

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



APLICACIÓN DE NPs Ca PARA INDUCIR LA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMPUESTOS EN FRUTOS DE TOMATE CULTIVADO BAJO ESTRÉS
SALINO

Tesis

Que presenta JUANA DE JESÚS VÁZQUEZ ROQUE
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Julio 2022

APLICACIÓN DE NPs Ca PARA INDUCIR LA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMPUESTOS EN FRUTOS DE TOMATE CULTIVADO BAJO ESTRÉS
SALINO

Tesis

Elaborada por JUANA DE JESÚS VÁZQUEZ ROQUE como requisito parcial
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión
y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



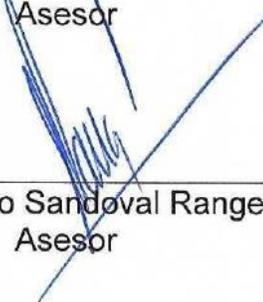
Dr. Gregorio Cadenas Pliego
Asesor



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por los conocimientos aportados para mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado mediante su programa de becas de postgrado.

Al programa de Maestría en Ciencias en Horticultura.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado por su asesoría, tiempo y apoyo brindado para la realización de esta investigación.

Al Dr. Gregoria Cadenas Pliego por su asesoría y apoyo para la realización de este trabajo.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por su asesoría y apoyo para para la realización de este trabajo.

Al Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente por su asesoría y apoyo para para la realización de este trabajo.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel por su asesoría y apoyo para para la realización de este trabajo.

Dedicatoria

A Dios, por su infinito amor, por sustentarme en mi debilidad y por ser el único que siempre ha permanecido fiel a mi lado.

Índice General

Índice General.....	v
Lista de Graficas	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO	5
Objetivos específicos	5
REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
Antecedentes	6
Salinidad en el suelo	6
Especies reactivas de oxígeno.....	8
Mecanismos de defensa antioxidante	10
Compuestos antioxidantes no enzimáticos	11
Producción de osmolitos	12
Compuestos antioxidantes enzimáticos	13
Importancia del cultivo de tomate.....	14
Importancia del calcio.....	16
Nanotecnología en la agricultura.....	17
Características de las nanopartículas	17
Absorción, transporte o translocación de las nanopartículas	20
Raíz.....	20
Hojas	20

Transporte	21
Vía simplasto.....	21
Vía apoplasto	21
Vía simplásto.....	22
Translocación	23
Xilema	23
Floema	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
Desarrollo y manejo del cultivo.....	25
Tratamientos	25
Nanopartículas	25
Variables agronómicas.....	26
Calidad de fruto	26
COMPUESTOS ANTIOXIDANTES.....	27
Clorofilas y carotenoides	27
Vitamina C.....	27
Flavonoides.....	28
Fenoles	28
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
Variables agronómicas.....	30
Calidad de fruto	34
Contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas	39
Compuestos antioxidantes no enzimáticos de hojas de plantas de tomate ..	40
Compuestos antioxidantes no enzimáticos de frutos de tomate.....	42

CONCLUSIONES 45

REFERENCIAS 46

Lista de Graficas

Figura 1. Altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y racimos de las plantas de tomate con estrés salino por NaCl tratadas con NPs Ca.....	31
Figura 2. Frutos de plantas de tomate con estrés salino por NaCl tratadas con NPs Ca.	33
Figura 3. Biomasa fresca y seca aérea de plantas de tomate con estrés salino por NaCl tratadas con NPs Ca.....	34
Figura 4. Calidad de los frutos de las plantas de tomate tratadas con nanopartículas de calcio y salinidad.	38
Figura 5. Pigmentos fotosintéticos de las hojas de tomate tratadas con salinidad Y nanopartículas de calcio.....	40
Figura 6. Compuestos antioxidantes no enzimáticos en hojas de plantas de tomate sometidas a estrés salino tratadas con NPs Ca.....	41
Figura 7. Compuestos antioxidantes no enzimáticos en frutos de plantas de tomate sometidas a estrés salino tratadas con NPs Ca.....	43
Figura 8. Carotenoides en frutos de plantas de tomate sometidas a estrés salino tratadas con CaNPs.....	44

RESUMEN

APLICACIÓN DE NPs Ca PARA INDUCIR LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMPUESTOS EN FRUTOS DE TOMATE CULTIVADO BAJO ESTRÉS SALINO

Por

JUANA DE JESÚS VÁZQUEZ ROQUE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO JUÁREZ MALDONADO – ASESOR

Saltillo, Coahuila

Julio 2022

El cultivo del tomate tiene gran importancia económica y nutricional a nivel mundial, debido a su alto contenido de compuestos bioactivos, que promueven la salud humana, al contribuir en la reducción de diferentes enfermedades crónicas, sin embargo, el rendimiento del cultivo puede verse afectado negativamente por la salinidad del suelo. El objetivo de esta investigación es evaluar el impacto de las CaNPs sobre los biocompuestos de los frutos de tomate cultivados bajo estrés salino. Se evaluaron cinco tratamientos: 1) un control con 50 mM de NaCl, 2) NPs Ca a 2500 mg L⁻¹, 3) NPs Ca a 2500 mg L⁻¹ más NaCl a 50 mM, 4) Ca (NO₃) a 2500 mg L⁻¹ más NaCl a 50 mM, y 5) un control sin la aplicación de NPs Ca ni NaCl (T0). El estrés salino provocó severos daños sobre el desarrollo de las plantas de tomate, sin embargo, el daño fue mitigado por la aplicación de NPs Ca, ya que aumentó el número de racimos 8.35 por planta, el número de frutos amarrados (12.31 %), el número de frutos totales (6.63 %), y disminuyó el peso de los frutos dañados (18.44 %); se promovió también la síntesis de fenoles (15.43 y 20.03 %) y de β-caroteno (19 %). La aplicación como drench de NPs Ca en tomates cultivados bajo estrés salino indujo la tolerancia al estrés al estimular la defensa antioxidante no enzimática.

Palabras clave: nanotecnología, NPs Ca, biocompuestos, salinidad, calidad de los frutos.

ABSTRACT

APLICACIÓN DE NPs Ca PARA INDUCIR LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMPUESTOS EN FRUTOS DE TOMATE CULTIVADO BAJO ESTRÉS SALINO

Por

JUANA DE JESÚS VÁZQUEZ ROQUE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO JUÁREZ MALDONADO – ASESOR

Saltillo, Coahuila

Julio 2022

Tomato cultivation has great economic and nutritional importance worldwide, due to its high content of bioactive compounds, which promote human health, by contributing to the reduction of different chronic diseases, however, crop yield can be negatively affected. due to soil salinity. The objective of this research is to evaluate the impact of CaNPs on the biocompounds of tomato fruits grown under salt stress. Five treatments were evaluated: 1) a control with 50 mM NaCl, 2) NPs Ca at 2500 mg L⁻¹, 3) NPs Ca at 2500 mg L⁻¹ + NaCl at 50 mM, 4) Ca (NO₃) at 2500 mg L⁻¹ + NaCl at 50 mM, and 5) a control without the application of NPs Ca or NaCl (T₀). The saline stress caused severe damage to the development of tomato plants, however, the damage was mitigated by the application of NPs Ca, since the number of clusters increased 8.35 per plant, the number of tied fruits (12.31%), the number of total fruits (6.63 %), and the weight of damaged fruits decreased (18.44 %); the synthesis of phenols (15.43 and 20.03%) and β-carotene (19%) was also promoted. The drench application of Ca NPs in tomatoes grown under salt stress induced stress tolerance by stimulating non-enzymatic antioxidant defense.

Keywords: nanotechnology, Ca NPs, biocompounds, salinity, fruit quality.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el aumento de la salinidad del suelo es una amenaza global para la producción agrícola (Ivushkin *et al.*, 2019). Es un problema ambiental ampliamente distribuido en el mundo (Zhu, 2016) que tiene un impacto negativo en la seguridad alimentaria mundial (Mohanavelu *et al.*, 2021). Aproximadamente 1125 millones de hectáreas de tierra en el mundo presentan problemas de salinidad. Los suelos salinos representan el 6.5 % de la superficie terrestre total a nivel mundial, de las cuales 62 millones de hectáreas, correspondientes al 20 % de las tierras cultivables del mundo se encuentran afectadas por salinidad (Zhao *et al.*, 2018; Egamberdieva *et al.*, 2019). Debido a los altos niveles de salinidad, cada año 1.5 millones de hectáreas se vuelven inadecuadas para la producción agrícola, y se estima que para el 2050 el 50 % de las tierras cultivables se perderán (Sanower, 2019).

En México, el 13 % del total de la superficie cultivable presenta problemas de salinidad, siendo la región noroeste la más afectada, con un 7.6 % de su superficie cultivable con elevada salinidad (Lopez-Alvarez *et al.*, 2021).

Los suelos afectados por salinidad han ganado preocupación mundial, debido a que la población mundial aumenta rápidamente y a su vez la tierra cultivable disminuye gradualmente. Por lo tanto, será necesario aumentar la producción mundial de alimentos más de un 60 % para el 2050, para mantener el nivel actual de suministro de alimentos (Johansen *et al.*, 2019). En consecuencia, surge la necesidad de desarrollar técnicas innovadoras para mejorar la productividad agrícola (Tommonaro *et al.*, 2021).

La alta salinidad se refiere a la presencia de una elevada concentración de sales en el suelo. La situación más frecuente de salinidad en los suelos se debe a la presencia de cloruro de sodio (NaCl), sin embargo, pueden presentarse distintas combinaciones de sales, siendo comunes los cloruros y los sulfatos de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (Lamz y González, 2013; Shahid *et al.*, 2018). Los principales problemas que surgen en las plantas debido a la salinidad son el estrés osmótico causado por una disminución en el potencial del agua, lo que dificulta la adquisición de

agua en las células vegetales y el estrés iónico derivado de la acumulación de iones de sodio y cloruro en las células vegetales, como consecuencia surgen trastornos nutricionales (Yang y Guo, 2018; Tanveer *et al.*, 2020). Además, el estrés iónico perturba el balance Redox de las células vegetales, afectando la integridad de las membranas biológicas, provocando estrés oxidativo (Vaishnav *et al.*, 2020). Por lo tanto, la salinidad es un factor que limita en el crecimiento y desarrollo de las plantas en todo el mundo, afectando el rendimiento y la productividad de la mayoría de las plantas de cultivo (Kumar *et al.*, 2020).

