



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA**

**RESPUESTAS DE TOMATE A ELEMENTOS  
BENÉFICOS EN HIDROPONÍA Y ESTRÉS  
SALINO**

VÍCTOR HUGO CARBAJAL VÁZQUEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2022

La presente tesis titulada: **Respuestas de tomate a elementos benéficos en hidroponía y estrés salino** realizada por el alumno: **Víctor Hugo Carbajal Vázquez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA

  
\_\_\_\_\_  
DRA. LIBIA IRIS TREJO TÉLLEZ

ASESOR

\_\_\_\_\_  
DR. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. FERNANDO CARLOS GOMEZ MERINO

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2022

# RESPUESTAS DE TOMATE A ELEMENTOS BENÉFICOS EN HIDROPONÍA Y ESTRÉS SALINO

Víctor Hugo Carbajal Vázquez, D.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## RESUMEN

Los factores de estrés biótico y abiótico delimitan la producción de alimentos en el sector agroalimentario, a nivel mundial. El estrés por acumulación de sales en el suelo y en el agua de riego afecta el crecimiento y diferenciación de las plantas, además del rendimiento y la calidad de los frutos. Los elementos no esenciales como el Si, el Ti y el V son considerados bioestimulantes en algunas especies de cultivos, ya que se ha demostrado que en pequeñas cantidades estimulan parámetros de crecimiento y mejoran mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares que permiten a las plantas tolerar diferentes factores de estrés. El objetivo de este trabajo fue evaluar las respuestas tanto en germinación como en parámetros fisiológicos, bioquímicos, nutricionales y de calidad de frutos a la aplicación de Si, Ti y V tanto en semillas como en el área foliar de plántulas de dos variedades de tomate, bajo estrés por NaCl. En primer lugar, se condujo un experimento en invernadero con plantas de tomate cv. Río Supremo, las cuales se cultivaron hidropónicamente y se trataron con dosis crecientes de NaCl (0, 50 y 100 mM) y con la aspersión foliar de Si y Ti en dosis de 0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup> (a partir de SiO<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub>, respectivamente). En frutos del segundo racimo se evaluó el porcentaje de jugo, la concentración de licopeno, la firmeza y parámetros de color. El NaCl reduce el porcentaje de jugo, la firmeza, la concentración de licopeno, el índice de color, la relación a/b, y el croma. Mientras que, el silicio mejora la firmeza y la luminosidad; y el Ti, incrementa el índice de color, índice b y croma. Como segunda actividad, se realizó un experimento de germinación, en donde se evaluó el efecto del tratamiento de semillas cv. Río Grande con diferentes dosis de Ti (0, 2.5, 5, 7.5 y 10 mg L<sup>-1</sup>, a partir de, TiO<sub>2</sub>, 99.7% Sigma-Aldrich, <25 nm) mediante imbibición y bajo condiciones de laboratorio. Se midieron parámetros de germinación y de crecimiento inicial. El Ti mejora indicadores de germinación y crecimiento inicial en plántulas de tomate. Por último, se estableció un experimento en invernadero con plántulas de tomate cv. Río Grande bajo condiciones hidropónicas, a las cuales se les indujo estrés salino por medio de la adición de NaCl (0, 50 y 100 mM) a través del agua de riego; y se les aplicó tanto Ti (0, 500 y 1000 mg L<sup>-1</sup>) como de V (0, 25 y 50 µM) vía foliar. El Ti no afecta aspectos fisiológicos, bioquímicos bajo estrés salino. Mientras que, el V incrementa la concentración de clorofila a y de carotenoides. Los resultados obtenidos muestran evidencias de que las dosis utilizadas de Si, Ti y V mejoran parámetros de germinación, aspectos fisiológicos, bioquímicos y nutrimentales, así como de calidad de fruto, ante factores de estrés por salinidad.

**Palabras clave:** elementos benéficos, hidroponía, salinidad, *Solanum lycopersicum*

# **TOMATO RESPONSES TO BENEFICIAL ELEMENTS IN HYDROPONICS AND SALINE STRESS**

Victor Hugo Carbajal Vázquez, D.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## **ABSTRACT**

Biotic and abiotic stress factors define food production in the agri-food sector, worldwide. The stress due to the accumulation of salts in the soil and in the irrigation water affects the growth and differentiation of the plants, as well as the yield and the quality of the fruits. Non-essential elements such as Si, Ti and V are considered biostimulants in some crop species, since it has been shown that in small amounts they stimulate growth parameters and improve physiological, biochemical and molecular mechanisms that allow plants to tolerate different stress factors. The objective of this work was to evaluate the responses both in germination and in physiological, biochemical, nutritional and fruit quality parameters to the application of Si, Ti and V both in seeds and in the leaf area of seedlings of two varieties of tomato, under NaCl stress. First, a greenhouse experiment was conducted with tomato plants cv. Río Supremo, which were grown hydroponically and treated with increasing doses of NaCl (0, 50 and 100 mM) and with foliar spraying of Si and Ti in doses of 0, 75 and 150 mg L<sup>-1</sup> (from SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>, respectively). In fruits of the second cluster, the juice percentage, lycopene concentration, firmness and color parameters were evaluated. NaCl reduces the juice percentage, firmness, lycopene concentration, color number, a/b ratio, and chroma. As a second activity, a germination experiment was carried out, where the effect of the treatment of cv. Río Grande with different doses of Ti (0, 2.5, 5, 7.5 and 10 mg L<sup>-1</sup>, from, TiO<sub>2</sub>, 99.7% Sigma-Aldrich, <25 nm) by imbibition and under laboratory conditions. Germination and initial growth parameters were measured. Ti improves germination and initial growth indicators in tomato seedlings. Finally, a greenhouse experiment was established with tomato seedlings cv. Río Grande under hydroponic conditions, to which saline stress was induced through the addition of NaCl (0, 50 and 100 mM) through the irrigation water; and both Ti (0, 500 and 1000 mg L<sup>-1</sup>) and V (0, 25 and 50 μM) were applied by foliar route. Ti does not affect physiological, biochemical aspects under saline stress. While, V increases the concentration of chlorophyll a and carotenoids. The results obtained show evidence that the doses used of Si, Ti and V improve germination parameters, physiological, biochemical and nutritional aspects, as well as quality of fruit quality, in the face of salinity stress factors.

**Key words:** beneficial elements, hydroponics, salinity, *Solanum lycopersicum*

**DEDICADO A:**

*Mis hijos: Gaddiel y Galia.*

*Mi esposa: Soledad*

*Mi madre y hermanas: María A., Aura, Elideth y Ana.*

*Mi familia: José, Bárbara, Rafael, Reina†, Balbina, Rachel, Beny, Sofía, Fer, Xavi, Goyo, Lalo, Mau, Luis, Ari, Rachel, José Ángel, Yeyén, Matías, Juan Pablo, María José y Johanán.*

*Mi familia en general y a Konan.*

**Víctor H.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios.

Al CONACYT, por la beca que me fue otorgada, para obtener el grado doctoral.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por permitirme el uso de sus instalaciones en el área de Nutrición Vegetal de Edafología (laboratorios e invernaderos).

A la Dra. Libia I. Trejo Téllez y el Dr. Fernando C. Gómez Merino, por su amistad, paciencia y ensañanzas.

A mis asesores Dr. E. Gabriel Alcántar González y Prometeo Sánchez García, por su amistad y atinadas sugerencias en el proceso de investigación.

A los directivos de la UFM por su apoyo a la distancia.

A mis profesores y amigos de generación, así como a todos los que colaboraron con este proyecto.

Mil gracias.

Víctor H.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>DEDICADO A:</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I. SILICIO AFECTA PORCENTAJE DE JUGO, LICOPENO, FIRMEZA Y PARÁMETROS DE COLOR EN FRUTOS DE TOMATE BAJO ESTRÉS SALINO</b> .....	4
<b>1.1. RESUMEN</b> .....	4
<b>1.2. INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>1.3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	7
<b>1.3.1. Condiciones experimentales y material vegetal</b> .....	7
<b>1.3.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental</b> .....	7
<b>1.3.3. Variables evaluadas</b> .....	8
<b>1.3.4. Análisis estadístico</b> .....	9
<b>1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	10
<b>1.4.1. Efectos del NaCl y Si en porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate</b> .....	10
<b>1.4.2. Efectos del NaCl y Si en concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate</b> .....	14
<b>1.4.3. Efectos del NaCl y Si en luminosidad y relación de indicadores de color a/b de frutos de tomate</b> .....	17
<b>1.4.4. Efectos del NaCl y Si en los indicadores de color a y b de frutos de tomate</b> .....	19
<b>1.4.5. Efectos del NaCl y Si en los indicadores de tono (ángulo Hue) e índice de saturación (Croma) del color de frutos de tomate</b> ...	21
<b>1.5. CONCLUSIONES</b> .....	23

<b>CAPÍTULO II. CLORURO DE SODIO Y TITANIO AFECTAN LICOPENO, FIRMEZA Y PARÁMETROS DE COLOR DE FRUTOS DE TOMATE.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. RESUMEN.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.1. Material vegetal y condiciones experimentales.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3. Variables evaluadas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.4. Análisis estadístico.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.1. Efectos del NaCl y Ti en porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.2. Efectos del NaCl y Ti en concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate.....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.3. Efectos del NaCl y Ti en luminosidad y relación de indicadores.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.4. Efectos del NaCl y Ti en los indicadores de color a y b de frutos de tomate.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.5. Efectos del NaCl y Ti en los indicadores de color tono (ángulo Hue) e índice de saturación (croma) de frutos de tomate.....</b>	<b>40</b>
<b>2.5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO III. TITANIO AFECTA LA GERMINACIÓN, BIOMASA Y VARIABLES DE CRECIMIENTO INICIAL EN TOMATE.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. RESUMEN.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.1. Material vegetal y tratamientos con titanio.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.2. Germinación y diseño experimental.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.3. Cinética de germinación.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.4. Variables a evaluar.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.5. Análisis estadístico.....</b>	<b>51</b>



<b>3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.1. Ganancia de peso en semillas de tomate.....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.2. Variables de germinación.....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.3. Longitud de raíz y tallo, número de raíces y hojas.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.4. Contenido total de agua en plántulas de tomate .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.5. Biomasa fresca y seca .....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.6. Correlación de los resultados obtenidos entre la concentración de Ti con las variables medidas .....</b>	<b>59</b>
<b>3.5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>CAPÍTULO IV. APLICACIÓN FOLIAR DE TIO<sub>2</sub> EN VARIABLES FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE PLÁNTULAS DE TOMATE, BAJO ESTRÉS SALINO .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1. RESUMEN.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.1. Material vegetal y tratamientos salino y foliares.....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.2. Diseño experimental .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.3. Variables de crecimiento .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.4. Unidades SPAD y concentración de pigmentos fotosintéticos.....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.5. Determinación de azúcares totales .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.6. Actividad antioxidante total.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.7. Concentración nutrimental .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.8. Análisis estadístico .....</b>	<b>71</b>
<b>4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>72</b>
<b>4.4.1. Altura de planta, diámetro de tallo y área foliar.....</b>	<b>72</b>
<b>4.4.2. Unidades SPAD y pigmentos fotosintéticos. ....</b>	<b>76</b>
<b>4.4.3. Azúcares totales en hojas, tallos y raíz de plántulas de tomate .....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.4. Capacidad antioxidante total.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4.5. Concentración nutrimental .....</b>	<b>87</b>

4.5. CONCLUSIONES .....	91
<b>CAPÍTULO V. APLICACIÓN FOLIAR DE V AFECTA VARIABLES FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE PLÁNTULAS DE TOMATE, BAJO CONDICIONES SALINAS .....</b>	<b>92</b>
5.1. RESUMEN .....	92
5.2. INTRODUCCIÓN .....	93
5.3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	95
5.3.1. Material vegetal.....	95
5.3.2. Tratamientos salinos y foliares .....	95
5.3.3. Diseño experimental .....	97
5.3.4. Variables de crecimiento .....	97
5.3.5. Unidades SPAD y concentración de carotenoides, clorofilas a, b y totales .....	98
5.3.6. Determinación de azúcares totales .....	98
5.3.7. Actividad antioxidante total.....	99
5.3.8. Concentración nutrimental .....	99
5.3.9. Análisis estadístico .....	100
5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	101
5.4.1. Altura de planta, diámetro de tallo y área foliar.....	101
5.4.2. Unidades SPAD y pigmentos fotosintéticos .....	106
5.4.3. Azúcares totales en hojas, tallos y raíces de plántulas de tomate .....	111
5.4.4. Capacidad antioxidante total.....	113
5.4.5. Concentración nutrimental .....	118
5.5. CONCLUSIONES .....	122
<b>CONCLUSIÓN GENERAL.....</b>	<b>123</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Ensayo conducido con aplicaciones de Ti en semillas de tomate tipo saladette de porte determinado cv. Río Grande. ....	49
<b>Cuadro 2.</b> Efecto del Ti en germinación de semillas de tomate cv. Río Grande tratadas con diferentes dosis de Ti.....	53
<b>Cuadro 3.</b> Efecto del Ti en crecimiento y diferenciación de plántulas de tomate cv. Río Grande tratadas con diferentes dosis.....	56
<b>Cuadro 4.</b> Efecto del Ti en la cantidad de biomasa fresca y seca de plántulas de tomate cv. Río Grande tratadas con diferentes dosis. ....	59
<b>Cuadro 5:</b> Volumen de riego aplicado y actividades realizadas durante el experimento. ....	67
<b>Cuadro 6.</b> pH de los tratamientos foliares conteniendo Ti, con y sin Tween 20®, además de su ajuste para ser aplicado a las plantas. ....	68
<b>Cuadro 7.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la altura de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	73
<b>Cuadro 8.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en el diámetro de tallo de plántulas de tomate cv. Río Grande.....	74
<b>Cuadro 9.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en el área foliar de plántulas de tomate cv. Río Grande después de 30 DDT....	75
<b>Cuadro 10.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en las unidades SPAD de plántulas de tomate cv. Río Grande.....	77
<b>Cuadro 11.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en los pigmentos fotosintéticos en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.....	78
<b>Cuadro 12.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la concentración de azúcares en plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	80
<b>Cuadro 13.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	83

<b>Cuadro 14.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en tallos de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	84
<b>Cuadro 15.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en raíces de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	86
<b>Cuadro 16.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la concentración nutrimental (macronutrientes) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	88
<b>Cuadro 17.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO <sub>2</sub> en la concentración nutrimental (macronutrientes y Ti) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	90
<b>Cuadro 18.</b> Volumen de riego aplicado y actividades realizadas durante el experimento con V. ....	96
<b>Cuadro 19.</b> pH de los tratamientos foliares incluyendo V, con y sin Tween 20 <sup>®</sup> , además de su ajuste para ser aplicado a las plantas. ....	97
<b>Cuadro 20.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la altura de planta de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	102
<b>Cuadro 21.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en el diámetro de tallo de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	104
<b>Cuadro 22.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en el área foliar de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	106
<b>Cuadro 23.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en las unidades SPAD de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	107
<b>Cuadro 24.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en los pigmentos fotosintéticos en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	110
<b>Cuadro 25.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en los azúcares totales solubles de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	112

<b>Cuadro 26.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.....	114
<b>Cuadro 27.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en tallos de plántulas de tomate cv. Río Grande.....	116
<b>Cuadro 28.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en raíces de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	117
<b>Cuadro 29.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la concentración nutrimental (macronutrientes) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	119
<b>Cuadro 30.</b> Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la concentración nutrimental (macronutrientes y V) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande. ....	121

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en el porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ )..... 13
- Figura 2:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en la concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ )..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 3:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en luminosidad y relación de los indicadores de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ )..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en índices de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). ..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en índices de color Hue y croma de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 6:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl × Ti (e y f) en el porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada

subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ )..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 7:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl  $\times$  Ti (e y f) en la concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ )..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 8:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl  $\times$  Ti (e y f) en luminosidad y relación de los indicadores de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 9:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl  $\times$  Ti (e y f) en índices de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). ..... 39

**Figura 10:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl  $\times$  Si (e y f) en índices de color Hue y Cromo de tomate cv. Río Supremo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 11:** Incremento de peso en semillas de tomate cv. Río Grande expuestas a diferentes concentraciones de Ti. Medias  $\pm$  DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ )..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 12:** Contenido de humedad en plántulas (raíces, tallos y hojas) de tomate cv. Río Grande expuestas a diferentes concentraciones de Ti. Medias  $\pm$  DE con letras diferentes en cada variable indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ ). **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 13:** Correlación de Pearson entre la concentración de Ti y las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate c. v. Rio Grande, con distintas dosis durante 30 días. **¡Error! Marcador no definido.**



## INTRODUCCIÓN GENERAL

La salinidad afecta la producción de cultivos en el mundo, perturbando de forma directa la seguridad alimentaria de una población global creciente, estimada en 10 mil millones de habitantes para el 2050. En la actualidad este problema afecta 20% de los suelos agrícolas y 33% de la superficie bajo irrigación. La salinidad del suelo impide alcanzar el rendimiento y la calidad esperada, lo que hace necesario la búsqueda de tecnologías que permitan contrarrestar el exceso de sales potencialmente tóxicas en los suelos, generar especies con mayor tolerancia, así como, incrementar el uso de compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales brindan efectos benéficos ante factores de estrés abiótico (Machado y Serralheiro, 2017; Nachshon, 2018; Hofmann *et al.*, 2020; Mora *et al.*, 2020).

Los bioestimulantes han tomado relevancia a en los últimos años, debido a que mejoran o estimulan características fisiológicas, bioquímicas y moleculares en las plantas, permitiéndoles una mejor adaptación a diferentes factores de estrés. Se definen como sustancias que pueden contener o no microorganismos, que al ser aplicados de manera foliar o al suelo, estimulan la absorción de nutrimentos, benefician el crecimiento y diferenciación, optimizan la tolerancia a diferentes tipos de estrés biótico o abiótico y mejoran la calidad y rendimiento de los cultivos (Brown y Saa, 2015; Yakhin *et al.*, 2017; Roupael y Colla, 2020).

Los bioestimulantes derivan de diversas fuentes biológicas e inorgánicas y se clasifican de la siguiente manera (du Jardin, 2015): 1) Ácidos húmicos y fúlvicos: Son macromoléculas orgánicas de estructura química compleja, resultan de la degradación de plantas y animales por medio de la microbiota (López-Salazar *et al.*, 2014). 2) Hidrolizados de proteína: Son compuestos de aminoácidos que se obtienen mediante hidrólisis de proteínas químicas y enzimáticas a partir de residuos de cultivos o desechos de animales (Halpern *et al.*, 2015). 3) Extractos de algas: Pueden contener polisacáridos como ficocoloides, alginatos y carragenanos (Craigie, 2011). 4) Quitosano: Es la forma desacetilada del polímero quitina abundante en organismos marinos, se produce de forma

natural o industrial (López-Corona *et al.*, 2019). 5) Compuestos inorgánicos: Entre ellos destacan los elementos no esenciales llamados benéficos como el aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), lantano (La), selenio (Se), silicio (Si), sodio (Na), titanio (Ti), vanadio (V) y yodo (I), están presentes en suelos en formas solubles e insolubles (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). 6) Hongos y bacterias benéficas: Son organismos vivos que tienen su lugar de acción en raíces, aunque las bacterias se extienden hacia el interior celular interactuando de manera simbiótica con las plantas (Mendoza-Hernández *et al.*, 2019).

Los elementos como el Si, Ti y V, se consideran benéficos para las plantas, debido a que promueven el crecimiento, mejoran la resistencia al estrés abiótico como sequía, salinidad, temperatura (alta o baja), radiación y toxicidad por metales (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). Se ha demostrado que el Si mejora la estructura de los cloroplastos y reduce la degradación de membranas en células de las hojas (Liang, 1999), mitiga efectos negativos de la radiación UV (Lou *et al.*, 2016), promueve la acumulación de osmolitos osmoprotectores como la prolina (Abdel-Latef y Tran, 2016) y mejora el estatus hídrico de las plantas (Ahmed *et al.*, 2011). Por otro lado, el Ti incrementa procesos fotosintéticos, transpiración y conductancia estomática (Qi *et al.*, 2013), mejora el rendimiento y calidad de frutos (Choi *et al.*, 2015) y activa enzimas antioxidantes (Khan, 2016). Mientras que el V afecta positivamente el coeficiente de velocidad de germinación y la longitud de vástago (Buendía-Valverde *et al.*, 2018) y mejora el contenido de clorofilas y la asimilación fotosintética (García-Jiménez *et al.*, 2018; Nawaz *et al.*, 2018a).

El cultivo de tomate es de gran importancia económica en el mundo, India y China produjeron el 44% de una producción mundial de 7.3 millones de Mg en 2017. Estados Unidos de América es el principal importador mundial con 1.7 millones de Mg, lo que es igual al 26% del volumen de importaciones mundiales. La tendencia de crecimiento de este país es al alza en sus importaciones, su tasa media de crecimiento anual es de 7.8%. Canadá es el noveno importador mundial de la hortaliza con 215 mil Mg anuales (SADER, 2019; FAOSTAT, 2019).

México se ha consolidado como primer exportador de tomate desde el 2015, y en el 2017 exportó 1.7 millones de Mg, equivalentes al 24% del volumen mundial exportado; esto le ha permitido que, en la última década, su tasa media de crecimiento anual sea de 5.8%. Aunque la superficie destinada al cultivo de tomate se ha reducido en los últimos años, el crecimiento en la producción ha incrementado en 54.2%, lo mismo que sus importaciones (77.8%), permitiéndole ser el principal proveedor a nivel mundial. Tan solo en el 2017, el volumen cosechado fue de 631 mil Mg respecto al obtenido en 2012. El principal mercado destino es EUA, ya que México le exporta el 90.1% del tomate que ese país consume, secundado por Canadá, quién importa el 65.3% del tomate mexicano. (SAGARPA, 2017; SIAP, 2019). El objetivo de este trabajo fue evaluar las respuestas fisiológicas, bioquímicas, nutricionales y en calidad de fruto a la aplicación foliar de Si, Ti, y V, en plántulas y frutos de tomate bajo estrés por salinidad.

# **CAPÍTULO I. SILICIO AFECTA PORCENTAJE DE JUGO, LICOPENO, FIRMEZA Y PARÁMETROS DE COLOR EN FRUTOS DE TOMATE BAJO ESTRÉS SALINO**

## **1.1. RESUMEN**

La salinidad como factor de estrés en los cultivos decrece la producción y el rendimiento. El silicio (Si) es un elemento no esencial con potenciales beneficios en plantas superiores sometidas a algún factor de estrés biótico o abiótico. En esta investigación se evaluaron los efectos de dos factores de estudio: 1) Aplicación de 0, 50 y 100 mM NaCl a través de la solución nutritiva de Steiner y 2) Aspersión foliar de 0, 75 y 150 mg Si L<sup>-1</sup> a partir de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silicio), en el porcentaje de jugo, la concentración de licopeno, firmeza y parámetros de color en frutos de tomate cv. Río Supremo. Las dosis de NaCl evaluadas redujeron el porcentaje de jugo, la firmeza, la concentración de licopeno, el índice de color, la relación a/b, y el croma. Por el contrario, el estrés salino incrementa el índice b y la luminosidad. En tanto que, el Si afectó negativamente el porcentaje de jugo y la concentración de licopeno, además de que, redujo el índice de color y relación a/b. Sin embargo, mejora la firmeza y la luminosidad, e incrementa el índice b. Por lo consiguiente, se recomienda aplicar Si en las plantas de tomate cv. Río Supremo debido a que estimula biomoléculas relacionadas con calidad de fruto.

**Palabras clave:** Elemento benéfico, salinidad, calidad de frutos, *Solanum lycopersicon*.

## 1.2. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la superficie total de suelos salinos es de 397 millones de ha; existen 45 millones de ha de suelos irrigados afectados por salinidad, los cuales representan la tercera parte de los utilizados para producción de alimentos (Rouphael *et al.*, 2018). En el continente americano, el área total destinada a cultivos es de 3.9 millones aproximadamente, 65.1% de ésta tiene problemas de salinidad (FAO, 2020). En México, este problema se ha acrecentado debido a los altos índices de evaporación en zonas de agua subterránea somera, al uso de aguas de riego salobres, a la intrusión salina hacia los mantos freáticos en las zonas costeras y por efectos del cambio climático (CONAGUA, 2018). Las sales en exceso en el suelo, son un factor de estrés que afecta procesos metabólicos en la planta, ya que, la presión osmótica que se genera en la rizósfera induce menor absorción de agua, provocando desequilibrios iónicos y nutrimentales. Por otro lado, la sobre acumulación de sodio y cloruro en el citosol incrementa el estrés oxidativo, interfiere en la absorción de potasio y calcio, además de, desequilibrar la absorción y translocación de nitrato (Rouphael *et al.*, 2018), todo ello incide negativamente en el crecimiento y diferenciación de los cultivos, además de limitar la producción y reducir el rendimiento (Avestan *et al.*, 2019).

El cultivo de tomate tiene una tolerancia media a la salinidad. Por ser una especie glicófita soporta conductividades eléctricas no mayores de  $2.5 \text{ dS m}^{-1}$ . La salinidad afecta la germinación de las semillas, reduce la elongación lateral y vertical de la raíz, induce la disminución de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, reduce el contenido de clorofilas, capacidad fotosintética y decrece el tamaño y cantidad de los frutos. Sin embargo, mejora características organolépticas al incrementar ácidos orgánicos y azúcares (Goykovic y Saavedra, 2007; Mozafariyan *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016; Hernández-Fuentes *et al.*, 2017). Por otro lado, el silicio (Si) es de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (el segundo después del oxígeno con 27% de su composición). En plantas superiores no es considerado esencial. Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado funciones benéficas de éste ante factores de

estrés biótico y abiótico; además de que constituye entre el 0.1 y el 10% de su biomasa seca (Safoora *et al.*, 2018; Gómez-Merino y Trejo-Tellez, 2018). En plantas de tomate, induce tolerancia a infecciones por *Orobancha ramosa* (Madany, 2020), mejora el rendimiento comercial y la calidad de los frutos (Marodin *et al.*, 2014), además de la calidad poscosecha (Marodin *et al.*, 2016). En árboles de aguacate, aplicaciones de  $K_2SiO_3$  mejoraron la calidad de los frutos y el rendimiento (Dann y Le, 2017). También, la aplicación foliar de  $K_2SiO_3$  en árboles de níspero (*Eriobotrya japonica*, Lind.) cv. Emanuel, incrementó el cuajado, número, peso y calidad de los frutos (El Kholy *et al.*, 2018). Debido a que, el Si tiende a acumularse en la epidermis de los frutos y refuerza paredes celulares mejorando la calidad de los frutos, el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de Si en tres dosis (0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>) vía foliar a plantas de tomate cv. Río Supremo, sometidas a estrés salino (a partir de NaCl, con las dosis 0, 50 y 100 mM NaCl), en variables de calidad de fruto.

## **1.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.3.1. Condiciones experimentales y material vegetal**

El experimento se llevó a cabo en un invernadero tipo túnel con malla antiáfido en laterales y cubierta plástica con ventana cenital. Por medio de un Data Logger (Onset Hobo) se midieron las temperaturas medias diurna y nocturna (31.7 y 15.1 °C, respectivamente), humedad relativa durante el día y la noche (30 y 86.9%), además de la duración del fotoperiodo, la cual fue en promedio de 11.3 h con intensidad luminosa media de  $137 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Se usó semilla de tomate híbrido cv. Río Supremo de porte determinado. Éstas se sembraron en charolas de 200 cavidades con turba como sustrato para obtener plántulas. Treinta y dos días después de la siembra (dds), las plántulas se trasplantaron a bolsas de polietileno negro calibre 400, de 30 x 30 x 30 cm, las cuales contenían tezontle como sustrato (tamaño de partícula entre 5 y 6 mm).

### **1.3.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental**

Se estableció un diseño experimental completamente al azar en un arreglo factorial  $3^2$ , el primer factor de estudio fue la concentración de cloruro de sodio (NaCl) en la solución nutritiva con tres niveles (0, 50 y 100 mM, con valores de conductividad eléctrica de 2, 7 y 12 dS  $\text{m}^{-1}$  considerando la concentración de la solución nutritiva). Se usó la solución nutritiva (SN) de Steiner (Steiner, 1984). La aplicación foliar de Si suministrado a partir de  $\text{SiO}_2$  (Sigma Aldrich) en tres niveles (0, 75 y 150  $\text{mg L}^{-1}$ ) se consideró como el segundo factor de estudio. Con la combinación de los factores y niveles se obtuvieron nueve tratamientos, y cada tratamiento tuvo nueve repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta de 61 días después de la siembra (dds), trasplantada en una bolsa de polietileno negro calibre 400 (dimensiones y contenido, descritos anteriormente). Se realizó una poda de yemas axilares a las plantas, para llevar a un solo tallo. Los tutores de los tallos fueron cintas de rafia. Las unidades experimentales se

colocaron en el invernadero a una distancia de 0.3 m de separación entre plantas y 0.8 m entre hileras.

Al momento de establecer el experimento, se consideró la aplicación del riego mediante un sistema por goteo en espagueti, para esto se colocaron nueve tanques de 200 L, cada contenedor contaba con una bomba de  $\frac{1}{2}$  HP, un ramaleo de PVC con regreso al tanque regulado con una válvula y una línea de salida con un filtro de anillos, la cual estaba conectada a una manguera negra agrícola de 16 mm con tres goteros por contenedor. Cada gotero contaba con una cruceta para cuatro tubines y cada tubín con una estaca que iba directo a la unidad experimental. La adición de las concentraciones de NaCl a las soluciones nutritivas inició 61 dds. Se aplicaron ocho riegos de un minuto cada dos horas al día, cada gotero aplicaba 100 mL de SN, por lo que cada unidad experimental recibía 800 mL de solución nutritiva al día. En días nublados se disminuían a cinco riegos al día.

Las aspersiones foliares con Si iniciaron 62 dds. Todas las aplicaciones se realizaron a las 6:00 h, asperjando las plantas hasta punto de goteo con un promedio de volumen de solución de 50 mL por planta. Para una mayor adherencia de la solución asperjada a la lámina foliar, se adicionó el surfactante Tween<sup>TM</sup> 20 a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>. Se realizaron ocho aplicaciones foliares en intervalos de 10 días entre aplicaciones.

### **1.3.3. Variables evaluadas**

Las variables de calidad se evaluaron en frutos del segundo racimo en el estado de madurez conocido como rojo según la UPOV (2001). Se determinó el peso de fruto completo usando una balanza analítica (ADAM, modelo CQT1501), posteriormente se obtuvo el jugo del tomate con un extractor (Hamilton Beach, modelo: 67606-MX) y se estimó el porcentaje del peso total de fruto que correspondió al jugo. La variable firmeza se determinó con un texturómetro (Chantillón marca Force Five, modelo FDV-30) con punta cónica de 8 mm de diámetro, en la zona ecuatorial del fruto. Se estimó la concentración de licopeno



empleando la ecuación siguiente propuesta por Arias *et al.* (2000), e índice de color (Domene y Segura, 2014) como a continuación se describe:

Licopeno (mg 100 g<sup>-1</sup> peso fresco) = 11.848 x (a/b) + 1.5471

$$IC = \frac{2000 a}{L \sqrt{a^2 + b^2}}$$

Donde “a” y “b” son los parámetros obtenidos con el colorímetro.

Los parámetros de color L (luminosidad), a (tonalidades de color verde con valores negativos o positivos para rojo) y b (valores negativos con tonalidades hacia el amarillo o positivo hacia el azul) se determinaron en dos puntos opuestos de la zona ecuatorial de cada fruto usando un colorímetro (Hunter Lab, modelo D25-PC2). Con los datos obtenidos en los parámetros antes mencionados, se calcularon la relación a/b (Domene y Segura, 2014), además del índice de saturación (croma) y el ángulo Hue (Domene y Segura, 2014) como se describe a continuación:

$$\text{Croma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

$$\text{Hue} = \arctan (b/a)$$

#### **1.3.4. Análisis estadístico**

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), usando el software SAS (SAS Institute Inc., 2011).

## 1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.4.1. Efectos del NaCl y Si en porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate

#### Porcentaje de jugo

Los cultivos afectados por la salinidad presentan estrés osmótico a nivel radicular, es decir, concentraciones altas de sal en la solución del suelo reducen el potencial hídrico en la rizosfera de la planta, provocando menor absorción de agua y déficit hídrico en sus órganos (Yang y Guo, 2017). En nuestro estudio, el factor NaCl afectó significativamente el porcentaje de jugo de fruto (**Figura 1a**), esta variable se vio disminuida en 24 y 20% con la adición de 50 y 100 mM respectivamente, en comparación con el testigo.

El Si absorbido tiende a depositarse en células de las hojas, esta deposición se ha observado en pared celular de células guarda, provocando ligeras deformaciones y cambios estructurales que afectan la apertura de los estomas reduciendo la conductancia estomática y el flujo transpiratorio (Agarie *et al.*, 1998; Vandegeer *et al.*, 2021). En este sentido, es posible que las dosis utilizadas en esta investigación afectaran el contenido de humedad de la planta, así como la de los frutos, ya que se observó, que los tratamientos 75 y 150 mg Si L<sup>-1</sup> decrecieron el porcentaje de frutos, aunque solo el decremento de 12% de la dosis 75 mg Si L<sup>-1</sup> fue significativo al ser comparado con el testigo (**Figura 1c**). Nuestros resultados no son consistentes con estudios anteriores, los cuales encontraron que el Si incrementó el contenido de jugo estudiada en otras especies, por ejemplo: Árboles de naranja cv. Olinda Valencia tratados con K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> con dosis de 2 y 4%, los frutos mostraron mayor contenido de jugo al momento de la cosecha, en comparación con su testigo (Mshraky *et al.*, 2016) y en árboles de granada cv. Manfalouty con cuarenta años de edad, el porcentaje de jugo fue mayor cuando se aplicaron dosis foliares con 0.5 y 1% de K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, al compararse con su testigo (Masoud *et al.*, 2018). El efecto interactivo de los factores de estudio fue significativo (**Figura 1e**); las dosis de Si disminuyeron el

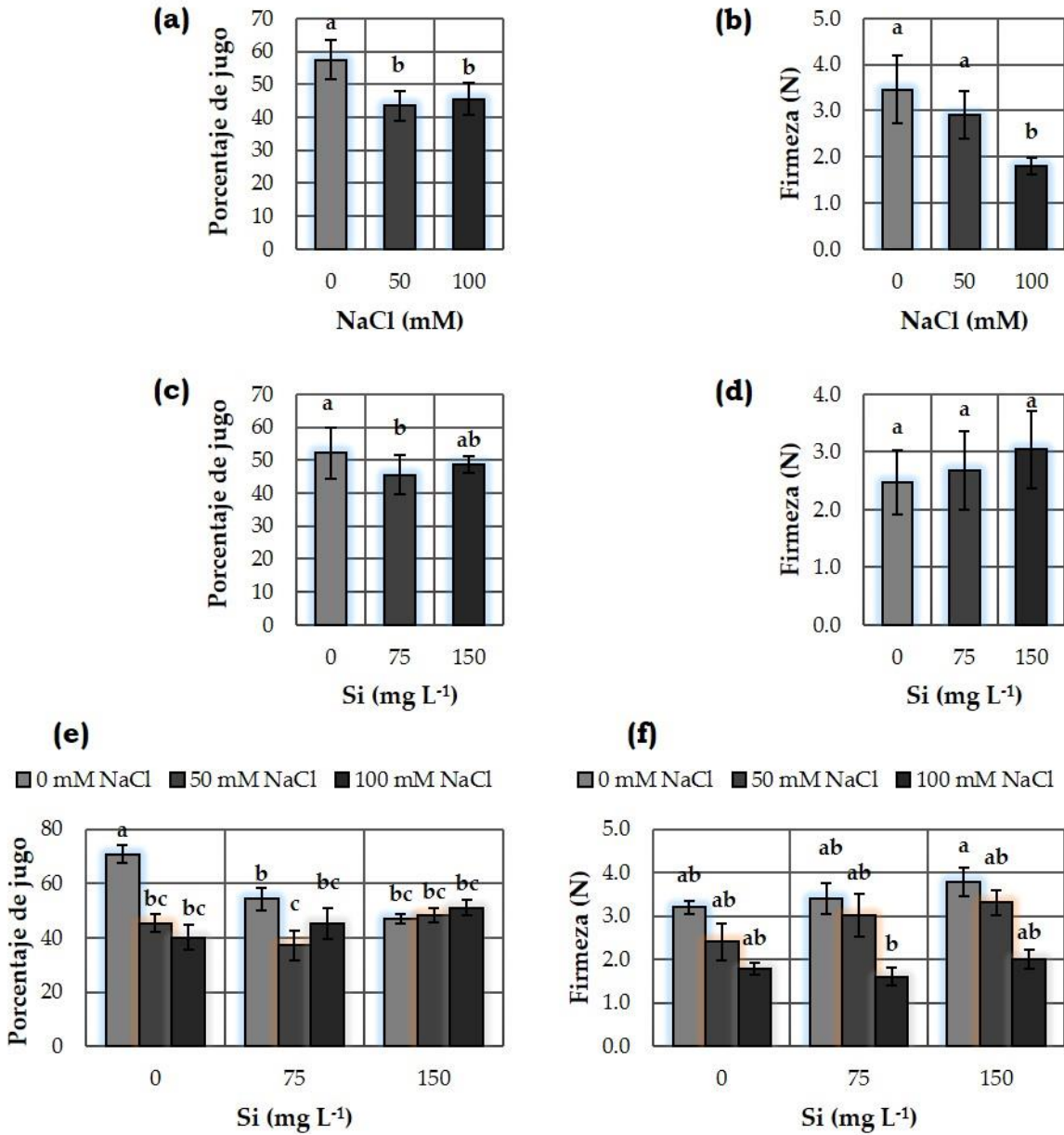
porcentaje de jugo aún en combinación con el NaCl en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin Si.

## **Firmeza**

La firmeza en frutos de tomate es un indicador de calidad importante para el consumidor final, ya que se ha demostrado que prefiere frutas firmes. Mientras que, para la industria es una característica que les permite un mejor transporte y una mayor vida útil del producto (Zahedi *et al.*, 2012). Diversas investigaciones realizadas en frutos de tomate de distintas variedades han demostrado que el estrés salino tiene efectos positivos en la variable firmeza, este efecto puede deberse a que las sales en altas concentraciones estimulan la dureza del epicarpio (Ruíz *et al.*, 2015). Por ejemplo, en plantas irrigadas con solución nutritiva a una conductividad eléctrica (CE) de 4.8 dS m<sup>-1</sup>, los frutos mostraron mayor firmeza (Stamatakis *et al.*, 2003). En frutos del cv. Momotaro Fight se encontró mayor firmeza al aplicar solución nutritiva adicionada con NaCl a una CE de 5 dS m<sup>-1</sup> (Sato *et al.*, 2006). En el cv. Durinta F<sub>1</sub> tratado con cinco niveles de NaCl (3, 4, 5, 6 y 7 dS m<sup>-1</sup>), mostraron mayor firmeza conforme se incrementó el nivel salino (Qaryouti *et al.*, 2007). De igual manera, plantas de tomate Cherry cv. West Virginia 106, irrigadas con 0, 25, 50, 75, 100 y 150 mM NaCl (1.2, 2.6, 5.4, 8.1, 10.7 y 15.8 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente), la mayor firmeza del fruto se encontró con la aplicación de las dosis 75, 100 y 150 mM (El-Mogy *et al.*, 2018). También, en la cv. Belladona, sus frutos fueron más firmes al aplicarles 50 mM NaCl (Costan *et al.*, 2020), en todos los casos al compararse con su testigo. Sin embargo, este efecto no fue observado en nuestro estudio, ya que el tratamiento 100 mM NaCl disminuyó la firmeza del fruto 48% en comparación con el testigo (**Figura 1b**). Por otro lado, la adición de 75 y 150 mg Si L<sup>-1</sup>, si bien no tuvo efecto significativo en la firmeza del fruto, se observa una tendencia de 8 y 23% mayor, respectivamente en comparación con el testigo (**Figura 1d**). Diferentes investigaciones han demostrado que el Si mejora la firmeza de los frutos. Se ha documentado que el Si tiende a depositarse entre la pared celular y el plasmalema en células del mesocarpio permitiendo una mayor protección física

y mecánica, esto hace que se incremente la resistencia a la punción en los frutos (Tesfay *et al.*, 2011; Luyckx *et al.*, 2017). La adición de  $K_2SiO_3$  en 2 y 4% a árboles de naranjo cv. Olinda Valencia, mejoró la firmeza del epicarpio en los frutos (Mshraky *et al.*, 2016); al aplicar vía foliar 0.1% Si en plantas de vid de siete años, se obtuvieron frutos con mayor firmeza (Bassiony e Ibrahim, 2016); al aplicar 2 mM Si vía foliar a plantas de pepino, los frutos fueron más firmes en el área del pedúnculo (González-Terán *et al.*, 2020). Este mismo efecto también fue observado en plantas de tomate, donde al utilizar 2.25 mM Si como  $K_2SiO_3$  se obtuvieron frutos más firmes (Stamatakis *et al.*, 2003). De igual manera, tomate Cherry cv. Unicornio con la dosis 20 mM Si a partir de  $SiO_2$  aumentó la firmeza de fruto (Islam *et al.*, 2018). En saladette cv. Sun 7705 al aplicar 250 y 1000 mg  $L^{-1}$  de  $SiO_2$  bajo estrés por arsénico se registró mayor firmeza de fruto (González-Moscoso *et al.*, 2019). En la cv. Belladona, con la adición de 2 mmol  $L^{-1}$   $K_2SiO_3$  en la solución nutritiva se incrementó también la firmeza de frutos (Costan *et al.*, 2020). En todos los casos, al ser comparados con su respectivo testigo.

