doi: 10.1016/j.plaphy.2016.04.021
- Abro MA, Lecompte F, Bardin M, Nicot PC. 2014. Nitrogen fertilization impacts biocontrol of tomato gray mold. *Agronomy for Sustainable Development* 34: 641-648. Doi: 10.1007/s13593-013-0168-3
- Achary VMM, Ram B, Manna M, Datta D, Bhatt A, Reddy MK, Agrawal PK. 2017. Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnology Journal*. 15(12): 1493-1508. Doi: 10.1111/pbi.12803
- Alcántar GC, Sandoval VM. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Chapingo, México.
- Bachiega ZFC, Mattos D, Syvertsen JP. 2011. Plant growth, leaf photosynthesis, and nutrient-use efficiency of citrus rootstocks decrease with phosphite supply. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(3): 487-495. Doi: 10.1002/jpln.201000320

- Bachiega ZFC, Mesquita GL, Menino G, Tanaka FAO, Mattos DJ, Quaggio JA. 2017. Anatomical and ultrastructural damage to citrus leaves from phosphite spray depends on phosphorus supply to roots. *Plant and Soil* 418: 557-569. Doi: 10.1007/s11104-017-3314-x
- Badr MA, Abou-Hussein SD, El-Tohamy WA. 2016. Tomato yield, nitrogen uptake and water use efficiency as affected by planting geometry and level of nitrogen in an arid region. *Agricultural Water Management* 169: 90-97. Doi: 10.1016/j.agwat.2016.02.012
- Boqi W, Yuesen L, Yixiang W, Yanchun L. 2014. Effect of nitrogen fertilization on growth and nitrogen dynamics of *Chamaecrista rotundifolia* cv. Minyin on red soil in southern China. *Grassland Science* 60: 112-117. Doi: 10.1111/grs.12050
- Bremner JM. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C. A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. pp. 1149-1178.
- Cerqueira A, Alves A, Berenguer H, Correia B, Gómez-Cadenas A, Javier DJ, Monteiro P, Pinto G. 2017. Phosphite shifts physiological and hormonal profile of Monterey pine and delays *Fusarium circinatum* progression. *Plant Physiology and Biochemistry* 114: 88-99. Doi: 10.1016/j.plaphy.2017.02.020
- Conover WJ, Iman RL. 1981. Rank transformation as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician* 35(3): 124-129.
- Constán-Aguilar C, Sánchez-Rodríguez E, Rubio-Wilhelmi MM, Camacho MA, Romero L, Ruiz JM, Blasco B. 2014. Physiological and Nutritional Evaluation of the Application of Phosphite as a Phosphorus Source in Cucumber Plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 45(2): 204-222. Doi: 10.1080/00103624.2013.854374
- Deepa KV, Athikkattuvasu SK, Paino DM, Kashchandra GR. 2002. Phosphite, an Analog of Phosphate, Suppresses the Coordinated Expression of Genes under Phosphate Starvation. *Plant Physiology* 129(3): 1232-1240
- Estrada-Ortiz E, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Silva-Rojas HV, Castillo-González AM, Avitia-García E. 2016. Physiological Responses of Chard and Lettuce to Phosphite Supply in Nutrient Solution. *Journal of Agricultural Science and Technology* 18(4): 1079-1090.
- Geiger M, Walch-Liu P, Engels C, Harnecker ED, Schulze F, Ludewig U, Sonnewald WR, Scheible, Stitt M. 1998. Enhanced carbon dioxide leads to a modified diurnal rhythm of nitrate reductase activity and higher levels of amino acids in Young tobacco plants. *Plant Cell Environ.* 21(3): 253–268.
- Harborne, J. B. 1973. Chlorophyll extraction. *In*: Harborne, J.B. (ed.), *Phytochemical Methods. Recommended technique.* Chapman and Hall, London. pp. 205-207
- Janusauskaite D, Feiziene D, Feiza V. 2017. Nitrogen-induced variations in leaf gas exchange of spring triticale under field conditions. *Acta Physiol. Plant.* 39: 193. Doi: 10.1007/s11738-017-2495-5
- Jost R, Pharmawati M, Lapis-Gaza HR, Rossig C, Berkowitz O, Lambers H, Finnegan FM. 2015. Differentiating phosphate-dependent and phosphate-independent systemic phosphate-starvation response networks in *Arabidopsis thaliana* through the application of phosphite. *J. Exp. Bot.* 66: 2501-2514. Doi: 10.1093/jxb/erv025