El estrés salino es un factor limitante para la germinación de las semillas de tomate. Se informa también que el alto estrés salino ($CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$) afecta el tiempo de transición de la floración y provoca un retraso en la primera inflorescencia junto con una reducción en el crecimiento de brotes y raíces (Egamberdieva *et al.*, 2019). Disminuye el número y peso de los frutos, influye negativamente en el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas de tomate (Pérez-Labrada *et al.*, 2019; Vaishnav *et al.*, 2020). Además, el estrés salino puede modificar directamente la calidad de los frutos, especialmente el contenido de compuestos bioactivos durante la vida postcosecha (Hernández-Fuentes *et al.*, 2017). Para adaptarse a condiciones de salinidad, las plantas han desarrollado mecanismos de adaptación como la acumulación de solutos compatibles (prolina), (Kibria *et al.*, 2017), protección enzimática (Sadik Polash *et al.*, 2019), compartimentación y homeostasis de iones (Munns y Gilliam, 2015), aumento en la concentración de Ca^{2+} en el citosol para mantener un equilibrio intracelular de Na^+ y K^+ (Cirillo *et al.*, 2019), energización del transporte de solutos a través de las bombas de protones. Mecanismos fisiológicos y bioquímicos que incluyen cambios en la morfología, anatomía, relaciones hídricas, fotosíntesis, contenido de clorofila, perfil hormonal, asimilación de CO_2 , distribución de iones tóxicos, transporte de electrones, generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Liu y Yang, 2020), lo que estimula la defensa antioxidante de las plantas (Acosta-Motos *et al.*, 2017; Arif *et al.*, 2020). En condiciones de estrés las ROS actúan como señalizadores, desencadenando respuestas enzimáticas y no enzimáticas. Dentro de los compuestos no

enzimáticos se encuentran el ácido ascórbico (ASH), glutatión (GSH), alcaloides, carotenoides, flavonoides, compuestos fenólicos y tocoferol (Pérez-Labrada *et al.*, 2019). Entre los principales compuestos enzimáticos para la eliminación de ROS se encuentran superóxido dismutasa (SOD, EC 1.15.1.1), catalasa (CAT, EC 1.11.1.6), peroxidasa (POD, EC 1.11.1.7), ascorbato peroxidasa (APX, EC 1.1.11.1), glutatión reductasa (GR, EC 1.6.4.2), glutatión peroxidasa (GPX, EC 1.11.1.7), monodehidroascorbato reductasa (MDHAR, EC 1.6.5.4) y deshidroascorbato reductasa (DHAR, EC 1.8.5.1), entre otros (Gohari *et al.*, 2020; Godoy *et al.*, 2021).

El tomate es el segundo cultivo más importante en el mundo debido a su alto valor nutritivo y económico (Benazzouk *et al.*, 2020; Rivas-García *et al.*, 2021). Además los frutos presentan un alto contenido de compuestos bioactivos que promueven la salud humana, incluidas las vitaminas (C y E), los carotenoides (β -caroteno y licopeno) y los compuestos fenólicos, a los que se les atribuyen propiedades fisiológicas, que incluyen efectos antiinflamatorios, antimicrobianos, antialérgicos, antitrombóticos, anticancerígenos, vasodilatadores, cardioprotectores y antioxidantes (Quinet *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2021). Por lo que el consumo de tomates puede contribuir en la reducción de enfermedades, especialmente las enfermedades crónicas al aumentar el nivel de antioxidantes del cuerpo, atrapando ROS y reduciendo el daño oxidativo a biomoléculas importantes como lípidos de membrana, proteínas enzimáticas y ADN, ayudando así a contrarrestar los efectos del estrés oxidativo (Ali *et al.*, 2021).

El calcio es un macronutriente necesario para el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. El calcio juega un papel importante en la absorción de nutrientes, importante para el crecimiento, desarrollo y producción de frutos tomates, así como para la obtención de frutos de calidad, relacionado directamente con la estructura, estabilidad y regulación de las paredes y membranas celulares. Es el componente principal de la lámina media, fundamental para los procesos de división, promueve el agrandamiento celular, mejora la fuerza de la pared celular, mejora la actividad de enzimática y el desarrollo hormonal (Mustafa *et al.*, 2021). Las condiciones de salinidad afectan

su absorción y transporte, conduciendo a la ocurrencia de desórdenes fisiológicos como la pudrición final de la flor (Blossom end rot) (Sturião *et al.*, 2020). La aplicación de calcio modifica el desarrollo de las plantas y las hace tolerantes al estrés (Mustafa *et al.*, 2021). Puede fortalecer las plantas contra enfermedades, aumentar el rendimiento de los cultivos, la biomasa y la tasa fotosintética (Vijai Anand *et al.*, 2021; Gandhi *et al.*, 2021). Además, puede aumentar los parámetros de crecimiento, pigmentos fotosintéticos, contenido de minerales y de antioxidantes no enzimáticos. Así como los compuestos antioxidantes y calidad de los frutos de pimiento en condiciones de estrés salino (capsaicina, licopeno, β -caroteno, fenoles totales, flavonoides totales y actividad antioxidante) (Ageeb Akladious & Ibrahim Mohamed, 2018). Se ha reportado que la aplicación de calcio previene la toxicidad por NaCl, además muestra efectos positivos en la germinación y crecimiento de plantas de tomate bajo condiciones de estrés salino (Tanveer *et al.*, 2020).

Con la finalidad de hacerle frente a los problemas de salinidad se han empleado diversas estrategias que ayudan a las plantas a mitigar los efectos de la salinidad (Islam *et al.*, 2021), tales como la nanotecnología. La nanotecnología está revolucionando la producción agrícola, a través del uso de nanopartículas, que son nanomateriales en una escala de 1 a 100 nm (Vargas-Hernandez *et al.*, 2020). Las nanopartículas tienen propiedades físicas y químicas únicas (Adrees *et al.*, 2021). Debido a su gran área superficial y su tamaño a nanoescala (Khan *et al.*, 2019), poseen propiedades que contribuyen a la biodisponibilidad de nutrientes para el sistema radicular de las plantas (Gaiotti *et al.*, 2021). Las NPs de SiO₂ aumentan los flavonoides en plantas de tomate contaminadas con arsénico, además disminuye la translocación del arsénico y mitiga la fitotoxicidad de la planta de tomate. (González-Moscoso *et al.*, 2019; González-Moscoso *et al.*, 2022).

Se ha reportado que el uso de nanopartículas de cobre en plantas de tomate aumenta la calidad de los frutos y licopeno en condiciones de estrés abiótico (Juárez Maldonado *et al.*, 2016; Hernández-Hernández *et al.*, 2018), además de que la aplicación de nanopartículas contribuye a que las plantas sean resistentes

a estreses abióticos como sequía, salinidad, metales pesados, etc. (Adrees *et al.*, 2021; Mustafa *et al.*, 2021). Se ha reportado que la aplicación de nanopartículas estimula la producción de ROS, por lo tanto el uso de NPs puede inducir un incremento en la actividad enzimática y no enzimática y ayudar a las plantas a tolerar la salinidad (Farhangi-abriz y Torabian, 2018; Pérez-Labrada *et al.*, 2019). Se ha descrito la capacidad de estos materiales por aspersion foliar o en soluciones nutritivas, para modificar la composición y calidad nutraceútica de los cultivos (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). Además, la aplicación foliar de nanopartículas conduce a una mayor eficiencia del uso del agua, lo que aumenta la absorción de nutrientes en las plantas (Mahil y Kumar, 2019).

HIPÓTESIS

Las NPs Ca mitigarán el efecto del estrés salino en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y, como efecto secundario aumentarán el contenido de biocompuestos en los frutos de tomate.

OBJETIVO

El objetivo de la presente investigación fue determinar el impacto de las NPs Ca sobre el contenido de biocompuestos en plantas de tomate cultivadas bajo estrés salino.

Objetivos específicos

- 1.- Analizar los cambios en el sistema antioxidante.
- 2.- Determinar el contenido de compuestos bioactivos en los frutos de tomate.
- 3.- Determinar los cambios en los parámetros fisiológicos.

REVISIÓN DE LITERATURA

Antecedentes

La agricultura es la columna vertebral de la mayoría de los países en desarrollo, en los que gran parte de sus ingresos proviene del sector agrícola (Manjunatha *et al.*, 2019). La nanotecnología es una tecnología prometedora que ha proporcionado diversas herramientas agrícolas en forma nanofertilizantes, nanopesticidas y nanosensores que han mostrado efectos positivos para mejorar la productividad agrícola (Neme *et al.*, 2021). La aplicación de la nanotecnología podría minimizar el costo de fertilizantes y pesticidas, puede ayudar a mejorar las características de los insumos, como la entrega dirigida, la liberación controlada, el aumento de la solubilidad y la larga vida útil. Estas características la hacen más eficiente y a su vez reducen el riesgo de contaminación ambiental (Ealias & Saravanakumar, 2017), a través del uso de nanopartículas que son materiales con un diámetro en el rango de 1 a 100 nm (Singh *et al.*, 2021). En este rango de tamaño, tienen propiedades químicas, ópticas específicas y únicas. Las nanopartículas pueden ser esféricas, cilíndricas, tubulares, cónicas, huecas, espirales, planas o irregulares. Su superficie puede ser uniforme o irregular con variaciones superficiales. Algunas nanopartículas son cristalinas o amorfas con sólidos monocristalinos o multicristalinos sueltos o aglomerados (Ealias y Saravanakumar, 2017).

El impacto de las nanopartículas en las plantas depende principalmente de su composición química, tamaño, recubrimiento y de la concentración a la que son eficaces, así como de la especie de las plantas. Además de que su efecto sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas depende de su forma de aplicación (directamente al suelo o por aspersión foliar) (Baazaoui *et al.*, 2021).

Salinidad en el suelo

La salinidad del suelo es un problema mundial importante debido a su impacto negativo en la productividad y sostenibilidad agrícola, debido a que la mayoría de las especies de cultivo son sensibles al estrés salino (Godoy *et al.*, 2021). Los

problemas de salinidad ocurren bajo todas las condiciones climáticas y pueden resultar tanto de acciones naturales como inducidas por el hombre. El área más grande de suelos salinos se encuentran principalmente en regiones áridas y semiáridas donde la evapotranspiración supera la precipitación (Shahid *et al.*, 2018). Un suelo salino tiene un porcentaje de sodio intercambiable (ESP) alrededor de 15, una relación de adsorción de sodio (SAR) menor de 13, CE más de cuatro dS m^{-1} y pH mayor de 8.5 (Srivastava *et al.*, 2019; Orozco-Mosqueda *et al.*, 2020), de acuerdo al nivel de sales presentes un suelo salino se clasifica en cuatro clases principales: salinidad muy severa ($\text{CE} >16 \text{ dS m}^{-1}$), salinidad severa ($\text{CE} 8-16 \text{ dS m}^{-1}$), salinidad moderada ($\text{CE} 4-8 \text{ dS m}^{-1}$) y ligeramente salino ($\text{CE} 2-4 \text{ dS m}^{-1}$) (Shokat y Großkinsky, 2019). Las sales que pueden inducir salinidad son NaCl , Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 , MgCl_2 , KCl y Na_2CO_3 , siendo el NaCl la de más frecuencia y de mayor efecto derivado de la disociación del Na^+ y Cl^- (Munns *et al.*, 2020). La salinidad afecta todos los órganos de las plantas, desde las raíces hasta las hojas (Shokat y Großkinsky, 2019). La acumulación excesiva de iones afecta procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos (Rahman *et al.*, 2018; Vaishnav *et al.*, 2020), debido al aumento de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Yang Xiao *et al.*, 2020) y derivado del estrés iónico y osmótico sobre el metabolismo de las plantas (Zeeshan *et al.*, 2020). Además, la salinidad dificulta la germinación de las semillas, la fotosíntesis (destrucción del aparato fotosintético), la transpiración y la conductancia estomática, disminuye el potencial hídrico de la hoja y la presión de turgencia en la célula, desintegra la membrana y disminuye el crecimiento celular (Arif *et al.*, 2020).