Los efectos interactivos de los factores de estudio no mostraron diferencias significativas en la firmeza de fruto (**Figura 1f**). Sin embargo, la aplicación de ambas dosis de Si (75 y 150 mg  $L^{-1}$ ) a plantas tratadas con 50 mM NaCl, ocasionaron un incremento creciente en la firmeza de los frutos, aunque no significativo, con respecto a su testigo (50 mM NaCl y 0 mg Si  $L^{-1}$ ). La firmeza está mediada por sustancias pécticas compuestas por ácido galacturónico y por pectinas cálcicas que juegan un rol importante la fisiología estructural de los frutos, las cuales permiten la síntesis de células nuevas en la pared celular (Barazarte *et al.*, 2010; González-Terán *et al.*, 2020). Bajo estrés salino, el  $Na^+$  desplaza al  $Ca^+$  por competencia en los sitios de unión de la pared celular disminuyendo los parámetros de calidad en frutos, como la firmeza. Mientras que, el Si se deposita en la pared celular interactuando con las pectinas y el calcio, incrementando la rigidez y resistencia de los frutos (López-Cuén *et al.*, 2020).



**Figura 1:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en el porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### 1.4.2. Efectos del NaCl y Si en concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate

#### Licopeno

El licopeno es el carotenoide más abundante en tomate, representa entre el 80 y 90% de los pigmentos que dan el color rojo a los frutos y representa entre el 3 y 5% en tejido fresco, no pierde funcionalidad al ser procesado y no es tóxico. En los últimos años ha tomado mucha relevancia por sus propiedades físico-químicas en la prevención de enfermedades provocadas por estrés oxidativo, como las cardiovasculares, neurodegenerativas, hipertensión y distintos tipos de cáncer (Waliszewski y Blasco, 2010; Cruz, *et al.*, 2013). Existe evidencia que, durante la exposición de las plantas al estrés salino, hay sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ERO) que afectan sus funciones vitales. Los carotenoides como el licopeno, actúan como mecanismo de defensa ante las ERO, eliminando el oxígeno singlete ( $O_2$ ), el anión superóxido ( $O_2^-$ ), el radical hidroxilo ( $OH^-$ ) y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) producidos por la salinidad (Kim *et al.*, 2013; Uarrota *et al.*, 2018; Ke *et al.*, 2019).

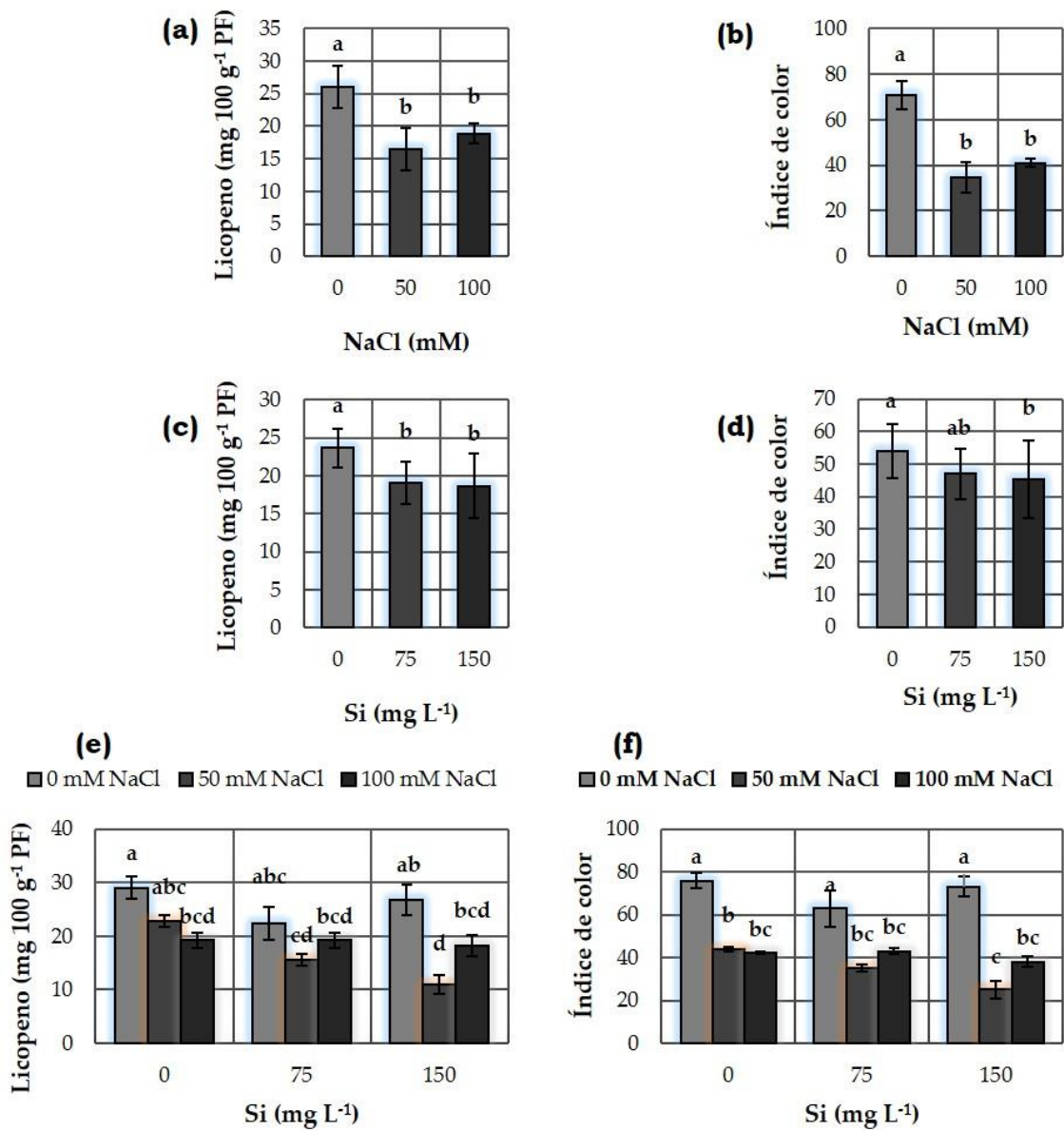
En esta investigación, la concentración de licopeno de los frutos se vio afectada con la adición de 50 y 100 mM NaCl, ya que disminuyó significativamente su concentración 37 y 27% respectivamente, al compararse con el testigo (**Figura 2a**). Este resultado es consistente con lo reportado por Stamatakis *et al.* (2003) en tomate cv. Momotaro y por Khan (2016) en el genotipo BL-1076, quienes al aplicar conductividades eléctricas mayores a 4 dS  $m^{-1}$  y dosis de 200 mM NaCl, encontraron efectos negativos de la salinidad en el contenido de licopeno en fruto. Sin embargo, y contrario a los resultados obtenidos en este estudio se han encontrado incrementos en el contenido de licopeno en frutos de tomate, al aplicar 75 mM NaCl en plantas cv. Mini Carol (Zushi y Matsuzoe, 2015).

Por otro lado, la adición de 75 y 150 mg Si  $L^{-1}$  decreció la concentración de licopeno de manera significativa en 19 y 21% respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 2c**). Diversas investigaciones han reportado aumentos en

el contenido de licopeno al suministrar Si vía solución nutritiva o foliar, ante un factor de estrés. La adición de 2.25 mM Si a partir de  $K_2SiO_3$  a la solución nutritiva aplicada a plantas de tomate bajo salinidad, incrementó el contenido de licopeno en los frutos (Stamatakis *et al.*, 2003). En tomate sometido a estrés salino cv. El-basha 1077, al suministrar Si al suelo como  $K_2SiO_3$  (0, 200 y 400  $mg\ kg^{-1}$ ), los frutos mostraron mayor contenido de licopeno al compararse con el testigo (Elkhatib *et al.*, 2017). De igual manera, plantas de tomate sometidas a estrés por As, mostraron mayor contenido de licopeno con la dosis 3.2  $mg\ As\ L^{-1}$  y 1000  $mg\ Si\ L^{-1}$  (González-Moscoso *et al.*, 2019). No obstante, estos efectos no se observaron en nuestro estudio. Los efectos interactivos de los factores de estudio no mostraron significancia estadística (**Figura 2e**).

### **Índice de color (IC)**

El color de los frutos está asociado a características organolépticas como el aroma, sabor y la textura, estas propiedades sensoriales son indicadores de frescura y calidad, las cuales determinan si el consumidor adquiere el producto (García *et al.*, 2011). Valores de IC entre 20 a 40, indican que el fruto está en una coloración de naranja a rojo oscuro (Domene y Segura, 2014). En esta investigación, los resultados obtenidos superaron este intervalo (tanto tratamientos como el testigo). Aunque, 50 y 100 mM NaCl fueron menores significativamente en 51 y 42% al ser comparado con el testigo (**Figura 2b**). Por otro lado, la aplicación de 75 y 150  $mg\ Si\ L^{-1}$ , fue menor en 13 y 16% respectivamente, en comparación con el testigo. Sin embargo, solo la dosis alta fue significativa (**Figura 2d**). Mientras que, en el efecto interactivo no fue significativo (**Figura 2f**).



**Figura 2:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en la concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).



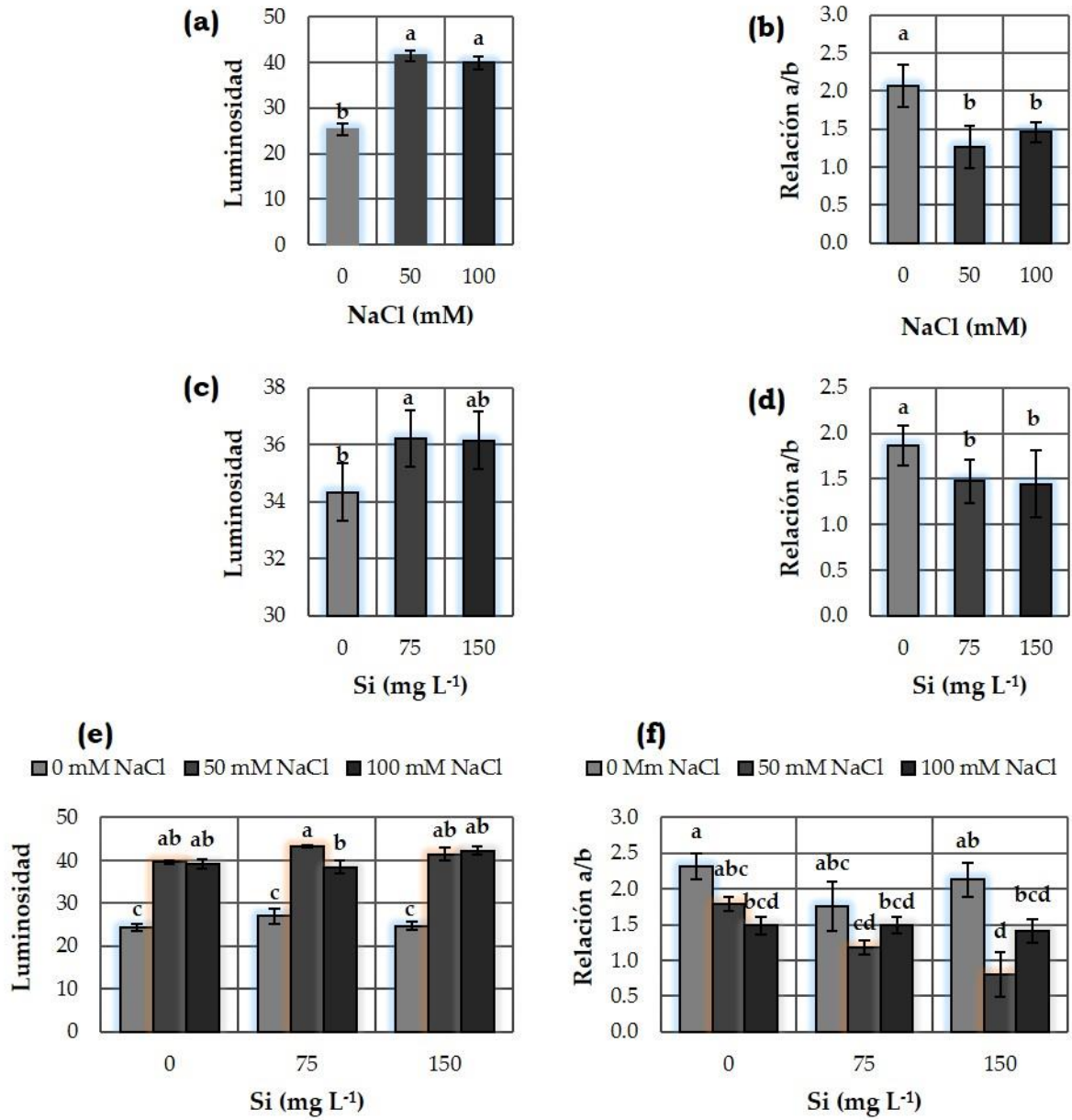
### **1.4.3. Efectos del NaCl y Si en luminosidad y relación de indicadores de color a/b de frutos de tomate**

#### **Luminosidad (L)**

La cantidad de luz que se refleja o transmite dentro de un tono entre blanco (100%) y negro (0%) se conoce como luminosidad (L), esta característica del color determina la claridad, brillantez u oscuridad de un fruto (Díaz-Pérez *et al.*, 2000). En este estudio, los frutos tratados con 50 mM NaCl tuvieron una L de 41%, en tanto que, al ser tratados con 100 mM NaCl, su L fue de 40%, esto significó un incremento de la L en 63 y 58% respectivamente, al compararse con el testigo (**Figura 3a**). Por otro lado, al aplicar Si vía foliar, las dosis 75 y 150 mg Si L<sup>-1</sup> obtuvieron una L de 36% en promedio. Sin embargo, solo se observó un incremento significativo en la L del fruto de 5.4% con la dosis 75 mg Si L<sup>-1</sup> respecto al testigo (**Figura 3c**). En ambos casos, los efectos principales de los factores de estudio mostraron frutos más brillantes y claros. Mientras que, no se encontraron efectos significativos de la interacción de los factores de estudio en la variable luminosidad del fruto (**Figura 3e**).

#### **Relación de los índices a y b**

Por otro lado, la relación de los índices a y b se vio afectada por la salinidad de forma significativa (**Figura 3b**), ya que las dosis 50 y 100 mM NaCl decrecieron esta relación 39 y 29% respectivamente, en comparación con el testigo. Así también, la aplicación de Si en dosis de 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>, decreció de forma significativa en 21 y 23% esta variable (**Figura 3d**). En cuanto a los efectos interactivos, el tratamiento con 50 mM NaCl y 150 mg Si L<sup>-1</sup> (**Figura 3f**), se observó el valor más bajo y significativo (55% en comparación con el tratamiento 50 mM NaCl y 0 mg Si L<sup>-1</sup>, y 65% al compararse con el tratamiento 0 mM NaCl y 0 mg Si L<sup>-1</sup>).



**Figura 3:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en luminosidad y relación de los indicadores de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### **1.4.4. Efectos del NaCl y Si en los indicadores de color a y b de frutos de tomate**

La máxima calidad organoléptica de un fruto de tomate es en su estado de madurez con coloración rojo brillante, este es resultado de la síntesis de carotenoides, mayormente licopeno. Dentro de los intervalos propuestos por Cantwell *et al.* (2007) los valores en índices a y b para la etapa de coloración del fruto “rojo brillante” son 26.4 y 23.1, respectivamente.

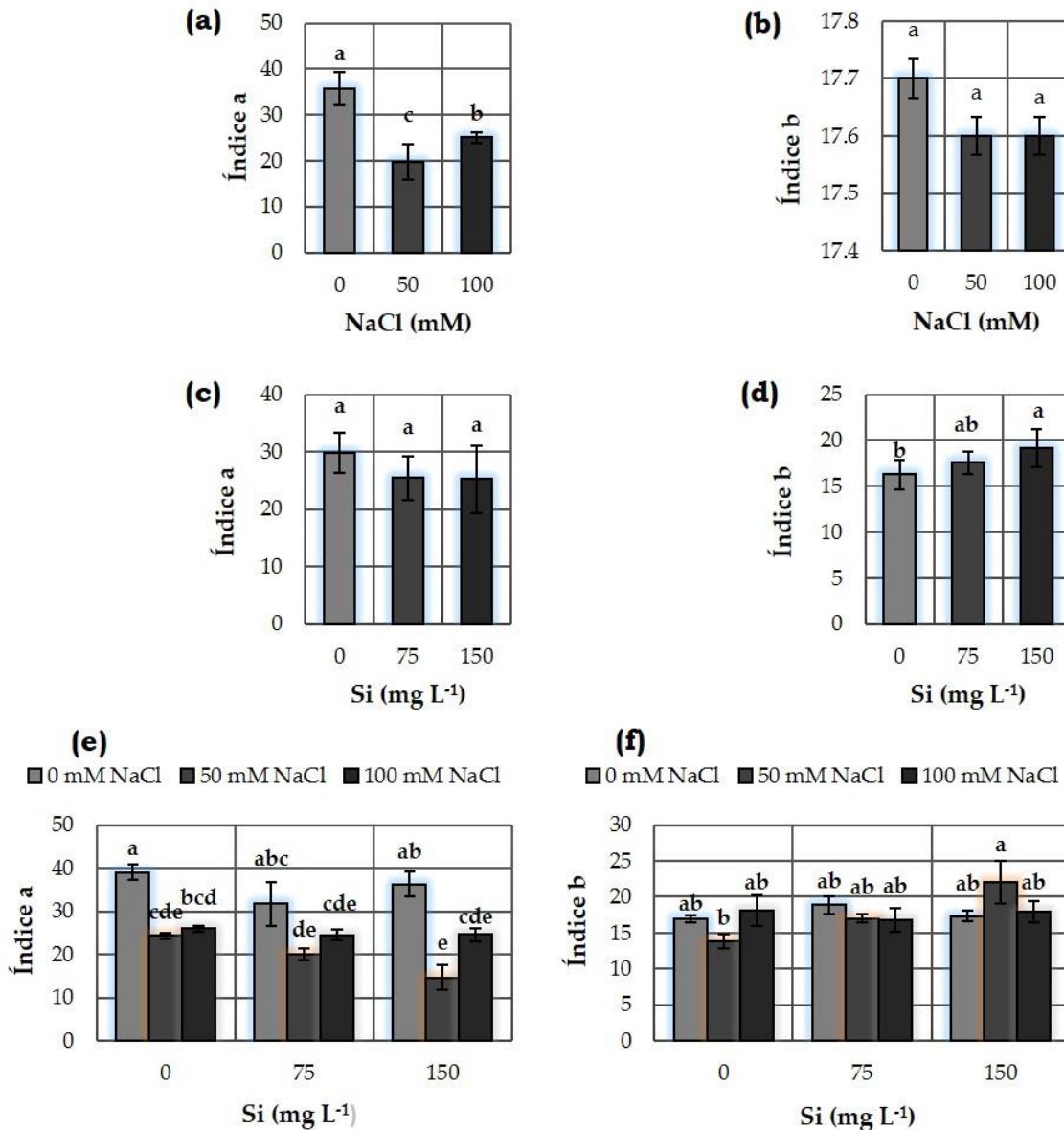
##### **Índice a**

En nuestro estudio, observamos que los tratamientos con NaCl (50 y 100 mM) redujeron el índice “a” de los frutos significativamente (45 y 30% con respecto al testigo). Es decir, los frutos tratados sin salinidad mostraron el mayor valor de índice “a” (35.6), y este valor es 35% más alto que 26.4 (referido para el color rojo brillante), por lo que entran en la clasificación de “rojo oscuro” (Cantwell *et al.*, 2007). Mientras que, con los tratamientos salinos los valores obtenidos en índice “a” fueron 20 (50 mM NaCl) y 25 (100 mM NaCl), valores cercanos y dentro de la clasificación rojo brillante, respectivamente. Por otro lado, el efecto independiente del Si (**Figura 4c**) y los efectos interactivos de los factores de estudio (NaCl × Si, **Figura 4e**), no fueron significativos en esta variable.

##### **Índice b**

Para el índice “b”, valores por debajo de 20.7 (clasificado como “rojo oscuro”) se consideran frutos maduros con calidad aceptable (Cantwell *et al.*, 2007). En los resultados obtenidos para índice “b” en esta investigación, el tratamiento sin Si (testigo) mostró el menor valor de la variable (16.2), el cual es menor a 20.7 en 22%. En tanto que, las dosis de Si aplicadas vía foliar incrementaron progresivamente la variable con medias de 17.5 (75 mg Si L<sup>-1</sup>) y 19.1 (150 mg Si L<sup>-1</sup>) lo que significó un incremento de 8 y 18%, en donde solo la dosis alta de Si (150 mg L<sup>-1</sup>) tuvo diferencia significativa con el testigo (**Figura 4d**). Si bien estos valores siguen estando por debajo de la clasificación “rojo oscuro”, se puede

apreciar que el Si mejoró esta variable. El efecto independiente del NaCl (**Figura 4b**) y los efectos interactivos de los factores de estudio (NaCl × Si, **Figura 4f**), no fueron significativos en la variable.



**Figura 4:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en índices de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### **1.4.5. Efectos del NaCl y Si en los indicadores de tono (ángulo Hue) e índice de saturación (Croma) del color de frutos de tomate**

En el espacio cromático cilíndrico, el ángulo Hue es la tonalidad que indica una tendencia del color rojo hacia el amarillo con valores de 0 a 90°. Usualmente se usa el intervalo entre 35-40° como indicador de un color rojo aceptable (rojo oscuro y rojo brillante, de acuerdo a la clasificación de Cantwell *et al.* (2007). En tanto que, para croma la tendencia es de amarillo a verde con valores de 90 a 180° e indica la cromaticidad o pureza del color y sus valores aceptables para rojo están en un intervalo de 34 y 35°, ya que cuanto menor sea el valor, más rojo es el tomate (Cantwell *et al.*, 2007; Padrón *et al.*, 2012; San Martín-Hernández *et al.*, 2012).

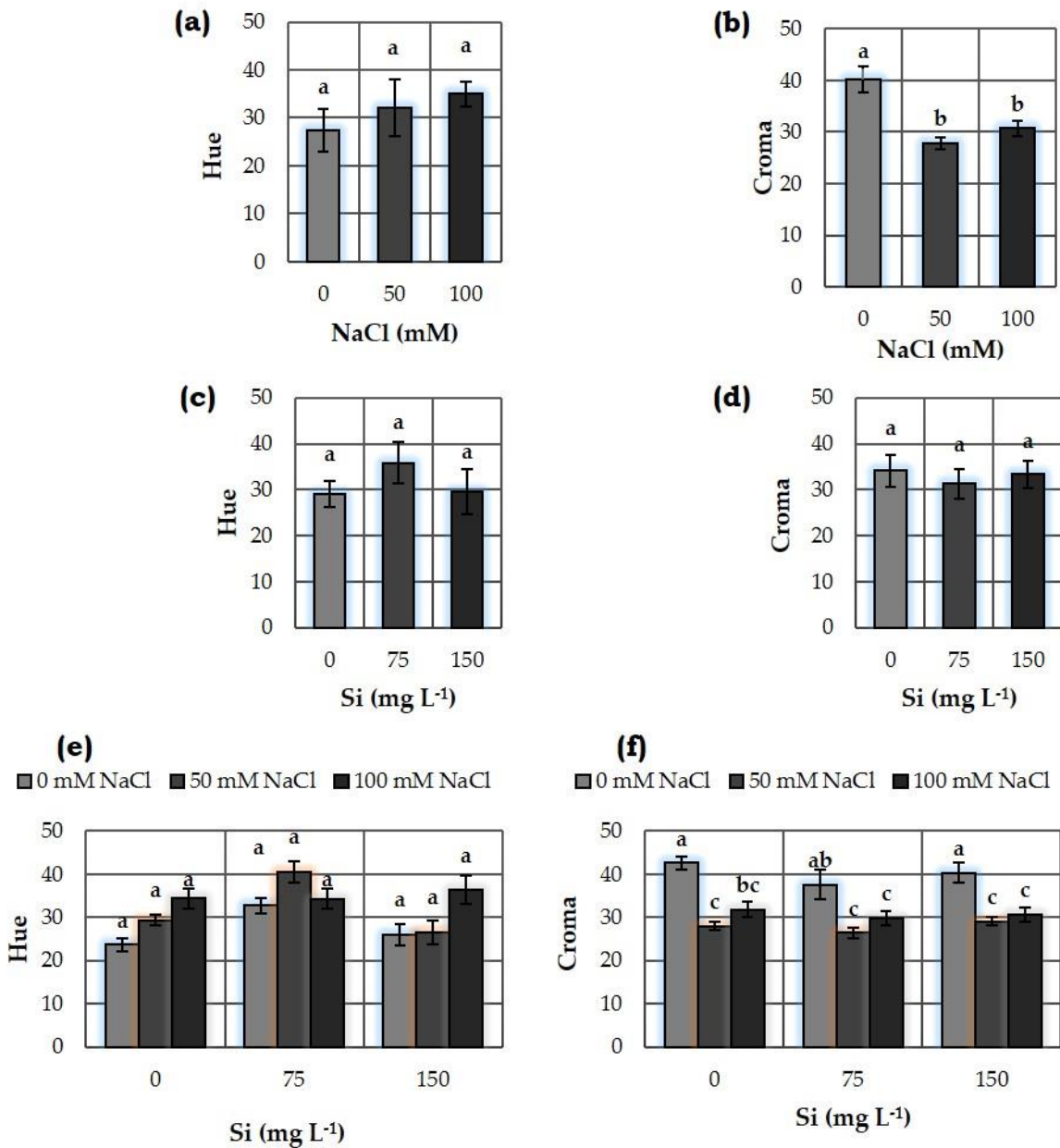
##### **Ángulo Hue**

En la **Figura 5** se puede observar que el NaCl tiene una tendencia a incrementar el ángulo Hue en los frutos de tomate conforme se aumentaron las dosis salinas. Así también, en la dosis con 75 mg Si L<sup>-1</sup> se observó el valor más alto en el ángulo Hue. Esto implica que tanto la salinidad como el Si acercaron el color de los frutos a la categoría de rojo brillante, ya que el incremento en el ángulo Hue tiende a tonos amarillentos (García *et al.*, 2009). Sin embargo, En nuestro experimento, los efectos independientes del NaCl (**Figura 5a**) y Si (**Figura 5c**), además de la interacción de los mismos (NaCl × Si, **Figura 5e**) no mostraron efectos significativos en ángulo Hue.

##### **Croma**

El valor más alto en croma fue con el tratamiento sin salinidad (40.2), este valor es 6% mayor al propuesto por Cantwell *et al.* (2007) para madurez comercial (37.9). En tanto que, los valores obtenidos con los tratamientos salinos fueron 27.8 (50 mM NaCl) y 30.8 (100 mM NaCl), lo que significa que la salinidad afectó el índice croma disminuyéndolo 31 y 24%, en comparación con su testigo (**Figura 5b**). Este efecto fue positivo, debido a que los frutos tratados con ambas dosis

salinas entran en la clasificación de “rojo oscuro”. Por otro lado, el efecto independiente del Si (**Figura 5d**) y los efectos interactivos (NaCl × Si, **Figura 5f**), no fueron significativos en el índice croma.



**Figura 5:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en índices de color Hue y croma de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## 1.5. CONCLUSIONES

Los frutos de plantas de tomate cv. Río Supremo tratados con 50 y 100 mM NaCl son afectados de forma diferencial en los parámetros de calidad. Por un lado, la salinidad redujo el porcentaje de jugo, la firmeza, la concentración de licopeno, así como, el índice de color, la relación a/b, y el croma de los frutos. Mientras que, el índice b y la luminosidad se incrementaron.

Las aplicaciones foliares de Si incrementaron la firmeza, la luminosidad y el índice b. En tanto que, redujo el porcentaje de jugo, la concentración de licopeno, el índice de color y la relación a/b.

En los efectos interactivos de los factores de estudio solo se encontraron decrementos en el porcentaje de jugo y la relación a/b.

Se concluye que, la aplicación de NaCl y Si mejoran algunas variables de calidad en frutos de tomate cv. Río Supremo.

## **CAPÍTULO II. CLORURO DE SODIO Y TITANIO AFECTAN LICOPENO, FIRMEZA Y PARÁMETROS DE COLOR DE FRUTOS DE TOMATE**

### **2.1. RESUMEN**

La salinidad es un factor de estrés abiótico que afecta el rendimiento y la calidad de los cultivos. Sin embargo, el estrés salino mejora parámetros en calidad de frutos. Por otro lado, el titanio (Ti) es el noveno elemento en la corteza terrestre, no es esencial en plantas superiores, aunque diversas investigaciones han demostrado que tiene efectos benéficos en cultivos bajo algún factor de estrés biótico o abiótico. En este contexto, se planteó como objetivo evaluar los efectos de la aplicación conjunta de NaCl (0, 50 y 100 mM) en la solución nutritiva y de Ti vía foliar (0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>) en atributos de calidad del fruto de tomate cv. Río Grande, dado que el tomate (*Solanum lycopersicon* L.) es una especie de alta importancia económica y nutracéutica para México y el mundo. Entre los resultados obtenidos destaca que la salinidad decrece el porcentaje de jugo, la firmeza, la concentración de licopeno, el índice de color, la relación entre índices a/b, el índice a además del índice croma. Por otro lado, incrementa la luminosidad y el ángulo Hue. El Ti incrementa el índice de color, índice b y croma; pero, disminuye la luminosidad. Los factores de interacción (NaCl × Ti), incrementan el porcentaje de jugo, índice de color, índice b y croma. Lo anterior indica que el Ti en las dosis utilizadas en este estudio, puede mejorar parámetros de calidad de fruto ante factores de estrés como la salinidad. Sin embargo, se recomienda realizar más estudios con Ti, en tomate y otros cultivos, a nivel fisiológico, bioquímico y molecular para una mejor comprensión del elemento en las distintas etapas fenológicas de la planta.

**Palabras clave:** Calidad de frutos, metal de transición, salinidad, *Solanum lycopersicon*, tratamiento foliar.



## 2.2. INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático han ocasionado la aparición de factores de estrés abióticos como altas temperaturas, luminosidad, sequía, entre otros, que afectan la evapotranspiración de los cultivos, que aunado a malas prácticas agrícolas y al uso de agua salobre o residual, contribuyen a la salinización de los suelos. La degradación del suelo provocada por salinidad es un factor que limita la producción de alimentos, y ésta se origina por el exceso de sales que alteran la composición química de las partículas del suelo. La acumulación salina [principalmente por cationes como sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ); además del anión cloruro ( $\text{Cl}^-$ )], incrementa el potencial osmótico en la rizósfera de los cultivos, evitando que las plantas puedan absorber agua y nutrimentos en forma suficiente e interrumpe la homeostasis de las células vegetales (Mozafariyan *et al.*, 2016; Cardona *et al.*, 2017; Roupheal *et al.*, 2018). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que el estrés salino en ocasiones toma un rol bioestimulante en las plantas y al igual que el Ti puede beneficiar parámetros fisiológicos y bioquímicos en algunos cultivos.

Por un lado, la aplicación de 30 mM NaCl en plantas de uchuva (*Physalis peruviana*) estimula parámetros de crecimiento e índice de área foliar (Miranda *et al.*, 2012). En plantas de tomate cv. Río Supremo, tratamientos con NaCl en la solución nutritiva reduce el pH del fruto, incrementa acidez titulable (AT), conductividad eléctrica (CE), concentración de sólidos solubles totales (SST) y la relación SST/AT (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020); plantas de tomate cherry cv. West Virginia 106 tratadas con 25 mM NaCl, mostraron mejoras en calidad de frutos (SST y firmeza), a su vez, mostraron una mejor vida de anaquel (El-Mogy *et al.*, 2018).

Por otro lado, el titanio (Ti) incrementa la capacidad antioxidante en fresa cv. Selva y Elkat, además del rendimiento y la calidad de frutos en el cv. Daewang (Skupien y Oszmianski, 2007; Choi *et al.*, 2015). En melocotón cv. Sevilla II y nectarina cv. Silver King, el Ti incrementa el crecimiento del fruto y la firmeza al

momento de la cosecha (Serrano *et al.*, 2004). En el cultivo de okra (*Abelmoschus esculentus* L.) influye positivamente en la germinación y en el contenido de clorofilas (Ogunkunle *et al.*, 2020); asimismo, el Ti mejora características de calidad de fruto como la relación entre sólidos solubles totales y acidez titulable (SST/AT) en tomate cv. Río Supremo (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020).

El Ti es un elemento no esencial con la capacidad de bioestimular el crecimiento y desarrollo de las plantas. La bioestimulación es un proceso integral en los sistemas de cultivos que en los últimos años ha cobrado importancia, el uso de bioestimulantes promueve el crecimiento y optimiza la producción, mediante la modificación fisiológica de las plantas. La definición más aceptada es que los bioestimulantes son materiales que, en pequeñas cantidades estimulan la absorción nutrimental, incrementan la tolerancia al estrés biótico o abiótico y mejoran la calidad de los cultivos (Du Jardin, 2015; Nardi *et al.*, 2016). Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación foliar de Ti en tres dosis (0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>) en plantas de tomate cv. Río Supremo, bajo condiciones salinas (a partir de NaCl, con las dosis 0, 50 y 100 mM), en variables de calidad de fruto.

## **2.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.3.1. Material vegetal y condiciones experimentales**

Se sembraron semillas de tomate híbrido cv. Río Supremo de porte determinado en charolas de 200 cavidades con turba como sustrato. Después de 32 días después de la siembra (dds), se hizo trasplante a bolsas de polietileno negro calibre 400 de 30 x 30 x 30 cm, conteniendo tezontle como sustrato (tamaño de partícula entre 5 y 6 mm). El trabajo experimental se realizó en un invernadero tipo túnel con malla antiáfidos en laterales y cubierta plástica con ventana cenital. Con un Data Logger (Onset Hobo) se obtuvieron las temperaturas medias diurna y nocturna (31.7 y 15.1 °C), humedad relativa durante el día y la noche (30 y 86.9%), además de la duración del fotoperiodo, la cual fue en promedio de 11.3 h con intensidad luminosa media de 137  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

### **2.3.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental**

El diseño experimental que se utilizó, fue completamente al azar en un arreglo factorial 3<sup>2</sup>. El primer factor de estudio fue el cloruro de sodio (NaCl) aplicado vía solución nutritiva con tres niveles 0, 50 y 100 mM (2, 7 y 12 dS m<sup>-1</sup>, en estos valores se considera la composición de la solución nutritiva). Se empleó la solución nutritiva universal de Steiner (Steiner, 1984). El segundo factor de estudio fue la aplicación foliar de Ti suministrado a partir de TiO<sub>2</sub> (Sigma Aldrich) en tres niveles (0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>). La combinación de los factores y niveles dio como resultado nueve tratamientos, y cada tratamiento tuvo nueve repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta de 61 dds y con cinco hojas verdaderas, trasplantada en una bolsa de polietileno negro calibre 400 (con dimensiones de 30 x 30 x 30 cm), y se usó tezontle como sustrato (tamaño de partícula entre 5 y 6 mm). Con el fin de tener un solo tallo por planta, se realizó poda de yemas axilares y éste se tutoró por medio de cintas de rafia. Las unidades experimentales se distribuyeron a una distancia de 0.3 m de separación entre plantas y 0.8 m entre hileras dentro del invernáculo.

La adición de las concentraciones de NaCl a las soluciones nutritivas inició 61 dds. El riego se realizó mediante un sistema por goteo en espagueti. Se colocaron 9 tanques de 200 L, cada contenedor contaba con una bomba de ½ HP, un ramaleo de PVC con regreso al tanque regulado con una válvula y una línea de salida con un filtro de anillos, la cual estaba conectada a una manguera negra agrícola de 16 mm con tres goteros por contenedor. Cada gotero contaba con una cruceta para cuatro tubines y cada tubín con una estaca. Durante el experimento se administraron ocho aspersiones foliares, las cuales se realizaron en intervalos de 10 días entre aplicaciones. Los tratamientos foliares con Ti iniciaron 62 dds y cada aplicación se realizó a las 6:00 am, asperjando las plantas hasta punto de goteo. El promedio de solución ocupada fue de 50 mL por planta. Para una mayor adherencia de la solución asperjada a la lámina foliar, se adición el surfactante Tween™ 20 a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>.

### **2.3.3. Variables evaluadas**

En frutos del segundo racimo cosechados según la UPOV (2001) en el estado de madurez conocido como rojo, se evaluaron las variables de calidad. El peso de fruto se determinó por medio de una balanza analítica (ADAM, modelo CQT1501), acto seguido, por medio de un extractor (Hamilton Beach, modelo: 67606-MX) se obtuvo el jugo del tomate y se estimó el porcentaje del peso total de fruto que correspondió al jugo. La variable firmeza se midió en la zona ecuatorial del fruto con un texturómetro (Chantillón marca Force Five, modelo FDV-30) con punta cónica de 8 mm de diámetro. La concentración de licopeno se estimó según la metodología propuesta por Arias *et al.* (2000), además del índice de color (Domene y Segura, 2014) como se describe a continuación:

Licopeno (mg 100 g<sup>-1</sup> peso fresco) = 11.848 x (a/b) + 1.5471

$$IC = \frac{2000 a}{L \sqrt{a^2 + b^2}}$$

Donde “a” y “b” son los parámetros obtenidos con el colorímetro.

Con un colorímetro (Hunter Lab, modelo D25-PC2) se determinaron los parámetros de color en dos puntos opuestos de la zona ecuatorial de cada fruto. Éstos fueron, L (luminosidad), a (tonalidades de color verde con valores negativos o positivos para rojo) y b (valores negativos con tonalidades hacia el amarillo o positivo hacia el azul). La relación a/b, además del índice de saturación (croma) y el ángulo Hue, se calcularon con los datos obtenidos de los parámetros antes mencionados (Domene y Segura, 2014) usando las fórmulas que a continuación se describen:

$$\text{Croma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

$$\text{Hue} = \arctan (b/a)$$

#### **2.3.4. Análisis estadístico**

Se realizaron análisis de varianza usando el software SAS (SAS Institute Inc., 2011) y pruebas de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) con los resultados obtenidos.