- Manna M, Islam T, Kaul T, Subramanyam RC, Fartyal D, James D, Reddy MK. 2015. A comparative study of effects of increasing concentrations of phosphate and phosphite on rice seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum* 37: 258. Doi: 10.1007/s11738-015-2016-3
- Mastalerczuk G, Borawska-Jarmułowicz B, Kalaji HM, Dąbrowski P, Paderewski J. 2017. Gas-exchange parameters and morphological features of festulolium (*Festulolium braunii* K. Richert A. Camus) in response to nitrogen dosage. *Photosynthetica* 55: 20-30. Doi: 10.1007/s11099-016-0665-0
- Meiqing L, Jinyang L, Xinhua W, Wenjing Z. 2017. Early diagnosis and monitoring of nitrogen nutrition stress in tomato leaves using electrical impedance spectroscopy. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 10(3): 194-205. Doi: 10.3965/j.ijabe.20171003.3188
- Mofidnakhai M, Abdossi V, Dehestani A, Pirdashti H, Babaeiza V. 2016. Potassium phosphite affects growth, antioxidant enzymes activity and alleviates disease damage in cucumber plants inoculated with *Pythium ultimum*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 49: 207-221. Doi: 10.1080/03235408.2016.1180924
- Monteiro ACA, De Resende MLV, Valente TCT, Ribeiro Junior PM, Pereira VF, Da Costa JR, Da Silva JAG. 2016. Manganese Phosphite in Coffee Defence against *Hemileia vastatrix*, the Coffee Rust Fungus: Biochemical and Molecular Analyses. *Journal of Phytopathology* 164: 1043–1053. Doi: 10.1111/jph.12525
- Monteiro FLH, Rezende de Oliveira SH, Rezende DK, Vilela RML, Donizeti AJ. 2014. Inductors of Resistance and Their Role in Photosynthesis and Antioxidant System Activity of Coffee Seedlings. *American Journal of Plant Sciences* 5: 3710-3716. Doi: 10.4236/ajps.2014.525387
- Moore S, Stein WH. 1954. A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids and related compounds. *Journal of Biological Chemistry* 211: 907-913.
- Muhammad A. 2014. Effects of Nitrogen Application on Chlorophyll Content, Water Relations, and Yield of Maize Hybrids under Saline Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45: 1336-1356. Doi: 10.1080/00103624.2013.875199
- Qinglin L, Hanping M, Zhiyu Z, Xiaodong Z, Jiheng N, Jun S. 2017. Effects of nitrogen and phosphorus on the microstructure and ultrastructure of tomato leaves (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Plant Nutrition* 40(12): 1773-1783. Doi: 10.1080/01904167.2016.1245320
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3 User's Guide. Cary, North Carolina: SAS Institute Inc.
- Scott P, Bader MKF, Williams NM. 2016. Foliar phosphite application has minor phytotoxic impacts across a diverse range of conifers and woody angiosperms. *Physiologia Plantarum* 158: 124-134. Doi: 10.1111/ppl.12442
- Steiner A. 1984. The universal nutrient solution. *In: I.S.O.S.C. Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. The Netherlands.* pp. 633-649.

- Ucar E, Ozyigit Y, Demirbas A, Guven DY, Turgut K. 2017. Effect of Different Nitrogen Doses on Dry Matter Ratio, Chlorophyll and Macro/Micro Nutrient Content in Sweet Herb (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48: 1231-1239. Doi: 10.1080/00103624.2017.1341917
- Wang G, Liu F, Xue S. 2017. Nitrogen addition enhanced water uptake by affecting fine root morphology and coarse root anatomy of Chinese pine seedlings. *Plant and Soil* 418: 177-189. Doi: 10.1007/s11104-017-3283-0
- Xiaogang L, Fusheng L, Yan Z, Qiliang Y. 2016. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. *Agricultural Water Management* 172: 1-8. Doi: 10.1016/j.agwat.2016.04.007