Sin embargo, las plantas tienen mecanismos para contrarrestar los efectos negativos del estrés salino, los cuales incluyen una homeostasis de ROS, un incremento en el sistema de defensa antioxidante, así como la activación de las vías de eliminación de ROS, compartimentación de iones tóxicos, biosíntesis de osmolitos (principalmente la prolina), así como una homeostasis de iones (Munns *et al.*, 2020).

Por otra parte, el Na^+ provoca el deterioro de la estructura del suelo y tanto el Na^+ como el Cl^- son tóxicos para las plantas, además, la absorción de Na^+ y Cl^- conlleva a la deficiencia de nutrientes como Ca^{2+} y K^+ (Acosta-Motos *et al.*, 2017).

Especies reactivas de oxígeno

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) se encuentran presentes en las células vegetales en condiciones normales, principalmente como subproductos del metabolismo aeróbico (fotorrespiración) y fotosintético (en la cadena de transporte de electrones) (Mittler, 2017; Dumont y Rivoal, 2019). En condiciones normales, existe un equilibrio entre la cantidad de producción de ROS y su eliminación (Moradbeygi *et al.*, 2020).

El término "ROS" se refiere a especies de oxígeno reducidas de forma incompleta, éstas pueden sobre producirse en condiciones de estrés biótico y abiótico, en diferentes compartimentos celulares como primera capa de defensa. Las ROS intracelulares se producen en orgánulos como los cloroplastos, mitocondrias y los peroxisomas/glioxisomas, mientras que las ROS extracelulares son producidas por el NADPH oxidasas localizadas en la membrana plasmática y retículo endoplásmico (Qi *et al.*, 2018). La acumulación de ROS dentro de la célula provoca estrés oxidativo (Yang Xiao *et al.*, 2020; Hasanuzzaman *et al.*, 2021).

Las ROS desempeñan un doble papel en las plantas, desencadenan una cascada de señalización ante diversos estreses (Qi *et al.*, 2018), activando los mecanismos de defensa antioxidantes (enzimático y no enzimático), por lo cual no solo controlan la adaptación al estrés, sino que también regulan el crecimiento celular, la diferenciación, la proliferación y el desarrollo de las plantas (Qi *et al.*, 2017; Mittler, 2017).

En las plantas, las ROS son el grupo más vital dentro de las especies reactivas, existen en estados iónicos y moleculares. Los estados iónicos incluyen radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) y aniones superóxido (O_2^-) y el radical peroxilo ($\text{ROO}\cdot$), mientras que los estados moleculares incluyen principalmente peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$) y ozono (O_3) (Maurya, 2020).

El $^1\text{O}_2$ se forma en las membranas fotosintéticas en las reacciones entre las moléculas de clorofila en estado triplete y el oxígeno molecular en el interior de los cloroplastos principalmente en el fotosistema II (PSII), cuando la energía lumínica absorbida por las clorofilas supera las capacidades de la fotosíntesis. La vida media observada de $^1\text{O}_2$ es de aproximadamente 3 μs y se ha demostrado que una pequeña porción de $^1\text{O}_2$ puede difundirse a una distancia de varios nanómetros, donde puede reaccionar con diversas biomoléculas (Janků *et al.*, 2019).

El O_2^- es producido en los cloroplastos a través de las reacciones de Mehler en donde el O_2 es reducido por un electrón proveniente de la fotosíntesis en la cadena de transporte de electrones (García-Caparrós *et al.*, 2019). Es una especie nucleófila altamente reactiva con una vida media de aproximadamente 1 μs , participa en la propagación de otras especies relacionadas con el estrés oxidativo, como el peróxido de hidrogeno (Janků *et al.*, 2019).

El H_2O_2 tiene una capacidad de reactividad moderada, es el no radical menos reactivo. Sin embargo, puede provocar daños a gran distancia de su punto de generación, esto se debe a que no tiene electrones desapareados lo que le confiere una alta capacidad de movimiento entre las membranas biológicas (García-Caparrós *et al.*, 2019). El H_2O_2 es generado en los cloroplastos, el núcleo, las membranas plasmáticas, retículo endoplásmico, mitocondrias, específicamente en la cadena de transporte de electrones y en los peroxisomas por la oxidación del carbono (García-Caparrós *et al.*, 2019).

Mientras que el $\cdot\text{OH}$ es el radical libre más reactivo debido a su corta vida, potencial redox muy positivo y alta afinidad por biomoléculas, oxida de forma no selectiva ADN, proteínas, lípidos, aminoácidos, azúcares y metales, que provocan daños o inestabilidad genética (Orabi y Hussein, 2019; Hussain *et al.*, 2019).

En consecuencia, las células desarrollan un sistema equilibrado para contrarrestar el efecto de las ROS y el estrés oxidativo, las plantas tienen un mecanismo antioxidante bien regulado que consta de componentes enzimáticos y no enzimáticos que funcionan de forma sinérgica e interactiva para equilibrar la

síntesis y la eliminación de ROS y prevenir el daño celular (Kapoor *et al.*, 2019). Cada tipo de ROS tiene una capacidad oxidativa diferente y afecta diferentes reacciones fisiológicas y bioquímicas reguladas por diferentes genes en las plantas (Huang *et al.*, 2019). Debido a sus características inherentes, todos los tipos de ROS pueden dañar macromoléculas como proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y carbohidratos lo que puede conducir a la muerte celular (Zhou *et al.*, 2018).

Mecanismos de defensa antioxidante

Actualmente, las tensiones ambientales como la salinidad, la sequía, las temperaturas extremas, los metaloides tóxicos y las inundaciones son causantes de numerosos efectos perjudiciales para los cultivos, ya que conducen al estrés oxidativo debido a la sobreacumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

De igual manera, el estrés osmótico y el estrés iónico inducidos por la salinidad desencadenan la sobreproducción de ROS, lo que provocan daños oxidativos en los orgánulos celulares y los componentes de la membrana y, en niveles graves, provocan la muerte de células y plantas. El sistema de defensa antioxidante protege a la planta del daño oxidativo inducido por la sal al desintoxicar las ROS y también al mantener el equilibrio de la generación de ROS bajo estrés salino (Hasanuzzaman *et al.*, 2021).

Estos mecanismos de defensa desarrollados en las plantas, son capaces de inhibir o apagar las reacciones de los radicales libres y retrasar o prevenir el daño celular. Existen dos mecanismos de defensa antioxidante, los compuestos enzimáticos y no enzimáticos (Lichtfouse, 2020).

Aparte del mecanismo de defensa antioxidante, las plantas logran evitar el estrés salino mediante la acumulación de osmolitos y otros antioxidantes no enzimáticos que facilitan la eliminación de ROS, la absorción de agua, y disminuyen el potencial osmótico del citoplasma (Kashyap *et al.*, 2020). Estos mecanismos de defensa son muy comunes en todas las plantas y sus tejidos, en diferentes etapas de crecimiento y desarrollo. Diferentes órganos como la raíz o el brote pueden

usar dicho mecanismo de defensa, que se hace más efectivo al actuar en conjunto con otras vías metabólicas dentro de ese órgano en particular para sobrevivir bajo condiciones de estrés (Ahmad *et al.*, 2019).

Compuestos antioxidantes no enzimáticos

Las estrategias no enzimáticas dependen de moléculas pequeñas como los α -tocoferoles localizados en la membrana celular, pueden desempeñar funciones antioxidantes esenciales al actuar como “barredores químicos de sacrificio”, lo que lleva a la eliminación de moléculas de ROS mediante la oxidación de los α -tocoferoles (Dumont y Rivoal, 2019).

Dentro de los antioxidantes no enzimáticos se encuentra el ácido ascórbico o vitamina C (AsA), glutatión (GSH), ácidos fenólicos, alcaloides, flavonoides, carotenoides (licopeno y β -caroteno), α -tocoferol y los aminoácidos no proteicos (Hasanuzzaman *et al.*, 2020; Hasanuzzaman *et al.*, 2021).

El AsA tiene la capacidad de reducir o minimizar los efectos negativos de las ROS en las plantas. Puede donar electrones y proteger las membranas al reducir los superóxidos y los radicales hidroxilo, así como reducir el H_2O_2 en agua y oxígeno mediante reacciones catalizadas por la enzima ascorbato peroxidasa (AL-Aloosy *et al.*, 2019). Además, también participa en el proceso de disipación del exceso de energía al funcionar como cofactor de la violaxantina depoxidasa (Ramadoss *et al.*, 2021).

Los carotenoides como el licopeno, β -caroteno, xantofilas, luteínas, neoxantina y zeaxantinas son antioxidantes lipofílicos capaces de proteger la maquinaria fotosintética (AL-Aloosy *et al.*, 2019). Funcionan como moléculas antena capturando la luz a través de la transferencia de energía, extendiendo efectivamente el rango de luz absorbida por el aparato fotosintético, extintores y depuradores de clorofilas en estado triplete ($_3Chl^*$) y de 1O_2 formados en el cloroplasto a través del ciclo de las xantofilas (Hussain *et al.*, 2019). El licopeno se convierte en β -caroteno por la acción de la enzima licopeno β -ciclase (Gavicho Uarrota *et al.*, 2018). La función principal del licopeno es la eliminación de del radical 1O_2 , mientras que el papel principal del β -caroteno es la eliminación de la

clorofila triplete ($_3\text{Chl}^*$), además participar en la formación de la vitamina A (Szymanska *et al.*, 2014).

El GSH se caracteriza por su alto potencial reductor debido a la presencia de nucleófilos centrales (residuos de cisteína) que eliminan el H_2O_2 , $^1\text{O}_2$, $\cdot\text{OH}$ y O_2^- . Por lo que reduce el estrés oxidativo, protege la membrana plasmática y evita la peroxidación lipídica. Tiene la capacidad de regenerar otros antioxidantes como el ácido ascórbico a través del ciclo ascorbato-glutatión (AsA-GSH) (Ramadoss *et al.*, 2021). Además, desempeña funciones importantes en procesos biológicos, como el crecimiento celular, el desarrollo, la regulación del transporte de azufre, transducción de señales, síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, la síntesis de fotoquelatina para la quelación de metales, desintoxicación de xenobióticos y expresión de genes responsables del estrés (Tuzet *et al.*, 2018; Hussain *et al.*, 2019). Por lo que también mejora la tolerancia a estreses abióticos como la salinidad, sequía, altas temperaturas, bajas temperaturas y la toxicidad a metales pesados (Ramadoss *et al.*, 2021).

Los compuestos fenólicos tienen al menos un anillo aromático que lleva uno o más grupos hidroxilo. Son sintetizados a partir del ácido shikímico. Dentro de los compuestos fenólicos se consideran diversos metabolitos secundarios: flavonoides, taninos, ésteres de hidroxycinamato y lignina. Las propiedades antioxidantes de los compuestos fenólicos y los flavonoides son vitales para la eliminación de los radicales libres y la eliminación de ROS, mediante la inhibición de enzimas o la quelación de metales traza implicados en la producción de radicales libres. Su actividad depende del número de grupos hidroxilos libres en su estructura molecular (Ahmad *et al.*, 2019; Orabi y Abou-Hussein, 2019).