## 2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.4.1. Efectos del NaCl y Ti en porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate

#### Porcentaje de jugo

Cuando una planta absorbe sales en cantidades excesivas, las transporta a través del flujo transpiratorio hasta las hojas, en donde las almacena. La sobreacumulación de iones como el  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  induce un efecto tóxico a nivel celular provocando estrés iónico. Altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  citoplasmático afectan la absorción de  $\text{K}^+$ , ión importante en la apertura y cierre estomático; al verse afectada la actividad de las células guarda en las estomas, se reduce el flujo de masas, disminuyendo el porcentaje de humedad en los diversos órganos de la planta, como los frutos (Yang y Guo, 2017; Mao *et al.*, 2018). Este efecto se vio reflejado en este estudio solos con la dosis 50 mM NaCl, la cual ocasionó un decremento de en 32% el porcentaje de jugo de los frutos evaluados respecto al testigo (**Figura 6a**).

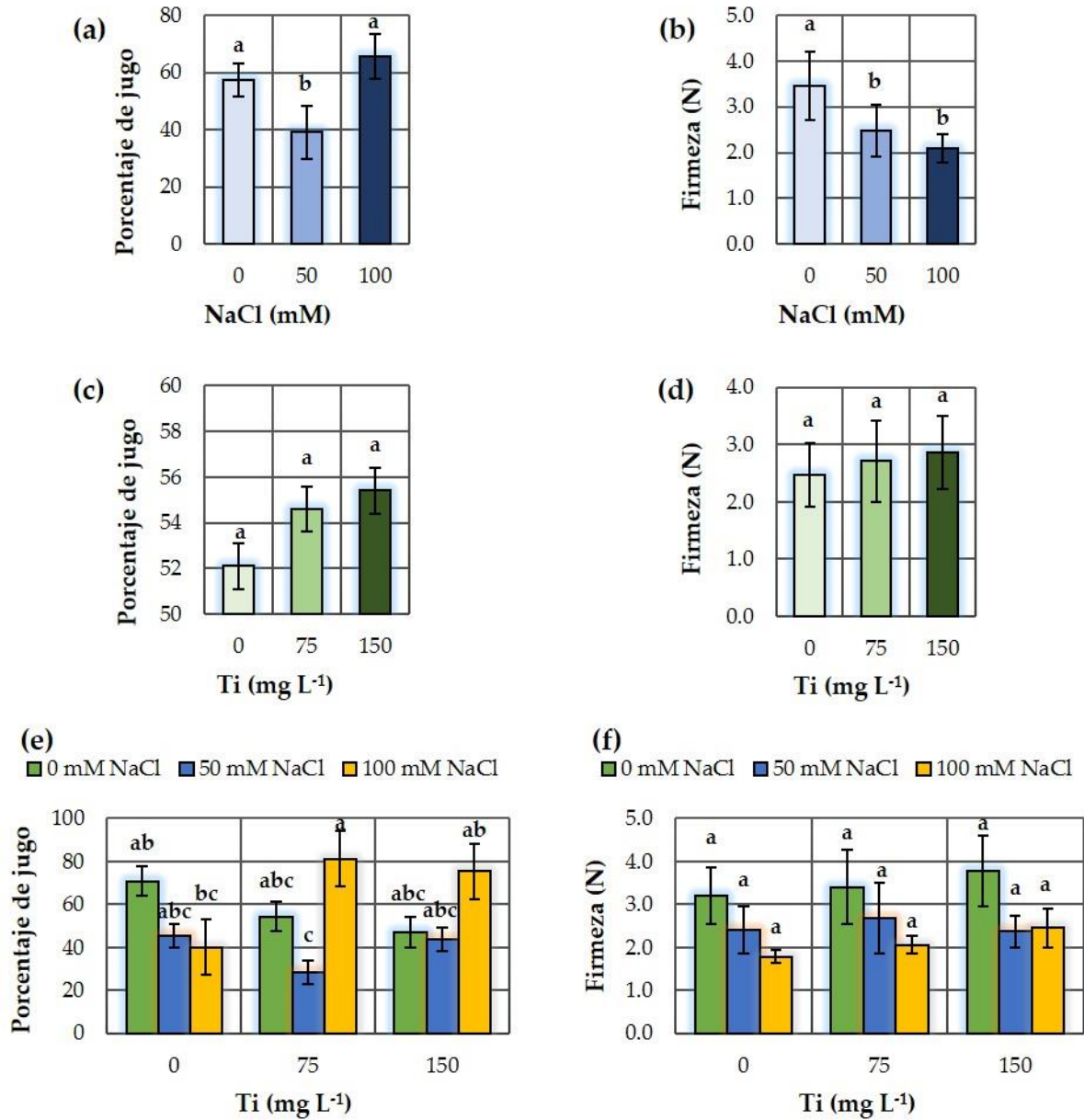
Las dosis de Ti 75 y 150 mg  $\text{L}^{-1}$  incrementaron de forma no significativa el porcentaje de jugo en 5 y 6% respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 6c**). La interacción de los factores de estudio no mostró diferencias significativas, salvo el tratamiento 100 mM NaCl con 75 mg Ti  $\text{L}^{-1}$  el cual incrementó 15% el porcentaje de jugo (**Figura 6e**).

#### Firmeza

Para el consumidor final, la firmeza es un atributo de calidad de gran importancia, así como, la apariencia, el sabor y el valor nutricional, ésta depende de la resistencia de la piel y la pulpa (Batu, 2004; Iglesias *et al.*, 2015). La firmeza comercial aceptable de los frutos de tomate oscila entre 1.45 y 1.46 N, rango que los clasifica como “muy firmes”, con valores mínimos tolerables entre 1.28 y 1.22 N catalogados como “ligeramente blandos” (Batu, 2004). En este estudio, las dosis 50 y 100 mM NaCl disminuyeron la firmeza de los frutos en forma

significativa (29 y 40%) con respecto al testigo (**Figura 6b**). Esto significó que la salinidad acercó la firmeza de los frutos al parámetro de “muy firme”, al reducirla de 3.5 N (testigo) a 2.5 y 2.1 N (50 y 100 mM NaCl, respectivamente).

Por otro lado, ensayos realizados en árboles de ciruela cv. Red Beaut de cuatro años, a los cuales se les aplicó vía foliar 0.042 mM Ti a partir de ascorbato de titanio, mostraron frutos con mayor firmeza. Esto pudo deberse a que el Ti mejora la translocación de Ca hacia los frutos, permitiendo que éste se deposite en la pared celular (Alcaraz-López *et al.*, 2003); de la misma manera, la aplicación foliar de Ti en dosis de 50, 100 y 150 mg kg<sup>-1</sup> en fresa cv. Daewang, mejoran la firmeza de fruto (Choi *et al.*, 2015). Este efecto no se observó en este estudio (**Figura 6d**), al igual que los efectos interactivos (NaCl × Ti) mostrados en la **Figura 6f**.



**Figura 6:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl × Ti (e y f) en el porcentaje de jugo y firmeza de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).



## 2.4.2. Efectos del NaCl y Ti en concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate

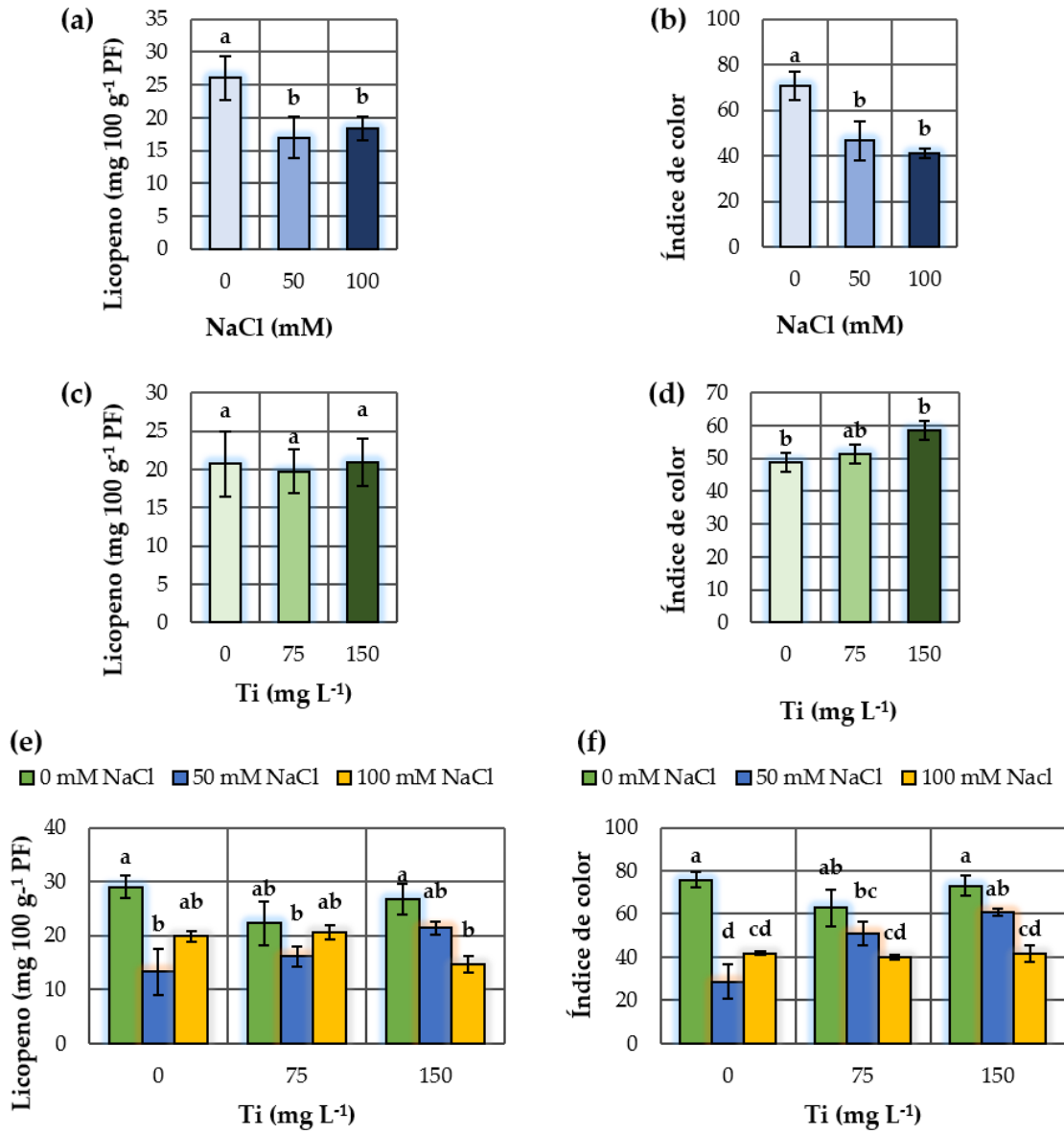
### Licopeno

De los pigmentos en frutos de tomate, el licopeno presenta concentraciones que oscilan entre el 80 y 90%. Se sintetiza en el proceso de maduración de la fruta y es precursor de carotenoides (Giannakoula e Ilias, 2013; de Cássia *et al.*, 2018). En este trabajo la concentración de licopeno en los frutos se vio disminuida (35 y 29%) por las aplicaciones salinas (50 y 100 mM NaCl), ambos valores en comparación con el testigo (**Figura 7a**). Los resultados en este estudio son consistentes con lo reportado por León-Calvario *et al.* (2020), quienes al aplicar dosis crecientes de NaCl (50, 75 y 100 mM) registraron disminución en la concentración de licopeno. De igual manera, Stamatakis *et al.* (2003) y Khan (2016), encontraron que la concentración de licopeno en variedades Momotaro Fight y genotipos BL-1076 disminuye con conductividades eléctricas mayores a 4 dS m<sup>-1</sup> y dosis de 200 mM de NaCl, respectivamente. Por otro lado, el Ti en su efecto independiente (**Figura 7c**) y los efectos interactivos (NaCl × Ti) mostrados en la **Figura 7e** no fueron significativos.

### Índice de color

La percepción del color por el ojo humano depende del paso de la luz a través de la córnea y del proceso de información por parte del cerebro. El índice de color es un parámetro que describe matemáticamente los colores por medio del espacio de color CIE-L\*a\*b\* y sirve para evaluar el color de los frutos, y deducir la aceptación del fruto por parte del consumidor final. En tomate la degradación de clorofila y la síntesis de licopeno en cloroplastos dictan el cambio de color de verde a rojo (Borghesi *et al.*, 2011; Benito-Bautista *et al.*, 2016). En este experimento, El índice de color fue disminuido en 39 y 42% con las dosis (50 y 100 mM NaCl) con respecto al testigo (**Figura 7b**). Lo anterior es consistente con los resultados obtenidos con la variable licopeno, al verse disminuido la concentración de licopeno con la adición de las dosis salinas, el índice de color

de los frutos también se vio afectado. Por otro lado, la dosis 150 mg Ti L<sup>-1</sup> incrementó el índice de color 20% al compararse con el testigo (**Figura 7d**). En cuanto a las interacciones de los factores de estudio, los tratamientos consistentes en 50 mM NaCl con 75 o 150 mg Ti L<sup>-1</sup> incrementaron el índice de color en 77 y 112% respectivamente, en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin Ti como se muestra en la **Figura 7f**.



**Figura 7:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl × Ti (e y f) en la concentración de licopeno e índice de color de frutos de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### 2.4.3. Efectos del NaCl y Ti en luminosidad y relación de indicadores

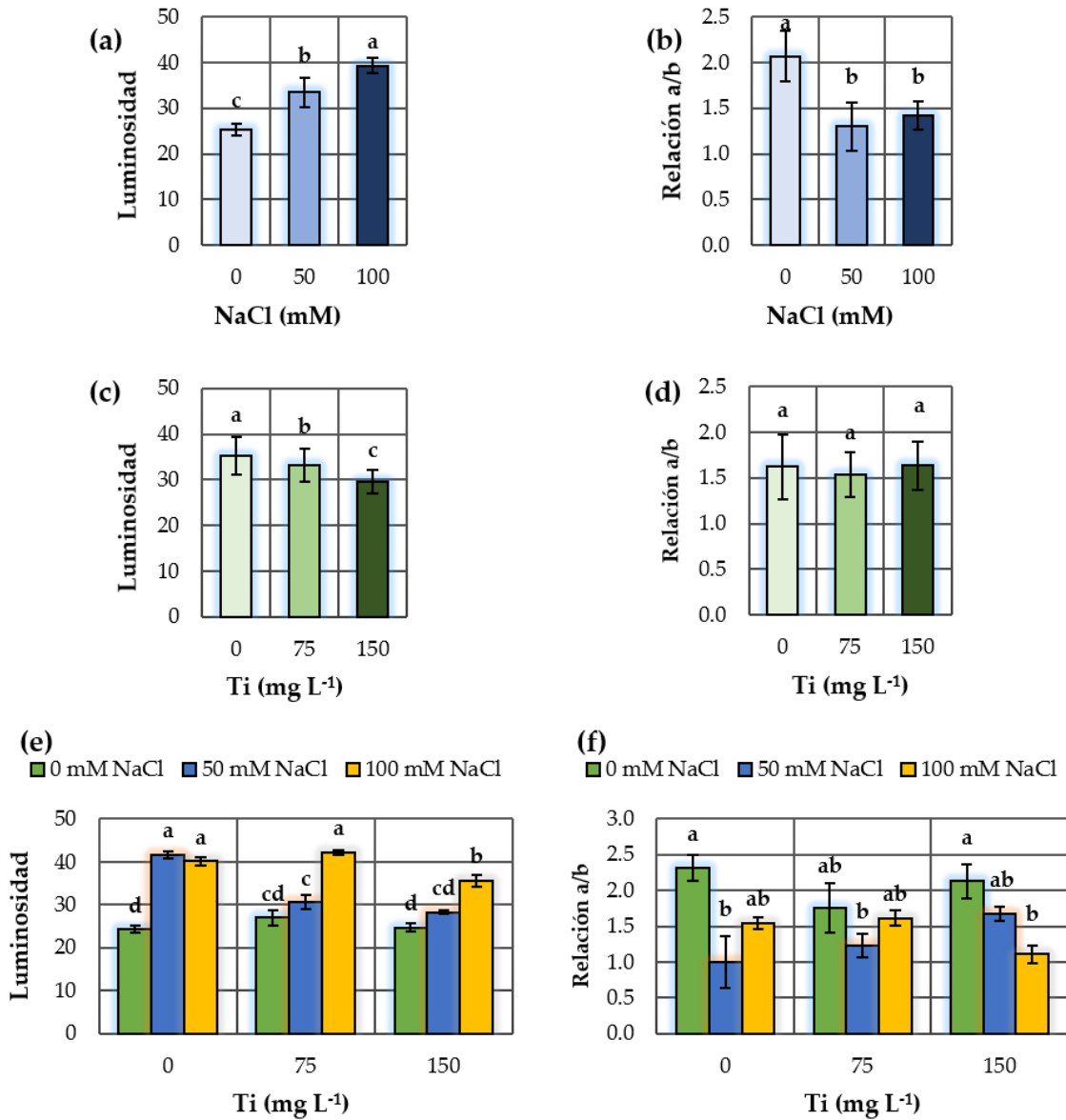
#### Luminosidad (L)

En el espacio de color CIELab, el parámetro L se usa para contabilizar la transmitancia de luz que confiere la claridad, la brillantez u oscuridad en un objeto. En frutos de tomate la clasificación “rojo brillante” se encuentra en un intervalo de 39 a 41 (Cantwell *et al.*, 2007; Díaz-Pérez *et al.*, 2000; San Martín *et al.*, 2012). En el testigo y 50 mM NaCl los valores de L fueron 25 y 33, que se sitúan debajo de la clasificación rojo brillante; mientras que, con la dosis 100 mM NaCl se obtuvo el valor más alto (39), lo que clasificó a los frutos como rojos brillante. Es decir, las dosis 50 y 100 mM NaCl mejoraron en 32 y 55% la luminosidad del fruto, respecto al testigo (**Figura 8a**). Este resultado es consistente a lo reportado por Saito *et al.* (2008), quienes demostraron que frutos de tomate cv. House Momotaro fueron más brillantes al aplicarles NaCl (50 mM). Por otro lado, los valores obtenidos con las aplicaciones foliares de 75 (33) y 150 (29) mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyeron significativamente la luminosidad del fruto respecto al testigo (35), el color de los frutos en tratamientos, así como del testigo, entran en la clasificación “rojo oscuro” (**Figura 8c**). En los efectos de interacción de los factores de estudio, los tratamientos consistentes en 50 mM NaCl con 75 y 150 mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyeron en promedio 29% la luminosidad del fruto con respecto al testigo. De igual manera el tratamiento 100 mM NaCl con 150 mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyó la luminosidad del fruto en 11% con respecto al tratamiento sin NaCl y sin Ti (**Figura 8e**).

#### Relación de los índices a y b

La reducción en los valores de la relación de los índices a y b, indican una mayor acumulación de pigmentos verdes; en frutos maduros con coloración rojiza los valores tienden a incrementar (Massaretto *et al.*, 2018). En frutos tratados con 50 y 100 mM NaCl, fueron 1.3 y 1.4 respectivamente, es decir, la relación a/b fue reducida en 37 y 31%, al compararse con el testigo (2.1). En otras palabras, los frutos tratados con NaCl no tuvieron un color rojo opaco, sino rojo brillante

(Figura 8b). Por otro lado, el efecto independiente del Ti (Figura 8d) y los efectos interactivos de ambos factores de estudio (Figura 8f) no fueron significativos.



**Figura 8:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl × Ti (e y f) en luminosidad y relación de los indicadores de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### **2.4.4. Efectos del NaCl y Ti en los indicadores de color a y b de frutos de tomate**

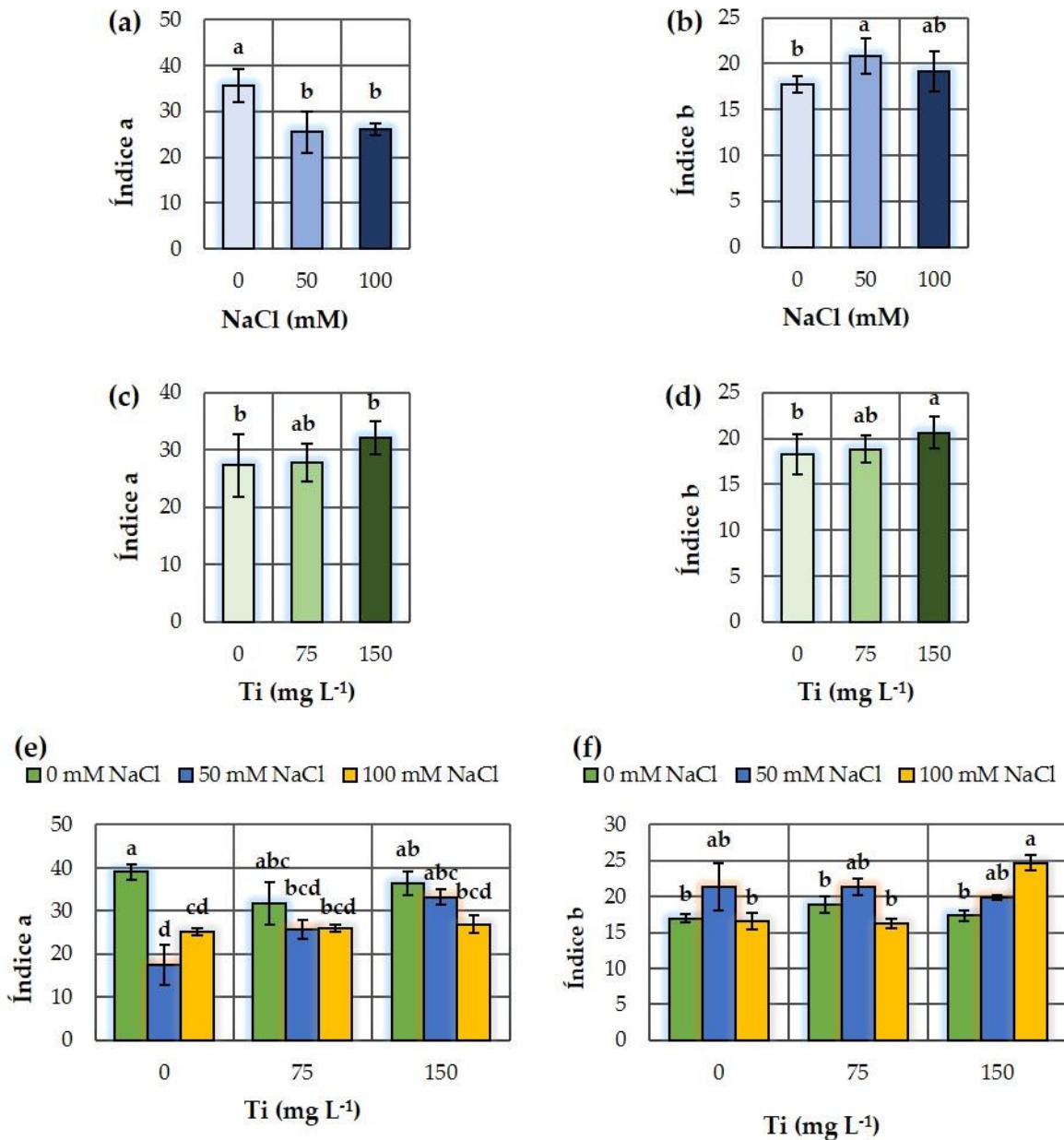
##### **Índice a**

El cambio de color en el proceso de maduración (degradación de clorofila y síntesis de carotenos) se puede medir con los índices “a” (rojo) y “b” (amarillo), con valores 26.4 y 23.1 respectivamente, para la clasificación denominada “rojo brillante (Cantwell *et al.*, 2007; Zapata *et al.*, 2007). En los frutos de plantas tratadas con las dosis 50 y 100 mM NaCl se redujo el índice “a” en 28% en promedio, respecto al testigo (**Figura 9a**). Es decir, el tratamiento testigo obtuvo un valor alto (36), lo cual lo ubica muy por encima de la clasificación “rojo oscuro” (valor de 27.5; Cantwell *et al.*, 2007); en tanto que, los valores obtenidos con ambas dosis salinas (25.5, en promedio) los ubican dentro de la clasificación “rojo brillante”. Mientras que, las dosis aplicadas de Ti no mostraron efectos significativos en la variable (**Figura 9c**). Por otra parte, el tratamiento 50 mM NaCl con 150 mg Ti L<sup>-1</sup> obtuvo un valor de 33, esto significó un incremento en 90% del índice “a” con respecto al tratamiento 50 mM NaCl sin Ti el cual obtuvo un valor de 17.5 (**Figura 9e**); esto indica que, el tratamiento con la dosis media de salinidad y con la dosis alta de Ti, ubicaron a los frutos tratados en la clasificación rojo oscuro en comparación con los del testigo, ubicados en rosa naranja.

##### **Índice b**

En lo que respecta al índice “b”, el efecto del NaCl solo fue significativo con la dosis 50 mM, la cual obtuvo un valor de 21, y representó un incremento de la variable en 18% respecto al testigo (**Figura 9b**). Por otro lado, la aplicación de 150 mg Ti L<sup>-1</sup> incrementó significativamente en 13% el índice b respecto al testigo (**Figura 9d**). En ambos casos, los incrementos sugieren que tanto la salinidad como la aplicación de Ti ocasionaron que los frutos se clasificaron como rojos brillantes. Mientras que, el tratamiento 100 mM NaCl y 150 mg Ti L<sup>-1</sup> incrementó

el índice b en 49 y 45% respecto al tratamiento 100 mM NaCl sin Ti y al tratamiento sin NaCl y sin Ti respectivamente (**Figura 9f**).



**Figura 9:** Efectos principales del NaCl (a y b), Ti (c y d) y de interacción NaCl × Ti (e y f) en índices de color a y b de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### **2.4.5. Efectos del NaCl y Ti en los indicadores de color tono (ángulo Hue) e índice de saturación (croma) de frutos de tomate**

##### **Ángulo Hue**

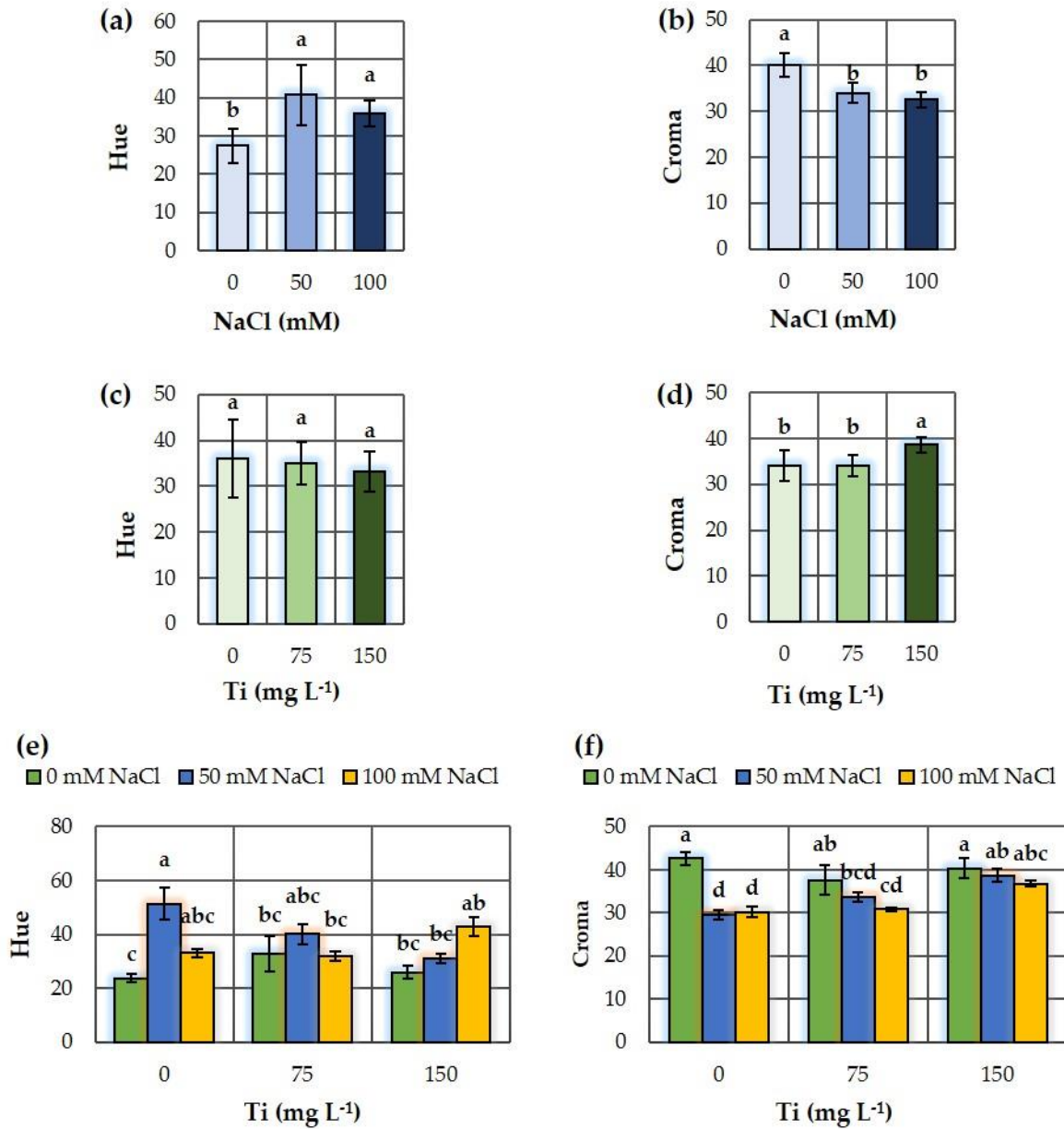
La evolución del color, en frutos en proceso de maduración, se puede medir con el ángulo Hue. Éste indica el paso de rojo a amarillo con unidades de 0 a 90°. Frutos “rojo brillante” se encuentra entre los 35 y 40°. Por otra parte, los valores en croma (tendencia de amarillo a verde) se encuentran entre 90 a 180° e indican la pureza del color. El intervalo aceptable en croma para la clasificación “rojo brillante” está entre 34 y 35° (Cantwell *et al.*, 2007; Pék *et al.*, 2010). En este estudio, los frutos tratados con las dosis salinas 50 y 100 mM NaCl obtuvieron valores en Hue de 41 y 36° respectivamente, lo que significa que hubo un incremento en el ángulo Hue de los frutos en 49 y 31% con respecto al testigo como se observa en la **Figura 10a**. Los frutos de plantas no tratadas con NaCl se clasificaron por debajo de “rojo oscuro” y los frutos tratados con NaCl fueron menos rojos, ubicándolos hacia la clasificación rojo brillante. El efecto del Ti en esta variable no fue significativo (**Figura 10c**). Por otra parte, el tratamiento con 50 mM NaCl y 150 mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyó el ángulo Hue significativamente, en 39% con respecto al tratamiento 50 mM NaCl sin Ti, en este caso el NaCl y el Ti mejoraron la coloración roja del fruto (**Figura 10e**).

##### **Croma**

En tanto que, los valores en croma en frutos tratados con las dosis 50 y 100 mM NaCl fueron 34 y 33°, respectivamente, siendo estos valores inferiores significativamente en 16 y 19%, con respecto al testigo como se observa en la **Figura 10b**. Los frutos de plantas tratadas sin salinidad fueron más verdes que los de plantas tratadas con NaCl y éstos a su vez, se acercaron a la clasificación rojo brillante. Por otro lado, el valor obtenido con la dosis 150 mg Ti L<sup>-1</sup> indica que los frutos tratados fueron más verdes que los tratados con el testigo, esta diferencia fue en 13% (**Figura 10d**). En tanto que, los tratamientos 50 o 100 mM



NaCl con 150 mg Ti L<sup>-1</sup> aumentaron el croma en 31 y 22% comparación con los tratamientos con 50 y 100 mM NaCl sin Ti, respectivamente (**Figura 10f**).



**Figura 11:** Efectos principales del NaCl (a y b), Si (c y d) y de interacción NaCl × Si (e y f) en índices de color Hue y Croma de tomate cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## 2.5. CONCLUSIONES

La salinidad aplicada en la solución nutritiva a plantas de tomate cv. Río Supremo, disminuyó las variables porcentaje de jugo, concentración de licopeno e índice de color; no obstante, mejoró la firmeza, la luminosidad, índices y relación a y b, así como, el ángulo Hue y el croma de los frutos tratados. Por otro lado, el Ti aplicado vía foliar, mejoró el índice de color, índice b y croma, aunque, disminuye la luminosidad. Estos efectos pueden deberse a que el Ti contenido tanto en plantas como en frutos, modifique las características de color en el tomate, ya que es considerado un fotocatalizador que se activa con luz ultravioleta.

En tanto que, en los efectos interactivos de los factores de estudio, las variables afectadas positivamente fueron Porcentaje de jugo, índice de color, índices a y b, Hue y croma, empero, la variable luminosidad disminuye negativamente. El Ti, puede mejorar indicadores de color que optimizan la calidad de los frutos de tomate. Sin embargo, aún se desconocen los mecanismos de acción del Ti a nivel molecular. Por lo cual se recomienda realizar nuevas investigaciones que ayuden a una mejor comprensión de los efectos del  $TiO_2$  en los frutos.

## **CAPÍTULO III. TITANIO AFECTA LA GERMINACIÓN, BIOMASA Y VARIABLES DE CRECIMIENTO INICIAL EN TOMATE**

### **3.1. RESUMEN**

Se evaluó el efecto del tratamiento de semillas con titanio durante la fase de imbibición en indicadores de germinación y de crecimiento inicial de plántulas. El Ti se suministró durante 24 h a semillas de tomate cv. Río Grande como nano partículas ( $\text{TiO}_2$ , 99.7% Sigma-Aldrich, <25 nm), las concentraciones utilizadas fueron 0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10 mg Ti  $\text{L}^{-1}$ . Después de la imbibición las semillas se colocaron en recipientes plásticos con tapa (12 × 11 × 7 cm) con 10 semillas, lo cual constituyó la unidad experimental; cada tratamiento tuvo tres repeticiones. Durante 35 d se cuantificó el número de semillas germinadas por día, y se determinó el porcentaje relativo de germinación, los índices de vigor 1 y 2, el índice de germinación y el coeficiente de velocidad de germinación. Asimismo, se midieron las longitudes de tallos y raíces, número de raíces y hojas y biomasa fresca y seca. Dosis altas de Ti (7.5 y 10 mg  $\text{L}^{-1}$ ) incrementaron el índice de vigor 1. El mayor contenido de humedad en raíces se encontró con las dosis altas (7.5 y 10 mg  $\text{L}^{-1}$ ), éstas presentaron una diferencia de 3% en ambos casos, con respecto al testigo. En tallos provenientes de semillas tratadas con 5 mg Ti  $\text{L}^{-1}$  se incrementó el contenido de humedad 0.8%, respecto al testigo. En hojas, con la dosis 10 mg Ti  $\text{L}^{-1}$  el contenido de humedad fue mayor al testigo en 2.6%. La longitud de raíz de plántulas provenientes de semillas tratadas con la dosis 7.5 mg Ti  $\text{L}^{-1}$  mostró un incremento significativo de 31%, con respecto al testigo. La longitud de tallo de plántulas provenientes de semillas tratadas con 7.5 mg Ti  $\text{L}^{-1}$ , fue mayor en un 16% de forma significativa, con respecto al testigo. Se concluye que el Ti aplicado en forma de nano partículas a semillas de tomate, mejora parámetros de germinación, lo que puede ser positivo para el crecimiento, diferenciación y rendimiento de los cultivos.

**Palabras clave:** elementos benéficos, imbibición, nanomateriales, plántulas, *Solanum lycopersicum*.

### 3.2. INTRODUCCIÓN

De los metales de transición, el titanio (Ti) se extrae de minerales como la anatasa ( $\text{TiO}_2$ ), la ilmenita ( $\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$ ), el rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), la titanita ( $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$ ) o el leucoxeno, este último es una alteración de la ilmenita, la cual es el mineral más explotado para obtener Ti. El Ti se encuentra en una concentración de 0.57% de la corteza terrestre, por lo que ocupa el noveno sitio por su abundancia (Van Gosen y Ellefsen, 2018).

La ilmenita y el rutilo son los concentrados minerales de mayor importancia para obtener Ti. El primero representa alrededor del 92% del consumo mundial, es típicamente más abundante en las arenas con metales de transición y en forma natural contiene alrededor del 55 al 65% de  $\text{TiO}_2$ . El rutilo contiene alrededor del 95% de  $\text{TiO}_2$ , pero éste suele ser menos abundante que la ilmenita en los depósitos fuente. La ilmenita se procesa para producir concentrados de Ti, ya sea como rutilo sintético o escoria titanífera, las cuales se transforman en polvo de  $\text{TiO}_2$ ; este material es un pigmento blanco que se usa en pinturas, papel y plásticos porque proporciona blancura, brillo, índice de refracción alto y opacidad. De igual forma es usado en recubrimientos de varillas de soldadura y para la fabricación de carburos, productos químicos y metales. También se usa en naves espaciales, misiles guiados, joyas, articulaciones artificiales y marcapasos cardíacos. En 2015, los principales productores de titanio mineral fueron Australia, Sudáfrica, China y Mozambique, la producción mundial de Ti fue de 10.3 millones de megagramos métricos, significando un incremento de 4% a lo obtenido el año anterior. Para ese mismo año (2015), en los Estados Unidos de América el valor estimado de los concentrados minerales de Ti consumidos fue de 670 millones de dólares, lo que indica que la extracción de este mineral es de importancia económica para ese país (Bedinger, 2018; Van Gosen y Ellefsen, 2018).

En particular, las nanopartículas de Ti se hacen a partir de la mezcla de anatasa y rutilo en sus formas cristalinas, y se utilizan en abundancia por sus

propiedades anticorrosivas y fotocatalíticas (Shi *et al.*, 2013; Miranda-Villagómez *et al.*, 2019), estas características de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , permiten que sean empleadas en productos de belleza, como aditivo alimentario (E171) o como excipiente en medicinas, entre otros usos, sin conocerse aún restricción alguna en cuanto a dosis máxima permitida por la Organización Mundial de la Salud u otras instituciones como la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación o la Unión Europea. Por tal demanda, se estima que la producción de  $n\text{TiO}_2$  es cercana a los  $88,000 \text{ Mg año}^{-1}$  a partir de anatasa, o rutilo y se tiene registro que es el nanomaterial de mayor liberación al medio ambiente, tan solo en Europa se estima una entrada de  $0.13 \mu\text{g kg suelo año}^{-1}$  con el riesgo de incrementar a  $1200 \mu\text{g kg año}^{-1}$  por descargas de lodos residuales (Lyu *et al.*, 2015; Abukabda *et al.*, 2017; Tiwari *et al.*, 2017; Radziwill-Bienkowska *et al.*, 2018).

En el proceso de industrialización de diversas actividades como la agrícola, alimentaria, aeroespacial, cosmética y medicinal, entre otras, es muy común el uso de metales en forma de nanopartículas debido a las diversas propiedades que estos aportan, el fin es obtener productos de mejor calidad. Esta situación ha contribuido en la liberación de compuestos químicos con elementos metálicos, quienes a través de lodos residuales logran ser potencialmente tóxicos en el medio terrestre y acuático (Tangahu *et al.*, 2011; Tchounwou *et al.*, 2012; Keller *et al.*, 2013).

La toxicidad potencial de los elementos (esenciales o no) en el suelo, está mediada por el concepto de hormesis, ésta se caracteriza por ser una relación dosis-respuesta condicionada por factores ambientales, que en dosis bajas estimulan, e inhiben a dosis altas, este efecto se representa gráficamente como una curva en forma de U invertida o en forma de J, entre otras. Representa una estrategia evolutiva de las especies, restringida por la plasticidad biológica que permite respuestas adaptativas a desafíos ambientales como el cambio climático (Calabrese y Mattson, 2017; Gómez-Merino *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020). Este fenómeno, es considerado normal dentro de las funciones fisiológicas a nivel

celular, lo que permite un pre-acondicionamiento o respuesta adaptativa al estrés en los organismos. El conocimiento y dominio de la hormesis en las plantas implica mejoras en la planificación e incremento del rendimiento en los sistemas de producción agrícola (Mattson, 2008; Agathokleous y Calabrese, 2019).

Asimismo, entre los metales liberados al suelo, se encuentran los llamados benéficos, que han demostrado tener efectos horméticos en diferentes especies de plantas superiores; Moreno-Alvarado *et al.* (2017) y Ramírez-Olvera *et al.* (2018) observaron que el aluminio (Al) y el cerio (Ce) mejoran variables de germinación y desarrollo, regulan factores de transcripción en expresión de genes, además de mejorar las concentraciones de clorofilas, azúcares, aminoácidos y macro y micronutrientes en plántulas de arroz, respectivamente. Senties-Herrera *et al.* (2017) indicó que la aplicación de yodo (I), silicio (Si) y vanadio (V) tienen efectos tanto positivos como negativos en el desarrollo y la floración en caña de azúcar. Por otro lado, García-Jiménez *et al.* (2018) encontró que bajas concentraciones de V estimulan el desarrollo, y afectan de manera diferencial la concentración de clorofilas, aminoácidos, azúcares y nutrientes en plántulas de chile. Buendía-Valverde *et al.* (2018) concluyó que el cadmio (Cd), talio (Tl) y V en tres variedades de chile tienen efectos diferenciales en función de las dosis aplicadas y la variedad estudiada. En *Heliconia* sp, Cuacua-Temiz *et al.* (2017) sugieren que el cobalto (Co) y el selenio (Se) pueden modular la absorción y concentración de micronutrientes. Por otro lado, bajas dosis de lantano (La) suministradas en la solución nutritiva a *lisianthus*, retrasan la senescencia e incrementan la vida de flor en maceta (Torres-Flores, *et al.*, 2018).

El Ti suministrado en bajas concentraciones a plantas superiores actúa como elemento benéfico (Gómez-Merino, *et al.*, 2015); por el contrario, la aplicación de dosis mayores puede causar desórdenes metabólicos e inhibición del crecimiento y desarrollo en gran parte de especies vegetales, a este fenómeno se le conoce como hormesis (Poschenrieder *et al.*, 2013). Feizi *et al.* (2012) reportaron en trigo

que el Ti reduce el tiempo medio de germinación y mejora el desarrollo de plántulas. En semillas de hinojo, en las cuales es conocido que tienen germinación débil o retrasada, las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  promovieron el porcentaje de germinación y el índice de crecimiento de plántulas (Feizi *et al.*, 2013). El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del titanio en cinco dosis (0, 2.5, 5, 7.5 y 10  $\text{mg L}^{-1}$ ) a partir de nano partículas de  $\text{TiO}_2$ , en indicadores de calidad en germinación, biomasa y crecimiento inicial de semillas de tomate (*Solanum lycopersicon* L.) cv. Río Grande. Todo esto, bajo la hipótesis de que el Ti estimula la germinación de semillas y el crecimiento inicial de plántulas de tomate, que permita obtener un mejor crecimiento de la planta y un mejor rendimiento del cultivo.

### **3.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.3.1. Material vegetal y tratamientos con titanio**

Se usó semilla híbrida de tomate tipo saladette de porte determinado cv. Río Grande. Se seleccionaron semillas de tamaño uniforme y sin daños físicos, las cuales fueron pesadas en grupos de diez. Se prepararon 250 mL de solución madre de Ti con una concentración de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  a partir de nano partículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ , 99.7% Sigma-Aldrich,  $<25 \text{ nm}$ ). De la solución madre se hicieron diluciones a 2.5, 5.0 y  $7.5 \text{ mg Ti L}^{-1}$ , la solución  $0 \text{ mg L}^{-1}$  (testigo) fue agua destilada. Se colocaron 10 semillas en frascos conteniendo 30 mL de cada una de las soluciones a evaluar, y se dejaron reposar (periodo de imbibición) por 24 h (Camejo y Torres, 2000). Después de la imbibición, las semillas fueron retiradas de los frascos, se secaron con papel y nuevamente se pesaron.

#### **3.3.2. Germinación y diseño experimental**

Los grupos de 10 semillas se colocaron en recipientes plásticos con tapa ( $12 \times 11 \times 7 \text{ cm}$ ) sobre papel filtro de pliego, humedecido con 5 mL de agua destilada (durante el tiempo que se condujo el experimento, se mantuvo la humedad de la unidad experimental agregando de 3 a 5 mL de agua destilada cada tercer día), cada depósito fue una unidad experimental.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos más el testigo y tres repeticiones (**Cuadro 1**).



**Cuadro 1.** Ensayo conducido con aplicaciones de Ti en semillas de tomate tipo saladette de porte determinado cv. Río Grande.

mg Ti L <sup>-1</sup>	pH de las soluciones con Ti
0.0	7.7
2.5	7.3
5.0	7.0
7.5	6.4
10.0	4.8

### 3.3.3. Cinética de germinación

La germinación de las semillas fue registrada cada 24 h hasta que el valor de ésta fue constante en cada tratamiento.

### 3.3.4. Variables a evaluar

Los registros de germinación se realizaron diariamente durante treinta y cinco días, las semillas con una radícula de más de 2 mm de largo se consideraron como germinadas. Treinta y cinco días después de la siembra, se tomó la altura de la planta y la longitud de raíz con una regla graduada de 10 cm de largo. El número de raíces se contabilizó de forma manual utilizando una lupa. Los pesos de biomasa fresca y seca de vástago y raíz se obtuvieron por medio de una balanza analítica (Adventurer Ohaus Pro AV213C; Parsippany, NJ, EE. UU.).

Porcentaje de germinación total (PGT). Esta variable se midió por el método descrito por Billard *et al.* (2014), después del establecimiento del estudio. Esta variable corresponde al valor porcentual real de las semillas germinadas, considera el valor máximo de germinación alcanzado en la cinética (valor constante), como sigue:

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

Coeficiente de velocidad de germinación (CVG). Se estimó empleando la fórmula siguiente (Kader, 2005):

$$CVG = \frac{\text{Número total de semillas germinadas por unidad experimental}}{A_1T_1 + A_2T_2 + A_nT_n}$$

Donde  $A_1, A_2, \dots$  = El número de semillas emergidas en un número de días en particular.  $T_1, T_2, \dots$  es el número de día de germinación de semillas después del inicio de la incubación.

Índices de vigor I y II. Se determinaron según la metodología propuesta por Vashisth y Nagarajan (2010), empleando las formulas siguientes:

$$\text{Índice de vigor I} = (\% \text{ Germinación}) \times \text{Longitud de la plántula (Raíz + Vástago)}$$

$$\text{Índice de vigor II} = (\% \text{ Germinación}) \times \text{Peso de la plántula (Raíz + Vástago)}$$

Índice de germinación (IG). Se estimó con la metodología usada por Billard *et al.* (2014), empleando la siguiente fórmula:

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

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

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

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

Peso seco de raíz y vástago. Después de 35 d del establecimiento de las semillas, se separaron los vástagos y raíces de cada caja Petri. Se pesaron en una balanza analítica para obtener el peso fresco, después se colocaron en bolsas de papel y ser secados a 70 °C durante 48 h en una estufa de aire forzado (Riossa HCF-125D; Guadalajara, Jalisco, México), posteriormente se determinó el peso seco

en la balanza analítica (Adventurer Ohaus Pro AV213C; Parsippany, NJ, EE. UU.).

Contenido total de agua. Se midió de acuerdo con el método indicado por Jones y Turner (1978).

$$\text{Contenido total de agua (\%)} = \frac{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}}{\text{Peso fresco}} \times 100$$

### **3.3.5. Análisis estadístico**

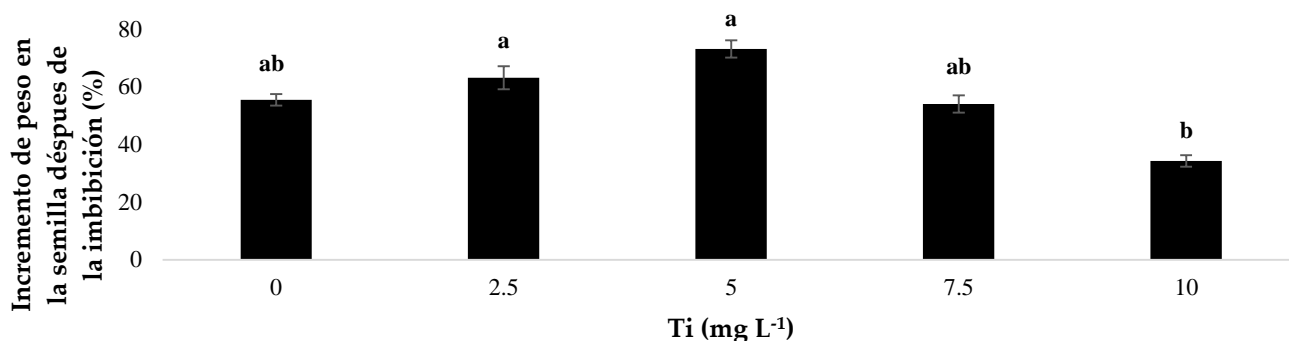
Con los resultados obtenidos se hicieron análisis de varianza y comparación de medias LSD ( $p \leq 0.05$ ), esta última para analizar la diferencia mínima significativa que pueda existir entre los tratamientos. Lo anterior, usando el software SAS (SAS, 2011). Además, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre la concentración de Ti y las variables evaluadas.

### 3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La semilla se considera como el principal órgano reproductivo en las plantas vasculares, se forma a partir del óvulo vegetal después de la fertilización. La germinación es un proceso mediante el cual, el embrión de una semilla se desarrolla hasta convertirse en planta, en el transcurso se rompe el estado de latencia e inicia el crecimiento embrionario. Este proceso se ve beneficiado por condiciones edafoclimáticas adecuadas, tales como humedad, temperatura, oxigenación y en algunos casos luminosidad (Doria, 2010; ISTA, 2005; Pérez, 2003).

#### 3.4.1. Ganancia de peso en semillas de tomate

El proceso de imbibición es el medio por el cual las semillas absorben agua, permitiendo que el nivel de humedad sea homogéneo y se activen procesos de respiración, de síntesis proteica, de movilización de reservas y germinativos. Investigaciones previas han demostrado que la imbibición en agua o en soluciones mejora la fisiología y la germinación en semillas de diferentes especies (Balaguera-López *et al.* 2009; Doria 2010; Perez *et al.* 2016; Monroy-Vázquez *et al.* 2017). En el estudio realizado, el Ti no tuvo efectos significativos en el incremento de peso de la semilla después de la imbibición (IPSI) respecto al testigo. Sin embargo, semillas imbibidas con 5 mg Ti L<sup>-1</sup> tuvieron mayor peso en comparación con las imbibidas con 10 mg Ti L<sup>-1</sup>, esta diferencia significativa fue de 29% (**Figura 11**). El Ti en forma de nanopartículas incrementa la resistencia al estrés y promueve la penetración del agua a través de las membranas de la semilla, permitiendo una mayor ganancia de peso como se observó en este estudio con la dosis 5 mg Ti L<sup>-1</sup> (Khot *et al.*, 2012), es probable que la dosis alta de Ti (10 mg Ti L<sup>-1</sup>) utilizada en este estudio, activará especies reactivas de oxígeno que afectaron la penetrabilidad del agua y el oxígeno hacia el interior de la semilla (Feizi *et al.* 2013).



**Figura 12:** Incremento de peso en semillas de tomate cv. Río Grande expuestas a diferentes concentraciones de Ti. Medias  $\pm$  DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ ).

### 3.4.2. Variables de germinación

En el **Cuadro 2** se presentan los resultados obtenidos con las variables de germinación, y a continuación se describen cada una de ellas.

**Cuadro 2.** Efecto del Ti en germinación de semillas de tomate cv. Río Grande tratadas con diferentes dosis de Ti.

Ti (mg L <sup>-1</sup> )	PGT (%)	CVG	IDV 1	IDV 2	IG
0.0	90.0 $\pm$ 17.3 ab	0.185 $\pm$ .009 a	1170.4 $\pm$ 196.7 b	48.3 $\pm$ 16.2 abc	100.2 $\pm$ 23.5 b
2.5	86.6 $\pm$ 5.7 ab	0.159 $\pm$ .004 a	1228.9 $\pm$ 79.9 b	46.5 $\pm$ 7.6 bc	105.8 $\pm$ 8.1 b
5.0	80.0 $\pm$ 10.0 b	0.188 $\pm$ .021 a	943.0 $\pm$ 94.3 c	36.6 $\pm$ 4.8 c	75.0 $\pm$ 10.3 c
7.5	90.0 $\pm$ 10.0 ab	0.157 $\pm$ .025 a	1476.0 $\pm$ 176.1 a	51.0 $\pm$ 10.1 ab	129.7 $\pm$ 19.9 a
10.0	96.6 $\pm$ 5.7 a	0.151 $\pm$ .007 a	1485.6 $\pm$ 77.7 a	61.7 $\pm$ 13.5 a	130.3 $\pm$ 9.8 a

PGT = porcentaje de germinación total; CVG = coeficiente de velocidad de germinación; IDV1 y 2 = índice de vigor 1 y 2; IG = índice de germinación. Medias  $\pm$  DE con letras diferentes en cada variable indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ ).

En la variable PGT las dosis aplicadas de Ti con 2.5 y 5 mg L<sup>-1</sup> se observaron decrementos no significativos con respecto al testigo (0 mg L<sup>-1</sup>) en 3.4 y 10% respectivamente; aunque no existe significancia, los resultados obtenidos coinciden con los presentados en pepino, canola, tabaco y maíz, en donde se observó inhibición de la germinación con tratamientos de 100 a 500  $\mu$ g mL<sup>-1</sup> de

nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (99.5% de pureza); 0 a 2000 mg Ti L<sup>-1</sup> a partir de nTiO<sub>2</sub> (20 nm); 0.1 a 5% de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, Sigma Aldrich, 99.5% (25 nm) y 1000 mg L<sup>-1</sup> (nTiO<sub>2</sub>, 99% pureza), respectivamente (Mushtaq, 2011; Mahmoodzadeh *et al.*, 2013; Frazier *et al.*, 2014; Karunakaran *et al.*, 2016).

Por otro lado, con la dosis 10 mg Ti L<sup>-1</sup> presentó un incremento de 6.6% respecto al testigo, pero dicho aumento no fue significativo. Salinas *et al.* (2001) y Pichardo *et al.* (2010) coinciden en que los porcentajes obtenidos en la germinación ayudan a determinar el vigor de las semillas, de esta manera, el material con germinación entre 60 y 80% se considera como vigor intermedio, mayor al 80% es de alto vigor. Con base en lo anterior, los resultados mostrados en PGT indican que las semillas tratadas además del testigo tienen un alto nivel de vigor.

La velocidad de emergencia y el coeficiente de germinación juegan un rol importante al momento de establecer un cultivo en campo, ya que, por medio de estas variables se puede clasificar una semilla como de rápida o lenta germinación (Buendía-Valverde *et al.*, 2018). El coeficiente de velocidad de germinación es el recíproco del tiempo promedio de una semilla en germinar e independiente del porcentaje de germinación total y su valor oscila de 0 (no germinación) a 1 (germinación rápida) (Ranal y García, 2006). En este estudio el Ti no tuvo efecto en el coeficiente de velocidad de germinación.

En el caso de los índices de vigor I y II se encontraron respuestas diferenciales. El índice de vigor I, de plántulas provenientes de las semillas tratadas con 7.5 y 10 mg Ti L<sup>-1</sup> mostraron mayor valor con respecto al testigo en 26 y 27% respectivamente; coincidiendo con lo reportado por Ruffini *et al.* (2016) quienes encontraron incrementos en índice de vigor I en haba cv. Minor tratadas con 50 mg nTiO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de (< 100 nm, Sigma Aldrich, EE. UU.). Por el contrario, a lo observado por Mahmoodzadeh *et al.* (2013) quien con la dosis 10 mg Ti L<sup>-1</sup> encontró que disminuye el vigor de semillas de canola. En la variable índice de vigor II, los tratamientos con Ti no tuvieron efectos significativos.

El cálculo del índice de germinación está basado en el porcentaje de germinación y la elongación de la radícula y se utiliza en muchos estudios como indicador de fitotoxicidad; valores entre 80 y 100% de índice de germinación no existe fitotoxicidad, no obstante, por encima de 100% el material empleado puede considerarse como bioestimulante (Eminio y Warman, 2004). Basado en lo antes mencionado, los resultados obtenidos en este estudio, indican que la dosis baja de Ti ( $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ ) no presentó efecto tóxico. Sin embargo, la dosis  $5 \text{ mg Ti L}^{-1}$  fue la que obtuvo el valor más bajo, lo que pudiera indicar que es fitotóxica. Si bien es cierto que la exposición a dosis bajas de un agente químico o factor ambiental que puede ser tóxico en dosis altas, induce un efecto benéfico en los organismos, también se puede presentar un efecto inverso, esto se debe a la plasticidad biológica del individuo y al número de dosis del agente estimulante (López-Díazgerrero *et al.*, 2013; Calabrese y Mattson, 2017). Por otro lado, las dosis altas de Ti ( $7.5$  y  $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) tuvieron un efecto bioestimulante en las semillas de tomate usadas en el experimento.

### **3.4.3. Longitud de raíz y tallo, número de raíces y hojas.**

Se ha documentado que el Ti mejora el crecimiento y la diferenciación de las plantas, ya que induce genes relacionados con el metabolismo fotosintético y la captación de luz por parte de los cloroplastos en el fotosistema II, lo que permite una mejor fijación de C, producción de azúcares e incrementos en biomasa (Ze *et al.*, 2011; Tumburu *et al.*, 2017; Abdel *et al.*, 2018). En el **Cuadro 3** se presentan los resultados obtenidos en variables de desarrollo. La mayor longitud de raíz se registró en plántulas de semillas tratadas con  $7.5$  y  $10 \text{ mg Ti L}^{-1}$  con incrementos de 31 y 22% respectivamente, al ser comparadas con el testigo. De la misma manera, en semillas de pepino, cebolla y *Arabidopsis thaliana* el tratamiento con  $500$  y  $1000 \mu\text{g Ti mL}^{-1}$  incrementó la longitud de la raíz (Andersen *et al.*, 2016; Szymanska *et al.*, 2016). Por el contrario, en plántulas de tomate tratamientos crecientes de  $0$  a  $500 \text{ mg nTiO}_2 \text{ L}^{-1}$  no incrementaron significativamente la longitud de raíz (Song *et al.*, 2013).

**Cuadro 3.** Efecto de diferentes dosis de Ti en crecimiento y diferenciación de plántulas de tomate cv. Río Grande.

<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>LR (cm)</b>	<b>LT (cm)</b>	<b>NR</b>	<b>NH</b>
0.0	9.40±0.92 bc	3.62±0.33 b	3.87±0.37 a	1.43±0.12 a
2.5	10.41±1.54 abc	3.86±0.51 b	3.54±0.57 a	0.97±0.34 bc
5.0	7.94±0.33 c	3.85±0.09 b	3.79±0.30 a	0.90±0.16 c
7.5	12.30±2.23 a	4.21±0.44 a	3.34±0.53 a	1.05±0.32 bc
10.0	11.44±1.18 ab	3.94±0.14 ab	4.10±0.45 a	1.35±0.05 ab

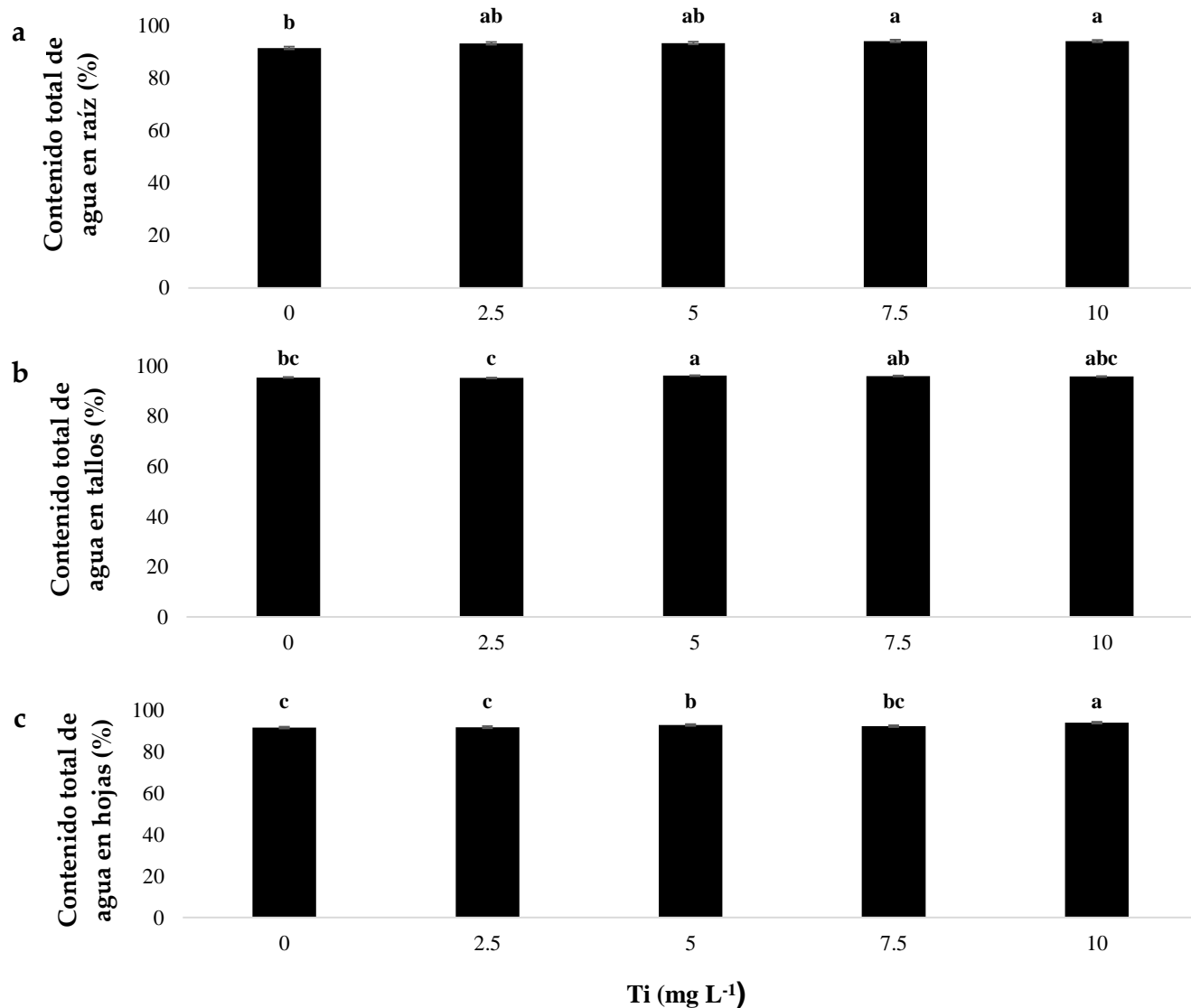
LR: longitud de raíz, LT: longitud de tallo, NR: número de raíces, NH: número de hojas. Medias ± DE con letras distintas en cada variable indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ ).

En cuanto a la longitud de tallo, la dosis 7.5 mg L<sup>-1</sup> la incrementó en 16% con respecto al testigo. De igual manera, tratamientos con 250, 500, 1000 y 2000 mg Ti L<sup>-1</sup> a semillas de avena no afectaron significativamente la longitud del tallo (Ramesh *et al.*, 2014) El número de raíces no presentó diferencias entre tratamientos. Por otra parte, los tratamientos a la semilla con 2.5, 5 y 7.5 mg Ti L<sup>-1</sup> de Ti ocasionaron una disminución significativa del 32, 37 y 26.5% respectivamente en el número de hojas, en comparación con el testigo.

#### **3.4.4. Contenido total de agua en plántulas de tomate**

Se encontraron diferencias significativas en el contenido de humedad de raíz, tallo y hojas de plántulas provenientes de semillas tratadas con diferentes concentraciones de Ti. En raíz, 7.5 y 10 mg Ti L<sup>-1</sup> incrementaron en 3% el contenido de humedad, respecto al testigo (**Figura 12a**). En tallo, el mayor contenido de humedad se obtuvo con la dosis 5 mg Ti L<sup>-1</sup>, superando al del testigo en 0.8% (**Figura 12b**). En hojas, el contenido de humedad en plántulas provenientes de semillas tratadas con 10 mg Ti L<sup>-1</sup> fue mayor en 2.6% respecto al testigo (**Figura 12c**).





**Figura 13:** Contenido total de agua en plántulas (raíces, tallos y hojas) de tomate cv. Río Grande expuestas a diferentes concentraciones de Ti. Medias ± DE con letras diferentes en cada variable indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ ).

### 3.4.5. Biomasa fresca y seca

Se encontraron respuestas diferenciales en la cantidad de biomasa fresca y seca en las plántulas provenientes de semillas tratadas con Ti. Por un lado, con la dosis 10 mg Ti L<sup>-1</sup> se obtuvo la mayor cantidad de biomasa fresca en raíz y hoja con incrementos de 53 y 17% respecto al testigo. Mientras que, las dosis 2.5 y 5 mg Ti L<sup>-1</sup> redujeron la biomasa fresca de tallo en 17 y 33% respecto al testigo. La biomasa fresca total de la plántula proveniente de la semilla imbibida con 10 mg Ti L<sup>-1</sup> fue mayor en 43% a la registrada con 5 mg Ti L<sup>-1</sup>. Song *et al.* (2013) encontró que al aplicar 50 mg nTiO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> a plántulas de tomate hay una ligera disminución en la biomasa fresca, la cual no fue significativa.

Por otro lado, en la biomasa seca de raíz no hubo diferencias significativas. En tanto que, en la biomasa seca de tallo las dosis 5 y 7.5 mg Ti L<sup>-1</sup> aplicadas a la semilla ocasionaron una disminución de 50 y 12.5% con respecto al testigo. La biomasa seca de hojas disminuyó en 27% cuando las semillas se trataron con 5 mg Ti L<sup>-1</sup>. La biomasa seca total de la plántula fue mayor en 35% en plántulas provenientes de semillas imbibidas con 10 mg Ti L<sup>-1</sup> que aquellas tratadas con 5 mg Ti L<sup>-1</sup> (**Cuadro 4**). Feizi *et al.* (2012), encontraron que al aplicar 40 mg nTiO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de a hinojo decrecía significativamente el peso seco de la raíz, tallo y plántula. En trigo, no obtuvieron diferencias significativas al aplicar dosis de 0 a 500 mg L<sup>-1</sup> de nTiO<sub>2</sub> (Feizi *et al.*, 2013).

**Cuadro 4.** Efecto del Ti en la cantidad de biomasa fresca y seca de plántulas de tomate cv. Río Grande tratadas con diferentes dosis.

Ti (mg L <sup>-1</sup> )	Biomasa fresca (g)			
	Raíz	Tallo	Hoja	Plántula
0.0	0.1±0.06 b	0.18±0.01 a	0.1±0.01 b	0.3±0.07 ab
2.5	0.2±0.01 ab	0.15±0.01 b	0.1±0.02 b	0.3±0.03 ab
5.0	0.1±0.01 b	0.12±0.01 c	0.1±0.01 b	0.3±0.02 b
7.5	0.1±0.04 ab	0.18±0.001 a	0.1±0.01 b	0.3±0.04 ab
10.0	0.2±0.06 a	0.18±0.02 a	0.2±0.02 a	0.4±0.08 a

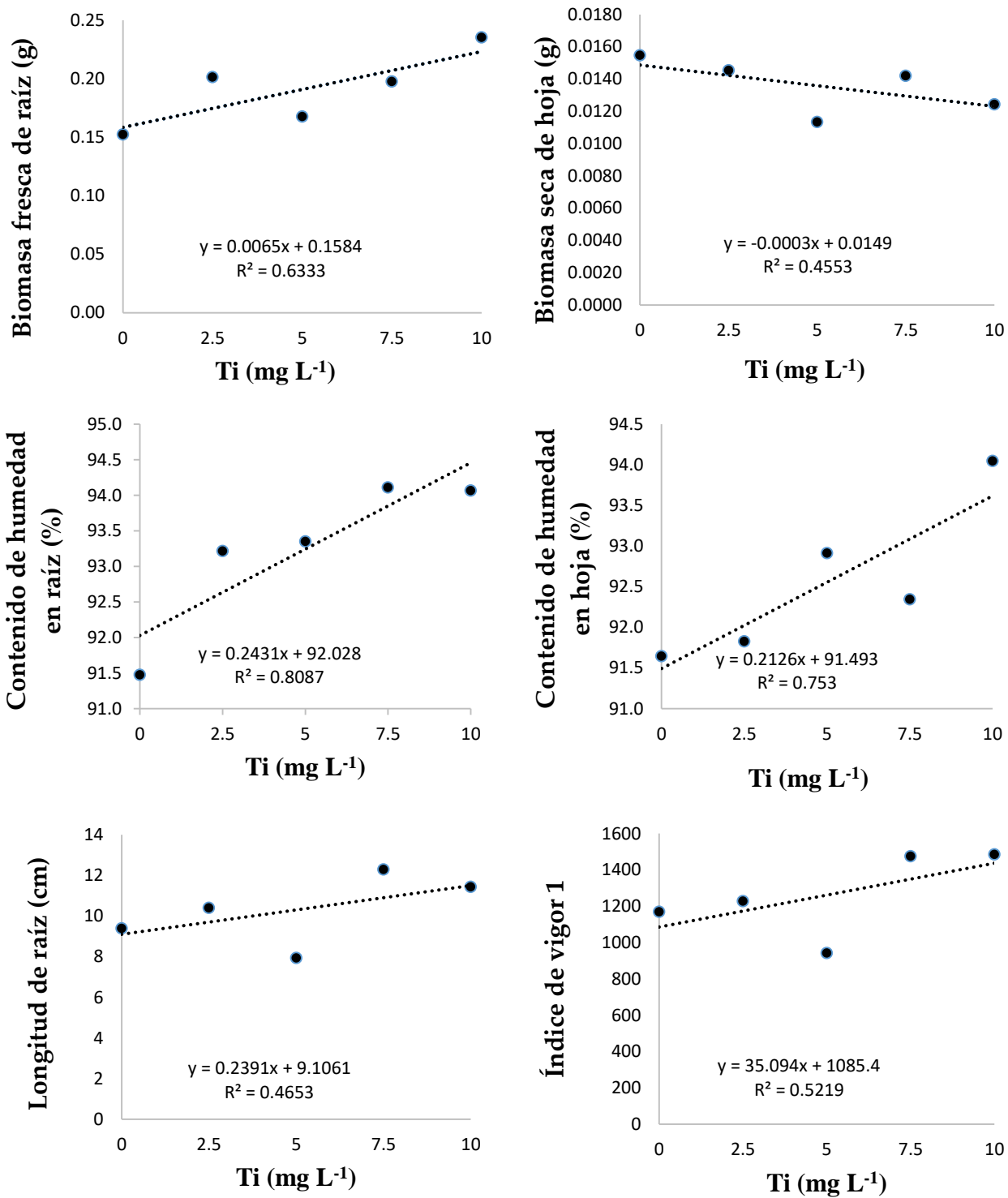
Ti (mg L <sup>-1</sup> )	Biomasa seca (g)			
	Raíz	Tallo	Hoja	Plántula
0.0	0.01±0.002 a	0.008±0.0009 a	0.01±0.001 a	0.2±0.01 ab
2.5	0.01±0.001 a	0.007±0.0008 ab	0.01±0.001 ab	0.2±0.02 ab
5.0	0.01±0.003 a	0.004±0.0006 c	0.01±0.001 c	0.1±0.01 b
7.5	0.01±0.002 a	0.007±0.0008 b	0.01±0.002 ab	0.2±0.02 ab
10.0	0.01±0.003 a	0.008±0.0017 a	0.01±0.002 bc	0.2±0.02 a

Medias ± DE con letras diferentes en cada variable indican diferencias estadísticas entre los tratamientos (LSD,  $p \leq 0.05$ ).

### 3.4.6. Correlación de los resultados obtenidos entre la concentración de Ti con las variables medidas

En la **Figura 13** se presentan las variables que tuvieron una correlación significativa con las diferentes concentraciones de Ti aplicadas. Se correlacionó positivamente la biomasa fresca, contenido de humedad y longitud de raíz, además del contenido de humedad en hojas y el índice de vigor 1. Por otro lado, se presentó una correlación negativa entre la biomasa seca de hojas y las concentraciones de Ti. Está documentado que el Ti suministrado en forma de  $n\text{TiO}_2$  tiende a localizarse en la pared celular por el pequeño tamaño de partícula, permitiendo una mayor reactividad en la superficie de la pared agrandando los poros o creando nuevos en los diferentes órganos de la planta, además de que,

el Ti estimula reacciones de oxidación-reducción a través de enzimas como la superóxido dismutasa y la ascorbato oxidasa en raíces. Esto permite un mejor control de las especies reactivas de oxígeno y una alta absorción de nutrientes relacionados con una mayor producción de biomasa (Zheng et al., 2008; Asli y Neumann, 2009).



**Figura 14:** Correlación de Pearson entre la concentración de Ti y las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate c. v. Rio Grande, con distintas dosis durante 30 días.

### **3.5. CONCLUSIONES**

Los resultados muestran efectos adversos en las variables número de hojas y biomasa seca detallo y hoja. Asimismo, demuestran que el Ti mejora potencialmente la germinación de las semillas, favorece los índices de germinación y de vigor 1 y 2, la longitud de raíz y tallo, el contenido de humedad de raíz, tallo y hoja, la biomasa fresca de raíz, tallo y hoja, además de la biomasa seca de raíz. Lo que supone que la aplicación de Ti a las semillas, a través de la imbibición, puede ayudar a la producción de plántulas de calidad con potenciales mejoras en crecimiento y rendimiento de los cultivos.

## **CAPÍTULO IV. APLICACIÓN FOLIAR DE TiO<sub>2</sub> EN VARIABLES FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE PLÁNTULAS DE TOMATE, BAJO ESTRÉS SALINO**

### **4.1. RESUMEN**

La agricultura a nivel mundial enfrenta el reto llamado cambio climático, el cual afecta los cultivos en diversas formas, entre ellas, la salinización del suelo y de mantos freáticos. El Ti es un elemento no esencial que provee beneficios a los cultivos ante un factor de estrés. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del NaCl en tres niveles aplicado a través de la solución nutritiva y de la aplicación de Ti en tres niveles, por medio de aspersiones foliares en variables fisiológicas y bioquímicas en plántulas de tomate cv. Río Grande. Para esta investigación, se obtuvieron plántulas de la siembra de semillas en almácigo, para después ser trasplantadas a vasos de unicel de 250 cm<sup>3</sup>, conteniendo agrolita. Se evaluaron dos factores de estudio, salinidad y Ti. Los tratamientos con NaCl para inducir salinidad (0, 50 y 100 mM NaCl) se aplicaron a la solución nutritiva de Steiner al 50 %. El Ti (0, 500 y 1000 mg L<sup>-1</sup>) fue adicionado mediante aspersiones foliares cada siete días después del trasplante. Las variables evaluadas fueron altura de planta, diámetro de tallo, área foliar, unidades SPAD, Pigmentos fotosintéticos, azúcares, actividad antioxidante y concentración nutrimental. El NaCl afecta variables de crecimiento, unidades SPAD, pigmentos fotosintéticos, azúcares y actividad antioxidante. El Ti disminuyó la concentración de azúcares totales en hojas. De manera general no se observó el efecto benéfico del Ti en las plántulas de tomate bajo estrés salino.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum*, elementos benéficos, nano materiales, clorofila, aminoácidos, concentración nutrimental.

## 4.2. INTRODUCCIÓN

A nivel global, cerca del 20% de los suelos agrícolas con riego y el 2.1% sin riego, tienen exceso de sales. La salinidad como factor de estrés, disminuye el potencial osmótico del suelo, esto afecta severamente la absorción de agua por parte de la planta, por tanto, la turgencia celular, provocando daños en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, causando grandes pérdidas a la industria agrícola (Guo *et al.*, 2018; Romero-Munar *et al.*, 2019; Chung *et al.*, 2020). Debido a procesos de intemperismo y al uso de agua residual como agua de riego, se pueden encontrar diferentes concentraciones y tipos de sales en el suelo, ríos, lagos y mantos freáticos. El NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaHCO<sub>3</sub> son sales altamente solubles y las más comunes en suelos cultivados (Can-Chulim *et al.*, 2017).

La alta acumulación de iones Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a nivel celular en las plantas, induce desequilibrios nutricionales y osmóticos, así como, la sobreacumulación de especies reactivas de oxígeno (O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), afectando negativamente el metabolismo. Esto ocasiona que las paredes celulares colapsen y haya muerte celular (Chung *et al.*, 2020). Por otro lado, las plantas bajo este tipo de estrés pueden desarrollar un control homeostático de agua y de iones, tolerancia a Na<sup>+</sup> y síntesis de solutos orgánicos de bajo peso molecular en el citoplasma (azúcares solubles, ácidos orgánicos, aminoácidos y sus derivados metilados), todo esto para reducir el potencial osmótico celular y mantener el nivel de turgencia (Madueño-Molina *et al.*, 2011; Romero-Munar *et al.*, 2019).

La producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a nivel mundial es de alto valor económico. En el periodo 2012-2016, China y Estados Unidos de América (EUA), fueron los principales países productores de esta hortaliza, con una producción en conjunto de 70 537 890 Mg. Para el año 2017 se produjeron 182 000 000 Mg. De igual manera, India incrementó su producción y junto con China representaron el 44% de la producción mundial. En ese mismo año, la comercialización de tomate en el planeta fue de 7 300 000 Mg (FAO, 2019).



Por otro lado, México se ha mantenido como primer exportador de tomate desde el 2015. En 2017 exportó 1.7 millones de Mg, equivalentes al 24% del volumen mundial exportado; esto le ha permitido que, en la última década, su tasa media de crecimiento anual sea de 5.8%. (SADER, 2019).

La bioestimulación con elementos no esenciales, se ha consolidado en los últimos años en cultivos como el tomate para mitigar factores de estrés biótico y abiótico. El titanio (Ti) es un elemento considerado benéfico para los cultivos. Se encuentra en gran parte de las rocas, sedimentos y arenas. Es el noveno elemento más abundante de la tabla periódica y el segundo de los metales de transición. Representa el 0.57% de la corteza terrestre. Tiene gran afinidad por el oxígeno, gracias a ello se puede encontrar naturalmente como dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en tres formas: anatasa y rutilo (forma tetragonal) y brookita (forma ortorrómbica), aunque también en forma de ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ). Estas formas de Ti en el suelo son insolubles, por tanto, no son disponibles para las plantas (Bacilieri *et al.*, 2017; Lyu *et al.*, 2017; Bedinger *et al.*, 2018).

En la actualidad, la anatasa es una de las fuentes más usadas para extraer Ti. China cuenta desde el 2014 con un gran depósito de este mineral, que no ha sido explotado en su totalidad. En el 2012, la capacidad de producción mundial de pigmento de  $\text{TiO}_2$  incrementó a 6.5 millones de Mg. Para el 2016, tan solo EUA importó 247 000 Mg lo que significó un aumento del 12% en comparación con el año anterior; sus principales países exportadores fueron Canadá (31%) y China (28%). El Ti extraído se usa en aleaciones (aeronáutica, aeroespacial, joyería y medicina), papel, pinturas, pigmentos, plásticos, porcelana, entre otros. Se calcula que para el año 2025 la demanda global de  $\text{TiO}_2$  incrementará 4.1% por año, es decir, 8.82 millones de  $\text{Mg año}^{-1}$  (Bedinger *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2019).

Hoy en día, existe otra forma de Ti en el medio ambiente, las nano partículas de  $\text{TiO}_2$  ( $\text{NPsTiO}_2$ ). La producción mundial de  $\text{NPsTiO}_2$  se estima en 88 000  $\text{Mg año}^{-1}$ , son usadas en cosméticos, y como edulcorantes y potenciadores de sabor en

alimentos. Este tipo de material llega a los cultivos a través de las aguas y lodos residuales principalmente, además del aire, en ambos casos su disponibilidad para las plantas es alta. Sin embargo, aún se desconocen los mecanismos de acceso, absorción y transporte del Ti en plantas superiores. En Europa se ha estimado que los residuos de las NPsTiO<sub>2</sub> en suelos pueden alcanzar hasta 0.13 mg kg<sup>-1</sup> suelo año<sup>-1</sup> y en suelos regados con aguas residuales pueden llegar a tener hasta 1 200 mg kg<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cervantes-Avilés *et al.*, 2017; Lyu *et al.*, 2017).