Producción de osmolitos

Los osmolitos son solutos osmoprotectores, que mejoran el potencial celular para mantener el agua sin obstaculizar el metabolismo normal. Su objetivo principal es regular el ajuste osmótico. Los osmolitos contrarrestan la presión osmótica impuesta por la salinidad. Además, protegen a las plantas del daño oxidativo al inhibir la producción de ROS (Sharma *et al.*, 2019). Los osmolitos acumulados

por las plantas incluyen aminoácidos como alanina, arginina, prolina, compuestos de amonio cuaternario (glicina betaína), azúcares (fructanos, sacarosa, trehalosa) y polioles (inositol, manitol). Estos compuestos además de mitigar los efectos negativos del estrés oxidativo al eliminar las especies reactivas de oxígeno (ROS), aumentan la acumulación de compuestos bioactivos antioxidantes, además de inducir las actividades enzimáticas antioxidantes y mejorar la actividad enzimática (Jogawat, 2019; Lichtfouse, 2020). La prolina es el osmolito más importante, debido a que desempeña un papel fundamental en la estabilidad de la membrana, al ser un antioxidante con la capacidad de inhibir de los radicales libres como el $\cdot\text{OH}$ y $^1\text{O}_2$, así como la inhibición de la oxidación de lípidos (AL-Aloosy *et al.*, 2019).

Compuestos antioxidantes enzimáticos

Las enzimas antioxidantes y los mecanismos dependientes de enzimas controlan los niveles de ROS en las células vegetales (Dumont & Rivoal, 2019). El sistema enzimático, incluye enzimas de defensa antioxidantes como el super oxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR), monodehidroascorbato reductasa (MDHAR), dehidroascorbato reductasa (DHAR), glutatión peroxidasa (GPX), glutatión S-transferasa (GST), así como proteínas similares a la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH) (Hasanuzzaman *et al.*, 2017).

La enzima SOD es una metaloenzima localizada en diferentes orgánulos vegetales. Las SOD se clasifican según el metal en sus sitios activos (Cu, Zn, Mn y Fe) (del Río *et al.*, 2018). La isoenzima Cu-ZnSOD es la más abundante y se encuentra presente en el estroma del cloroplasto, el citosol, los peroxisomas y el apoplasto, la Mn-SOD se expresa de manera más abundante en las mitocondrias y los peroxisomas, aunque también se ha detectado en el apoplasto y en la pared celular. La Fe-SOD está presente en menor proporción, sin embargo, esta isoenzima encuentra restringida en el estroma del cloroplasto de ciertas especies de plantas (Dumanović *et al.*, 2021). Su función principal función principal es

catalizar la conversión de los radicales superóxido ($O_2^{\cdot-}$) en oxígeno molecular (O_2) y finalmente en H_2O (Thabet et al., 2021).

La enzima catalasa (CAT) es muy eficiente en la eliminación de peróxido de hidrogeno (H_2O_2), tiene una capacidad única para convertir dos moléculas de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) en agua (H_2O) y oxígeno molecular (O_2) sin necesidad de reducción equivalente (Dumanović et al., 2021). Un aumento en la actividad CAT es dependiente de la concentración de H_2O_2 , por lo que existe una correlación entre los componentes de los sistemas de eliminación de ROS entre CAT y SOD (Tuzet et al., 2018).

El ascorbato peroxidasa (APX) reduce el H_2O_2 a H_2O utilizando al ascorbato como donante de electrones. APX depende del ciclo de ascorbato-glutati6n que transporta moléculas reductoras NADPH a través de GSH para regenerar el ascorbato reducido (Dumont y Rivoal, 2019; Thabet et al., 2021).

Importancia del cultivo de tomate

El cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los principales cultivos importantes para la seguridad alimentaria (Alajrami y Abu-Naser, 2020), es importante desde el punto de vista económico y también por su aporte a la nutrición humana como producto fresco y procesado, es una de las hortalizas más cultivadas y consumidas a nivel mundial (de Vos et al., 2018). Es el segundo cultivo más importante después de la papa (*Solanum tuberosum* L.) (Li et al., 2018; Kumari et al., 2021). En México el cultivo de tomate es una de las actividades hortícolas más importantes, es el tercer producto agrícola de exportación y una de las principales hortalizas exportadas, principalmente a Estados Unidos, debido a su cercanía geográfica, competitividad en cuanto a su precio, calidad y buen sabor (Ramírez Flores et al., 2020).

Según la clasificación taxonómica de Linneo, el nombre botánico del tomate era *Solanum lycopersicum*, por su parte Miller (1754) propuso el nombre del género *Lycopersicon* (Kumar et al., 2018). Botánicamente se cree que su fruto es una baya, sin embargo, nutricionalmente su fruto está relacionado con las verduras (Waheed et al., 2019). El tomate es una verdura baja en calorías, contiene tan

solo 18 Kcal con cero niveles de colesterol, contiene el 95 % de agua y 5 % constituido por carbohidratos y fibra (Kumari *et al.*, 2021). La importancia nutricional de los tomates es atribuida en gran medida a sus diversos compuestos bioactivos, que incluyen las vitaminas (C y E), flavonoides, carotenoides (licopeno y β -caroteno) y compuestos fenólicos (Quinet *et al.*, 2019). Además de ser una fuente de minerales como P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Fe y B, también contiene ácidos orgánicos como ácido cítrico, ácido málico y ácido glutámico (Ramírez Flores *et al.*, 2020), así como grandes cantidades de metabolitos, como sacarosa, hexosas y citrato. Los carotenoides y los compuestos polifenólicos contribuyen al valor nutricional de los tomates, además de que mejoran sus atributos funcionales y cualidades sensoriales, incluidos el sabor, el aroma y la textura (Quinet *et al.*, 2019). A estos compuestos bioactivos se les atribuye una amplia gama de propiedades fisiológicas, a los que se les incluyen efectos antiinflamatorios, anticancerígenos, anticolesterolémicos, antialérgicos, antimicrobianos, vasodilatadores, antitrombóticos, cardioprotectores, antiobesidad y antioxidante (Waheed *et al.*, 2019), por lo que el consumo de tomates reduce el riesgo de enfermedades y tiene efectos positivos sobre la salud humana. La demanda de tomates aumenta día con día, sin embargo, su productividad se ve afectada por diversos estreses como la salinidad (Sharma *et al.*, 2019). El tomate es extremadamente sensible a la salinidad (Kashyap *et al.*, 2020), la salinidad provoca una disminución en la germinación de las semillas, retraso en la emergencia de las plántulas, afecta negativamente el crecimiento vegetativo y las etapas reproductivas del tomate como la floración, el desarrollo, la maduración, el tamaño y la calidad de la fruta (Pengfei *et al.*, 2017; Rahman *et al.*, 2018). El estrés por salinidad provoca un estrés osmótico rápido en las raíces de las plantas de tomate, lo que resulta en una reducción del crecimiento de hojas y brotes. Posteriormente, el estrés por salinidad conduce a un desequilibrio iónico que provoca necrosis y muerte prematura de las hojas más viejas (Bai *et al.*, 2018). Además la salinidad provoca trastornos nutrimentales, limita la disponibilidad de nutrientes, su adsorción y transporte (Hussain *et al.*, 2018), lo que finalmente reduce el rendimiento de los cultivos. Durante las últimas etapas

de la exposición al estrés salino, se ha reportado la participación de hormonas como el ácido abscísico (ABA), giberelina (GA), brasinoesteroide (BR), ácido jasmónico (JA), óxido nítrico (NO) y el ácido salicílico (SA), las cuales desencadenan una cascada de señalizaciones que controlan directamente el crecimiento y la senescencia de las plantas en condiciones de estrés. Por su parte el etileno (ET) juega un papel importante en el establecimiento de la aclimatación a la sal y es indispensable para la adaptación de las plantas al estrés por salinidad (Bai *et al.*, 2018; Islam *et al.*, 2021). Las plantas de tomate pueden desarrollar estrategias para tolerar el estrés y mitigar los daños provocados por la salinidad (Kumari *et al.*, 2021).

Importancia del calcio

El calcio (Ca) es el tercer macronutriente más demandado por el tomate (de Souza Alonso *et al.*, 2020). Está involucrado en varios procesos fisiológicos como el crecimiento y desarrollo de las plantas, la división celular, la transmisión citoplasmática y la fotosíntesis (Guo *et al.*, 2018), además de ser el componente principal de la pared celular. El Ca juega un papel crucial en el control de la estructura, la señalización y la función de las membranas al formar enlaces con la bicapa de fosfolípidos, estabilizando y promoviendo la integridad estructural de los orgánulos de la membrana en plantas expuestas a ambientes de estrés (Ahmad *et al.*, 2018). El Ca es un mensajero secundario, bajo condiciones de estrés ambiental, la concentración de Ca se eleva transitoriamente, esta señal es enviada a las células, lo que posteriormente, desencadena una serie de respuestas en cascada, conduciendo a una adaptación al estrés ambiental (Guo *et al.*, 2018). Los factores adversos como la salinidad, provocan desequilibrio nutricional en las plantas de tomate. La deficiencia de Ca en tomate provoca una disminución de los pectatos de Ca, lo cual conduce al deterioro y deformación de los tejidos al inducir el estrés oxidativo (de Souza Alonso *et al.*, 2020). Además se pueden producir trastornos fisiológicos relacionados con el calcio, derivadas de las limitaciones en la translocación del Ca de las hojas a los frutos pueden causar trastornos como la pudrición apical de la flor en frutos (Blossom end rot)

(Oliveira da Silva *et al.*, 2019; Birlanga *et al.*, 2022), lo que afecta la calidad de los frutos, afectando su producción (Hernández-Pérez *et al.*, 2019).

Está documentado, que el Ca alivia los efectos de la salinidad en cultivos como tomate, arroz y habas (Nasrallah *et al.*, 2022). Se ha informado que el Ca ayuda a prevenir la toxicidad del NaCl. El Ca tiene la capacidad de mejorar la toxicidad del sodio y los efectos negativos causados por NaCl. Del mismo modo, se ha informado que la aplicación combinada de NaCl y CaCl₂ puede aumentar la capacidad antioxidante (Tanveer *et al.*, 2020). De Souza Alonso *et al.*, (2020) reportaron que la aplicación de Ca vía solución nutritiva disminuyó la pudrición apical de la flor (Blossom end rot) en un 30 % en plantas de tomate.

Nanotecnología en la agricultura

La producción agrícola mundial está sufriendo pérdidas sustanciales debido a fenómenos relacionados con el cambio climático, como la sequía y la salinidad, los cuales provocan daños en los tejidos de las plantas y, en última instancia, importantes pérdidas de rendimiento de los cultivos (Ioannou *et al.*, 2020). La agricultura es cada vez más importante a nivel mundial como fuente de alimento, debido al crecimiento de población mundial, la demanda de alimentos es cada vez más alta, por lo que es necesaria la aplicación de nuevas tecnologías que proporcionen soluciones como la nanotecnología (Ali *et al.*, 2018; Hemraj, 2019). La nanotecnología tiene la capacidad de transformar la agricultura en nanoagricultura. La nanoagricultura actualmente se centra en la utilización de nanopartículas para aumentar el rendimiento de los cultivos y evitar la contaminación del suelo (Safdar Ali *et al.*, 2018).