Diversos estudios colocan al Ti como un elemento benéfico, ya que mejora la longitud de raíz y tallo en *Vigna radiata* L. (Raliya *et al.*, 2015), aumenta la altura y biomasa en *Glycine max* L. (Rezaei *et al.*, 2015), incrementa la concentración de azúcares, aminoácidos, clorofila y prolina en *Vicia faba* (Abdel-Latef *et al.*, 2018) y potencializa la concentración de P y K en *Cucumis sativus* (Servin *et al.*, 2012). Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto principal del titanio aplicado vía foliar (en concentraciones de 0, 500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>) y del NaCl (con las dosis 0, 50 y 100 mM en la solución nutritiva), y sus interacciones, en variables fisiológicas, bioquímicas y concentración nutrimental de plántulas de tomate.

### 4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 4.3.1. Material vegetal y tratamientos salino y foliares

Se germinaron en contenedores de polietileno con 200 cavidades, semillas de tomate cv. Río Grande, usando turba como sustrato, durante este periodo la humedad de la charola se mantuvo asperjando las plantas con 500 mL de agua destilada una vez al día. Treinta y un días después de la siembra (DDS), las plántulas obtenidas se trasplantaron a vasos de unicel de 250 cm<sup>3</sup> previamente llenados con agrolita. A partir del trasplante las plántulas se mantuvieron con la solución nutritiva (SN) de Steiner (Steiner, 1984) al 25% y a los 28 después del trasplante (DDT) se cambió la concentración a 50% (**Cuadro 5**). Durante el tiempo que duró el experimento la temperatura media en el invernadero fue 27.3/20.4 °C (día/noche), una humedad relativa de 72% y luminosidad de 136.92  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Se estableció un experimento con el objetivo de evaluar las respuestas del Ti aplicado vía foliar a plantas de tomate sometidos a estrés salino.

**Cuadro 5:** Volumen de riego aplicado y actividades realizadas durante el experimento.

Actividad		DDS	DDT	DDMV
Riego	Siembra	0		
Aspersión a charola	Trasplante	31		
	Steiner 25%	32	1	
80 mL planta día <sup>-1</sup>	Steiner 50% e inicio de tratamientos salinos	59	28	
	Inicio de tratamientos foliares	60	29	0
100 mL planta día <sup>-1</sup>	2da aplicación foliar	67	36	7
	3ra aplicación foliar	74	43	14
120 mL planta día <sup>-1</sup>	4ta aplicación foliar	81	50	21
	Cosecha de plántulas	95	64	35

DDS = Días después de la siembra; DDT = Días después del trasplante; DDMV = Días después de medir variables.

A los 28 DDT se iniciaron tratamientos salinos aplicando 50 y 100 mM NaCl al sustrato a través de la SN de Steiner empleada en el riego, además de un testigo, el cual consistió solamente en la SN de Steiner al 50%. A los 29 DDT se realizaron las aplicaciones foliares (0, 500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>, a partir de TiO<sub>2</sub>). El riego se realizó de forma manual usando un vaso de precipitados, se aplicaron 80 mL de SN planta día<sup>-1</sup> durante los primeros 28 días después de trasplante, en los 15 días posteriores se aplicaron 100 mL de SN planta día<sup>-1</sup>, y de ahí se incrementó a 120 mL de SN planta día<sup>-1</sup> por los 21 días restantes (**Cuadro 6**). Se hicieron cuatro aplicaciones foliares en intervalos de 7 días, cada aplicación se realizó a las 6:00 h, asperjando las plántulas hasta punto de goteo, se usó Tween 20® como surfactante a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>. El pH de los tratamientos foliares se presenta en el **Cuadro 6**.

**Cuadro 6.** pH de los tratamientos foliares conteniendo Ti, con y sin Tween 20®, además de su ajuste para ser aplicado a las plantas.

TiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	pH sin Tween	pH con Tween	pH ajustado
0	5.88	3.42	3.5
500	2.90	2.87	3.5
1000	2.63	3.12	3.5

#### 4.3.2. Diseño experimental

El experimento se condujo en un invernadero con ventana cenital. Se utilizó un diseño experimental con distribución completamente al azar con un arreglo factorial de tratamientos. El primer factor fue la concentración NaCl en tres niveles (0, 50 y 100 mM) en la SN empleada para el riego y el segundo factor fueron las aplicaciones foliares de Ti, en tres concentraciones (0, 500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>), resultando nueve tratamientos por experimento. Cada tratamiento tuvo tres repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta por vaso de unicel.

### **4.3.3. Variables de crecimiento**

La variable altura de la planta se midió después de 1, 10, 20 y 30 después de iniciados los tratamientos desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento con un flexómetro (TRUPER 5 m); asimismo, el diámetro de tallo se midió a 10 cm de la base utilizando un calibrador a vernier digital (Truper 14388; Shanghai, China). A los 95 DDS se realizó la cosecha de plántulas. El área foliar se determinó usando un integrador del área foliar (LI-CORLI-3000A; Lincoln, NE, EE. UU.). Para obtener el peso de biomasa seca, las plantas se dividieron en raíces, tallos y hojas, posteriormente se colocaron en una estufa de aire forzado (Riossa HCF-125D; Guadalajara, Jalisco, México) a 70°C, para después ser pesadas por separado en una balanza analítica (Adventurer Ohaus Pro AV213C; Parsippany, NJ, EE. UU.).

### **4.3.4. Unidades SPAD y concentración de pigmentos fotosintéticos**

A los 0, 10, 20 y 30 DDT se midieron las unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development) con un medidor portátil SPAD-502® de Minolta, siguiendo el procedimiento descrito por Rodríguez-Mendoza *et al.* (1998). Se utilizó la metodología descrita por Sumanta *et al.* (2014) para determinar las concentraciones de pigmentos fotosintéticos (carotenoides, Chl *a*, Chl *b* y Chl total). Se tomaron 50 mg de material vegetal y se maceró con 10 mL de etanol al 95% (v/v). Las muestras se colocaron en tubos Falcon de 15 mL y se centrifugaron a 10 000 rpm en una centrifuga refrigerada (Eppendorf, 5424, Alemania) durante 5 min a 4 °C, y se recuperó el sobrenadante en un nuevo tubo Falcon. Del sobrenadante obtenido, se tomaron 0.5 mL y se mezcló con 4.5 mL de etanol al 95%. En estas muestras se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (Jenway 6715 UV/Vis; Staffordshire, Reino Unido) a 470, 649 y 664 nm. Las concentraciones de los pigmentos fotosintéticos se determinaron con las siguientes fórmulas:

$$C_x + c = (1000A_{470} - 2.13C_a - 97.63C_b) / 209$$

$$Ch-a = 13.36A_{664} - 5.19A_{649}$$

$$Ch-b = 27.43A_{649} - 8.12A_{664}$$

La concentración de clorofila total fue la suma de clorofila *a* y *b*.

#### **4.3.5. Determinación de azúcares totales**

Los azúcares solubles totales se determinaron siguiendo el protocolo descrito por Bailey (1958). Se pesaron 500 mg de muestra y se le agregaron 50 mL de etanol al 80%, acto seguido, mediante una plancha calefactora (Thermo Scientific, SP131635, Malaysia) se obtuvo sobrenadante, el cual se filtró y se llevó a un volumen final de 20 mL. Las muestras se incubaron en baño maría a 95°C durante 15 min, para después terminar el proceso colocando las muestras en hielo. Para cuantificar los azúcares totales, se realizó una curva estándar utilizando glucosa (Sigma-Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU.), y se midieron a una absorbancia de 600 nm en un espectrofotómetro (Jenway 6715 UV/Vis).

#### **4.3.6. Actividad antioxidante total**

Se utilizó una metodología empleada por Ibarra *et al.* (2011) con las modificaciones que se indican a continuación. Se pesaron 100 mg de tejido vegetal previamente macerado y homogenizado con N líquido, se agregó 1.5 mL de etanol al 60%, y se dejó reposar durante 24 h en refrigeración a 3 °C. Al siguiente día se centrifugó durante 20 min a 4 °C y a 15000 opm; en un tubo de reacción se colocaron 400 µL del sobrenadante, 600 µL de metanol al 80%, finalmente se agregó 1 mL de solución de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) y se agitó en vórtex. Transcurridos 15, 30 y 60 min de agregado el DPPH se leyó en un espectrofotómetro (Jenway, 6715 UV/Vis, Reino Unido) a una longitud de onda de 517 nm. Se utilizó trólox (ácido 6-hidroxi-2, 5, 7, 8-tetrametilchomano-2-carboxílico) como estándar. En la metodología se utilizaron dos blancos, uno para calibrar el espectrofotómetro (400 µL de etanol al 60% más 600 µL de

metanol al 80%) y el segundo blanco fue utilizado en la curva estándar (sin trólox).

#### **4.3.7. Concentración nutrimental**

Se utilizaron los protocolos descritos por Alcántar y Sandoval (1999), para realizar el análisis nutrimental. Se tomaron 0.25 g de tejido seco, a los cuales se les agregó una mezcla de ácidos ( $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HClO}_4$ ; 2:1, v:v) más  $\text{H}_2\text{O}_2$ , para realizar digestión húmeda. Una vez completada la digestión de la materia orgánica, la muestra se aforó a 25 mL de agua desionizada y se filtró. La concentración de N se determinó mediante el método de micro-Kjeldahl y el resto de los elementos mediante lecturas un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (Varian ICP OES 725-ES; Mulgrave, Australia).

#### **4.3.8. Análisis estadístico**

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza de acuerdo con un diseño de tratamientos con arreglo factorial y pruebas de comparación de medias por Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## 4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.4.1. Altura de planta, diámetro de tallo y área foliar

En las plantas, el proceso de crecimiento es afectado en forma negativa por la salinidad. Por un lado, el exceso de NaCl en el sustrato incrementa la presión osmótica y reduce la absorción de agua, reduciendo la turgencia y la elongación celular. Por otro, dentro de la planta, el catión  $\text{Na}^+$  y el anión  $\text{Cl}^-$  se concentran en hojas senescentes y mediante el flujo de transpiración se translocan a parte aérea, afectando las células en hojas con mayor actividad fotosintética, reduciendo la tasa de fotosíntesis, la captación de carbono y la acumulación de biomasa fresca (Parihar *et al.*, 2015). Estos efectos se vieron reflejados en nuestro estudio de forma significativa en la altura de planta, diámetro de tallo y área foliar. Las dosis evaluadas de NaCl (50 y 100 mM) disminuyeron éstas a partir de los 10 DDT. En tanto que, las dosis aplicadas de Ti (500 y 1000 mg L<sup>-1</sup>) no tuvieron efectos significativos en las variables antes indicadas.

Por otra parte, los tratamientos con 100 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> causaron inhibición del crecimiento de las plántulas en 21 y 26% a los 10 DDT; en 34 y 38% a los 20 DDT y en 43 y 49% a los 30 DDT, respectivamente, en todos los casos respecto al tratamiento sin NaCl y sin Ti. El diámetro de tallo fue reducido en 16.3% a los 20 DDT solo con el tratamiento consistente en 100 mM NaCl y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> respecto al tratamiento sin NaCl y sin Ti. Mientras que, los tratamientos con 50 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyeron el área de las hojas en 52 y 51%, respecto al tratamiento sin salinidad y sin Ti. De igual manera, los tratamientos con 100 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> redujeron en 65 y 76% el área foliar. (**Cuadros 7, 8 y 9**).



**Cuadro 7.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la altura de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Altura de planta (cm)				
	IDT	10 DDT	20 DDT	30 DDT	
<b>NaCl (mM)</b>					
0	22.2±1.1 a	36.2±1.4 a	46.4±5.4 a	59.1±3.6 a	
50	22.2±0.9 a	32.5±1.9 b	37.4±1.5 b	39.7±2.1 b	
100	21.0±0.7 a	27.9±1.3 c	31.6±1.2 c	32.9±1.2 c	
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>					
0	21.8±1.0 a	32.2±2.1 a	39.7±3.8 a	45.1±6.8 a	
500	21.9±1.1 a	33.0±2.6 a	37.6±5.5 a	44.3±5.0 a	
1000	21.6±0.7 a	31.3±2.2 a	38.1±3.9 a	44.3±5.1 a	
<b>NaCl (mM) Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>					
0	0	22.1±1.1 a	35.8±1.1 a	48.9±1.1 a	60.6±5.7 a
0	500	22.8±1.5 a	36.9±2.1 a	41.9±9.3 abc	57.0±1.9 a
0	1000	21.8±0.6 a	35.8±0.7 a	48.3±1.2 ab	59.7±2.7 a
50	0	22.2±1.1 a	31.3±2.4 abc	37.6±2.3 abc	41.2±2.9 b
50	500	22.4±0.7 a	34.3±2.2 ab	38.9±0.8 abc	41.6±0.8 b
50	1000	22.1±0.8 a	31.9±0.6 abc	35.9±0.8 bc	36.2±1.0 bc
100	0	21.3±0.8 a	29.5±1.6 bc	32.6±1.6 c	33.6±1.1 bc
100	500	20.7±0.7 a	27.9±1.0 c	32.1±0.9 c	34.4±1.3 bc
100	1000	20.9±0.8 a	26.1±1.0 c	30.2±0.5 c	30.9±0.5 c

IDT = inicio de tratamientos; DDT = días después de tratamientos; Medias ± DE con letras distintas en cada columna y factor de estudio indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

**Cuadro 8.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en el diámetro de tallo de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		Diámetro de tallo (mm)					
		IDT	10 DDT	20 DDT	30 DDT		
<b>NaCl (mM)</b>							
0		5.4±0.2 a	6.0±0.3 a	6.5±0.2 a	6.9±0.3 a		
50		5.4±0.1 a	5.5±0.2 b	5.7±0.2 b	5.9±0.2 b		
100		5.0±0.2 b	5.2±0.2 b	5.4±0.1 b	5.8±0.2 b		
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
0		5.3±0.1 a	5.6±0.2 a	5.9±0.2 a	6.2±0.3 a		
500		5.3±0.2 a	5.6±0.3 a	5.9±0.4 a	6.2±0.3 a		
1000		5.3±0.2 a	5.5±0.2 a	5.7±0.3 a	6.1±0.4 a		
<b>NaCl (mM)</b>	<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>						
0	0	5.1±0.2 ab	5.8±0.2 ab	6.2±0.2 abc	6.6±0.4 abc		
0	500	5.8±0.1 a	6.4±0.2 a	6.8±0.3 a	7.0±0.1 a		
0	1000	5.4±0.2 ab	5.7±0.2 ab	6.4±0.2 ab	7.0±0.3 ab		
50	0	5.3±0.1 b	5.6±0.2 ab	5.9±0.2 bcd	6.2±0.3 abc		
50	500	5.2±0.1 ab	5.2±0.1 b	5.5±0.1 dc	5.8±0.2 c		
50	1000	5.6±0.2 ab	5.7±0.3 ab	5.7±0.2 bcd	5.7±0.2 c		
100	0	5.4±0.1 ab	5.5±0.2 ab	5.6±0.1 bcd	5.9±0.1 bc		
100	500	4.9±0.2 b	5.1±0.2 b	5.4±0.2 cd	5.7±0.3 c		
100	1000	4.8±0.1 b	5.0±0.1 b	5.2±0.1 d	5.7±0.2 c		

IDT = inicio de tratamientos; DDT = días después de tratamientos; Medias ± DE con letras distintas en cada columna y factor de estudio indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

**Cuadro 9.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en el área foliar de plántulas de tomate cv. Río Grande después de 30 DDT.

Fuente de variación		Área foliar (cm <sup>2</sup> )
<b>NaCl (mM)</b>		
	0	518.7±20 a
	50	276.2±46 b
	100	157.8± 25 c
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>		
	0	340.6±76 a
	500	322.7±90 a
	1000	289.5±88 a
NaCl (mM)	Ti (mg L <sup>-1</sup> )	
0	0	503.8±21 ab
0	500	547.4±19 a
0	1000	504.9±17 ab
50	0	340.5±51 bc
50	500	244.0±48 cd
50	1000	244.2±34 cd
100	0	177.4±19 cd
100	500	176.6±27 cd
100	1000	119.2±25 c

Medias ± DE con letras distintas en columna y factor de estudio indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En esta investigación no se observó el efecto benéfico del Ti ante las dosis salinas; si no que por el contrario a lo esperado, es probable que las dosis de Ti aplicadas a las plántulas de tomate provocaran un estrés adicional al ya establecido por la salinidad, lo que provocó que las variables evaluadas fueran afectadas de forma negativa. Efectos similares con Ti fueron reportados en cultivo de arroz (*Oryza*

*sativa* L.), ya que la exposición de las plantas a dosis entre 500 y 2000 mg Ti L<sup>-1</sup>, inhibió el crecimiento, redujo la biomasa de raíces y brotes, además de disminuir la concentración de K y Fe en brotes, este último considerado esencial en procesos fotosintéticos (Ma *et al.*, 2017).

#### **4.4.2. Unidades SPAD y pigmentos fotosintéticos.**

En este estudio, la dosis de 100 mM NaCl disminuyó significativamente las unidades SPAD 12% a los 20 DDT en comparación con su testigo. A los 30 DDT, las dosis 50 y 100 mM NaCl redujeron el valor de las unidades SPAD en 13 y 34% respectivamente, en comparación con su testigo (**Cuadro 10**). La acumulación a través del tiempo del anión Cl<sup>-</sup> produce necrosis foliar disminuyendo la capacidad fotosintética de las hojas e inhibe la absorción de nitrato; de igual manera, el exceso de Na<sup>+</sup> ejerce un efecto antagónico en el K<sup>+</sup> (efecto observado en este estudio en la **Figura 16**), el cual regula el metabolismo del nitrato al actuar como ión acompañante y como activador de la enzima nitrato reductasa encargada de iniciar el proceso de reducción del nitrato (Calderón-Paniagua *et al.*, 2001; Castorena *et al.*, 2006).

No se observaron diferencias significativas en las lecturas SPAD por la adición del Ti (**Cuadro 10**). Por otra parte, el tratamiento 100 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyeron en promedio 67% las unidades SPAD en comparación con el tratamiento sin salinidad y sin Ti (**Cuadro 10**). El NaCl afecta las unidades SPAD debido a que el Na<sup>+</sup> desplaza el magnesio disponible, elemento central en la molécula de clorofila (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2003; Netondo *et al.*, 2004), además de que la acumulación de los iones Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> en cloroplastos reduce el transporte de electrones (Nouman *et al.*, 2018). Aunque, el Ti mejora la concentración de Mg en los tejidos, no se observó el efecto benéfico del Ti ante las dosis salinas.

**Cuadro 10.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en las unidades SPAD de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Unidades SPAD				
	IDT	10 DDT	20 DDT	30 DDT	
<b>NaCl (mM)</b>					
0	43.9±1.24 ab	49.3±1.8 ab	54.4±2.0 a	52.8±2.9 a	
50	43.3±1.28 ab	50.4±2.6 ab	50.5±3.6 ab	45.8±2.8 b	
100	41.8±1.42 b	46.3±2.3 b	47.8±3.2 b	34.7±5.4 c	
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>					
0	43.9±1.4 a	49.3±2.8 a	49.8±3.1 a	43.1±4.1 a	
500	42.3±1.5 a	48.1±2.0 a	50.0±2.8 a	43.7±5.1 a	
1000	42.9±1.0 a	48.5±2.4 a	52.9±3.7 a	46.5±6.8 a	
<b>NaCl (mM) Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>					
0	0	44.3±1.7 a	47.9±2.2 a	51.3±2.0 a	49.2±4.5 ab
0	500	44.6±0.6 a	49.9±1.6 a	54.4±1.8 a	53.4±1.6 a
0	1000	42.9±1.1 a	50.0±1.6 a	57.5±0.7 a	55.9±0.5 a
50	0	44.8±1.1 a	52.3±3.3 a	50.5±3.6 a	41.9±2.9 abc
50	500	41.9±1.2 a	48.2±2.4 a	49.6±2.9 a	44.9±2.0 abc
50	1000	43.4±1.1 a	50.7±2.0 a	51.6±4.7 a	50.6±1.8 ab
100	0	42.5±1.4 a	47.8±2.7 a	47.6±3.6 a	38.2±3.0 bc
100	500	40.5±1.8 a	46.2±1.7 a	46.0±2.3 a	32.8±4.3 c
100	1000	42.3±0.8 a	44.7±2.5 a	49.8±3.9 a	33.1±8.2 c

IDT = inicio de tratamientos; DDT = días después de tratamientos; Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En los pigmentos foliares no se observaron diferencias significativas en los efectos principales del NaCl y del Ti (**Cuadro 11**). El NaCl inhibe la transpiración y la conductancia estomática, afecta componentes de la fotosíntesis como clorofilas y carotenoides, además del rendimiento cuántico del transporte de

electrones PSII (Soussi *et al.*, 1998; Stepien y Johnson, 2009). Este efecto solo fue observado en la variable clorofila total, donde en el tratamiento con 100 mM NaCl y con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> mostró una reducción en la concentración de clorofila total en 42% con respecto al tratamiento sin salinidad con 500 mg Ti L<sup>-1</sup>, en este caso no se observó el efecto benéfico del Ti (**Cuadro 11**).

**Cuadro 11.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en los pigmentos fotosintéticos en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		Chl a	Chl b	Carotenoides	Chl Total
(µg g <sup>-1</sup> PF)					
<b>NaCl (mM)</b>					
0		36.8±5 a	15.9±1 a	9.0±1.3 a	52.8±3.1 a
50		36.3±4 a	15.7±1 a	9.2±0.8 a	53.4±2.3 a
100		31.9±2 a	12.1±3 a	7.7±1.2 a	44.1±2.1 a
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>					
0		34.1±3 a	15.6±0.6 a	8.2±0.9 a	49.7±3.2 a
500		38.4±5 a	15.6±3.1 a	9.2±1.5 a	54.1±3.5 a
1000		33.9±3 a	12.5±2.0 a	8.6±0.8 a	46.4±4.0 a
NaCl (mM)	Ti (mg L <sup>-1</sup> )				
0	0	32.4±5 a	14.8±0.5 a	8.0±1.7 a	47.3±5.4 ab
0	500	47.7±2 a	19.0±0.3 a	11.4±0.4 a	66.7±2.1 a
0	1000	30.4±1 a	13.8±1.1 a	7.6±0.7 a	44.3±2.6 ab
50	0	36.1±2 a	16.1±0.7 a	8.4±0.8 a	52.3±2.1 ab
50	500	36.4±6 a	14.9±1.5 a	9.3±1.0 a	51.3±3.5 ab
50	1000	40.3± a	16.0±1.1 a	10.0±0.7 a	56.4±4.9 ab
100	0	33.7±1 a	15.7±0.7 a	8.1±0.2 a	49.4±1.9 ab
100	500	31.1±3 a	13.0±2.5 a	6.9±2.2 a	44.2±3.5 ab
100	1000	30.9±2 a	7.7±2.0 a	8.1±0.8 a	38.6±0.9 b

PF = peso fresco; Chla = clorofila a; Chlb = clorofila b; Chl total = clorofila total. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### **4.4.3. Azúcares totales en hojas, tallos y raíz de plántulas de tomate**

La concentración de azúcares totales en hojas de plántulas tratadas con 50 mM NaCl fue significativamente mayor al testigo en 26%, en tanto que, las tratadas con 100 mM NaCl no fue diferente estadísticamente al testigo. En tallo, la mayor concentración de azúcares se observó con la dosis 50 mM NaCl, la cual fue mayor en 30% al testigo y 34% al tratamiento con 100 mM NaCl. Mientras que, en raíz solo el tratamiento con 100 mM NaCl fue estadísticamente diferente al testigo, mostrando el valor más bajo, esta diferencia fue de 31% (**Cuadro 12**). La salinidad mejora la acumulación y transporte de los carbohidratos dentro de la planta, debido a, que promueve la expresión del gen *LeSUT<sub>1</sub>* que codifica la isoforma de un transportador de sacarosa de hojas fuente a través del floema a otros órganos como el tallo para después pasar a los frutos (Kühn *et al.*, 1997; Yin *et al.*, 2010).

**Cuadro 12.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la concentración de azúcares en plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Hoja		Tallo		Raíz		
	(g 100 g <sup>-1</sup> PF)						
<b>NaCl (mM)</b>							
0	1.06±0.10	a	1.87±0.2	b	0.52±0.06	a	
50	0.78±0.08	b	2.43±0.3	a	0.43±0.03	ab	
100	1.01±0.11	a	1.61±0.1	b	0.36±0.07	b	
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
0	1.01±0.07	a	2.43±0.3	a	0.48±0.06	a	
500	0.75±0.07	b	1.83±0.2	a	0.40±0.04	a	
1000	1.08±0.12	a	1.73±0.2	a	0.44±0.08	a	
<b>NaCl (mM)</b>	<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>						
0	0	1.12±0.07	ab	1.90±0.20	bc	0.54±0.07	a
0	500	0.83±0.06	bc	1.41±0.03	cd	0.43±0.04	a
0	1000	1.23±0.06	a	2.29±0.12	b	0.58±0.07	a
50	0	0.90±0.08	abc	3.32±0.03	a	0.39±0.04	a
50	500	0.66±0.07	c	2.19±0.21	b	0.44±0.04	a
50	1000	0.77±0.05	bc	1.77±0.15	bcd	0.48±0.03	a
100	0	1.01±0.03	abc	1.82±0.09	bcd	0.51±0.07	a
100	500	0.77±0.06	bc	1.87±0.10	bcd	0.32±0.03	a
100	1000	1.24±0.06	a	1.14±0.06	d	0.27±0.04	a

PF = peso fresco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

Por otro lado, la concentración de azúcares en hojas de plantas tratadas con la dosis 500 mg Ti L<sup>-1</sup> mostraron el valor más bajo de concentración de azúcares, siendo menor en 26% al testigo. En tallo y raíz el efecto del Ti no fue significativo en la concentración de azúcar (**Cuadro 12**). Los tratamientos sin salinidad tanto



con la dosis de 500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> no fueron diferentes estadísticamente al tratamiento sin salinidad y sin Ti. Sin embargo, hubo diferencia estadística entre ambas dosis (500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>). La mayor concentración se obtuvo con el tratamiento 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>, seguido del tratamiento con 500 mg Ti L<sup>-1</sup>, es decir, la dosis alta mejoró la concentración de azúcares 48% en comparación con la dosis baja. En los tratamientos con 50 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> no mostraron diferencias significativas, respecto al tratamiento con respecto al tratamiento con 50 mM y sin Ti. El tratamiento 50 mM NaCl con 500 mg Ti L<sup>-1</sup> fue diferente estadísticamente 41% al compararse con el tratamiento sin salinidad y sin Ti. Por otro lado, con el tratamiento 100 mM NaCl los tratamientos con 500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> no fueron diferentes estadísticamente al tratamiento con 100 mM NaCl y sin Ti. Sin embargo, el tratamiento con 100 mM NaCl y con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> fue mayor 62% al compararse con el tratamiento con 100 mM NaCl y con 500 mg Ti L<sup>-1</sup> (**Cuadro 12**).

En tallos, el tratamiento con 0 NaCl y con 500 mg Ti L<sup>-1</sup> redujo en 25% la concentración de azúcares en comparación con el tratamiento sin salinidad y sin Ti. Por otro lado, el tratamiento con 0 NaCl y con 100 mg Ti L<sup>-1</sup> no fue diferente al tratamiento sin salinidad y sin Ti. La mayor concentración de azúcares en tallos se observó con el tratamiento 50 mM NaCl sin Ti, siendo estadísticamente superior al tratamiento sin salinidad y sin Ti. Los tratamientos con 50 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> disminuyeron de forma significativa la concentración de azúcar, en 34 y 46% respectivamente, al compararse con el tratamiento con 50 mM NaCl y sin Ti. La concentración de azúcares más baja se observó en el tratamiento con 100 mM NaCl y con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>, esta fue menor en 40% al compararse con el tratamiento sin salinidad y sin Ti (**Cuadro 12**). En raíces, el efecto principal de Ti y NaCl, además de la interacción no fueron significativos (**Cuadro 12**).

#### **4.4.4. Capacidad antioxidante total**

Cuando un cultivo está bajo algún tipo de factor de estrés biótico o abiótico, se produce una sobre acumulación de radicales libres a nivel celular que provocan reacciones en cadena, dañando biomoléculas como proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, lo que conlleva a la muerte celular. En su defensa, las plantas activan su sistema antioxidante, el cual depende de diversas enzimas y compuestos como los fenólicos, flavonoides, entre otros. En tomate, los principales antioxidantes son el licopeno y ácido ascórbico, ellos se encargan de captar la mayor cantidad de especies reactivas de oxígeno (Guil-Guerrero y Reboloso-Fuentes, 2009).

En este estudio, la actividad antioxidante solo se redujo en 27% en hojas con la adición de 100 mM, respecto al testigo. En el resto de las dosis de NaCl, así como en las dosis de Ti y de la interacción NaCl y Ti no se tuvieron efectos significativos **(Cuadro 13)**.

**Cuadro 13.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	15 min			30 min			60 min		
	(mg g <sup>-1</sup> PF)								
<b>NaCl (mM)</b>									
0	0.70±0.09	a	0.73±0.08	a	0.75±0.07	a			
50	0.63±0.12	ab	0.66±0.10	a	0.69±0.08	a			
100	0.51±0.21	b	0.57±0.21	a	0.62±0.20	a			
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>									
0	0.67±0.11	a	0.71±0.10	a	0.73±0.08	a			
500	0.64±0.15	a	0.69±0.13	a	0.72±0.10	a			
1000	0.54±0.0.20	a	0.58±0.19	a	0.61±0.19	a			
<b>NaCl (mM)</b>	<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>								
0	0	0.71±0.02	a	0.75±0.01	a	0.77±0.01	a		
0	500	0.75±0.01	a	0.77±0.01	a	0.78±0.01	a		
0	1000	0.64±0.07	a	0.68±0.07	a	0.70±0.06	a		
50	0	0.68±0.04	a	0.68±0.03	a	0.74±0.02	a		
50	500	0.61±0.07	a	0.68±0.06	a	0.70±0.05	a		
50	1000	0.60±0.07	a	0.68±0.06	a	0.65±0.05	a		
100	0	0.62±0.10	a	0.68±0.09	a	0.69±0.07	a		
100	500	0.54±0.09	a	0.68±0.09	a	0.68±0.07	a		
100	1000	0.38±0.10	a	0.68±0.08	a	0.48±0.11	a		

PF= peso fresco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En tallos, la dosis 100 mM NaCl incrementó la actividad antioxidante en 50% con respecto al testigo, después de 60 min (**Cuadro 14**).

**Cuadro 14.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en tallos de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		15 min	30 min	60 min
		(mg g <sup>-1</sup> PF)		
<b>NaCl (mM)</b>				
	0	0.11±0.04 a	0.17±0.05 a	0.26±0.06 b
	50	0.28±0.09 a	0.38±0.11 a	0.48±0.10 ab
	100	0.32±0.11 a	0.41±0.10 a	0.52±0.09 a
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>				
	0	0.18±0.07 a	0.27±0.08 a	0.40±0.09 a
	500	0.21±0.08 a	0.29±0.09 a	0.40±0.05 a
	1000	0.32±0.07 a	0.41±0.08 a	0.47±0.06 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>			
0	0	0.10±0.05 a	0.15±0.07 a	0.15±0.09 a
0	500	0.05±0.02 a	0.13±0.01 a	0.13±0.01 a
0	1000	0.17±0.03 a	0.25±0.04 a	0.25±0.05 a
50	0	0.26±0.09 a	0.38±0.08 a	0.38±0.09 a
50	500	0.27±0.08 a	0.30±0.07 a	0.30±0.11 a
50	1000	0.32±0.08 a	0.47±0.10 a	0.47±0.09 a
100	0	0.17±0.05 a	0.29±0.04 a	0.29±0.05 a
100	500	0.31±0.07 a	0.43±0.06 a	0.43±0.06 a
100	1000	0.48±0.16 a	0.51±0.17 a	0.51±0.15 a

PF = peso fresco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En raíz, la actividad antioxidante fue incrementada con 50 mM NaCl a los 15, 30 y 60 min en 39, 41 y 48% respectivamente, en comparación con el testigo. Por el contrario, el efecto principal del Ti no fue significativo. En las interacciones

de los factores de estudio, a los 15 min la mayor actividad antioxidante se observó con el tratamiento conteniendo 50 mM NaCl con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> y la menor actividad con el tratamiento 100 mM NaCl con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>, en ambos casos fueron diferentes estadísticamente al tratamiento sin salinidad y sin Ti. A los 30 min, el tratamiento con 50 mM NaCl y con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> mostró el valor más alto de la actividad antioxidante. En tanto que, la menor actividad se observó con el tratamiento 100 mM NaCl con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>, ambos casos fueron diferentes al tratamiento sin salinidad y sin Ti. Mientras que, a los 60 min, se observó la misma tendencia con el tratamiento conteniendo 50 mM NaCl con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> al mostrar el valor más alto de la actividad antioxidante y con el tratamiento 100 mM NaCl con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> la menor actividad, de igual manera, en ambos casos fueron diferentes estadísticamente al tratamiento sin salinidad y sin Ti. **(Cuadro 15)**. La mayor actividad antioxidante fue observada con el factor NaCl en los tres órganos evaluados y solo en raíz observamos efectos interactivos positivos y negativos entre el NaCl y el Ti. Lo indica que la salinidad pudo haber activado enzimas como la superóxido dismutasa, catalasas y peroxidasas (Bailly *et al.*, 2000; Bybordi y Mamedov, 2010). Por otro lado, no se observó el benéfico del Ti en la actividad antioxidante evaluada.

**Cuadro 15.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en raíces de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		15 min	30 min	60 min
		(mg g <sup>-1</sup> PF)		
<b>NaCl (mM)</b>				
0		0.31±0.02 b	0.29±0.02 b	0.27±0.02 b
50		0.43±0.03 a	0.41±0.02 a	0.40±0.02 a
100		0.11±0.01 c	0.11±0.01 c	0.12±0.01 c
<b>Ti( mg L<sup>-1</sup>)</b>				
0		0.27±0.06 a	0.27±0.06 a	0.26±0.05 a
500		0.28±0.06 a	0.27±0.06 a	0.26±0.05 a
1000		0.29±0.08 a	0.28±0.08 a	0.27±0.07 a
NaCl (mM)	Ti (mg L <sup>-1</sup> )			
0	0	0.27±0.03 c	0.25±0.03 cd	0.23±0.03 cd
0	500	0.33±0.01 bc	0.31±0.01 bc	0.29±0.01 bc
0	1000	0.32±0.01 bc	0.31±0.01 bc	0.30±0.01 bc
50	0	0.42±0.04 ab	0.40±0.04 ab	0.39±0.04 ab
50	500	0.40±0.03 abc	0.39±0.02 ab	0.37±0.02 ab
50	1000	0.47±0.01 a	0.45±0.01 a	0.44±0.01 a
100	0	0.13±0.01 d	0.14±0.01 de	0.15±0.01 de
100	500	0.11±0.01 d	0.11±0.01 e	0.12±0.01 de
100	1000	0.08±0.01 d	0.08±0.02 e	0.09±0.02 e

PF = peso fresco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### 4.4.5. Concentración nutrimental

El incremento salino en el suelo o sustratos, así como en la solución nutritiva induce a que las plantas no absorban agua en suficiencia, debido a un aumento en la presión osmótica a nivel radicular, provocando respuestas en cadena como el cierre de estomas, reducción de la tasa de transpiración y menor carga de nutrientes en el xilema (Ashraf *et al.*, 2018). Se ha documentado que el NaCl afecta al N en procesos de absorción, además de su transporte y distribución a parte aérea, ya que el anión  $\text{Cl}^-$  tiene un efecto antagónico tanto con  $\text{NO}_3^-$  como con  $\text{NH}_4^+$  (Parida y Das, 2004; Abdelgadir *et al.*, 2005; Chrysargyris *et al.*, 2018). Sin embargo, este efecto no fue observado en nuestro trabajo, ya que el N no fue afectado por los tratamientos con 50 y 100 mM NaCl (**Cuadro 16**). En tanto que, con la dosis 100 mM NaCl se observó la mayor concentración de P (2.28) en comparación con su testigo. Este resultado es consistente con lo reportado en lavanda, la cual al ser tratada con 25 y 50 mM NaCl se observaron incrementos en la concentración de P (Chrysargyris *et al.*, 2018). Por otro lado, con ambas dosis salinas (50 y 100 mM NaCl) se observaron concentraciones menores de K (8.6 y 8.1, respectivamente) al compararse con el testigo. En el citoplasma el elemento más abundante es el potasio, lo cual le permite a la célula estabilizar el pH y el potencial osmótico, además de ser necesario para procesos metabólicos (Marchner, 2011), en este estudio se observó déficit de K con la salinidad. Sin embargo, el Ti mejoró el estatus de K foliar, como efecto principal y ante las dosis salinas (**Cuadro 16**).

En el efecto principal del Ti, se observaron efectos significativos en N, P y K, ya que con ambas dosis (500 y 1000 mg Ti  $\text{L}^{-1}$ ) se encontraron concentraciones por encima de su respectivo testigo. Estos valores corresponden a una diferencia de 7 y 19%; 14 y 28%; y 19 y 21%, respectivamente (**Cuadro 16**). En cuanto a los efectos interactivos, en N el valor más alto se encontró con el tratamiento con 1000 mg Ti  $\text{L}^{-1}$  sin NaCl (**Cuadro 16**). Efectos similares fueron reportados en soya (*Glycine max*) (Lu *et al.*, 2002) y en espinaca (*Spinacia oleracea*) (Gao *et al.*, 2006).

**Cuadro 16.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la concentración nutrimental (macronutrientes) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	N P K (g kg <sup>-1</sup> PS)						
	<b>NaCl (mM)</b>						
0	22.7±1.7	a	1.88±0.10	b	11.9±0.9	a	
50	22.5±0.7	a	1.99±0.06	b	8.6±0.4	b	
100	22.1±0.6	a	2.28±0.19	a	8.1±0.8	b	
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
0	20.6±0.9	c	1.79±0.06	c	8.4±0.60	b	
500	22.1±0.3	b	2.05±0.06	b	10.0±1.30	a	
1000	24.6±0.8	a	2.30±0.17	a	10.2±1.20	a	
<b>NaCl (mM) Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
0	0	19.0±1.2	c	1.62±0.01	d	9.47±0.05	b
0	500	22.8±0.4	b	1.97±0.06	bc	13.4±0.11	a
0	1000	26.3±0.2	a	2.06±0.02	bc	13.0±0.26	a
50	0	21.7±0.3	bc	1.84±0.02	cd	8.88±0.25	bc
50	500	22.1±0.2	bc	2.01±0.03	bc	9.49±0.13	b
50	1000	24.4±0.1	ab	2.10±0.02	bc	7.51±0.18	cd
100	0	21.7±0.4	bc	1.90±0.04	bcd	7.03±0.47	d
100	500	21.6±0.1	bc	2.18±0.03	b	7.33±0.27	d
100	1000	23.1±0.9	ab	2.75±0.12	a	10.1±0.16	b

PS = peso seco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).



Por otro lado, el NaCl disminuyó significativamente en 7.2 y 16% la concentración de Ca en hojas, con respecto al testigo. Mientras que, solo la dosis 100 mM NaCl disminuyó significativamente en 20 % la concentración de Mg foliar, con respecto a su testigo. En tanto que, con la dosis 100 mM NaCl se observó la mayor concentración foliar de Ti, con respecto al testigo.

Con la aplicación foliar de Ti, se observaron efectos significativos en Ca, Mg y Ti. En Ca, solo la dosis 500 mg Ti L<sup>-1</sup> incrementó en 8% la concentración foliar, en comparación con el testigo. Mientras que, ambas dosis foliares (500 y 1000 mg Ti L<sup>-1</sup>) incrementaron en 14 y 11% la concentración de Mg en hojas, con respecto al testigo. Estos resultados coinciden con los observados en cilantro (*Coriandrum sativum* L.), el cual, al ser tratado con dosis de 50, 100 y 200 mg nTiO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> se incrementó la concentración de Ca y Mg foliar (Hu *et al.*, 2020); y en cebada (*Hordeum vulgare* L.) tratada con 500 mg nTiO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> se observó un incremento en la concentración de Ca en granos, raíces y brotes. Es probable que el Ti mejoró la absorción y translocación de Ca, ya que este elemento tiene la función de mensajero en la relación factor de estrés y respuesta de las plantas (Poscic *et al.*, 2016). La concentración de Ti en hojas se incrementó conforme aumentaron las dosis foliares con TiO<sub>2</sub>.

En la interacción de los factores de estudio. Por un lado, no se observó el efecto benéfico del Ti en Ca. Por otro lado, los tratamientos con 50 mM NaCl tanto con 500 como con 1000 mg Ti L<sup>-1</sup> mejoraron en 8 y 22% la concentración de Mg foliar, en comparación con el tratamiento con 50 mM NaCl y sin Ti; y en 26 y 43%, en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin Ti.

**Cuadro 17.** Efectos principales y de interacción del NaCl y TiO<sub>2</sub> en la concentración nutrimental (macronutrientes y Ti) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Ca		Mg		Ti		
	(g kg <sup>-1</sup> PS)		(mg kg <sup>-1</sup> PS)		(mg kg <sup>-1</sup> PS)		
<b>NaCl (mM)</b>							
0	20.6±1.5	a	4.82±0.4	a	792±77.3	b	
50	19.1±0.3	b	4.80±0.2	a	895±97.8	b	
100	17.3±0.8	c	3.86±0.2	b	1445±156	a	
<b>Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
0	18.4±0.6	b	4.14±0.1	b	19±1.7	c	
500	19.9±1.6	a	4.73±0.3	a	1072±144	b	
1000	18.6±1.1	b	4.61±0.4	a	2042±336	a	
<b>NaCl (mM) Ti (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
0	0	17.0±0.04	cd	3.73±0.05	de	16±0.7	e
0	500	23.8±0.8	a	5.57±0.23	a	941±30	d
0	1000	20.9±0.09	b	5.18±0.03	ab	1419±3	c
50	0	19.0±0.10	bc	4.35±0.17	cd	19±1	e
50	500	18.9±0.34	bc	4.70±0.07	bc	848.23±28	d
50	1000	19.2±0.53	bc	5.34±0.07	ab	1820±49	b
100	0	19.3±0.67	bc	4.33±0.08	cd	23±0.7	e
100	500	16.8±0.22	cd	3.93±0.09	de	1426±98	c
100	1000	15.8±0.09	d	3.30±0.02	e	2887±138	a

PS = peso seco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### **4.5. CONCLUSIONES**

La salinidad afecta negativamente el crecimiento de la planta; asimismo reduce las concentraciones de azúcares solubles en hojas y raíz, así como, la actividad antioxidante. En la interacción de ambos factores de estudio, las dosis aplicadas de Ti no mostraron el efecto benéfico esperado ante el factor de estrés salino en las variables evaluadas; excepto en la variable clorofila total y en la concentración de macronutrientes donde sí se observó este efecto. Aun no es claro el efecto del Ti a nivel molecular que explique cómo mejora tanto clorofilas como macronutrientes. Por lo que se recomienda más investigación al respecto.

## **CAPÍTULO V. APLICACIÓN FOLIAR DE V AFECTA VARIABLES FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE PLÁNTULAS DE TOMATE, BAJO CONDICIONES SALINAS**

### **5.1. RESUMEN**

La salinidad es un factor de estrés abiótico para los cultivos, con tendencias crecientes a nivel global. Por otra parte, las concentraciones de vanadio en el suelo y agua se han incrementado en los últimos años, ya sea de forma antropogénica o industrial, permitiendo que sea biodisponible para las plantas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del vanadio en plántulas de tomate cv. Río Grande bajo estrés por cloruro de sodio. Las plántulas tratadas se mantuvieron en vasos de unicel de 250 cm<sup>3</sup> con agrolita. Dosis con NaCl (0, 50, 100 mM) se aplicaron a través de la solución nutritiva de Steiner al 50%; asimismo, se realizaron cuatro aplicaciones foliares con vanadio en dosis con 0, 25 y 50 mM V a partir de NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>. Se evaluaron variables de crecimiento, unidades SPAD, pigmentos fotosintéticos, azúcares totales, actividad antioxidante y concentración nutrimental. El cloruro de sodio afecta parámetros de crecimiento, variables bioquímicas y nutrimentos. Mientras que, el V afecta negativamente las concentraciones de clorofila b y de Ca y Mg en hoja, incrementa el diámetro de tallo, la concentración de carotenoides y Azúcares en tallos. Por otro lado, el V aumenta la concentración de clorofila a y de carotenoides ante el estrés salino, lo que demuestra el efecto estimulante del vanadio en plántulas de tomate. Los resultados obtenidos en este estudio indican que el V puede estimular parámetros de crecimiento y diferenciación en plántulas de tomate cv. Río Grande.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum*, elementos benéficos, pigmentos fotosintéticos, concentración nutrimental.

## 5.2. INTRODUCCIÓN

En México, la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tiene alto impacto económico. Desde el 2015 se ha mantenido como el número uno en lo que se refiere a exportación de este producto. Aunque la superficie destinada al cultivo de tomate se ha reducido en los últimos años, el crecimiento en la producción ha incrementado 54.2%, lo mismo que sus importaciones (77.8%), permitiéndole al país ser el principal proveedor a nivel mundial. Tan solo en el 2017, el volumen cosechado fue de 631 000 Mg respecto al obtenido en 2012. El principal mercado destino es Estados Unidos de América, ya que México le exporta el 90.1% del tomate que ese país consume, secundado por Canadá, país que importa el 65.3% del vegetal mexicano. (SAGARPA, 2017; SIAP, 2019).

Para el ciclo primavera-verano de 2019 se sembraron 12 880 ha, se cosecharon 1 457 ha y se obtuvieron 65 307 Mg en volumen de producción. La superficie total cosechada de tomate en México en el ciclo otoño-invierno del mismo año fue de 22 060 ha, Sinaloa, Michoacán y Sonora representaron el 64.1% con 11 305, 1 502 y 1 324 ha respectivamente. En cuanto a la producción, los 24 estados que cultivan esta hortaliza, produjeron 131 584 Mg, siendo San Luis Potosí, Sonora, Baja California y Sinaloa las entidades con el mayor porcentaje de producción (71.8%). (SIAP, 2019).

La salinidad es un factor de estrés abiótico que afecta alrededor de 780 millones de hectáreas de suelo cultivable, esta superficie representa el 6% del territorio agrícola a nivel mundial y se estima una pérdida del 50% para el 2050. La sal más común en el suelo es el NaCl, en altas concentraciones provoca tensiones hiperosmóticas, iónicas y oxidativas en las plantas. En México, existen 32 acuíferos con presencia de suelo salino y agua salobre, además de 18 acuíferos costeros con intrusión salina, la cual es usada como agua de riego en zonas de la península de Baja California y el Altiplano, zonas con alta producción de cultivo de tomate. El tomate tiene tolerancia media a la salinidad, ya que conductividades eléctricas por encima de 2.5 dS m<sup>-1</sup> induce efectos adversos en

el cultivo, tanto en germinación como en crecimiento, diferenciación, producción y rendimiento (Sanjuan *et al.*, 2015; Ladewig *et al.*, 2017; CONAGUA, 2018; Siddiqui *et al.*, 2019).

Por otro lado, el vanadio (V) es un metal de transición que ocupa el quinto lugar de los elementos que componen la litosfera. La concentración promedio de V en suelos es de 110 mg kg<sup>-1</sup> dependiendo del material parental o de la industrialización. Los estados de oxidación de mayor interés biológico son V<sup>+3</sup>, V<sup>+4</sup> y V<sup>+5</sup>, siendo la V<sup>+5</sup> la forma de V con mayor biodisponibilidad, aunque su movilidad depende de la interacción con los óxidos de hierro y aluminio, tanto en el suelo como en el agua. Los países con mayor extracción de este mineral son Rusia, Sudáfrica y China, además de la región de América del Norte (Akabayov y Akabayov, 2014; Akoumianaki *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2020).

El V es un elemento no esencial en plantas superiores. Sin embargo, existe evidencia que en niveles menores a 2 mg V L<sup>-1</sup> puede promover el crecimiento de las plantas (Akoumianaki *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2020) lo cual lo clasifica dentro de los elementos benéficos. En tomate (*Solanum lycopersicum* L.) 250 ng V mL<sup>-1</sup> incrementa la concentración de clorofilas (Basiouny, 1984); en campanilla del pantano (*Ipomea aquatica* Forsk) la dosis de 0.05 mg V L<sup>-1</sup> incrementa parámetros de crecimiento (Chen *et al.*, 2016); dosis entre 170 y 590 μM V incrementan la biomasa fresca y la absorción de P en garbanzo (Imtiaz *et al.*, 2017); y dosis de 5 μM V en plántulas de pimiento (*Capsicum annum* L.) incrementa la altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas, yemas florales, volumen de raíz y biomasa fresca y seca (García-Jiménez *et al.*, 2018). Mientras que, en sandía (*Citrullus lanatus*) la aplicación de 50 μM V mejora la actividad de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa y catalasa, además de mejorar la biosíntesis de clorofila (Nawaz *et al.*, 2018). Por lo antes mencionado, El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto principal del NaCl (0, 50 y 100 mM aplicado vía solución nutritiva) y del vanadio aplicado vía foliar (0, 25 y 50 μM V), y sus interacciones, en variables fisiológicas, bioquímicas y concentración nutrimental de plántulas de tomate.

### **5.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **5.3.1. Material vegetal**

En charolas de uniceL con 200 cavidades y usando turba como sustrato, se germinaron 200 semillas de tomate cv. Río Grande, de donde se obtuvieron plántulas, y las más vigorosas fueron trasplantadas 31 días después de la siembra (DDS) a vasos de uniceL de 250 cm<sup>3</sup>, previamente llenados con agrolita. Durante 27 DDT las plántulas se mantuvieron con la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1984) al 25% y a los 28 DDS se cambió la concentración a 50%. La temperatura media en el invernadero durante la fase experimental fue de 27.3 y 20.4 °C (día/noche), con una humedad relativa y luminosidad promedio de 72% y 136.92  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

#### **5.3.2. Tratamientos salinos y foliares**

Con el objetivo de evaluar las respuestas del V aplicado vía foliar a plantas de tomate sometidas a estrés salino, se estableció el experimento en un invernadero tipo túnel con ventana cenital, malla antiáfidos y cubierta plástica. As dosis de NaCl se agregaron a la solución nutritiva de Steiner al 50% (0, 50 y 100 mM NaCl), se aplicó a los 59 DDS por medio del riego al sustrato. Usando vasos de precipitados se aplicó el riego (80 mL de solución nutritiva por planta al día) de forma manual durante 59 DDS, a los 67 DDS se incrementó el volumen a 100 mL planta día<sup>-1</sup>, y a los 81 DDS se aumentó a 120 mL planta día<sup>-1</sup> (**Cuadro 18**).

**Cuadro 18.** Volumen de riego aplicado y actividades realizadas durante el experimento con V.

Actividad		DD S	DD T	DDM V
Riego	Siembra	0		
Aspersión a charola	Trasplante	31		
	Steiner 25%	32	1	
80 mL planta día <sup>-1</sup>	Steiner 50% e inicio de tratamientos salinos	59	28	
	Inicio de tratamientos foliares	60	29	0
100 mL planta día <sup>-1</sup>	2da aplicación foliar	67	36	7
	3ra aplicación foliar	74	43	14
120 mL planta día <sup>-1</sup>	4ta aplicación foliar	81	50	21
	Cosecha de plántulas	95	64	35

DDS = Días después de la siembra; DDT = Días después del trasplante; DDMV = Días después de medir variables.

Las aspersiones foliares de V (0, 25 y 50  $\mu\text{M}$  V, a partir de metavanadato de amonio,  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) se realizaron a los 60 DDS, donde el tratamiento testigo (0  $\mu\text{M}$  V) fue la aspersión de agua destilada. En horario de 6:00 h se realizaron cuatro aspersiones foliares en intervalos de 7 días, se asperjó cada plántula hasta punto de goteo. Para romper la tensión superficial de las gotas y obtener un área de mojado en las hojas, se usó Tween 20<sup>®</sup> como surfactante a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>. En el **Cuadro 19** se presenta el pH de los tratamientos foliares con y sin Tween 20<sup>®</sup>.



**Cuadro 19.** pH de los tratamientos foliares incluyendo V, con y sin Tween 20®, además de su ajuste para ser aplicado a las plantas.

V ( $\mu\text{M}$ )	pH sin Tween	pH con Tween	pH ajustado
0	7.54	3.54	4.00
25	7.32	4.00	4.00
50	6.38	3.30	4.00

### 5.3.3. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con un arreglo factorial  $3^2$ , donde el primer factor fueron las concentraciones salinas (0, 50 y 100 mM NaCl) y el segundo factor las aplicaciones foliares del elemento benéfico a tres concentraciones (0, 25 y 50  $\mu\text{M}$ ) de V. Cada uno de los nueve tratamientos tuvo tres repeticiones. Una planta por vaso de unisel se consideró como unidad experimental.

### 5.3.4. Variables de crecimiento

Después de 1, 10, 20 y 30 días del inicio de tratamientos se determinó la altura de planta y el diámetro de tallo. La altura de planta se midió con un flexómetro (TRUPER 5 m) desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento, para medir el diámetro de tallo se utilizó un calibrador vernier digital (Truper 14388; Shanghai, China), esta acción se realizó a 10 cm de la base. Las mediciones se realizaron a los 1, 10, 20 y 30 días después de tratamientos. A los 95 DDS se hizo cosecha de las plántulas y se determinó el área foliar con un integrador del área foliar (LI-CORLI-3000A; Lincoln, NE, EE. UU.). El peso de biomasa seca se realizó lo siguiente: las plantas se dividieron en raíces, tallos y hojas, después se colocaron en una estufa de aire forzado (Riossa HCF-125D; Guadalajara, Jalisco, México) a 70 °C, para posteriormente ser pesadas por separado en una balanza analítica (Adventurer Ohaus Pro AV213C; Parsippany, NJ, EE. UU.).

### **5.3.5. Unidades SPAD y concentración de carotenoides, clorofilas a, b y totales**

Con un medidor portátil SPAD-502® de Minolta se midieron las unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development) a los 0, 10, 20 y 30 DDT. Para determinar los carotenoides y las Chl *a*, Chl *b* y Chl total). Se tomaron 50 mg de hojas y se maceraron con 10 mL de etanol al 95% (v/v). Las muestras se centrifugaron a 10 000 opm en una centrífuga refrigerada (Eppendorf, 5424, Alemania) durante 5 min a 4 °C usando tubos Falcon de 15 mL. Se recuperó el sobrenadante en un nuevo tubo Falcon debidamente etiquetado. Se tomaron 0.5 mL del sobrenadante obtenido, y se mezcló con 4.5 mL de etanol al 95% (Sumanta *et al.*, 2014). En un espectrofotómetro (Jenway 6715 UV/Vis; Staffordshire, Reino Unido) se midieron las muestras a una absorbancia de 470, 649 y 664 nm. Las fórmulas usadas para calcular las concentraciones de los pigmentos fotosintéticos se presentan a continuación:

$$C \times c = (1000A_{470} - 2.13C_a - 97.63C_b) / 209$$

$$Ch-a = 13.36A_{664} - 5.19A_{649}$$

$$Ch-b = 27.43A_{649} - 8.12A_{664}$$

La concentración de clorofila total fue la suma de clorofila *a* y *b*.

### **5.3.6. Determinación de azúcares totales**

Siguiendo el protocolo propuesto por Bailey (1958) se determinaron los azúcares solubles totales. A 500 mg de muestra se le agregaron 50 mL de etanol al 80%. El sobrenadante se obtuvo por medio de una plancha calefactora (Thermo Scientific, SP131635, Malaysia) el cual se filtró y se llevó a un volumen final de 20 mL. Las muestras se incubaron durante 15 min en baño maría a 95 °C. El proceso terminó al colocar las muestras en hielo. Los azúcares totales, se cuantificaron por medio de una curva estándar utilizando glucosa (Sigma-

Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU.), y se midieron en un espectrofotómetro (Jenway 6715 UV/Vis) a una absorbancia de 600 nm.

### **5.3.7. Actividad antioxidante total**

La actividad antioxidante total se determinó con el método propuesto por Ibarra *et al.* (2011) modificado, como se indica a continuación. Se maceraron y homogenizaron 100 mg de tejido vegetal con nitrógeno líquido, acto seguido, se agregaron 1.5 mL de etanol al 60%, para después dejar reposar durante 24 h a una temperatura de 3 °C. Pasando las horas de reposo, las muestras se centrifugaron durante 20 min a 4 °C y a 15000 opm. Se colocaron 400 µL del sobrenadante, 600 µL de metanol al 80%, más 1 mL de solución de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) en un tubo de reacción y se procedió a agitarse en vórtex. Las muestras se leyeron después de 15, 30 y 60 min de agregado el DPPH en un espectrofotómetro (Jenway, 6715 UV/Vis, Reino Unido) a una longitud de onda de 517 nm. Se utilizó trólox (ácido 6-hidroxi-2, 5, 7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico) como estándar. Se utilizaron 2 blancos, uno para calibrar el espectrofotómetro (400 µL de etanol al 60% más 600 µL de metanol al 80%) y el segundo blanco fue utilizado en la curva estándar (sin trólox).

### **5.3.8. Concentración nutrimental**

Para realizar el análisis nutrimental, se pesaron 0.25 g de tejido seco y se colocaron en tubos de ensayo, acto seguido se les agregó una mezcla de ácidos ( $H_2SO_4:HClO_4$ ; 2:1, v/v) y  $H_2O_2$  para realizar digestión húmeda. Después de la digestión de la materia orgánica se aforó la muestra a 25 mL con agua desionizada y se filtró (Alcántar y Sandoval, 1999). Mediante el método de micro-Kjeldahl se determinó la concentración de N. El resto de los elementos se determinaron mediante lecturas en un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (Varian ICP OES 725-ES; Mulgrave, Australia).

### **5.3.9. Análisis estadístico**

Con los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza de acuerdo a un diseño de tratamientos con arreglo factorial y pruebas de comparación de medias por Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## 5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.4.1. Altura de planta, diámetro de tallo y área foliar.

El crecimiento de los cultivos puede ser afectado por condiciones ambientales (salinidad, sequía, temperatura, toxicidad por metales, etc.). Cada factor de estrés provoca una respuesta específica en la planta dependiendo de la especie y sus antecedentes genéticos (Van den Broeck *et al.*, 2017). La salinidad inducida por NaCl afecta el crecimiento de las plantas. Estos iones se acumulan en la pared celular, citoplasma y vacuola. Incrementan el potencial osmótico, afectan el pH celular, la turgencia y procesos fotosintéticos reduciendo la capacidad de la planta para convertir energía en biomasa (Parihar *et al.*, 2015). En este estudio la adición de NaCl a la solución nutritiva redujo significativamente la altura de la planta y diámetro de tallo de las plántulas de tomate a los 10, 20 y 30 DDT, además del área foliar como se observa en los **Cuadros 20, 21 y 22**, al compararse con su testigo. En parte, estos resultados, demuestran la capacidad que tienen las plantas sometidas a estrés (en este caso a salinidad) de reasignar energía y metabolitos secundarios como las hormonas (auxinas, brasinoesteroides, citoquininas, giberelinas, etc.) o ácidos (abcísico, jasmónico o salicílico) que son esenciales para equilibrar el crecimiento y defensa de las plantas (Shyu y Brutnell, 2015; Abouelsaad y Renault, 2018).

**Cuadro 20.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la altura de planta de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		Altura de planta (cm)			
		IDT	10 DDT	20 DDT	30 DDT
<b>NaCl (mM)</b>					
0		22.2±1.4 a	37.2±2.1 a	49.6±2.5 a	58.8±2.9 a
50		21.6±0.9 a	32.2±1.1 b	37.3±1.5 b	39.7±2.0 b
100		22.7±1.1 a	30.8±1.1 b	34.0±1.3 c	35.2±1.5 c
<b>V (µM)</b>					
0		22.9±1.2 a	34.7±2.1 a	41.0±3.8 a	44.1±5.1 a
25		21.5±1.1 a	32.9±2.3 a	40.7±4.6 a	45.0±6.7 a
50		22.1±1.1 a	32.7±1.6 a	39.3±3.0 a	44.7±5.1 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>				
0	0	23.8±0.8 a	38.9±2.3 a	50.3±2.3 a	56.2±3.2 a
0	25	21.7±1.7 a	36.9±2.6 ab	52.1±3.0 a	62.8±2.6 a
0	50	21.1±1.4 a	36.0±1.2 ab	46.4±1.0 a	57.3±2.0 a
50	0	21.5±1.0 a	32.4±0.9 bc	37.3±1.6 b	39.7±2.2 b
50	25	21.4±1.0 a	32.0±1.6 bc	36.4±1.4 b	37.8±1.6 b
50	50	21.9±0.7 a	32.1±0.8 bc	38.3±1.6 b	41.8±2.2 b
100	0	23.6±1.4 a	32.8±0.8 bc	35.5±1.9 b	36.5±2.4 b
100	25	21.2±0.6 a	29.8±0.8 c	33.4±0.7 b	34.4±0.6 b
100	50	23.2±1.0 a	29.9±1.1 c	33.2±0.7 b	34.9±1.0 b

IDT = inicio de tratamientos; DDT = días después de tratamientos; Medias ± DE con letras distintas en cada columna y factor de estudio indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En tanto que, el efecto principal de la aspersión foliar de V no fue significativo en la altura de planta, diámetro de tallo y área foliar (**Cuadros 20, 21 y 22**). Este resultado es consistente con lo reportado en otros estudios, como en plantas de soya cultivadas en suelos oxisoles, las cuales no presentaron efectos significativos en variables de crecimiento cuando se les agregaron dosis de 75 mg V kg<sup>-1</sup> (Wang y Liu, 1999), en plantas de tomate, con dosis de 1 y 10 mg NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> (Vachirapatama *et al.*, 2011), y en plántulas de pimiento con 15 µM V a los 28 DDT (García-Jiménez, *et al.*, 2018). Por el contrario, en arroz, al aplicarse dosis crecientes de V (15 a 70 mg L<sup>-1</sup>) el crecimiento se redujo significativamente (Altaf *et al.*, 2020b).

**Cuadro 21.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en el diámetro de tallo de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Diámetro de tallo (mm)				
	IDT	10 DDT	20 DDT	30 DDT	
<b>NaCl (mM)</b>					
0	5.96±0.3 a	6.38±0.2 a	6.87±0.2 a	7.63±0.4 a	
50	5.56±0.2 ab	2.58±0.2 b	6.08±0.3 b	6.13±0.2 b	
100	5.27±0.1 b	5.26±0.1 b	5.46±0.1 c	5.70±0.2 b	
<b>V (µM)</b>					
0	5.80±0.3 a	5.96±0.4 a	6.22±0.5 a	6.51±0.4 ab	
25	5.55±0.2 a	5.62±0.2 a	6.11±0.3 a	6.23±0.3 b	
50	5.45±0.2 a	5.64±0.3 a	6.08±0.3 a	6.73±0.7 a	
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>				
0	0	6.49±0.4 a	6.93±0.1 a	7.11±0.3 a	7.68±0.2 ab
0	25	5.62±0.1 ab	5.98±0.1 bc	6.57±0.1 ab	6.69±0.3 bc
0	50	5.78±0.4 ab	6.25±0.2 ab	6.92±0.2 a	8.53±0.3 a
50	0	5.60±0.3 ab	5.60±0.3 bc	6.10±0.5 abc	6.16±0.2 cd
50	25	5.60±0.3 ab	5.62±0.7 bc	6.19±0.4 abc	6.10±0.2 cd
50	50	5.48±0.1 b	5.52±0.1 bc	5.95±0.2 abc	6.14±0.2 cd
100	0	5.31±0.2 b	5.36±0.1 c	5.44±0.2 bc	5.68±0.2 cd
100	25	5.43±0.2 b	5.25±0.1 c	5.57±0.2 bc	5.89±0.3 cd
100	50	5.08±0.1 b	5.16±0.2 c	5.36±0.1 c	5.53±0.1 d

IDT = inicio de tratamientos; DDT = días después de tratamientos; Medias ± DE con letras distintas en cada columna y factor de estudio indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).



Por otro lado, en la interacción de los factores de estudio, en la variable AP las plántulas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  V y sin salinidad, mostraron la media más alta en comparación con los demás tratamientos (52 y 63 cm a los 20 y 30 DDT, respectivamente), a los 20 y 30 DDT, los tratamientos con 100 mM ya sea con 25 o 50  $\mu\text{M}$  V mostraron una reducción en la altura de planta de 34 y 35%; 39 y 38% respectivamente, en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin V. (**Cuadro 20**). Mientras que, en la variable diámetro de tallo la media más alta se obtuvo con el tratamiento 50  $\mu\text{M}$  V sin NaCl a los 30 DDT, sin ser significativo al compararse con el tratamiento sin salinidad y sin V. El tratamiento con 100 mM NaCl tanto con 25 y 50  $\mu\text{M}$  V redujeron el diámetro de tallo de forma significativa 24 y 25%; 22 y 25%; 23 y 28% a los 10, 20 y 30 DDT, respectivamente al compararse con el tratamiento sin NaCl y sin V (aunque no fueron diferentes estadísticamente al tratamiento con 100 mM NaCl sin V) como se puede apreciar en el **Cuadro 21**. En tanto que, en el área foliar los tratamientos con 50 y 100 mM NaCl tanto con 25 y 50  $\mu\text{M}$  V disminuyeron el AF 48 y 45%; y 61 y 60%, respectivamente en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin V (**Cuadro 22**). En los efectos interactivos de los factores de estudio, observamos que en las variables evaluadas (AP, DT y AF), la aplicación foliar de V no tuvo un efecto benéfico significativo en las plántulas expuestas a la salinidad, muy al contrario, en todos los casos las dosis altas de V en combinación con el NaCl disminuyeron significativamente las variables, al compararse con el tratamiento sin salinidad y sin vanadio. Estos resultados son congruentes con los obtenidos en otras investigaciones en donde dosis mayores a 2 mg V L<sup>-1</sup> provocan efectos fitotóxicos en plantas superiores (Serra *et al.*, 1989; Furukawa *et al.*, 2001; Saco *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2017; Imtiaz *et al.*, 2018; Nawaz *et al.*, 2018).

**Cuadro 22.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en el área foliar de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		Área foliar (cm <sup>2</sup> )	
<b>NaCl mM</b>			
	0	482.7±55	a
	50	252.1±30	b
	100	202.1±13	c
<b>V (µM)</b>			
	0	323.0±75	a
	25	281.7±65	a
	50	332.2±79	a
NaCl (mM)	V (µM)		
0	0	498.2±67	ab
0	25	426.6±72	ab
0	50	523.4±26	a
50	0	260.5±18	cd
50	25	222.7±08	cd
50	50	273.2±52	bcd
100	0	210.3±12	cd
100	25	195.7±09	d
100	50	200.1±21	d

Medias ± DE con letras distintas en la columna y factor de estudio indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### 5.4.2. Unidades SPAD y pigmentos fotosintéticos

En las plantas, concentraciones altas de clorofila dan paso a una mayor captación de fotones y por ende se registran niveles altos de fotosíntesis, esto se traduce en una mejor producción de biomasa y mejor crecimiento. Las unidades SPAD son una herramienta que nos indica el estatus relativo de la clorofila que

producen las hojas, ya que estas son sensibles al estrés salino (Nawaz *et al.*, 2017; Altaf *et al.*, 2020b).

**Cuadro 23.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en las unidades SPAD de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Unidades SPAD				
	IDT	10 DDT	20 DDT	30 DDT	
<b>NaCl (mM)</b>					
0	42.4±1.3 a	45.3±1.7 b	52.4±2.1 a	53.7±2.8 a	
50	44.6±1.6 a	50.1±1.9 a	51.8±3.3 a	45.5±2.8 b	
100	44.1±1.2 a	45.2±3.0 b	44.4±2.2 b	40.5±2.2 c	
<b>V (µM)</b>					
0	42.7±1.6 a	46.5±2.2 a	47.6±3.2 a	44.8±2.9 b	
25	44.2±0.9 a	48.5±1.8 a	49.4±2.6 a	49.2±4.3 a	
50	44.2±1.6 a	45.7±3.2 a	51.5±3.3 a	45.7±3.8 ab	
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>				
0	0	41.1±1.9 a	45.7±2.4 a	50.8±2.8 ab	50.9±2.0 abc
0	25	43.9±0.8 a	46.6±1.1 a	52.4±0.8 a	56.6±3.5 a
0	50	42.3±0.8 a	43.8±1.1 a	54.1±2.2 a	53.7±2.2 ab
50	0	42.4±1.0 a	49.2±1.7 a	49.8±3.4 ab	43.5±1.7 cd
50	25	44.6±1.5 a	51.3±1.9 a	50.8±2.1 ab	48.9±3.5 abcd
50	50	46.7±1.7 a	49.7±2.3 a	54.7±4.1 a	44.1±2.5 bcd
100	0	44.5±1.4 a	44.5±2.1 a	42.3±1.7 b	39.9±1.7 d
100	25	44.0±0.4 a	47.5±1.7 a	45.1±2.9 ab	42.1±2.5 cd
100	50	43.7±1.6 a	43.7±4.6 a	45.9±1.5 ab	39.4±2.4 d

IDT = inicio de tratamientos; DDT = días después de tratamientos; Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

La aplicación de los tratamientos salinos mostró efectos significativos en las unidades SPAD a partir de los 20 DDT. La dosis 100 mM NaCl disminuyó a los 20 DDT la variable significativamente en 15% en comparación con su testigo. En tanto que, a los 30 DDT ambas dosis salinas (50 y 100 mM NaCl) disminuyeron significativamente las unidades SPAD en 15 y 25% respectivamente, al compararse con su testigo (**Cuadro 23**). Este resultado es consistente con el reportado en manzana (Sotiropoulos, 2007), crisantemo (Lee y van Iersel, 2008), pepino (Colla *et al.*, 2012) y tomate (Camen *et al.*, 2017; Altaf *et al.*, 2020a). En este estudio no se observaron efectos significativos del V en las unidades SPAD a los 10 y 20 DDT. Sin embargo, a los 30 DDT la dosis 25  $\mu\text{M}$  V incrementó las unidades SPAD 10% en comparación con el testigo (**Cuadro 23**).

En los efectos interactivos, a los 30 DDT tratamientos con 100 mM de NaCl tanto con 25 como con 50  $\mu\text{M}$  V disminuyeron las unidades SPAD al compararse con el tratamiento sin salinidad y sin V en 17 y 23% respectivamente (**Cuadro 23**).

En los pigmentos fotosintéticos, la dosis 50 mM NaCl redujo significativamente la clorofila a y los carotenoides en 13 y 36% respectivamente, en comparación con los testigos. En tanto que, los valores obtenidos con 50 y 100 mM NaCl en clorofila b y total, fueron estadísticamente iguales a su respectivo testigo (**Cuadro 24**). En los fotosistemas I y II, cantidades de V por debajo de 2 mg kg<sup>-1</sup> actúan como catalizador redox en la cadena de transporte de electrones, mejorando la concentración de clorofila (Delfert y McDonald, 1985; García-Jiménez *et al.*, 2018). En esta investigación, el efecto principal del V en clorofila a, no presentaron efectos significativos, coincidiendo con lo reportado por Saldaña-Sánchez *et al.* (2019) en tomate y pimiento. La dosis 50  $\mu\text{M}$  V presentó efectos diferenciales en clorofila b y carotenoides. Por un lado, redujo 36% la clorofila b. Mientras que, incrementó 46% los carotenoides. El V no tuvo influencia en la clorofila total, coincidiendo con García-Jiménez *et al.* (2018), quienes al aplicar 15  $\mu\text{M}$  V a plantas de pimiento no encontraron diferencia significativa en la variable (**Cuadro 24**). En las interacciones de los factores de estudio, los pigmentos fotosintéticos mostraron efectos significativos diferenciales (**Cuadro**

**24).** En clorofila a, el valor más bajo se observó en el tratamiento 50 mM NaCl con 0  $\mu$ M V; en tanto que, el más alto se obtuvo con el tratamiento 100 mM NaCl con 50  $\mu$ M V, registrándose un incremento de 93% de forma significativa. En clorofila b, la mayor concentración fue en plantas tratadas con 50 mM NaCl con 0  $\mu$ M V y la menor concentración fue con el tratamiento 50 mM NaCl con 50  $\mu$ M V, entre estos tratamientos observamos una diferencia significativa de 60%. En la concentración de carotenoides el valor más bajo se obtuvo con la dosis 50 mM NaCl con 0  $\mu$ M V, esta menor en 36% al tratamiento sin NaCl y sin V. El valor más alto se observó con el tratamiento 100 mM NaCl con 50  $\mu$ M V y superior al tratamiento con 50 mM NaCl con 0  $\mu$ M V en 87%.

**Cuadro 24.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en los pigmentos fotosintéticos en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Chla</b>	<b>Chlb</b>	<b>Carotenoides</b>	<b>Chl Total</b>	
	<b>(<math>\mu\text{g g}^{-1}</math> PF)</b>				
<b>NaCl (mM)</b>					
0	27.4±2.4 ab	12.0±1.5 a	7.19±0.7 a	39.5±3.6 a	
50	23.7±3.0 b	16.0±4.0 a	4.63±1.3 b	39.7±4.2 a	
100	30.5±2.7 a	11.7±2.0 a	8.85±1.3 a	42.3±3.3 a	
<b>V (<math>\mu\text{M}</math>)</b>					
0	25.7±3.5 a	16.0±3.0 a	5.90±1.7 b	41.8±3.2 a	
25	26.3±2.0 a	13.3±2.6 ab	6.14±0.8 b	39.6±3.6 a	
50	29.6±3.1 a	10.3±2.1 b	8.62±1.3 a	40.0±4.4 a	
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (<math>\mu\text{M}</math>)</b>				
0	0	28.4±4.0 ab	11.4±1.3 ab	7.92±1.1 ab	39.9±5.2 a
0	25	28.4±1.5 ab	13.1±0.6 ab	6.64±0.2 b	41.5±2.1 a
0	50	25.4±1.4 ab	11.5±2.7 ab	7.01±0.7 ab	37.2±4.0 a
50	0	18.8±0.4 b	23.8±0.2 a	1.55±0.1 c	42.6±0.6 a
50	25	25.1±3.3 ab	14.6±4.3 ab	5.07±1.1 bc	39.7±5.7 a
50	50	27.2±3.3 ab	9.52±2.3 b	7.26±0.3 ab	36.7±5.6 a
100	0	29.8±2.4 ab	12.9±1.4 ab	8.23±0.8 ab	42.7±3.3 a
100	25	25.4±0.85 ab	12.2±2.7 ab	6.73±0.8 b	37.6±3.6 a
100	50	36.3±1.2 a	10.0±2.2 b	11.6±1.1 a	46.4±2.4 a

PF = peso fresco; Chla = clorofila a; Chlb = clorofila b; Chl total = clorofila total. Medias  $\pm$  DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### 5.4.3. Azúcares totales en hojas, tallos y raíces de plántulas de tomate

El incremento en la presión osmótica y la toxicidad por exceso del ion  $\text{Na}^+$  y el anión  $\text{Cl}^-$ , son dos formas de estrés salino que provocan desabasto hídrico y desbalance iónico a nivel celular en las plantas. La acumulación de azúcares en hojas, tallos o raíz, es una estrategia de las plantas para tolerar el estrés salino, ya que estos solutos tienen un rol importante en el ajuste osmótico celular, de esta manera, mantiene un gradiente de potencial hídrico adecuado para la absorción de agua (Ghorbani *et al.*, 2018; González-Jiménez *et al.*, 2020; Pastelín-Solano y Castañeda-Castro, 2020). En este estudio, la concentración de azúcares en hoja se redujo en 91 y 92% con 50 y 100 mM NaCl, respectivamente; mientras que en raíz las reducciones fueron de 49 y 48% en comparación con su testigo. La mayor concentración se observó en tallos de plántulas tratadas con 100 mM NaCl, este valor fue mayor al testigo en 12% (**Cuadro 25**).

Las dosis aplicadas de V vía foliar no afectaron estadísticamente la concentración de azúcares en hoja y raíz. En tanto que, en tallos la concentración más alta de azúcares se obtuvo con la aplicación de 50  $\mu\text{M}$  V siendo 18% mayor al testigo (**Cuadro 25**). En plantas de remolacha azucarera, girasol y pimiento, se encontraron concentraciones altas de azúcares al ser tratadas con 10 mM V; de 7.5 a 15 mg V  $\text{L}^{-1}$  y de 5 a 15  $\mu\text{M}$  V respectivamente (Singh y Wort, 1969; Abedini y Mohammadian, 2018; García-Jiménez *et al.*, 2018). Esto es debido, a una mejor tasa de fijación de carbono, ya que el V estimula enzimas de síntesis de sacarosa, como la sacarosa sintetasa, la sacarosa fosfato sintetasa y la uridín difosfato glucosa-pirofosforilasa (Singh y Wort, 1969).

**Cuadro 25.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en los azúcares totales solubles de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	Hoja		Tallo		Raíz	
	(g 100 g <sup>-1</sup> PF)					
<b>NaCl (mM)</b>						
0	11.37±0.1	a	2.25±0.12	b	0.81±0.10	a
50	0.96±0.05	b	2.00±0.14	c	0.41±0.09	b
100	0.88±0.06	b	2.53±0.19	a	0.42±0.05	b
<b>V (µM)</b>						
0	1.08±0.07	a	2.08±0.18	b	0.59±0.09	a
25	1.11±0.19	a	2.25±0.08	ab	0.50±0.07	a
50	1.03±0.11	a	2.45±0.23	a	0.55±0.18	a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>					
0	0	1.26±0.05	b	1.97±0.08	bc	0.76±0.04 ab
0	25	1.59±0.08	a	2.38±0.09	b	0.64±0.06 bc
0	50	1.26±0.05	b	2.41±0.08	ab	1.04±0.05 a
50	0	0.98±0.02	bc	1.75±0.08	c	0.58±0.12 bc
50	25	0.86±0.05	c	2.27±0.07	bc	0.35±0.02 c
50	50	1.04±0.02	bc	1.98±0.16	bc	0.31±0.06 c
100	0	1.01±0.005	abc	2.53±0.06	ab	0.44±0.03 bc
100	25	0.87±0.04	c	2.11±0.04	bc	0.50±0.06 bc
100	50	0.78±0.04	c	2.95±0.13	a	0.31±0.03 c

PF = peso fresco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

La mayor concentración de azúcares en hojas la observamos en tratamientos sin NaCl con la dosis 25 µM V superando en 27% al tratamiento sin NaCl y sin V. En tratamientos con 50 mM NaCl tanto con 0, 25 y 50 µM V, la concentración de azúcares se vio disminuida en 38, 46 y 34% respectivamente, en comparación



con el tratamiento sin NaCl y con 25  $\mu$ M V. Mientras que, tratamientos con 100 mM NaCl tanto con las dosis 25 y 50  $\mu$ M V mostraron los valores más bajos con una reducción de 31 y 38% respectivamente, en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin V (**Cuadro 25**).

En tallos, solo el tratamiento con 100 mM NaCl y con 50  $\mu$ M V incrementó significativamente la concentración azúcares en 33% al ser comparada con el tratamiento sin NaCl y sin V (**Cuadro 25**). Por otro lado, tratamientos con 50 mM NaCl tanto con 25 como con 50  $\mu$ M V y el tratamiento con 100 mM NaCl con 50  $\mu$ M V, disminuyeron la concentración de azúcar en 54, 59 y 59% respectivamente, en todos los casos al compararse con el tratamiento sin salinidad y sin V (**Cuadro 25**).