Características de las nanopartículas

Las nanopartículas son un conjunto de sustancias (naturales o artificiales) compuestas de carbono, metal, óxidos metálicos o materia orgánica, (Ealias y Saravanakumar, 2017; Ioannou *et al.*, 2020). Las nanopartículas son de diferente forma, tamaño y estructura. Estás pueden ser esféricas, cilíndricas, tubulares, cónicas, huecas, espirales, planas, irregulares y defieren en tamaño (1 a 100 nm).

El tamaño de estos nanomateriales tienen una alta relación superficie/volumen lo que aumenta su reactividad y posible actividad bioquímica (Hemraj, 2019). Su estructura puede ser uniforme o irregular con variaciones superficiales. Las nanopartículas se pueden producir a través de varias rutas sintéticas, su tamaño a nivel nanoescala las vuelve químicamente muy reactivas y físicamente agregantes. La efectividad de las nanopartículas baja a medida que se agregan, para evitar esto son modificadas superficialmente con ligantes que pueden ser moléculas pequeñas y grandes como polímeros, que contienen en su estructura heteroátomos de nitrógeno, azufre, oxígeno, fósforo entre otros (Cadenas-Pliego *et al.*, 1993; Martínez-Aguilera *et al.*, 1995). La presencia de grupos funcionales en los ligantes favorece la interacción química con las partículas oxi-hidroxiladas y provoca una mejor dispersión en diferentes medios, además de incrementar su actividad antimicrobiana, ligantes como aminoácidos y polímeros naturales son ideales para funcionalizar nanopartículas ya que además de participar en las funciones anteriormente descritas, pueden ser aprovechados por las plantas (Treviño López *et al.*, 2021). Su estructura puede ser uniforme o irregular con variaciones superficiales. Pueden ser cristalinas o amorfas con sólidos monocristalinos o multicristalinos sueltos o aglomerados (Ealias y Saravanakumar, 2017). La aplicación de nanopartículas ha llamado la atención, por sus múltiples beneficios en diferentes campos del sector agrícola por ejemplo: la nutrición vegetal, la protección de cultivos, la mejora de las características agronómicas de los cultivos (Hemraj, 2019). Recientemente, se han utilizado diversos nanomateriales (TiO_2 , FeS_2 , Ag, Zn, ZnO , carbono, Cu y CuO) como agentes de cebado para inducir la germinación de semillas, los parámetros de las plántulas, la tolerancia al estrés ambiental y aumentar el rendimiento de diversos cultivos agrícolas (Vijai Anand *et al.*, 2021). Además, la aplicación de nanopartículas puede aliviar el impacto negativo del estrés salino al aumentar la absorción de K^+ , disminuyendo la toxicidad del ion Na^+ , regular el equilibrio iónico; activar el sistema de defensa antioxidante; mejora en el índice de estabilidad de la membrana, al aumentar el contenido de los solutos y pigmentos

compatibles, asimismo aumenta la conductancia estomática, así como el contenido de agua de la hoja (Nasrallah *et al.*, 2022).

Se ha descrito diversos efectos positivos sobre los cultivos con la aplicación de nanopartículas. En el cultivo de arroz (*Oriza sativa*) puede incrementar la disponibilidad de nutrientes, además de mejorar la capacidad antioxidante (Mahil & Kumar, 2019). En plántulas de soya, la aplicación de nanopartículas de silicio (NPs Si) aliviaron el efecto del estrés salino a través de aumento de la concentración de K^+ , capacidad antioxidante, compuestos no enzimáticos y la disminución de la concentración de Na^+ , peroxidación lipídica y producción de ROS (Farhangi-abriz y Torabian, 2018). En plantas de tomate el uso de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) mostraron un aumento en el sistema antioxidante, la actividad fotosintética debido al aumento de la actividad de la enzima anhidrasa carbónica y el sistema antioxidante, además las nanopartículas de óxido de cerio y óxido de titanio indujeron una actividad máxima de las enzimas antioxidantes y de la fotosíntesis (Ghasemnezhad *et al.*, 2019). El uso de nanopartículas de silicio aumentó la germinación de las semillas, lo cual es atribuido al aumento de la disponibilidad de nutrientes, mejoraron el crecimiento y la calidad de las plántulas e indujeron la síntesis de clorofilas. En especies de *Thinopyrum intermedium* y arroz (*Oriza sativa*) se le atribuyen múltiples efectos como rompimiento de latencia, aumento del peso seco de raíces y brotes (Siddiqui *et al.*, 2020). En Maíz (*Zea mays*) la aplicación de nanopartículas de fosfato de calcio (NPs CaP) promovieron el crecimiento y la maduración de la raíz (Nasrallah *et al.*, 2022). En lechuga (*Lactuca sativa*) se aumentó el crecimiento de brotes y raíces y en calabaza (*Cucurbita pepo*) aumento el crecimiento al aplicar nanopartículas de borato de calcio (BNPs Ca) (Meier *et al.*, 2020). Las nanopartículas de óxido de calcio (NPs CaO) a una concentración de 250 ppm pueden mejorar la germinación de las semillas y mejorar el crecimiento de las plántulas y el crecimiento radicular (Vijai Anand *et al.*, 2021).

Diversos estudios han indicado que las NPs pueden ser absorbidas por las raíces de las plantas o por exposición foliar, y pueden llegar a todos los órganos de la planta, incluidos los frutos, mejorando su calidad (de la Rosa *et al.*, 2021).

Por lo cual, no cabe duda de que el crecimiento de la agricultura depende totalmente de técnicas nuevas e innovadoras como la nanotecnología. Se espera que las nanopartículas aplicadas en la agricultura puedan aumentar la producción agrícola y satisfacer la demanda de alimentos de una población en crecimiento (Vedamurthy *et al.*, 2021).

Absorción, transporte o translocación de las nanopartículas

La acumulación y absorción de las NPs es diferente dependiendo el tipo de planta composición química, tipo, recubrimiento y tamaño de las NPs (Pérez-de-Luque, 2017). Las NPs se pueden suministrar a las plantas mediante la exposición de las raíces o la absorción por las hojas (Lv *et al.*, 2019; Afzal *et al.*, 2021). Las NPs pueden ingresar a las células vegetales al unirse a las proteínas transportadoras de las membranas, a través de la endocitosis (creación de nuevos poros). Las NPs viajan de una célula a otra a través de los plasmodesmos que se encuentran en el citoplasma (Shahid Ali *et al.*, 2021).

Raíz

Las NPs se trasladan a las porciones aéreas después de interactuar con las raíces de las plantas y se acumulan en los orgánulos celulares o subcelulares. La adsorción de NPs del suelo por las raíces de las plantas puede describirse como el primer paso en la bioacumulación (Shahid *et al.*, 2021). El transporte o translocación de elementos de las raíces hacia los tejidos superficiales, son transportados a través de las membranas celulares por transportadores específicos (transportadores y bombas) y estos se mueven a través del citoplasma de una célula a otra vía simplástica o apoplástica (Medina-Velo *et al.*, 2017) y a través de los plasmodesmos internalizados en el citoplasma translocarse vía xilema o floema (Shahid *et al.*, 2021).

Hojas

La absorción foliar de las NPs desde la superficie de la hoja hasta los tejidos internos (Lv *et al.*, 2019) ocurre a través de dos vías de absorción diferentes: una

vía polar a través de los tricomas, hidátodos y estomas y una vía no polar a través de la cutícula de la hoja y su poros (Avellan *et al.*, 2021). La cutícula actúa como una barrera foliar primaria, que se limita la entrada de las NPs, permitiendo la entrada de NPs menores a 5 nm, mientras que las NPs mayores a 10 nm ingresan a través de los estomas (Shahid Ali *et al.*, 2021). Debido a la capacidad de las NPs de penetrar los poros estomáticos (de la Rosa *et al.*, 2021), la ruta principal de entrada de las NPs es a través de los poros estomáticos, para luego trasladarse vía apoplasto y simplasto hacia el sistema vascular de las plantas. El xilema y floema también juegan un papel importante en el transporte de las NPs, para ser acumuladas en la vacuola y la pared celular (Hong *et al.*, 2021).

Transporte

Una vez que las NPs penetran la planta (después de entrar a las células), existen dos formas de moverse a través de los tejidos: el apoplasto y el simplasto (Pérez-de-Luque, 2017). A través de las vías simplástica y apoplástica, las NPs pueden alcanzar los vasos del xilema y el floema y trasladarse en toda la planta a diferentes tejidos y órganos (como flores, frutas y semillas) (Sanzari *et al.*, 2019).

Vía simplasto

El transporte simplástico tiene lugar intercelularmente a través de estructuras especializadas llamadas plasmodesmos y placas cribosas (Pérez-de-Luque, 2017). Los plasmodesmos son canales que atraviesan la pared celular de las plantas y permiten la comunicación intercelular al unir el citoplasma entre células adyacentes (Lv *et al.*, 2019). Las NPs pueden entrar a las células al unirse con las proteínas transportadoras (Khan *et al.*, 2019). Solamente las NPs pequeñas de 20-50 nm pueden ser transportadas vía simplasto (Hong *et al.*, 2021).

Vía apoplasto

El transporte apoplástico tiene lugar fuera de la membrana plasmática a través de los espacios extracelulares, las paredes celulares de las células adyacentes y los vasos del xilema (Al-Amri *et al.*, 2020). La vía apoplástica es importante para

el movimiento dentro de los tejidos vegetales, ya que permite que las NPs alcancen el cilindro central de la raíz y los tejidos vasculares, para poder moverse rápidamente a la parte aérea. Una vez dentro del cilindro central, las NPs pueden moverse hacia la parte aérea a través del xilema, siguiendo el flujo de transpiración (Pérez-de-Luque, 2017). Se ha reportado que las NPs grandes de 50-200 nm pueden ser transportadas vía apoplasto (Hong *et al.*, 2021). Al llegar al xilema las NPs se acumulan en la endodermis como resultado de una barrera apoplástica denominada “banda de Caspary”, por lo que para una translocación eficiente las NPs deben penetrar el sistema vascular vía simplasto (Pradeep Kumar *et al.*, 2016; Fiol *et al.*, 2021).

Vía simplásto

La ruta simplástica es la ruta más importante para el transporte de las NPs en los cultivos (Pradeep Kumar *et al.*, 2016). La penetración de las NPs en las células ocurre al unirse a proteínas transportadoras, a través de acuaporinas, canales iónicos, endocitosis y los plasmodesmos (Pradeep Kumar *et al.*, 2016). Sin embargo el transporte simplástico tiene lugar intercelularmente, principalmente a través de estructuras especializadas llamadas plasmodesmos (Pérez-de-Luque, 2017). Los plasmodesmos son canales que atraviesan la pared celular de la planta y permiten la comunicación intercelular al unir el citoplasma entre células adyacentes (Lv *et al.*, 2019). Se ha reportado que solo las NPs pequeñas de 20-50 nm son transportadas vía simplasto (Hong *et al.*, 2021). La interacción de las NPs con las membranas de las células vegetales podría alterarse según la naturaleza hidrofóbica/hidrofílica. Las NPs hidrofílicas tienden a adsorberse en la superficie de la membrana bicapa y, además, pueden unirse a las vesículas intracelulares, mientras que las NPs hidrofóbicas se incrustan en el núcleo hidrofóbico de la membrana sin provocar lesiones ni fugas en la membrana. Las NPs en el citoplasma pueden estar rodeadas de proteínas o con algunas biomoléculas específicas que forman una corona. Una vez dentro de las células, los endosomas que contienen NPs o el complejo NPs-proteína pueden moverse

de manera más eficiente a través de los plasmodesmos (Pradeep Kumar *et al.*, 2016).

Translocación

La translocación de las NPs en la planta dependen de la fisiología y la estructura de las células vegetales (Ali *et al.*, 2021), de las características de las NPs (tamaño, composición química y carga neta), así como de las rutas de aplicación y de las condiciones ambientales (Sanzari *et al.*, 2019; Avellan *et al.*, 2021). La translocación inicia cuando las NPs penetran las paredes celulares y la membrana plasmática de las células de las hojas o las raíces (Husen, 2020). Las NPs se mueven de las hojas a las raíces, de las raíces a las partes aéreas de las plantas, así como también al tallo, a las semillas o fruto en desarrollo, y de una raíz a otra (Lv *et al.*, 2019). El mecanismo de transporte es mediado por dos rutas de translocación: el xilema y el floema (Wu *et al.*, 2020).

Xilema

Después de la exposición a las plantas, las NPs penetran las paredes celulares y las membranas plasmáticas de las capas epidérmicas en las raíces, seguido de una serie de eventos para ingresar a los tejidos vasculares de la planta vía xilema y moverse a la estela. El xilema es el vehículo más importante en la distribución y translocación de NPs, a través del xilema, las NPs pueden absorberse y trasladarse a las hojas, de igual manera las NPs pueden ser captadas por las raíces y transportadas a los brotes (Yan y Chen, 2019). Un factor que puede limitar la translocación de las NPs es el tamaño de los poros de la pared celular, debido a que el tamaño del poro es menor (3-8 nm) que el tamaño de las NPs (Aslani *et al.*, 2014). Por lo que la translocación de las NPs a través del xilema depende principalmente de la transpiración, la presión de las raíces y factores ambientales como la temperatura, la humedad y la interacción carga-carga entre las NPs y las plantas (Husen, 2020).

Floema

El floema es otro mecanismo de transporte de las NPs (Hong et al., 2014). Después de atravesar la cutícula y la epidermis, las NPs pueden moverse dentro del mesófilo en la célula vía simplasto (a través de plasmodesmos) o vía apoplasto (a través del espacio extracelular), de esta manera las NPs llegan al floema, para ser transportadas desde las hojas a diversos órganos de las plantas. Una vez dentro del floema el transporte de las NPs se encuentra regulado por las placas de tamiz y proteínas, para llegar a otros órganos no vasculares, las NPs deben atravesar la vasculatura del tallo. Mientras las NPs se transportan a través del floema también pueden intercambiarse del floema al xilema, dependiendo de la estructura vascular de la planta y de las propiedades de las NPs (Zhang *et al.*, 2021). Además, las NPs pueden transportarse de los brotes hacia las raíces a través del floema. Por lo que el transporte de NPs puede ser hacia arriba o hacia abajo de su forma de aplicación (Ma *et al.*, 2017). El mecanismo de transporte de las NPs de los brotes hacia las raíces puede atribuirse a una asociación entre las NPs y un transportador de aminoácidos (Wu *et al.*, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo y manejo del cultivo

El experimento se estableció en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en un invernadero de tipo multitunel con cubierta de polietileno, perteneciente al Departamento de Botánica de la misma universidad, se establecieron plantas de tomate saladette “El Cid F1” (Harris Moran) de crecimiento indeterminado bajo un sistema de cultivo sin suelo. El trasplante se realizó en bolsas de polietileno negro con capacidad 10 L utilizando como sustrato una mezcla de peat most y perlita en relación 1:1 (v/v). El cultivo se realizó en un solo tallo. Para proporcionar los nutrientes a las plantas se utilizó un sistema de riego dirigido y la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) modificando la concentración de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo (25, 50, 75 y 100 %). Para los tratamientos bajo estrés salino se le agregó NaCl a la solución Steiner a una concentración de 50 mM. El pH de la solución nutritiva se ajustó a 6.5 con ácido sulfúrico (100 mL).

Tratamientos

Los tratamientos utilizados fueron cinco: 1) un control con 50 mM de NaCl, 2) Ca NPs a 2500 mg L⁻¹, 3) Ca NPs a 2500 mg L⁻¹ más NaCl a 50 mM, 4) Ca (NO₃) a 2500 mg L⁻¹ más NaCl a 50 mM, y 5) un control sin la aplicación de Ca NPs ni NaCl (T0). Las concentraciones de NaCl, Ca NPs y Ca (NO₃) se seleccionaron con base a trabajos anteriores (López-Vargas et al., 2021; López-Vargas et al., 2018; Pérez-Labrada et al., 2019).. Se añadió NaCl a la solución a partir del trasplante y durante todo el desarrollo del cultivo. Las aplicaciones de Ca NPs fueron vía drench, mientras la aplicación de Ca (NO₃) fue vía foliar. Las Ca NPs y el Ca (NO₃) se aplicaron desde los siete días después de trasplante, y posteriormente cada siete días durante todo el desarrollo del cultivo.

Nanopartículas

Se utilizaron NPs CaCO₃ comerciales. Con pH= 7.39 (17.6 °C) y Potencial Z= -13.1 mV. Para hacer eficiente el uso de nanopartículas de CaCO₃, fueron

sonicadas en agua destilada empleando un equipo de ultrasonido con un 60% de amplitud del equipo. Después de dispersar las nanopartículas por al menos 15 minutos. Las nanopartículas se mantienen en dispersión estable por aproximadamente 3-5 horas, después de este tiempo se aglomeran y precipitan en el fondo. Antes de aplicar las nanopartículas al cultivo se agitan mecánicamente y se logran dispersar fácilmente.

Variables agronómicas

Para la evaluación del crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate se midió altura de planta (flexómetro) diámetro de tallo (vernier digital), se contó número de hojas, número de racimos, número de frutos por planta; en el caso de las plantas desarrolladas con NaCl, se contabilizó el número de frutos dañados (blossom end rot) por planta para determinar el porcentaje de daño. Con una balanza digital se pesó el peso total de los frutos de las plantas, así como el peso de los frutos dañados por planta. Para la biomasa fresca, se evaluó peso fresco de tallo y hojas (kg), utilizando una balanza digital (OHAUS modelo Adventurer Pro). El peso seco (PS) de tallo y hojas (g) se obtuvo al secar las muestras.

Calidad de fruto

Para determinar la calidad del fruto, se recolectaron dos frutos por planta de tamaño uniforme, en la etapa de maduración 6 de acuerdo con la escala del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), del segundo, cuarto y sexto racimo. Se determinaron los parámetros que describen la calidad en frutos. El potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron utilizando un potenciómetro digital HI 98130 (Hanna Instruments). Los sólidos solubles totales (TSS) se midieron en 10 mL de pulpa de los frutos utilizando un refractómetro digital (ATAGO, modelo MASTER-100H, Bellevue, WA, EE. UU.). La firmeza de los frutos se determinó con un penetrómetro manual (WAGNER INSTRUMENTS, modelo FDK 20, Greenwich, CT, EE. UU.), para lo cual, se tomaron tres medidas en puntos distintos del fruto y se obtuvo el promedio. El potencial de oxidación-reducción (ORP) se midió con un

potenciómetro de pH/potencial de oxidación-reducción (Hanna Instruments, modelo HI2211, Woonsocket, RI, EE. UU.). La acidez titulable (TA) se determinó mediante la técnica colorimétrica según la metodología (AOAC, 1990) utilizando 10 mL de pulpa de los frutos, se la agregaron dos gotas de fenolftaleína (1%). Se tituló con NaOH (0.1 N) y los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico.

COMPUESTOS ANTIOXIDANTES

Clorofilas y carotenoides

Las clorofilas y los carotenoides se determinaron de acuerdo con (Nagata y Yamashita, 1992) Se midieron absorbancias (Abs) a 453 nm, 505 nm, 663 nm y 645 nm en un espectro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150). Para determinar clorofilas a, b y clorofilas totales se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3. El licopeno y β -caroteno se determinó con las ecuaciones 4 y 5. Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de PS.

$$\text{Clorofila a} = 0.999 * \text{Abs}_{663} + 0.0989 * \text{Abs}_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila b} = -3.28 * \text{Abs}_{663} + 1.77 * \text{Abs}_{645} \quad (2)$$

$$\text{Clorofilas totales} = \text{Clorofila a} + \text{Clorofila b} \quad (3)$$

$$\text{Licopeno} = 0.0458 * \text{Abs}_{663} + 0.204 * \text{Abs}_{645} + 0.372 * \text{Abs}_{505} - 0.0806 * \text{Abs}_{453} \quad (4)$$

$$\beta \text{ caroteno} = 0.216 * \text{Abs}_{663} - 1.22 * -0.304 * \text{Abs}_{505} + 0.452 * \text{Abs}_{453} \quad (5)$$

Vitamina C

La vitamina C (ácido ascórbico) se determinó por el método de Hung y Yen (2002). Se pesaron 10 mg de tejido liofilizado, se colocó en un tubo eppendorf de 2 mL. Se agregó 1 mL de ácido metafosfórico (HPO₃) al 1%, se homogenizó en vortex, posteriormente se centrifugó en una microcentrifuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R) a 12500 rpm durante 5 minutos a 4°C. Se tomaron 0.2 mL de la extracción y se agregaron 1.8 mL de 2-6 diclorofenolindofenol. La cuantificación se realizó por espectrofotometría (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a una longitud de onda de 515 nm en una celdilla de cuarzo.

Para el blanco se utilizó ácido metafosfórico. Los valores se obtuvieron a partir de la curva de calibración preparada con ácido ascórbico (0-50 mg L⁻¹). Los resultados se expresaron en mg g⁻¹ de peso seco de ácido ascórbico.

Flavonoides

La cuantificación de flavonoides se realizó mediante el método de Dowd, adaptado por Arvouet-Grand et al. (1994) con algunas modificaciones. Para la extracción se pesaron 20 mg de tejido liofilizado, se colocaron en tubo eppendorf de 2 mL. Se le agregaron 2 mL de metanol grado reactivo, y se homogenizó en vortex, posteriormente se centrifugó en una microcentrifuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R) a 10 000 rpm durante 2 minutos a -4°C. La mezcla se filtró con papel Whatman N° 1. Para la cuantificación se agregaron 1 mL del extracto en un tubo eppendorf y 1 mL de solución metanólica de Tricloruro de Aluminio (AlCl₃) al 2%. Se dejó reposar durante 20 minutos en oscuridad a 4°C. Transcurrido el tiempo se tomó la lectura en espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a una longitud de onda de 415 nm utilizando una celdilla de cuarzo. Para el blanco se utilizó 1 mL de metanol grado reactivo y 1 mL de Tricloruro de Aluminio (AlCl₃). La curva de calibración se realizó con quercentina (0-30 mg L⁻¹). El contenido de flavonoides fue expresado en mg por 100 g de PS.