#### **5.4.4. Capacidad antioxidante total**

Los cultivos cuando son sometidos a factores de estrés bióticos o abióticos, de forma natural o inducida, generan especies reactivas de oxígeno (ERO) provocado por el desbalance iónico en las células. El mecanismo de defensa de las plantas para esta problemática, es la producción de diversos metabolitos secundarios que neutralizan o quelatan las ERO, dependiendo de la estructura química de los compuestos y de la presencia de los grupos hidroxilo (Pérez-Pérez *et al.*, 2017; Hinojosa-Davalos *et al.*, 2019; Clarenc-Arland *et al.*, 2020). En este estudio se midió la actividad antioxidante por el método DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), el cual se considera un radical libre, estable, de coloración violeta, que al entrar en contacto con las muestras a evaluar acepta un átomo de hidrógeno reduciéndose y cambiando su coloración violácea a amarilla (Kedare y Singh, 2011).

Los efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante en hojas no mostraron diferencias significativas (**Cuadro 26**).

**Cuadro 26.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		15 min	30 min	60 min
		(mg g <sup>-1</sup> PF)		
<b>NaCl (mM)</b>				
0		0.64±0.08 a	0.62±0.05 a	0.71±0.04 a
50		0.71±0.01 a	0.73±0.01 a	0.74±0.01 a
100		0.52±0.12 a	0.56±0.06 a	0.61±0.09 a
<b>V (µM)</b>				
0		0.57±0.06 a	0.61±0.05 a	0.65±0.08 a
25		0.72±0.01 a	0.74±0.01 a	0.75±0.01 a
50		0.58±0.05 a	0.63±0.08 a	0.67±0.07 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>			
0	0	0.62±0.07 a	0.68±0.05 a	0.71±0.04 a
0	25	0.74±0.01 a	0.75±0.01 a	0.76±0.02 a
0	50	0.55±0.06 a	0.63±0.08 a	0.67±0.06 a
50	0	0.71±0.01 a	0.73±0.05 a	0.74±0.05 a
50	25	0.72± 0.01 a	0.74±0.03 a	0.75±0.01 a
50	50	0.72±0.07 a	0.73±0.09 a	0.74±0.02 a
100	0	0.38±0.06 a	0.43±0.07 a	0.49±0.06 a
100	25	0.70±0.02 a	0.73±0.01 a	0.75±0.01 a
100	50	0.47±0.07 a	0.53±0.06 a	0.60±0.05 a

Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En tallos, la dosis 100 mM NaCl mostró mayor actividad antioxidante a los 15 min con respecto al su testigo. No se observaron efectos significativos de la aplicación de V en la actividad antioxidante. Mientras que, en los efectos

interactivos de los factores de estudio, solo el tratamiento con 50 mM NaCl y con 50  $\mu$ M V fue mayor en 87% al tratamiento con 50 mM NaCl sin V. A los 30 y 60 min no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en las interacciones de los factores de estudio (**Cuadro 27**).

**Cuadro 27.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en tallos de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		15 min	30 min	60 min
		(mg g <sup>-1</sup> PF)		
<b>NaCl (mM)</b>				
	0	0.49±0.04 b	0.60±0.04 a	0.68±0.03 a
	50	0.59±0.05 ab	0.65±0.09 a	0.70±0.07 a
	100	0.69±0.05 a	0.74±0.03 a	0.77±0.02 a
<b>V (µM)</b>				
	0	0.53±0.08 a	0.61±0.08 a	0.69±0.06 a
	25	0.63±0.07 a	0.69±0.06 a	0.73±0.04 a
	50	0.62±0.08 a	0.69±0.06 a	0.73±0.04 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>			
0	0	0.52±0.06 ab	0.62±0.05 a	0.70±0.02 a
0	25	0.52±0.02 ab	0.63±0.03 a	0.70±0.03 a
0	50	0.42±0.03 ab	0.54±0.04 a	0.63±0.05 a
50	0	0.40±0.08 b	0.52±0.05 a	0.63±0.05 a
50	25	0.62±0.06 ab	0.66±0.05 a	0.70±0.08 a
50	50	0.75±0.01 a	0.78±0.01 a	0.79±0.03 a
100	0	0.66±0.08 ab	0.70±0.06 a	0.74±0.03 a
100	25	0.75±0.01 ab	0.77±0.01 a	0.78±0.01 a
100	50	0.68±0.02 ab	0.75±0.01 a	0.78±0.01 a

Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

Entretanto, una reducción de la actividad antioxidante en raíces fue observada con la aplicación de 100 mM NaCl a los 15, 30 y 60 min, esto representó una diferencia significativa de 45, 38 y 36% respectivamente, al ser comparados con

sus respectivos testigos. No se observaron diferencias significativas en el efecto principal del V, ni en los efectos interactivos (**Cuadro 28**).

**Cuadro 28.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en raíces de plántulas de tomate cv. Río Grande.

<b>Fuente de variación</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>60 min</b>
	<b>(mg g<sup>-1</sup> PF)</b>		
<b>NaCl (mM)</b>			
0	0.11±0.02 a	0.13±0.02 a	0.14±0.02 a
50	0.08±0.01 ab	0.09±0.01 ab	0.10±0.01 ab
100	0.06±0.005 b	0.08±0.005 b	0.09±0.008 b
<b>V (µM)</b>			
0	0.10±0.02 a	0.11±0.02 a	0.12±0.02 a
25	0.07±0.01 a	0.09±0.01 a	0.09±0.01 a
50	0.08±0.01 a	0.10±0.01 a	0.11±0.02 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>		
0	0	0.14±0.02 a	0.16±0.02 a
0	25	0.07±0.01 a	0.08±0.02 a
0	50	0.12±0.01 a	0.14±0.01 a
50	0	0.09±0.02 a	0.10±0.02 a
50	25	0.09±0.003 a	0.10±0.008 a
50	50	0.06±0.006 a	0.07±0.01 a
100	0	0.07±0.004 a	0.08±0.005 a
100	25	0.06±0.006 a	0.07±0.005 a
100	50	0.07±0.006 a	0.08±0.004 a

Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

#### 5.4.5. Concentración nutrimental

Los macronutrientos N, P, K, Ca y Mg cumplen funciones importantes en crecimiento y diferenciación, síntesis de clorofila, proteínas, lípidos y enzimas, así como parte estructural de pared celular, membranas plasmáticas, moléculas energéticas y nucleótidos en plantas superiores (Arnon y Stout, 1939; Hawkesford *et al.*, 2012). En esta investigación, las dosis 50 y 100 mM NaCl disminuyeron la concentración foliar de K en 21 y 30% respectivamente, en comparación con su testigo. Este efecto tuvo lugar porque el Na aportado por NaCl desplaza al K en los mecanismos de absorción y transporte, además de que acumula iones de sodio en tejidos vegetales, induciendo un desbalance en la relación  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ , la cual es un de equilibrio homeostático de las plantas ante el estrés salino (Pitman, 1964; Sustr *et al.*, 2019). Las dosis foliares con 25 y 50  $\mu\text{M}$  V no afectaron significativamente el N, P y K de las hojas. Por otro lado, la concentración más alta de N se observó en el tratamiento con 50 mM NaCl y sin V, este valor fue 45% mayor al del tratamiento sin NaCl y Sin V. En P no hubo efectos significativos. Mientras que, en K solo el tratamiento con 100 mM NaCl y con 50  $\mu\text{M}$  V disminuyó su concentración en 55% al compararse con el tratamiento sin NaCl y Sin V (**Cuadro 29**).

**Cuadro 29.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la concentración nutrimental (macronutrientes) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		N	P	K
		(g kg <sup>-1</sup> PS)		
<b>NaCl (mM)</b>				
0		19.5±1.17 a	3.15±1.32 a	12.6±0.07 a
50		22.5±2.62 a	1.52±0.03 a	10.0±0.10 b
100		19.7±0.97 a	1.43±0.03 a	8.76±0.05 b
<b>V (µM)</b>				
0		22.2±2.76 a	1.48±0.07 a	11.3±0.84 a
25		20.2±0.97 a	3.33±1.31 a	10.7±1.50 a
50		19.4±1.05 a	1.32±0.12 a	9.34±1.38 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>			
0	0	19.4±0.75 b	1.40±0.03 a	13.5±0.25 a
0	25	20.8±0.37 ab	6.87±4.52 a	12.1±2.79 a
0	50	18.2±1.85 b	1.19±0.05 a	12.3±0.14 a
50	0	28.2±3.05 a	1.66±0.01 a	10.3±0.16 ab
50	25	19.3±0.51 b	1.54±0.05 a	9.96±0.13 ab
50	50	20.1±0.10 b	1.36±0.03 a	9.86±0.18 ab
100	0	18.9±0.48 b	1.37±0.04 a	10.1±0.26 ab
100	25	20.4±1.72 ab	1.57±0.02 a	10.0±0.33 ab
100	50	19.9±0.36 b	1.36±0.03 a	6.04±0.20 b

PS = peso seco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En el **Cuadro 30** se observa que la dosis 50 mM NaCl incrementó la concentración foliar de Ca en 12% en comparación con el testigo. La dosis 100 mM NaCl disminuyó la concentración de Mg en las hojas en 17%, al ser comparado con el testigo. En tanto que, ambas dosis de NaCl incrementaron la

concentración del V en las hojas en 36 y 52%, con respecto a su testigo. Por otro lado, las dosis foliares con 25 y 50  $\mu\text{M}$  V disminuyeron de forma significativa la concentración de Ca en 12 y 13% y la de Mg en 8 y 14% respectivamente, en comparación con el testigo. Este resultado es consistente con lo reportado en plantas de maíz dulce (*Zea mays* L., subsp. *Mays Saccharata* Group) tratadas con 0.1  $\mu\text{M}$ , en las cuales se observó decrementos de Ca y Mg en tallos y hojas (Grzanka *et al.*, 2020). El déficit de Mg en hojas se correlaciona directamente con la reducción de clorofila a y b encontrados en este estudio (**Cuadro 24**), ya que la biosíntesis de clorofila requiere de Mg para formar Mg-protoporfirina, a través de la enzima Mg-quelataasa (Alcántar-González *et al.*, 2016). La concentración de V en el follaje se vio incrementada con el aumento en las dosis aplicadas de V (**Cuadro 30**).

En los efectos interactivos, tratamientos sin NaCl y tanto con 25 como con 50  $\mu\text{M}$  V disminuyeron 16 y 26% respectivamente, el Ca foliar con respecto al tratamiento sin NaCl y sin V. De igual manera, tratamientos con 50 mM NaCl con 50  $\mu\text{M}$  V y con 100 mM NaCl tanto con 25 y 50  $\mu\text{M}$  V disminuyeron la concentración de Ca en 14, 22 y 9% respectivamente, en comparación con el tratamiento sin NaCl y sin V. La concentración de Mg en las hojas se redujo en 14 y 27% con los tratamientos sin salinidad tanto con 25 como 50 M V con respecto al tratamiento sin salinidad y sin V; asimismo, fue menor en 17 y 20% en los tratamientos con 50 mM NaCl y con 25 como 50 M V. De la misma manera, los tratamientos con 100 mM y 25 como 50 M V la redujeron en 27 y 28% (**Cuadro 30**).



**Cuadro 30.** Efectos principales y de interacción del NaCl y V en la concentración nutrimental (macronutrientes y V) en hojas de plántulas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación		Ca (g kg <sup>-1</sup> PS)	Mg (g kg <sup>-1</sup> PS)	V (mg kg <sup>-1</sup> PS)
<b>NaCl (mM)</b>				
0		19.8±1.40 b	6.49±0.47 a	3.49±0.36 c
50		22.1±1.28 a	6.54±0.28 a	5.46±0.48 b
100		19.2±0.86 b	5.39±0.18 b	7.27±0.73 a
<b>V (µM)</b>				
0		22.2±1.57 a	6.60±0.54 a	0.45±0.15 c
25		19.6±0.83 b	6.07±0.25 b	5.62±0.36 b
50		19.3±0.99 b	5.66±0.25 b	10.1±0.82 a
<b>NaCl (mM)</b>	<b>V (µM)</b>			
0	0	23.1±0.36 ab	7.54±0.13 a	0.00±0.00 e
0	25	19.3±0.66 cde	6.44±0.12 bc	0.00±0.00 e
0	50	17.0±0.44 e	5.49±0.25 cd	3.88±0.17 d
50	0	25.1±0.78 a	7.06±0.15 ab	6.60±0.32 c
50	25	21.5±0.38 bc	6.25±0.12 bcd	0.77±0.02 e
50	50	19.8±0.44 cde	6.05±0.24 bcd	5.85±0.21 c
100	0	18.5±0.82 cde	5.20±0.10 d	9.75±0.29 b
100	25	18.1±0.25 de	5.52±0.23 cd	0.60±0.52 e
100	50	21.1±0.50 cde	5.46±0.23 cd	7.14±0.20 c

PS = peso seco. Medias ± DE con letras en cada columna y factor de estudio distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## 5.5. CONCLUSIONES

Las aplicaciones salinas evaluadas en este estudio, mostraron efectos diferenciales en las variables medidas. Por un lado, afecta negativamente las variables de crecimiento, concentración de clorofila, la concentración de azúcares en hojas y raíz, la actividad antioxidante en raíz y la concentración de K, Ca y Mg en hojas. Por el contrario, incrementa la concentración de azúcares en tallo, la actividad antioxidante en tallo y raíz, e incrementa la concentración de V en los tejidos.

Las dosis de V aplicadas vía foliar, no afectaron la altura de planta, el área foliar ni la actividad antioxidante en hojas; pero redujeron la concentración de clorofila b, además de la de Ca y Mg en hojas. El V tuvo efectos positivos en el diámetro de tallo, carotenoides y la concentración de azúcares en tallo.

Mientras que, en la interacción de los factores de estudio en altura de planta, diámetro de tallo, área foliar, pigmentos fotosintéticos, azúcares totales, y en concentración de Ca y Mg, se encontraron reducciones. Por otro lado, se observaron incrementos en clorofila a, carotenoides y concentración de V en tejidos. Aún no es no es claro cómo afecta el V a nivel molecular las plantas de tomate cv. Río Supremo, por lo cual se recomienda más investigación al respecto.

## CONCLUSIÓN GENERAL

Como se mencionó anteriormente, la salinidad es un factor de estrés abiótico que afecta negativamente el cultivo de tomate. En nuestro estudio, la salinidad redujo el crecimiento de la planta, esto es debido a que el NaCl suministrado afectó la concentración de clorofilas y azúcares en hojas, además de la concentración de K, Ca y Mg, éste último es parte estructural de la clorofila, por lo que su ausencia supone una menor síntesis de la molécula decreciendo la producción de biomasa vegetal, tanto en cv. Río Supremo como en la cv. Río Grande. Sin embargo, se observó que la salinidad mejoró aspectos de calidad de fruto, como firmeza y parámetros de color en la cv. Río Supremo.

Por otro lado, diversos estudios han demostrado el aporte benéfico del Si, el Ti y el V en el crecimiento y diferenciación de plantas superiores. En esta investigación se encontró que el Si mejora la firmeza y parámetros de color, además de que reduce el efecto negativo de la salinidad en los frutos en la cv. Río Supremo. Por otro lado, los resultados obtenidos con Ti demuestran que mejora la germinación de semillas, los índices de germinación y de vigor 1 y 2, la longitud de raíz y tallo en crecimiento inicial, el contenido de humedad de raíz, tallo y hoja, la biomasa fresca de raíz, tallo y hoja, además de la biomasa seca de raíz en la cv. Río Grande. En plántulas, el Ti favorece la concentración de clorofila total y nutrimental en la cv. Río Grande. En tanto que, en frutos beneficia parámetros de color en la cv. Río Supremo, esto es debido a que el Ti es un fotocatalizador que se activa con luz ultravioleta. Mientras que, con V no se observaron efectos significativos en variables de crecimiento de las plántulas de tomate. Sin embargo, mejoró la concentración de carotenoides y azúcares en tallo. No se observó el efecto benéfico del V en las plantas cv. Río Grande ante la salinidad, si no que por el contrario en la interacción de los factores de estudio se observaron decrementos en variables de crecimiento, moleculares y nutrimentales. Aun no es claro el efecto tanto del Ti como del V a nivel molecular que explique el funcionamiento de estos elementos en la célula. Por lo que se recomienda más investigación al respecto.

## LITERATURA CITADA

- Abdelgadir, E. M., M. Oka, H. Fujiyama. 2005.** Characteristics of nitrate uptake by plants under salinity. *Journal of Plant Nutrition*, 28: 33–46. DOI:10.1081/PLN-200042156.
- Abdel-Latef, A. A. H., A. K. Srivastava, M. S. A. El- sadek, M. Kordrostami, L. S. P. Tran. 2018.** Titanium dioxide nanoparticles improve growth and enhance tolerance of broad bean plants under saline soil conditions. *Land Degradation & Development*, 29: 1065-1073. DOI: 10.1002/ldr.2780.
- Abdel-Latef, A. A., L. S. P. Tran. 2016.** Impacts of priming with silicon on the growth and tolerance of maize plants to alkaline stress. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1-10. DOI: 10.3389/fpls.2016.00243.
- Abedini, M., F. Mohammadian. 2018.** Vanadium effects on phenolic content and photosynthetic pigments of sunflower. *South Western Journal of Horticulture, Biology and Environment*, 9: 77-86.
- Abouelsaad, I., S. Renault. 2018.** Enhanced oxidative stress in the jasmonic acid-deficient tomato mutant *def-1* exposed to NaCl stress. *Journal of Plant Physiology*, 226: 136-144. DOI: 10.1016/j.jplph.2018.04.009.
- Abukabda, A. B., P. A. Stapleton, C. R. McBride, J. Yi, T. R., Nurkiewicz. 2017.** Heterogeneous Vascular Bed Responses to Pulmonary Titanium Dioxide Nanoparticle Exposure. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 4:33. DOI: 10.3389/fcvm.2017.00033.
- Agarie, S., H. Uchida, W. Agata, F. Kubota, P. B. Kaufman. 1998.** Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1: 89-95. DOI: 10.1626/pp.1.89.
- Agathokleous, E., E. J. Calabrese. 2019.** Hormesis can enhance agricultural sustainability in a changing world. *Global Food Security*, 20: 150-155. DOI: 10.1016/j.gfs.2019.02.005.
- Ahmed, M., U. Qadeer, M. A. Aslam. 2011.** Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research*, 6: 594-607. DOI: 10.5897/AJAR10.626.
- Akabayov, S. R., B. Akabayov. 2014.** Vanadate in structural biology. *Inorganica Chimica Acta*, 420: 16-23. DOI: 10.1016/j.ica.2014.02.010.
- Akoumianaki, I. A., P. E. Barouchas, A. Kyramariou, E. Ilia, N. K. Moustakas. 2015.** Effect of vanadium on dry matter and nutrient concentration in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.). *Bulletin UASVM Horticulture*, 72: 295-298. DOI: 10.15835/buasvmcn-hort:11348.

- Alcántar, G. G., V. M. Sandoval. 1999.** Handbook of Chemical Analyses of Plant Tissues. Chapingo, Mexico: Mexican Society of Soil Science.
- Alcántar-González, G., L. I. Trejo-Téllez, L. Fernández-Pavia, M. N. Rodríguez-Mendoza. 2016.** Elementos esenciales. *In: Nutrición de cultivos.* Alcántar-González, G., L. I. Trejo-Tellez, F. C. Gómez-Merino (eds). Biblioteca Básica de Agricultura. Segunda edición. pp. 443.
- Alcaraz-López, C., M. Botia, C. F. Alcaraz, F. Riquelme. 2003.** Effects of foliar sprays containing calcium, magnesium and titanium on plum (*Prunus domestica* L.) fruit quality. *Journal of Plant Physiology* 160: 1441-1446. DOI: 10.1078/0176-1617-00999.
- Altaf, M. A., R. Shahid, M. X. Ren, S. Naz, M. M. Altaf, A. Qadir, M. Anwar, A. Shakoor, F. Hayat. 2020a.** Exogenous melatonin enhances salt stress tolerance in tomato seedlings. *Biologia Plantarum*, 64: 604-615. DOI: 10.32615/bp.2020.090.
- Altaf, M. M., X. P. Diao, A. ur Rehman, M. Imtiaz, A. Shakoor, M. A. Altaf, H. Younis, P. Fu, M. U. Ghani. 2020b.** Effect of Vanadium on Growth, Photosynthesis, Reactive Oxygen Species, Antioxidant Enzymes, and Cell Death of Rice. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20: 2643-2656. DOI: 10.1007/s42729-020-00330-x.
- Andersen, C. P., G. King, M. Plocher, M. Storm, L. R. Pokhrel, M. G. Johnson, P. T. Rygielwicz. 2016.** Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35: 2223–2229. DOI: 10.1002/etc.3374.
- Arias, R., T. C. Lee, L. Logendra, H. Janes. 2000.** Correlation of lycopene measured by HPLC with the L\*, a\*, b\* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48: 1697-1702. DOI: 10.1021/jf990974e.
- Arnon, D. I., P. R. Stout, 1939.** The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14: 371-375. DOI: 10.1104/pp.14.2.371.
- Ashraf, M., S. M. Shahzad, M. Imtiaz, M. S. Rizwan. 2018.** Salinity effects on nitrogen metabolism in plants focusing on the activities of nitrogen metabolizing enzymes: A review. *Journal of Plant Nutrition*, DOI: 10.1080/01904167.2018.1431670.
- Asli, S., P. M. Neumann. 2009.** Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects

- on root water transport. *Plant, Cell & Environment*, 32: 577-584, DOI: 10.1111/j.1365-3040.2009.01952.x
- Avestan, S., M. Ghasemnezhad, M. Esfahani, C. S. Byrt. 2019.** Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy*, 9: 246-267. DOI: 10.3390/agronomy9050246.
- Bacilieri, F. S., A. C. Pereira de Vasconcelos, R. M. Quintao Lana, J. G. Mageste, J. L. R. Torres. 2017.** Titanium (Ti) in plant nutrition-A review. *Australian Journal of Crop Science*, 11: 382-386. DOI: 10.21475/ajcs.17.11.04.pne202.
- Bailey, R. W. 1958.** The reaction of pentoses with anthrone. *Biochemical Journal*, 68: 669-672. DOI: 10.1042/bj0680669.
- Bailly, C., A. Benamar, F. Corbineau, D. Come. 2000.** Antioxidant system in canola seeds as affected Priming. *Seed Science Research* 10: 35-42.
- Balaguera-López, H. E., Y. A. Deaquiz, J. G. Alvarez-Herrera. 2009.** Plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) proveniente de semillas embebidas en diferentes soluciones de giberelinas (GA<sub>3</sub>). *Agronomía Colombiana*, 27: 57-64.
- Barazarte, H., T. García, E. Garrido, H. Pérez, Y. Terán. 2010.** Evaluación de dos métodos colorimétricos para cuantificar sustancias pécticas en parchita (*Passiflora edulis*). *Bioagro*, 22: 1-6.
- Basiouny, F. M. 1984.** Distribution of vanadium and its influence on chlorophyll formation and iron metabolism in tomato plants, *Journal of Plant Nutrition*, 7: 1059-1073, DOI: 10.1080/01904168409363265
- Bassiony, S. S., M. G. Ibrahim. 2016.** Effect of silicon foliar sprays combined with moringa leaves extract on yield and fruit quality of "Flame Seedless" Grape (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Production*, 7: 1127-1135. DOI: 10.21608/jpp.2016.46946.
- Batu, A. 2004.** Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 61: 471-475. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00141-9.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., D. G. Debouck, J. P. Lynch. 2003.** Growth, gas exchange, water relations, and ion composition of *Phaseolus* species grown under saline conditions. *Field Crops Research*, 80: 207-222. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00179-X.
- Bedinger, G. M. 2018.** Titanium: 2015 Mineral Yearbook. U.S. Geological Survey. 16 pp. Disponible en línea: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/titanium/myb1-2015-titan.pdf>.

- Bedinger, G. M. 2018.** Titanium: 2016 Mineral Yearbook. United State Geological Survey, 16 pp.
- Benito-Bautista, P., N. Arellanes-Juárez, Pérez-Flores, M. E. 2016.** Color y estado de madurez del fruto de tomate de cáscara. *Agronomía Mesoamericana*, 27: 115-130. DOI: 10.15517/am.v27i1.21891.
- Billard, C. E., C. A. Dalzotto, V. H. Lallana. 2014.** Desinfección y siembra de asimbiótica de semillas de dos especies y una variedad de orquídeas del género *Oncidium*. *Polibotánica*. 38:145-157.
- Borghesi, E., M. L. González-Miret, M. L. Escudero-Gilete, F. Malorgio, F. J. Heredia, A. J. Meléndez-Martínez. 2011.** Effects of salinity stress on carotenoids, anthocyanins, and color of diverse tomato genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 11676-11682. DOI: 10.1021/jf2021623.
- Brown, P., S. Saa. 2015.** Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plants Science*, 6: 1-3. DOI: 10.3389/fpls.2015.00671.
- Buendía-Valverde, M. L., L. I. Trejo-Téllez, T. Corona-Torres, V. H. Aguilar-Rincón. 2018.** Cadmio, talio y vanadio afectan diferencialmente la germinación y crecimiento inicial de tres variedades de chile. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34: 737-749. DOI: 10.20937/rica.2018.34.04.14.
- Bybordi, A., G. Mamedov. 2010.** Evaluation of application methods efficiency of zinc and iron for canola (*Brassica napus* L.). *Notulae Scientia Biologicae* 2: 94-103.
- Calabrese, E. J., M. P. Mattson. 2017.** How does hormesis impact biology, toxicology, and medicine? *Aging and Mechanism of Disease*, 3: 1-8. DOI: 10.1038/s41514-017-0013-z.
- Calderón-Paniagua, N., A. A. Estrada-Luna, J. D. J. Martínez-Hernández. 2001.** Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7: 127-132.
- Camejo, D., W. Torres. 2000.** La salinidad y su efecto en los estadios iniciales del desarrollo de dos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales*, 21: 23-26.
- Camen, D., T. Iancu, C. Popescu, S. Stanciu, C. Dragomir, M. Moatar, N. Dragomir, E. Nistor, F. Sala. 2017.** Changes of physiological parameters in tomatoes under salt stress and fertilization levels. *Romanian Biotechnological Letters*, 22: 12821.

- Can-Chulim, A., E. Crúz-Crespo, H. M. Ortega-Escobar, E. I. Sánchez-Bernal, A. Madueño-Molina, J. I. Bojorquez-Serrano, O. R. Macilla-Villa. 2017.** Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la salinidad generada por NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaHCO<sub>3</sub>. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8: 1287-1300.
- Cantwell, M., S. Stoddard, M. LeStrange, B. Aegerter. 2007.** Report to the California tomato commission. Tomato variety trials: postharvest evaluations for 2006. UCCE Fresh Market Tomato Variety Trial 2006 Postharvest Evaluation. UC Davis, Davis Ca. USA. 16 p.
- Carbajal-Vázquez, V.H., F. C. Gómez-Merino, J. A. Herrera-Corredor, A. Contreras-Oliva, G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez. 2020.** Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from plants grown under salt stress conditions. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 48: 924-937. DOI: 10.15835/nbha48211904.
- Cardona, W., D. J. Gutiérrez, C. O. Monsalve, C. C. Bonilla. 2018.** Efecto de la salinidad sobre el crecimiento vegetativo de plantas de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) micorrizadas y sin micorrizar. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 11: 253-266. DOI: 10.17584/rcch.2017v11i2.6109.
- Castorena, M. V., E. A. C. Valencia, M. A. I. Ibarra, A. L. Ulery. 2006.** Absorción y traslocación de sodio y cloro en plantas de chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino. Revista Fitotecnia Mexicana, 29: 79-88.
- Cervantes-Avilés, P., E. Souza-Brito, A. Bernal-Martínez, J. A. Reyes-Aguilera, G. de la Rosa, G. Cuevas-Rodríguez. 2017.** Impacto de los nanocontaminantes en biorreactores aerobios para tratamiento de aguas residuales. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 16: 247-261.
- Chen, L., J. R. Liu, J. Gao, W. F. Hu, J. Y. Yang. 2020.** Vanadium in Soil-Plant System: Source, Fate, Toxicity, and Bioremediation. Journal of Hazardous Materials, 405: 1-62. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124200.
- Chen, T., T. Q. Li, J. Y. Yang. 2016.** Damage suffered by swamp morning glory (*Ipomoea aquatica* Forsk) exposed to vanadium (V). Environmental Toxicology and Chemistry, 35: 695-701. DOI: 10.1002/etc.3226.
- Choi, H. G., B. Y. Moon, K. Bekhzod, K. S. Park, J. K. Kwon, J. H. Lee, M. W. Cho, N. J. Kang. 2015.** Effects of foliar fertilization containing titanium dioxide on growth, yield and quality of strawberries during cultivation. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 56: 575-581. DOI: 10.1007/s13580-015-0023-3.
- Chrysargyris, A., E. Michailidi, N. Tzortzakis. 2018.** Physiological and biochemical responses of *Lavandula angustifolia* to salinity under mineral



- foliar application. *Frontiers in Plant Science*, 9: 489. DOI: 10.3389/fpls.2018.00489.
- Chung, Y. S., K. Ki-Seung, M. Hamayun, Y. Kim. 2020.** Silicon Confers Soybean Resistance to Salinity Stress Through Regulation of Reactive Oxygen and Reactive Nitrogen Species. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1725. DOI: 10.3389/fpls.2019.01725.
- Clarenc-Aarland, R., O. A. Castellanos-Hernández, A. Rodríguez-Sahagún, G. J. Acevedo-Hernández. 2020.** Efecto del estrés salino sobre la morfología y fitoquímica de orégano mexicano (*Lippia graveolens* Kunth) cultivado *in vitro*. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 22: 131-137. DOI: 10.18633/biotecnia.v22i3.1223.
- Colla, G., Y. Rouphael, E. Rea, M. Cardarelli. 2012.** Grafting cucumber plants enhance tolerance to sodium chloride and sulfate salinization. *Scientia Horticulturae*, 135: 177-185. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.11.023.
- CONAGUA. 2018.** Atlas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. 146 pp.
- CONAGUA. 2018.** Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 306 pp.
- Costan, A., A. Stamatakis, A. Chrysargyris, S. A. Petropoulos, N. Tzortzakis. 2020.** Interactive effects of salinity and silicon application on *Solanum lycopersicum* growth, physiology and shelf-life of fruit produced hydroponically. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100: 732-743. DOI: 10.1002/jsfa.10076.
- Craigie, J. S. 2011.** Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23: 371-393. DOI: 10.1007/s10811-010-9560-4.
- Cruz, B. R. M., G. J. G. González, P. S. Collado. 2013.** Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*, 28: 6-15. DOI: 10.3305/nh.2013.28.1.6302
- Cuacua-Temiz, C., L. I. Trejo-Téllez, J. Velasco-Velasco, F. C. Gómez-Merino. 2017.** Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se y Si en la nutrición de Heliconias (*Heliconia* sp.). *Agroproductividad*, 10: 62-68.
- Dann, E. K., D. P. Le. 2017.** Effects of silicon amendment on soilborne and fruit diseases of avocado. *Plants*, 6:51-65. DOI: 10.3390/plants6040051.
- de Cássia A. R., A. S. de Medeiros, M. C. M. Nicolau, O. F. de Assis, L. W. Lima, E. M. M. Aroucha, P. L. Gratao. 2018.** Influence of partial root-zone saline irrigation management on tomato yield and fruit quality from

- a potted-plant study. HortScience, 53: 1326-1331. DOI: 10.21273/HORTSCI13223-18.
- Delfert, D. M., J. M. McDonald. 1985.** Vanadyl and vanadate inhibit Ca<sup>2+</sup> transport systems of the adipocyte plasma membrane and endoplasmic reticulum. Archives of Biochemistry and Biophysics, 241: 665-672. DOI: 10.1016/0003-9861(85)90593-4.
- Díaz-Pérez, J. C., S. Bautista, R. Villanueva. 2000.** Quality changes in sapote mamey fruit during ripening and storage. Postharvest Biology and Technology, 18: 67-73. DOI: 10.1016/S0925-5214(99)00062-9.
- Domene, R. M. A., R. M. Segura. 2014.** Parametros de calidad externa en la industria agroalimentaria. Cajamar, Negocio Agroalimentario y Cooperativo, Ficha de Transferencia, No. 003.
- Doria, J. 2010.** Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. Cultivos Tropicales, 31: 74-85.
- du Jardin, P. 2015.** Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, 196: 3-14. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.021.
- El Kholy, M. F., A. A. Mahmoud, S. M. A. Mehaisen. 2018.** Impact of potassium silicate spray on fruiting, fruit quality and fruit storability of loquat trees. Middle East Journal of Agriculture Research, 7: 139-153.
- Elkhatib, H., S. M. Gabr, A. H. Roshdy, A. Al-Haleem, M. Mostafa. 2017.** The impacts of silicon and salicylic acid amendments on yield and fruit quality of salinity stressed tomato plants. Alexandria Science Exchange Journal, 38: 933-939. DOI: 10.21608/ASEJAIQJSAE.2017.4857.
- El-Mogy, M. M., C. Garchery, R. Stevens. 2018.** Irrigation with salt water affects growth, yield, fruit quality, storability and marker-gene expression in cherry tomato. Acta Agriculturae Scandinavica, Soil & Plant Science, 68: 727-737. DOI: 10.1080/09064710.2018.1473482.
- Emino, E. R., P. R. Warman. 2004.** Biological assay for compost quality. Compost Science and Utilization, 12: 342-348. DOI: 10.1080/1065657X.2004.10702203.
- FAO, 1991.** Guía para la manipulación de semillas forestales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en línea: <http://www.fao.org/docrep/006/AD232S/ad232s00.htm#TOC>.
- FAO. 2020.** Portal de suelos de la FAO: suelos con afectaciones salinas. Disponible en línea: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-afectados-por->

salinidad/more-information-on-salt-affected-soils/es/. Consultado: abril 15 de 2020.

- FAOSTAT. FAO. 2019.** Portal de datos/valor de producción. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Portal en línea: <http://www.fao.org/faostat/es/#data> (Octubre, 2019).
- Feizi, H., S. Amirmoradi, F. Abdollahi, P. S. Jahedi. 2013.** Comparative effects of nanosized and bulk titanium dioxide concentrations on medicinal plant *Salvia officinalis* L. Annual Research and Review in Biology, 3: 814-824.
- Feizi, H., M. Kamali, L. Jafari, M. P. Rezvani. 2013.** Phytotoxicity and stimulatory impacts of nanosized and bulk titanium dioxide on fennel (*Foeniculum vulgare* Mill). Chemosphere, 91: 506-511. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.12.012.
- Feizi, H., M. P. Rezvani, N. Shahtahmassebi, A. Fotovat. 2012.** Impact of bulk and nanosized titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) on wheat seed germination and seedling growth. Biological Trace Element Research, 146: 101-106. DOI: 10.1007/s12011-011-9222-7.
- Frazier, T. P., C. E. Burklew, B. Zhang. 2014.** Titanium dioxide nanoparticles affect the growth and microRNA expression of tobacco (*Nicotiana tabacum*). Functional and Integrative Genomics, 14: 75-83. DOI: 10.1007/s10142-013-0341-4.
- Furukawa, J., H. Yokota, K. Tanoi, S. Ueoka, S. Matsushashi, N. S. Ishioka, S. Watanabe, H. Uchida, A. Tsuji, T. Ito, T. Mizuniwa, A. Osa, T. Sekine, S. Hashimoto, T. M. Nakanishi. 2001.** Vanadium uptake and an effect of vanadium treatment on 18 F-labeled water movement in a cowpea plant by positron emitting tracer imaging system (PETIS). Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 249: 495-498. DOI: 10.1023/A:1013276224300.
- Gao, F., F. Hong, C. Liu, L. Zheng, M. Su, X. Wu, F. Yang, C. Wu, P. Yang. 2006.** Mechanism of nano-anatase TiO<sub>2</sub> on promoting photosynthetic carbon reaction of spinach. Biological Trace Element Research, 111: 239-253. DOI: 10.1385/BTER:111:1:239.
- Gao, L., B. Rao, H. Dai, H. Xie, P. Wang, F. Ma. 2019.** Kinetics of sulphuric acid leaching of titanium from refractory anatase under atmospheric pressure. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 55: 467-478. DOI: 10.5277/ppmp18159.
- García, S. M. L., J. V. Martínez, L. A. N. Avendaño, S. M. C. Padilla, H. O. Izquierdo. 2009.** Acción de oligosacáridos en el rendimiento y calidad de tomate. Revista Fitotecnia Mexicana, 32: 295-301.

- García, T. Y., A. P. García, A. G. Hernández, J. P. Pérez. 2011.** Estudio de la variación del índice de color durante la conservación de la piña variedad Cayena Lisa a temperatura ambiente. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20: 12-16.
- García-Jiménez, A., L. I. Trejo-Téllez, D. Guillen-Sánchez, F. C. Gómez-Merino. 2018.** Vanadium stimulates pepper plant growth and flowering, increases concentrations of amino acids, sugar and chlorophylls, and modifies nutrient concentrations. *PLoS ONE*, 13: e0201908. DOI: 10.1371/journal.pone.0201908.
- Ghorbani, A., S. M. Razavi, V. O. Ghasemi-Omran, H. Pirdashti. 2018.** *Piriformospora indica* inoculation alleviates the adverse effect of NaCl stress on growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Biology*, 20: 729-736. DOI: 10.1111/plb.12717.
- Giannakoula, A. E., I. F. Ilias. 2013.** The effect of water and salinity on growth and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Archives of Biological Sciences*, 65: 611-620. DOI: 10.2298/ABS1302611G.
- Gómez-Merino, F. C., L. I. Trejo-Téllez, A. García-Jiménez, H. F. Escobar-Sepulveda, S. M. Ramírez-Olvera. 2020.** Silicon flow from root to shoot in pepper: a comprehensive *in silico* analysis reveals a potential linkage between gene expression and hormone signaling that stimulates plant growth and metabolism. *PeerJ*, 8: e10053. DOI: 10.7717/peerj.10053.
- Gómez-Merino, F. C., L. I. Trejo-Téllez, C. Cuuacua-Temiz, M. A. Jácome-Chacón, H. E. Senties-Herrera. 2015.** Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *Agroentorno*, 166: 19-21.
- Gómez-Merino, F. C., L. I. Trejo-Téllez. 2018.** The role of beneficial elements in triggering adaptive responses to environmental stressors and improving plant performance. *in: Vats S. (eds) Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*. Springer, 137-172 pp. DOI: 10.1007/978-981-10-9029-5\_6.
- González-Jiménez, S. L., A. M. Castillo-González, M. García-Mateos, L. A. Valdez-Aguilar, C. Ybarra-Moncada, E. Avitia-García. 2020.** Respuesta de fresa cv. Festival a la salinidad. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43: 53-60. DOI: 10.35196/rfm.2020.1.53
- González-Moscoso, M., N. V. Martínez-Villegas, G. Cadenas-Pliego, A. Benavides-Mendoza, M. D. C. Rivera-Cruz, S. González-Morales, A. Juárez-Maldonado. 2019.** Impact of silicon nanoparticles on the antioxidant compounds of tomato fruits stressed by arsenic. *Foods*, 8: 612-630. DOI: 10.3390/foods8120612.
- González-Terán, G. E., F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez. 2020.** Effects of silicon and calcium application on growth, yield and fruit quality

- parameters of cucumber established in a sodic soil. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 19: 149-158. DOI: 10.24326/asphc.2020.3.13.
- Goykovic, C. V., D. R. G. Saavedra. 2007.** Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA*, 25: 47-58. DOI: 10.4067/S0718-34292007000300006.
- Guil-Guerrero, J. L., M. M. Reboloso-Fuentes. 2009.** Nutrient composition and antioxidant activity of eight tomato (*Lycopersicon esculentum*) varieties. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22: 123-129. DOI: 10.1016/j.jfca.2008.10.012.
- Guo, J., X. Dong, G. Han, B. Wang. 2018.** Salt-enhanced reproductive development of *Suaeda salsa* L. coincided with ion transporter gene upregulation in flowers and increased pollen K<sup>+</sup> content. *Frontiers in Plant Science*, 10: 333. DOI: 10.3389/fpls.2019.00333.
- Halpern, M., A. Bar-Tal, M. Ofek, D. Minz, T. Muller, U. Yermiyahu. 2015.** The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in Agronomy*, 130: 141-174. DOI: 10.1016/bs.agron.2014.10.001.
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. S. Moller, P. White. 2012.** Functions of macronutrients. *In: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 135 pp. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6.
- Hernández-Fuentes, A. D., E. R. López-Vargas, J. M. Pinedo-Espinoza, R. G. Campos-Montiel, J. Valdés-Reyna, A. Juárez-Maldonado. 2017.** Postharvest behavior of bioactive compounds in tomato fruits treated with Cu nanoparticles and NaCl stress. *Applied Sciences*, 7: 980-993. DOI: 10.3390/app7100980.
- Hinojosa-Dávalos, J., M. A. Cardona-López, M. Gutiérrez-Lomelí, A. Barrera-Rodríguez, M. A. Robles-García. 2019.** Identificación del perfil fitoquímico y efecto del estrés lumínico sobre la capacidad antioxidante del germinado de brócoli en un dispositivo germinador rotatorio tipo tambor. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 21: 67-75. DOI: 10.18633/biotecnia.v21i3.1013.
- Hofmann, T., G. V. Lowry, S. Ghoshal, N. Tufenkji, D. Brambilla, J. R. Dutcher, L. M. Gilbertson, J. P. Giraldo, J. M. Kinsella, M. P. Landry, W. Lovell, R. Naccache, M. Paret, J. A. Pedersen, J. M. Unrine, J. C. White, K. J. Wilkinson. 2020.** Technology readiness and overcoming barriers to sustainably implement nanotechnology-enabled plant agriculture. *Nature Food*, 1: 416-425. DOI: 10.1038/s43016-020-0110-1.