Fenoles

Para la extracción de fenoles se pesaron 50 mg del tejido liofilizado y se colocaron en tubo eppendorf de 2 mL. Se le agregó 1 mL de solución agua:acetona (1:1) (Yu y Dahlgren, 2000), se agitó en vortex por 30 segundos y se sonicó por 5 minutos a 0°C. Se centrifugó a 12500 rpm por 10 minutos a 4°C, se extrajo el sobrenadante en un tubo eppendorf. Se dejó reposar durante 20 minutos en oscuridad a 4°C. En un tubo eppendorf se agregaron 18 µL del sobrenadante, 70 µL del reactivo Folin-Ciocalteu, 175 µL de Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) al 20%, 1.74 mL de agua destilada (fría), se sometió a vortex durante 30 segundos. Las muestras se colocaron a baño maría a 45°C por 30 minutos (Nsor-Atindana

et al., 2012; Sultana et al., 2009). La cuantificación de fenoles se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150). Las muestras se leyeron a una absorbancia de 750 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se sustituyó el extracto por una solución agua:acetona (1:1). La curva de calibración se realizó con ácido gálico (0-250 mg L⁻¹). Los fenoles totales se expresaron en mg por g de PS.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se consideraron cinco repeticiones para cada tratamiento. Se establecieron cinco tratamientos, con cinco repeticiones en un diseño experimental de cuadro latino cinco por cinco. El análisis de varianza y la prueba de media de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher ($p \leq 0.05$) se realizaron utilizando el software Infostat 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables agronómicas

La menor altura la observamos en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl, la cual disminuyó 13.70 %, mientras que la mayor altura se observó en el tratamiento NPs Ca, superando al T0 en un 3.24 % (Fig. 1A). El diámetro de tallo disminuyó 10, 11.38 y 6.42 % en todos los tratamientos con salinidad NaCl, NPs Ca + NaCl y Ca (NO₃) respectivamente, el diámetro mayor lo encontramos en el T0 con 13.40 mm (Fig. 1B). Por su parte en el número de hojas no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados (Fig. 1C). El número mayor de racimos se obtuvo en el tratamiento NPs Ca + NaCl con 8.35 racimos, mientras que el menor número de racimos se obtuvo en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl con 7.65 racimos (Fig. 1D).

La altura, diámetro de tallo y número de racimos mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados. Las variables de crecimiento de plantas sometidas a estrés salino adoptaron tendencias similares al NaCl. Esto puede atribuirse a que el estrés salino provoca una disminución en la división y elongación de las células y del meristemo apical, así como a la disminución en la absorción de agua y disminución en los procesos metabólicos (Ageeb Akladious y Ibrahim Mohamed, 2018). La aplicación de NPs Ca indujeron una mayor altura en plantas sin salinidad y un mayor número de racimos plantas con estrés salino. Este comportamiento puede deberse a las propiedades específicas de las nanopartículas como el tamaño, la composición, la especie vegetal y de la disponibilidad de las NPs en los medios, lo que puede influir en la translocación y acumulación dentro de la planta y por lo tanto, tener un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas (López-Moreno *et al.*, 2016; Al-Amri *et al.*, 2020).

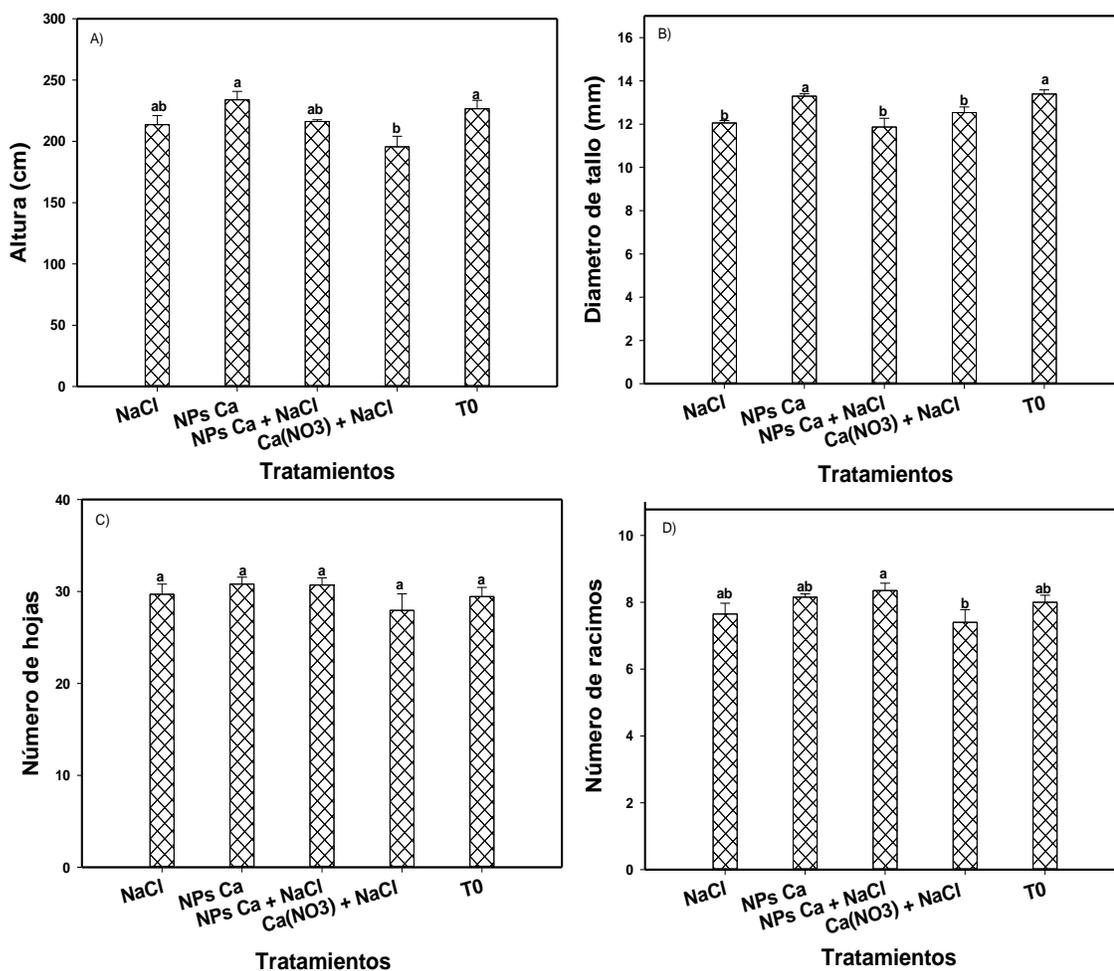


Figura 1. Altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y racimos de las plantas de tomate con estrés salino por NaCl tratadas con NPs Ca. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n=5$, valores promedio \pm error estándar.

El menor número de frutos amarrados lo encontramos en los tratamientos NaCl y Ca (NO₃) + NaCl con 43 y 42 frutos amarrados respectivamente, mientras que el mayor número de frutos amarrados lo encontramos en el tratamiento NPs Ca + NaCl con 48 frutos amarrados (Fig. 2A). El número mayor de frutos totales se obtuvo en el tratamiento NPs Ca + NaCl con 45 frutos por planta y el menor número de frutos totales en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl con 38 frutos por planta (Fig. 2B). Los tratamientos con salinidad mostraron disminución en el peso de los frutos de 36.57, 34.15 y 41.15 % en los tratamientos NaCl, NPs Ca + NaCl y Ca (NO₃) + NaCl respectivamente, el tratamiento NPs Ca fue mejor al testigo en un 1.80 % (Fig. 2C). Con respecto el número de frutos dañados, los

tratamientos con salinidad mostraron el mayor número de frutos dañados, siendo el tratamiento NaCl el más alto con un 7.05 frutos dañados por planta, mientras que el tratamiento NPs Ca inhibió la formación de frutos dañados (Fig. 2D). En cuanto al peso de los frutos dañados, el tratamiento NaCl mostró el mayor peso de frutos dañados con 4.35 kg por planta (Fig. 2E).

Se observaron diferencias estadísticas en el número de frutos amarrados, número de frutos totales, peso de los frutos, número de frutos dañados y peso de frutos dañados. En condiciones de salinidad se observó una disminución en el rendimiento de las plantas, mientras que la aplicación de NPs Ca incrementó el número de frutos amarrados, así como el número de frutos totales. Los efectos negativos de la salinidad sobre la productividad pueden atribuirse a desequilibrios osmóticos, iónicos o nutricionales (Rahman *et al.*, 2018). Por otro lado la disminución de la productividad podría ser atribuida a fluctuaciones en la partición de la biomasa, debido a que la energía para contrarrestar el estrés es mayor que la energía requerida para la generación de biomasa (Pérez-Labrada *et al.*, 2019). Estos resultados también podrían ser atribuidos a que la aplicación de NPs estimula la formación de órganos en las plantas (Hernández-Hernández *et al.*, 2018). Por su parte, la aplicación de NPs Ca inhibió en un 100% la formación de frutos dañados, esto puede atribuirse al tamaño (nanoescala) las NPs, ya que tienen potencial para atravesar las paredes celulares y la membrana plasmática y facilitar así, su absorción y translocación, por lo tanto pueden aumentar el suministro de elementos a las plantas provocando respuestas típicas de cada elemento (Siddiqui *et al.*, 2020). Además las respuestas de crecimiento y desarrollo de las plantas encontradas con la aplicación de NPs puede diferir mucho según el tipo de NPs, concentración, forma y etapa de aplicación, así como del material vegetal utilizado (Pérez-de-Luque, 2017).