- Hu, J., X. Wu, F. Wu, W. Chen, J. C. White, Y. Yuang, B. Wang, B. Xing, S. Tao, X. Wang. 2020.** Potencial application of titanium dioxide nanoparticles to improve the nutritional Quality of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 389: 121837. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121837.
- Ibarra, E. E., S. M. Pacheco, M. R. García, C. R. San Miguel, V. G. Ramírez, H. R. M. Soto. 2011.** Actividad antioxidante de alcaloides de *Erythrina americana* Miller. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34: 241-246.
- Iglesias, M. J., J. García-López, J. F. Collados-Luján, F. López-Ortíz, M. Díaz, F. Toresano, F. Camacho. 2015.** Differential response to environmental and nutritional factors of high-quality tomato varieties. *Food Chemistry*, 176: 278-287. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.12.043.
- Imtiaz, M., M. Ashraf, M. S. Rizwan, M. A. Nawaz, M. Rizwan, S. Mehmood, B. Yousaf, Y. Yuan, A. Ditta, M. A. Mumtaz, M. Ali, S. Mahmood, S. Tu. 2018.** Vanadium toxicity in chickpea (*Cicer arietinum* L.) grown in red soil: Effects on cell death, ROS and antioxidative systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 158: 139-144. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.022.
- Imtiaz, M., M. S. Rizwan, M. A. Mushtaq, B. Yousaf, M. Ashraf, M. Ali, A. Yousuf, M. Rizwan, M. Din, Z. Dai, S. Xiong, S. Mehmood, S. Tu. 2017.** Interactive effects of vanadium and phosphorus on their uptake, growth and heat shock proteins in chickpea genotypes under hydroponic conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 134: 72-81. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2016.11.003.
- Islam, M. Z., M. A. Mele, C. H. O. I. Ki-Young, K. A. N. G. Ho-Min. 2018.** The effect of silicon and boron foliar application on the quality and shelf life of cherry tomatoes. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2:159-164. DOI: 10.13080/z-a.2018.105.020.
- ISTA. 2005.** ISTA handbook on seed sampling. Second edition. Basserdorf, Switzerland.
- Jones, M. M., N. C. Turner. 1978.** Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits. *Plant Physiology*, 61: 122-126.
- Kader, M. A. 2005.** A comparison of seed germination calculation formulae and the associated interpretation of resulting data. *Journal Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 138: 65-75.
- Karunakaran, G., R. Suriyaprabha, V. Rajendran, N. Kannan. 2016.** Influence of ZrO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> nanoparticles on maize seed germination under different growth conditions. *Nanobiotechnology*, 10: 171-177. DOI: 10.1049/iet-nbt.2015.0007.



- Ke, Q., L. Kang, H. S. Kim, T. Xie, C. Liu, C. Y. Ji, S. H. Kim, W. S. Park, A. Mi-Jeong, S. Wang, H. Li, X. Deng, S. S. Kwak. 2019.** Down-regulation of *lycopene  $\epsilon$ -cyclase* expression in transgenic sweetpotato plants increases the carotenoid content and tolerance to abiotic stress. *Plant Science*, 281: 52-60. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.01.002.
- Kedare, S. B., R. P. Singh. 2011.** Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay. *Journal of Food Science and Technology*, 48: 412–422. DOI: 10.1007/s13197-011-0251-1.
- Keller, A. A., S. McFerran, A. Lazareva, S. Sangwon. 2013.** Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*, 15: 1692-1708. DOI: 10.1007/s11051-013-1692-4.
- Khan, M. N. 2016.** Nano-titanium dioxide (Nano-TiO<sub>2</sub>) Mitigates NaCl Stress by Enhancing Antioxidative Enzymes and Accumulation of Compatible Solutes in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Plant Sciences*, 11: 1-11. DOI: 10.3923/jps.2016.1.11.
- Khan, M. N. 2016.** Nano-titanium dioxide (nano-TiO<sub>2</sub>) mitigates NaCl stress by enhancing antioxidative enzymes and accumulation of compatible solutes in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Plant Sciences*, 11: 1-11. DOI: 10.3923/jps.2016.1.11.
- Khot L. R., S. Sankaran, M. J. Mari, R. Ehsani, E. W. Schuster. 2012.** Applications of nano materials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35: 64-70. DOI: 10.1016/j.cropro.2012.01.007.
- Kim, S. H., Y. H. Kim, Y. O. Ahn, M. J. Ahn, J. C Jeong, H. S. Lee, S. S. Kwak. 2013.** Downregulation of the lycopene  $\epsilon$ - cyclase gene increases carotenoid synthesis via the  $\beta$ - branch- specific pathway and enhances salt- stress tolerance in sweetpotato transgenic calli. *Physiologia Plantarum*, 147: 432-442. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01688.x.
- Kühn, C, V. R. Franceschi, A. Schulz, R. Lemoine, W. B. Frommer. 1997.** Macromolecular trafficking indicated by localization and turnover of sucrose transporters in enucleate sieve elements. *Science*, 275: 1298-1300. DOI: 10.1126/science.275.5304.1298.
- Ladewig, P., F. C. Gómez-Merino, R. Servín-Juárez, L. I. Trejo-Téllez. 2017.** La salinidad afecta diferencialmente crecimiento y rendimiento de cuatro genotipos de tomate nativos de México. In F. Pérez, E. Figueroa, L. Godínez, R. García (eds.) *Ciencias de la Economía y Agronomía. Handbook T-II-ECORFAN*,
- Lee, M. K., M. W. Van Iersel. 2008.** Sodium chloride effects on growth, morphology, and physiology of chrysanthemum (*Chrysanthemum*×

*morifolium*). HortScience, 43: 1888-1891. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.6.1888.

- León-Calvario, I., M. Cabrera-De La Fuente, A. Benavides-Mendoza, A. Juárez-Maldonado, A. Sandoval-Rangel. 2020.** Tomato grafted and cultivated in saline medium and its relation on nutraceutical compounds of the fruits. Pakistan Journal of Botany, 52: 811-819. DOI: 10.30848/PJB2020-3(6).
- Liang, Y. 1999.** Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. Plant and Soil, 209: 217-224. DOI 10.1023/A: 1004526604913.
- López-Corona, B. E., I. Mondaca-Fernández, P. Gortáres-Moroyoqui, M. M. Meza-Montenegro, J. D. J. Balderas-Cortés, C. Ruiz-Alvarado, E. O. Rueda-Puente. 2019.** Enraizamiento de esquejes de *Salicornia bigelovii* (Torr.) por quitosano como un bioproducto de origen marino. Terra Latinoamericana, 37: 361-369. DOI: 10.28940/terra.v37i4.517.
- López-Cuén, P. I., D. González-Mendoza, M. I. Escobosa-García, V. Cárdenas-Salazar, F. Núñez-Ramírez, R. Soto-Ortiz, C. Ruiz-Alvarado. 2020.** Respuesta fisiológica diurna del tomate a la aplicación de silicio bajo condiciones de salinidad. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11: 339-352.
- López-Diazguerrero, N. E., V. Y. González, R. J. Hernández-Bautista, A. Alarcón-Aguilar, A. Luna-López, M. Königsberg. 2013.** Hormesis: lo que no mata, fortalece. Gaceta Médica de México, 149: 438-447.
- López-Salazar, R., G. González-Cervantes, R. E. Vázquez-Alvarado, E. Olivares-Sáenz, J. A. Vidales-Contreras, R. C. de la Rosa, M. Ortega-Escobar. 2014.** Metodología para obtener ácidos húmicos y fúlvicos y su caracterización mediante espectrofotometría infrarroja. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8: 1397-1407.
- Lou, Y. S., L. Wu, R. Lixuan, Y. Meng, Z. Shidi, Z. Huaiwei, Z. Yiwei. 2016.** Effects of silicon application on diurnal variations of physiological properties of rice leaves of plants at the heading stage under elevated UV-B radiation. International Journal of Biometeorology, 60:311-318. DOI: 10.1007/s00484-015-1039-1.
- Lu, C., C. Zhang, J. Wen, G. Wu, M. Tao. 2002.** Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. Soybean Science, 21: 168-171.
- Luyckx, M., J. F. Hausman, S. Lutts, G. Guerreiro. 2017.** Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. Frontiers in Plant Science, 8: 401-409 . DOI: 10.3389/fpls.2017.00411.



- Lyu, S., X. Wei, J. Chen, C. Wang, X. Wang, D. Pan. 2017.** Titanium as a Beneficial Element for Crop Production. *Frontiers Plant Science*, 8: 597. DOI: 10.3389/fpls.2017.00597.
- Ma, C., H. Liu, G. Chen, Q. Zhao, B. Eitzer, Z. Wang, W. Cai, L. A. Newman, J. C. White, O. P. Dhankher, B. Xing. 2017.** Effects of titanium oxide nanoparticles on tetracycline accumulation and toxicity in *Oryza sativa* (L.). *Environmental Science: Nano*, 4: 1827-1839. DOI: 10.1039/C7EN00280G.
- Machado, R. M. A., R. P. Serralheiro. 2017.** Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3: 1-13. DOI: 10.3390/horticulturae3020030.
- Madany, M. M. Y., A. M. Saleh, T. H. Habeeb, W. Hozien, H. AbdElgawad. 2020.** Silicon dioxide nanoparticle alleviate the threats of broomrape infection in tomato by inducing cell wall fortification and modulating ROS homeostasis. *Environmental Science: Nano*, 1-44. DOI: 10.1039/C9EN01255A.
- Madueño-Molina, A., J. D. García-Paredes, J. Martínez-Hernandez, R. Bugarín-Montoya, J. I. Bojorquez-Serrano. 2011.** Salinidad inducida con NaCl y aplicación de fósforo sobre las propiedades bioquímicas de frijolillo (*Rhynchosia minima* L (DC)). *Universidad y Ciencia*, 27: 43-51.
- Mahmoodzadeh, H., M. Nabavi, H. Kashefi. 2013.** Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). *Journal of Ornamental and Horticultural Plants*, 3: 25-32.
- Mao, X., Y. Zheng, K. Xiao, Y. Wei, Y. Zhu, Q. Cai, L. Chen, H. Xie, J. Zhang. 2018.** OsPRX2 contributes to stomatal closure and improves potassium deficiency tolerance in rice. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 495: 461-467. DOI: 10.1016/j.bbrc.2017.11.045.
- Marodin, J. C., J. T. V. Resende, R. G. F. Morales, M. L. S. Silva, A. G. Galvao, D. S. Zanin. 2014.** Yield of tomato fruits in relation to silicon sources and rates. *Horticultura Brasileira*, 32: 220-224. DOI: 10.1590/S0102-05362014000200018.
- Marodin, J. C., J. T. V. Resende, R. G. F. Morales, M. V. Faria, A. R. Trevizam, A. S. T. Figueiredo, D. M. Dias. 2016.** Tomato post-harvest durability and physicochemical quality depending on silicon sources and doses. *Horticultura Brasileira*, 34: 361-366. DOI: 10.1590/S0102-05362016003009.
- Marschner, H. 2011.** Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd ed. (Edit. P. Marschner); Academic Press: Amsterdam, The Netherlands. pp. 684.

- Masoud, A. A. B., E. M. A. Radwan, E. A. Abou-Zaid. 2018.** Effect of some Micro-nutrients, Silicon and GA3 Spraying on Yield and Fruit Quality of Pomegranate. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 49: 97-106. DOI: 10.21608/AJAS.2018.18688.
- Massaretto, I. L., I. Albaladejo, E. Purgatto, F. B. Flores, F. Plasencia, J. M. Egea-Fernández, M. C. Bolarin, I. Egea. 2018.** Recovering Tomato Landraces to Simultaneously Improve Fruit Yield and Nutritional Quality Against Salt Stress. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1778. DOI: 10.3389/fpls.2018.01778.
- Mattson, M. P. 2008.** Hormesis defined. *Ageing Research Reviews*, 7: 1-7. DOI: 10.1016/j.arr.2007.08.007.
- Mendoza-Hernández, C. S., E. E. Quiñones-Aguilar, G. E. López-Ramírez, L. López-Pérez, G. Rincón-Enríquez. 2019.** Densidad de microorganismos en rizósfera de limón mexicano con HuangLongBing e inoculado con hongos micorrízicos arbusculares y bacterias benéficas en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 37: 379-389. DOI: 10.28940/terra.v37i4.525.
- Miranda, D., C. Ulrichs, G. Fischer. 2012.** Efecto del cloruro de sodio (NaCl) sobre el crecimiento y colonización micorrízica en uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Avances de la Investigación Agronómica II*. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. p. 15-25.
- Miranda-Villagómez, E., L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, M. Sandoval-Villa, P. Sánchez-García, M. A. Aguilar-Méndez. 2019.** Nanophosphorus Fertilizer Stimulates Growth and Photosynthetic Activity and Improves P Status in Rice. *Journal of Nanomaterials*, Article ID 5368027, 11 pages. DOI: 10.1155/2019/5368027.
- Monroy-Vázquez, M. E., C. B. Peña-Valdivia, J. R. García-Nava, E. Solano-Camacho, H. Campos, E. García-Villanueva. 2017.** Imbibición, vialidad y vigor de semillas de cuatro especies de *Opuntia* con grado distinto de domesticación. *Agrociencia*, 51: 27-42.
- Mora, O., C. Le Mouël, M. de Lattre-Gasquet, C. Donnars, P. Dumas, O. Réchauchère, T. Brunelle, S. Manceron, E. Marajo-Petiizon, C. Moreau, M. Barzman, A. Forslund, P. Marty. 2020.** Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PLoS ONE*, 15(7): e0235597. DOI: 10.1371/journal.pone.0235597.
- Moreno-Alvarado, M., S. García-Morales, L. I. Trejo-Téllez, J. V. Hidalgo-Contreras, F. C. Gómez-Merino. 2017.** Aluminum Enhances Growth and Sugar Concentration, Alters Macronutrient Status and Regulates the Expression of NAC Transcription Factors in Rice. *Frontiers in Plant Science*, 8: 73. DOI: 10.3389/fpls.2017.00073.

- Mozafariyan, M., M. M. Kamelmanesh, B. Hawrylak-Nowak. 2016.** Ameliorative effect of selenium on tomato plants grown under salinity stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62: 1368-1380. DOI: 10.1080/03650340.2016.1149816
- Mshraky, A. M., K. A. Fatma, G. A. M. EL-Hadidy. 2016.** Influence of pre and post applications of potassium silicate on resistance of chilling injury of Olinda Valencia orange fruits during cold storage at low temperatures. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 5: 442-453.
- Mushtaq, Y, K. 2011.** Effect of nanoscale Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub> and carbon particles on cucumber seed germination. *Journal of Environmental Science and Health*, 46: 1732-1735. DOI: 10.1080/10934529.2011.633403.
- Nachshon, U. 2018.** Cropland soil salinization and associated hydrology: trends, processes and examples. *Water*, 10: 1-20. DOI: 10.3390/w10081030.
- Nardi, S., D. Pizzeghello, M. Schiavon, A. Ertani. 2016.** Plant biostimulants: physiological responses induced by protein hydrolyzed-based products and humic substances in plant metabolism. *Scientia Agricola*, 73: 18-23. DOI: 10.1590/0103-9016-2015-0006.
- Nawaz, M. A., C. Chen, F. Shireen, Z. Zheng, Y. Jiao, H. Sohail, M. Afzal, M. Imtiaz, M. A. Ali, Y. Huang, Z. Bie. 2018a.** Improving vanadium stress tolerance of watermelon by grafting onto bottle gourd and pumpkin rootstock. *Plant Growth Regulation*, 85: 41-56. DOI: 10.1007/s10725-018-0372-x.
- Nawaz, M. A., L. Wang, Y. Jiao, C. Chen, L. Zhao, M. Mei, Y. Yu, Z. Bie, Y. Huang. 2017.** Pumpkin rootstock improves nitrogen use efficiency of watermelon scion by enhancing nutrient uptake, cytokinin content, and expression of nitrate reductase genes. *Plant Growth Regulation*, 82: 233-246. DOI: 10.1007/s10725-017-0254-7.
- Nawaz, M. A., Y. Jiao, C. Chen, F. Shireen, Z. Zheng, M. Imtiaz, Z. Bie, Y. Huang. 2018b.** Melatonin pretreatment improves vanadium stress tolerance of watermelon seedlings by reducing vanadium concentration in the leaves and regulating melatonin biosynthesis and antioxidant-related gene expression. *Journal of Plant Physiology*, 220: 115-127. DOI: 10.1016/j.jplph.2017.11.003.
- Netondo, G. W., J. C. Onyango, E. Beck. 2004.** Sorghum and salinity. *Crop Science* 44: 797-805. DOI: 10.2135/cropsci2004.8060.
- Nouman W, Qureshi MK, Shaheen M, Zubair M. 2018.** Variation in plant bioactive compounds and antioxidant activities under salt stress. *In: Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants.* (Ed.) Vats, S. pp. 77-101. DOI: 10.1007/978-981-10-9029-5\_4.

- Ogunkunle, C. O., E. F. Adegboye, H. K. Okoro, V. Vishwakarma, K. Alagarsamy, P. O. Fatoba. 2020.** Effect of nanosized anatase TiO<sub>2</sub> on germination, stress defense enzymes, and fruit nutritional quality of *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench (okra). *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 120. DOI: 10.1007/s12517-020-5121-6.
- Padrón, P. C. A., L. G. M. Padrón, H. A. I. Montes. G. R. A. Oropeza. 2012.** Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) con sistema de visión computarizada durante la maduración. *Agronomía Costarricense*, 36: 97-111.
- Parida, A. K., A. B. Das. 2004.** Effects of NaCl stress on nitrogen and phosphorous metabolism in a true mangrove *Bruguiera parviflora* grown under hydroponic culture. *Journal of Plant Physiology*, 161: 921-928. DOI: 10.1016/j.jplph.2003.11.006.
- Parihar, P., S. Singh, R. Singh, V. P. Singh, S. M. Prasad. 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.
- Pastelín-Solano, M. C., O. Castañeda-Castro. 2018.** Afectaciones fisiológicas y bioquímicas en vitroplantas de caña de azúcar en respuesta al estrés hídrico y salino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9: 1483-1493. DOI: 10.29312/remexca.v9i7.1253.
- Pék, Z., L. Helyes, A. Lugasi. 2010.** Color changes and antioxidant content of vine and postharvest-ripened tomato fruits. *HortScience*, 45: 466-468. DOI: 10.21273/HORTSCI.45.3.466.
- Pérez, M. C., C. G. Carrillo, L. E. Vidal, G. E. Ortiz. 2016.** Efecto de la imbibición en la calidad fisiológica de semillas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7: 1765-1773.
- Pérez-Pérez, L. M., L. G. García-Borbón, R. I. González-Vega, J. C. Rodríguez-Figueroa, E. C. Rosas-Burgos, J. A. Huerta-Ocampo, S. Ruiz-Cruz, F. J. Wong-Corral, J. Borboa-Flores, E. O. Rueda-Puente, C. L. D. Toro-Sánchez. 2017.** Liberación de compuestos fenólicos ligados en el garbanzo (*Cicer arietinum* L.) utilizando microbiota humana intestinal. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 20: 146-154. DOI: 10.18633/biotecnia.v20i3.722.
- Pichardo, G. J. M., G. O. J. Ayala, H. V. A. González, O. C. M. Flores, S. J. A. Carrillo, L. A. Peña, P. A. Robledo, D. S. G. García. 2010.** Calidad fisiológica, ácidos grasos y respiración en semillas de tomate de cáscara deterioradas artificialmente. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33: 231-238.

- Pitman, M. G. 1964.** Sodium and potassium uptake by seedling of *Hordeum vulgare*. Australian Journal of Biological Sciences, 18: 10-24. DOI: 10.1071/BI9650010.
- Poscic, F., A. Matiello, G. Fellet, F. Miceli, L. Marchiol. 2016.** Effects of Cerium and titanium oxide nanoparticles in soil on nutrient composition of barley (*Hordeum vulgare* L.) Kernels. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13: 577. DOI: 10.3390/ijerph13060577.
- Qaryouti, M. M., W. Qawasmi, H. Hamdan, M. Edwan. 2007.** Influence of NaCl salinity stress on yield, plant water uptake and drainage water of tomato grown in soilless culture. In: VIII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Advances in Soil and Soilless Cultivation under Protected Environment, 747: 539-545. DOI: 10.17660/ActaHortic.2007.747.70.
- Qi, M., Y. Liu, T. Li. 2013.** Nano-TiO<sub>2</sub> Improve the Photosynthesis of Tomato Leaves under Mild Heat Stress. Biological Trace Element Research, 156:323–328. DOI: 10.1007/s12011-013-9833-2.
- Radziwill-Bienkowska, J. M., P. Talbot, J. B. J. Kamphuis, V. Robert, C. Cartier, I. Fourquaux, E. Lentzen, J. N. Audinot, F. Jamme, M. Réfrégiers, J. K. Bardowski, P. Langella, M. Kowalczyk, E. Houdeau, M. Thomas, M. Mercier-Bonin. 2018.** Toxicity of Food-Grade TiO<sub>2</sub> to Commensal Intestinal and Transient Food-Borne Bacteria: New Insights Using Nano-SIMS and Synchrotron UV Fluorescence Imaging. Frontiers in Microbiology, 9: 794. DOI: 10.3389/fmicb.2018.00794.
- Raliya, R., P. Biswas, J. C. Tarafdar. 2015.** TiO<sub>2</sub> nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (*Vigna radiata* L.). Biotechnology Reports, 5: 22-26. DOI: 10.1016/j.btre.2014.10.009.
- Ramesh, M., K. Palanisamy, B. K. Sharma, N. K. Sharma. 2014.** Effects of bulk & nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn. Journal of Global Biosciences, 3: 415-422.
- Ramírez-Olvera, S.M., L. I. Trejo-Téllez, S. García-Morales, J. A. Pérez-Sato, F. C. Gómez-Merino. 2018.** Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice. PLoS ONE, 13: e0194691. DOI: 10.1371/journal.pone.0194691.
- Ranal, M. A., D, S. D. García. 2006.** How and why to measure the germination process? Brazilian Journal of Botany, 29: 1-11. DOI: 10.1590/S0100-84042006000100002.

- Rezaei, F., P. Moaveni, H. Mozafari. 2015.** Effect of different concentrations and time of nano TiO<sub>2</sub> spraying on quantitative and qualitative yield of soybean (*Glycine max* L.) at Shahr-e-Qods, Iran. *Biological Forum*, 7: 957-964.
- Romero-Munar, A., E. Baraza, J. Gulías, C. Cabot. 2019.** Arbuscular mycorrhizal fungi confer salt tolerance in giant reed (*Arundo donax* L.) plants grown under low phosphorus by reducing leaf Na<sup>+</sup> concentration and improving phosphorus use efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 10: 843. DOI: 10.3389/fpls.2019.00843.
- Rouphael, Y., G. Colla. 2020.** Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1-7. DOI: 10.3389/fpls.2020.00040.
- Rouphael, Y., G. Raimondi, L. Lucini, P. Carillo, M. C. Kyriacou, G. Colla, V. Cirillo, A. Pannico, C. El-Nakhel, S. De Pascale. 2018.** Physiological and Metabolic Responses Triggered by Omeprazole Improve Tomato Plant Tolerance to NaCl Stress. *Frontiers in Plant Science*, 9: 249-265. DOI: 10.3389/fpls.2018.00249.
- Ruffini, C. M., L. Giorgetti, L. Bellani, S. Muccifora, S. Bottega, C. Spano. 2016.** Root responses to different types of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and bulk counterpart in plant model system *Vicia faba* L. *Environmental and Experimental Botany*, 130: 11-21. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2016.05.002.
- Ruiz, M. S., H. Yasuor, A. Ben-Gal, U. Yermiyahu, Y. Saranga, R. Elbaum. 2015.** Salinity induced fruit hypodermis thickening alters the texture of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill) fruits. *Scientia Horticulturae*, 192, 244-249. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.06.002.
- Saco, D., S. Martín, P. San Jose. 2013.** Vanadium distribution in roots and leaves of *Phaseolus vulgaris*: morphological and ultrastructural effects. *Biologia Plantarum*, 57: 128-132. DOI: 10.1007/s10535-012-0133-z.
- SADER. 2019.** Reporte del mercado de tomate rojo. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en línea: [https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/cadena/2019/Reporte\\_mercado\\_jitomate\\_130319.pdf](https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/cadena/2019/Reporte_mercado_jitomate_130319.pdf). Consultado: octubre 20, 2019.
- Safoora, D., G. Cyrus, B. Bahram, G. Mahdi, S. Siamak. 2018.** Effect of silicon on growth and development of strawberry under water deficit conditions. *Horticultural Plant Journal*, 4: 226-232. DOI: 10.1016/j.hpj.2018.09.004.
- SAGARPA. 2017.** Jitomate mexicano: Planeación agrícola nacional, 2017-2030. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en línea:



<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>. Consultado: octubre 20, 2019.

- Saito, T., C. Matsukura, Y. Ban, K. Shoji, M. Sugiyama, N. Fukuda, S. Nishimura. 2008.** Salinity stress affects assimilate metabolism at the gene-expression level during fruit development and improves fruit quality in tomato (*Solanum lycopersium* L.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 77: 61-68. DOI: 10.2503/jjshs1.77.61.
- Saldaña-Sánchez, W. D., J. M. León-Morales, Y. López-Bibiano, M. Hernández-Hernández, E. C. Langarica-Velázquez, S. García-Morales. 2019.** Effect of V, Se, and Ce on Growth, Photosynthetic Pigments, and Total Phenol Content of Tomato and Pepper Seedlings. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19: 678-688. DOI: 10.1007/s42729-019-00068-1.
- Salinas, A. R., A. M. Yoldjian, M. R. Cravioto, V. Bisaro. 2001.** Pruebas de vigor y calidad fisiológica de semillas de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36: 371-379. DOI: 10.1590/S0100-204X2001000200022.
- San Martín-Hernández, C., V. M. Ordaz-Chaparro, P. Sánchez-García, M. T. B. Colinas-Leon, L. Borges-Gómez. 2012.** Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponia con diferentes granulometrias de tezontle. *Agrociencia*, 46: 243-254.
- Sanjuan, L. F., P. R. Vallejo, P. S. García, M. S. Villa, M. L. Muñoz, J. C. C. Rodríguez, C. P. Segovia. 2015.** Tolerancia de líneas nativas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la salinidad con NaCl. *Interciencia*, 40: 704-709.
- SAS Institute Inc. 2011.** Base ASA® 9.3 Procedures Guide: Statical Procedures. (Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.).
- Sato, S., S. Sakaguchi, H. Furukawa, H. Ikeda. 2006.** Effects of NaCl application to hydroponic nutrient solution on fruit characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae*, 109: 248-253. DOI: 10.1016/j.scienta.2006.05.003.
- Sentíes-Herrera, H. E., L. I. Trejo-Téllez, V. H. Volke-Haller, J. Cadena-Íñiguez, P. Sánchez-García, F. C. Gómez-Merino. 2017.** Iodine, Silicon, and Vanadium Differentially Affect Growth, Flowering, and Quality Components of Stalks in Sugarcane. *Sugar Tech*, 20: 518-533. DOI: 10.1007/s12355-017-0572-0.
- Serra, M. A., E. Sabbioni, A. Marchesini, A. Pintar, M. Valoti. 1989.** Vanadate as an inhibitor of plant and mammalian peroxidases. *Biological Trace Element Research*, 23: 151-164. DOI: 10.1007/BF02917186.

- Serrano, M., D. Martínez- Romero, S. Castillo, F. Guillén, D. Valero. 2004.** Effect of preharvest sprays containing calcium, magnesium and titanium on the quality of peaches and nectarines at harvest and during postharvest storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84:1270-1276. DOI: 10.1002/jsfa.1753.
- Servin, A. D., H. Castillo-Michel, J. A. Hernandez-Viezcas, B. C. Diaz, J. R. Peralta-Video, J. L. Gardea-Torresdey. 2012.** Synchrotron micro-XRF and micro-XANES confirmation of the uptake and translocation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Environmental Science & Technology*, 46: 7637-7643. DOI: 10.1021/es300955b.
- Shi, H., R. Magaye, V. Castranova, J. Zhao. 2013.** Titanium dioxide nanoparticles: a review of current toxicological data. *Particle and Fibre Toxicology*, 10: 1-33. DOI: 10.1186/1743-8977-10-15.
- Shyu, C., T. P. Brutnell. 2015.** Growth-defense balance in grass biomass production: the role of jasmonates. *Journal of Experimental Botany*, 66: 4165-4176. DOI: 10.1093/jxb/erv011.
- SIAP. 2019.** Boletín mensual de producción Tomate rojo (Jitomate). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/479692/Boletin\\_mensual\\_produccion\\_Tomate\\_Rojo\\_junio\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/479692/Boletin_mensual_produccion_Tomate_Rojo_junio_2019.pdf). Consultado: octubre 20, 2019.
- Siddiqui, M. H., S. Alamri, M. Y. Al-Khaishany, M. N. Khan, A. Al-Amri, H. M. Ali, I. A. Alaraidh, A. A. Alsahli. 2019.** Exogenous melatonin counteracts NaCl-induced damage by regulating the antioxidant system, proline and carbohydrates metabolism in tomato seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 20: 353-376. DOI: 10.3390/ijms20020353.
- Singh, B., D. J. Wort. 1969.** Effect of vanadium on growth, chemical composition, and metabolic processes of mature sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Plant Physiology*, 44: 1321-1327. DOI: 10.1104/pp.44.9.1321.
- Skupień, K., J. Oszmiański. 2007.** Influence of titanium treatment on antioxidants content and antioxidant activity of strawberries. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 6: 83-93.
- Song, U., H. Jun, B. Waldman, J. Roh, Y. Kim, J. Yi, E. J. Lee. 2013.** Functional analyses of nanoparticle toxicity: A comparative study of the effects of TiO<sub>2</sub> and Ag tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 93: 60-67. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.03.033.



- Sotiropoulos, T. E. 2007.** Effect of NaCl and CaCl<sub>2</sub> on growth and contents of minerals, chlorophyll, proline and sugars in the apple rootstock M 4 cultured *in vitro*. *Biologia Plantarum*, 51: 177-180.
- Soussi M, A. Ocaña, C. Lluch. 1998.** Effects of salt stress on growth, photosynthesis and nitrogen fixation in chick-pea (*Cicer arietinum* L.). *Journal Experimental Botany*, 49: 1329–1337. DOI: 10.1093/jxb/49.325.1329
- Stamatakis, A., N. Papadantonakis, D. Savvas, N. Lydakis-Simantiris, P. Kefalas. 2003.** Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *In International Symposium on Managing Greenhouse Crops in Saline Environment*, 609: 141-147. DOI: 10.17660/ActaHortic.2003.609.18.
- 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.
- Stepien P, G. N. Johnson. 2009.** Contrasting Responses of Photosynthesis to Salt Stress in the Glycophyte *Arabidopsis* and the Halophyte *Thellungiella*: Role of the Plastid Terminal Oxidase as an Alternative Electron Sink. *Plant Physiology*, 149: 1154–165. DOI: 10.1104/pp.108.132407.
- Sumanta, N., I. H. Choudhury, N. Jaishee, R. Suprakash. 2014.** Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4: 63-69.
- Sun, H., E. J. Calabrese, Z. Lin, B. Lian, X. Zhang. 2020.** Similarities between the Yin/Yang doctrine and hormesis in toxicology and pharmacology. *Trends in Pharmacology Sciences*, 41: 544-556. DOI: 10.1016/j.tips.2020.05.004.
- Sustr M, A. Soukup, E. Tylova.** Potassium in root growth and development. *Plants*, 8: 435. DOI: 10.3390/plants8100435.
- Szymanska, R., K. Kolodziej, I. Slesak, P. Zimack-Piekarczyk, A. Orzechowska, M. Gabruk, A. Zadlo, I. Habina, W. Knap, K. Burda, J. Kruk. 2016.** Titanium dioxide nanoparticles (100-1000 mg/l) can affect vitamin E response in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution*, 213: 957-965. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.03.026.
- Tangahu, B. V., A. S. R. Sheikh, H. Basri, M. Idris, N. Anuar, M. Mukhlisin. 2011.** A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, article ID 939161. DOI: 10.1155/2011/939161.

- Tchounwou, P. B., C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, D. J. Sutton. 2012.** Heavy metals toxicity and the environment. *In*: Luch A. (eds). Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, 101: 133-164. DOI: 10.1007/978-3-7643-8340-4\_6.
- Tesfay, S. Z., I. Bertling, J.P. Bower. 2011.** Effects of postharvest potassium silicate application on phenolics and other anti-oxidant systems aligned to avocado fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, 60: 92-99. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2010.12.011.
- Tiwari, M., C. N. Sharma, P. Fleischmann, J. Burbage, P. Venkatachalam, S. V. Sahi. 2017.** Nanotitania Exposure Causes Alterations in Physiological, Nutritional and Stress Responses in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *Frontiers in Plant Science*, 8: 633. DOI: 10.3389/fpls.2017.00633.
- Torres-Flores, N. I., F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, G. Alcántar-González, B. I. Trejo-Téllez, P. Sánchez-García, F. Bello-Camacho. 2018.** Bajas concentraciones de lantano en la solución nutritiva incrementan la vida de la flor en maceta de dos variedades de lisianthus. *Agroproductividad*, 11: 149-153.
- Trejo-Téllez, L. I., F. C. Gómez-Merino, G. Alcántar-González. 2016.** Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. *In*: Nutrición de cultivos. Trejo-Téllez, L. I., F. C. Gómez-Merino y G. Alcántar-González. (eds). Segunda edición. Biblioteca Básica de Agricultura. pp. 59-101.
- Tumburu, L., C. P. Andersen, P. T. Rygiewicz, J. R. Reichman. 2017.** Molecular and physiological responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in *Arabidopsis*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36: 71-82. DOI: 10.1002/etc.3500.
- Uarrota, V. G., D. L. V. Stefen, L. S. Leolato, D. M. Gindri, D. Nerling. 2018.** Revisiting carotenoids and their role in plant stress responses: from biosynthesis to plant signaling mechanisms during stress. *In* Antioxidants and antioxidant enzymes in higher plants. Springer, Cham. pp. 207-232. DOI: 10.1007/978-3-319-75088-0\_10.
- UPOV. 2001.** Guidelines for the conduct of test for distinctness, uniformity and stability: tomato. (Union for the Protection of New Varieties of plants). [https://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg044/tg\\_44\\_10.pdf](https://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg044/tg_44_10.pdf). Consultado en línea, julio de 2019)
- Vachirapatama, N., Y. Jirakiattikul, G. Dicinoski, A. T. Townsend, P. R. Haddad. 2011.** Effect of vanadium on plant growth and its accumulation in plant tissues. *Songklanakarin journal of Science and Technology*, 33: 255-261.

- Van den Broeck, L., M. Dubois, M. Vermeersch, V. Storme, M. Matsui and D. Inzé. 2017.** From network to phenotype: the dynamic wiring of an Arabidopsis transcriptional network induced by osmotic stress. *Molecular Systems Biology*, 13: 961-982.
- Van Gosen, B. S., K. J. Ellefsen. 2018.** Titanium Mineral Resources in Heavy-Mineral Sands in the Atlantic Coastal Plain of the Southeastern United States: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018-5045, 32 pp. DOI: 10.3133/sir20185045.
- Vandegeer, R. K., C. Zhao, X. Cibils- Stewart, R. Wuhrer, C. R. Hall, S. Hartley, D. T. Tissue, S. N. Johnson. 2021.** Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K<sup>+</sup> efflux and consequently reduces stomatal conductance. *Physiologia Plantarum*, 171: 358-370. DOI: 10.1111/ppl.13202.
- Vashisth A., S. Nagarajan. 2010.** Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of Plant Physiology*, 167:149-156. DOI: 10.1016/j.jplph.2009.08.011.
- Waliszewski, K. N., G. Blasco. 2010.** Propiedades nutraceuticas del licopeno. *Salud Pública en México*, 52: 254-265.
- Wang, J. F., Z. Liu. 1999.** Effect of vanadium on the growth of soybean seedlings. *Plant and Soil*, 216: 47-51. DOI: 10.1023/A:1004723509113.
- Yakhin, O. I., A. A. Lubyantsev, I. A. Yakhin, P. H. Brown. 2017.** Biostimulants in plant Science: a global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1-32. DOI: 10.3389/fpls.2016.02049.
- Yang Y., Y. Guo. 2018.** Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. *New Phytologist* 217: 523-539. DOI: 10.1111/nph.14920.
- Yang, J., M. Wang, Y. Jia, M. Gou, J. Zeyer. 2017.** Toxicity of vanadium in soil on soybean at different growth stages. *Environmental Pollution*, 231: 48-58. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.075.
- Yang, Y., Y. Guo. 2017.** Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. *New Phytologist* 217: 523-539. DOI: 10.1111/nph.14920.
- Yin, Y. G., Y. Kobayashi, A. Sanuki, S. Kondo, N. Fukuda, H. Ezura, S. Sugaya, C. Matsukura. 2010.** Salinity induces carbohydrate accumulation and sugar-regulated starch biosynthetic genes in tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. 'Micro-Tom') fruits in an ABA-and osmotic

- stress-independent manner. *Journal of Experimental Botany*, 61: 563-574. DOI: 10.1093/jxb/erp333.
- Zahedi, S. M., N. A. Ansari, S. A. Eftekhari. 2012.** Investigation of yield and adaptation of ten selected genotypes of tomato under subtropical climate conditions (Ahvaz). *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10: 782-786.
- Zapata, L., L. Gerard, C. Davies, L. Oliva, M. Schvab. 2007.** Correlación matemática de índices de color del tomate con parámetros texturales y concentración de carotenoides. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 34: 207-226.
- Ze, Y., C. Liu, L. Wang, M. Hong, F. Hong. 2011.** The Regulation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Expression of Light-Harvesting Complex II and Photosynthesis of Chloroplasts of *Arabidopsis thaliana*. *Biological Trace Element Research*, 143: 1131–1141. DOI: 10.1007/s12011-010-8901-0.
- Zhang, P., M. Senge, Y. Dai. 2016.** Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. *Reviews in Agricultural Science*, 4: 46-55. DOI: 10.7831/ras.4.46.
- Zheng, L., S. Mingyu, W. Xiao, L. Chao, Q. Chunxiang, C. Liang, H. Hao, L. Xiao-qing, H. Fashui. 2008.** Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biological Trace Element Research*, 121: 69-79, 2008. DOI: 10.1007/s12011-007-8028-0.
- Zushi, K., N. Matsuzoe. 2015.** Metabolic profile of organoleptic and health-promoting qualities in two tomato cultivars subjected to salt stress and their interactions using correlation network analysis. *Scientia Horticulturae*, 184: 8-17. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.12.030.