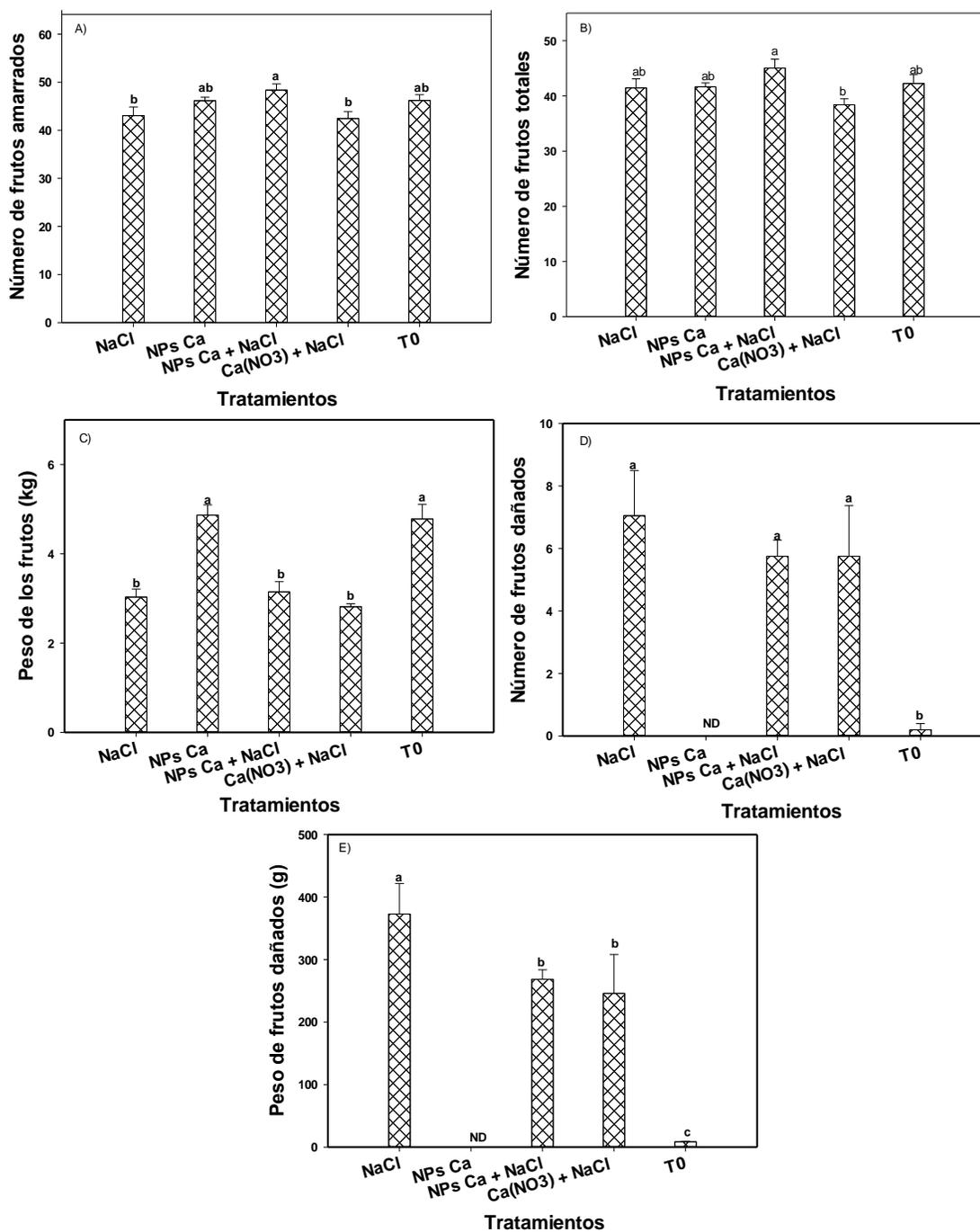


Figura 2. Frutos de plantas de tomate con estrés salino por NaCl tratadas con NPs Ca. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n = 5$, valores promedio \pm standard error.

Con respecto a la biomasa fresca aérea, se observó una disminución del 17.81% en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl, mientras el tratamiento NPs Ca incrementó la biomasa fresca aérea en un 14.39 % (Fig. 3A). Por otro lado, para la biomasa

seca aérea no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados (Fig. 3B). Estos resultados pueden atribuirse a que la aplicación de NPs puede producir efectos positivos o tóxicos (Siddiqui *et al.*, 2020), de acuerdo a la dosis, la forma de las NPs, tamaño, la carga y de la especie vegetal (Hong *et al.*, 2021). Lo que podría promover o suprimir el desarrollo vegetativo. Aunado a esto, el estrés salino también suprime la capacidad fotosintética, y el crecimiento de las plantas depende de la fotosíntesis, además, de que el efecto de la salinidad sobre la tasa fotosintética depende de la concentración de la sal y de la especie vegetal (Safdar *et al.*, 2019). Estos resultado coinciden con los reportados por Juárez-Maldonado *et al.* (2016) y Pinedo-Guerrero *et al.* (2017) quienes reportan que la aplicación de NPs no afecto la biomasa seca de plantas de tomate.

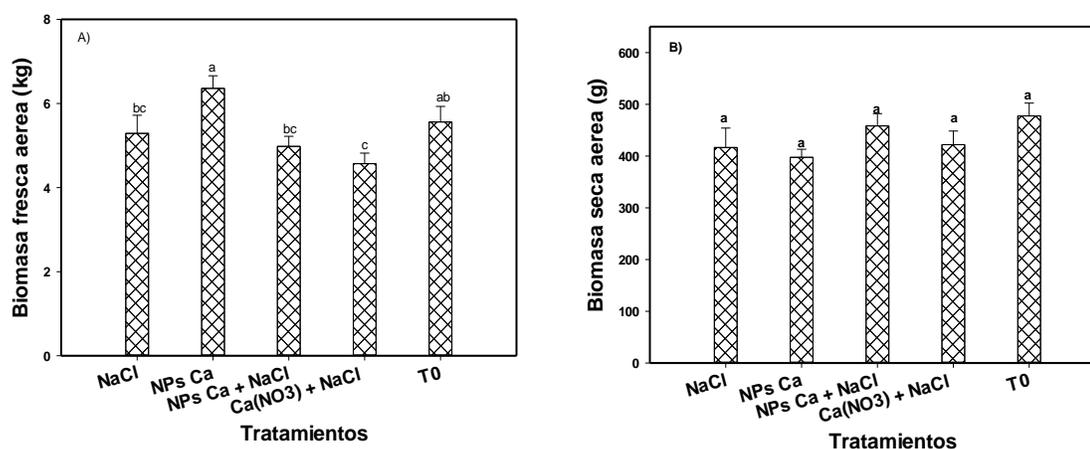


Figura 3. Biomasa fresca y seca aérea de plantas de tomate con estrés salino por NaCl tratadas con NPs Ca. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n = 5$, valores promedio \pm error estándar.

Calidad de fruto

La firmeza incrementó con la aplicación de NPs Ca en un 6.32 y 23.32 % en los racimos dos y cuatro, mientras que la firmeza disminuyó en todos los tratamientos con NaCl, siendo los tratamientos Ca (NO₃) + NaCl con 14.30 % en el racimo dos y NaCl con 21.25 y 25.62 % en los racimos cuatro y seis respectivamente los que mostraron menor firmeza en los frutos (Fig. 4A).

Para los datos reportados en la figura 4B los valores más altos de pH se observaron en el tratamiento NPs Ca con 4.81 en el racimo dos, en el tratamiento

NaCl con 5.06 en el racimo cuatro, en el tratamiento NPs Ca + NaCl con 4.77 en el racimo seis, mientras que los valores más bajos de pH se obtuvieron en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl con 4.65 en el racimo dos, en el tratamiento NPs Ca con 4.55 en el racimo cuatro y en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl perteneciente al racimo seis. Una disminución en el pH puede deberse a la acumulación de ácidos orgánicos en las vacuolas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Pinedo-Guerrero *et al.* (2017) quienes reportan una disminución del pH en los frutos de chile jalapeño con la aplicación de NPs Cu + quitosano y Morales-Espinoza *et al.* (2019) reportan una disminución en el pH de frutos de tomate con la aplicación de NPs Se. Un aumento en el pH se debe a una transformación de los ácidos orgánicos en las vacuolas en azúcares simples que luego son utilizados en la respiración celular para obtener energía. Esto provoca una disminución de la acidez y por lo tanto un aumento en el pH (Klunklin y Savage, 2017). Por otra parte se ha demostrado que la aplicación de CuNPs en el cultivo de tomate incrementa el pH (Juárez Maldonado *et al.*, 2016; López-Vargas *et al.*, 2018), esto indica que el efecto de las NPs puede variar dependiendo de su tipo y de la especie vegetal. En este trabajo el pH más alto fue de 5.06, mientras que el pH más bajo fue de 3.65. El rango del pH de los tomates se encuentra entre 4.0 y 4.5, la calidad de la fruta está muy influenciada por el pH y los consumidores aprecian más las frutas menos ácidas, debido a que se caracterizan por tener mejor sabor (López-Vargas *et al.*, 2018).

En los datos de la CE observados en la figura 4, observamos un incremento de la CE en todos los tratamientos con salinidad (NaCl, NPs Ca + NaCl y Ca (NO₃) + NaCl) en los tres racimos evaluados. La mayor CE la obtuvimos en el tratamiento NaCl con 5.18 mS cm⁻¹ perteneciente al racimo cuatro. Los resultados obtenidos son diferentes a los reportados por Hernández-Hernández *et al.* (2019) quienes reportan un incremento del 48 % en la conductividad eléctrica con aplicación de NPs de Se y Cu en plantas de tomate. Esto puede deberse a una disminución en la acumulación de azúcares solubles al ser utilizados en la respiración celular, ya que un aumento en la conductividad eléctrica puede ser

atribuida a la acumulación de azúcares solubles y ácidos orgánicos que contrarrestan el desequilibrio iónico (Pengfei *et al.*, 2017).

Para el Potencial de Oxido Reducción representados en la Figura 4D, solo fue diferente en el racimo cuatro en donde se observó un incremento de 28.03 % en el tratamiento NPs Ca + NaCl y una disminución del 34.93 % en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl con respecto al control, mientras que los demás tratamientos evaluados se comportaron estadísticamente igual a su respectivos controles López-Vargas *et al.* (2018) reportaron una disminución del 5.7 % del ORP con la aplicación de NPs Cu en el cultivo de tomate. Juárez-Maldonado *et al.* (2016) reportan una disminución en el ORP con la aplicación de NPs Cu + quitosan en tomate. Un ORP con valores bajos indica una mejor calidad del fruto, lo que puede traducirse en un mayor potencial antioxidante.

Para los sólidos solubles totales representados en la figura 4E se observaron incrementos en los tratamientos NaCl y NPs Ca + NaCl en los tres racimos evaluados, siendo el tratamiento NaCl el que mostró el mayor contenido de SST con 7.20 °Brix en los frutos pertenecientes al racimo cuatro, por su parte el menor contenido de SST lo encontramos en el tratamiento NPs Ca con 4°Brix en los frutos pertenecientes al racimo dos. Juárez-Maldonado *et al.* (2016) reportaron que la aplicación de NPs Cu + quitosan no generó diferencias en los sólidos solubles totales de fruto de tomate. Una disminución de los sólidos solubles totales puede ser atribuida al uso de azúcares simples en la respiración celular (Klunklin y Savage, 2017). Los resultados obtenidos de la variable acidez titulable presentados en la figura 4F se observaron incrementos en el tratamiento NaCl en los tres racimos evaluados, siendo el racimo cuatro el de mayor AT con 0.39 % de ácido cítrico comparado con sus respectivos controles. Estos resultados concuerdan con (López-Vargas *et al.*, 2018) quienes reportan una disminución del 16.33 % de la acidez titulable con la aplicación de 125 mg L⁻¹ de NPs Cu. Sin embargo difieren de lo reportado por (Hernández-Hernández *et al.*, 2019) quienes reportan un incremento del 20 % de la acidez titulable en frutos de tomate con la aplicación de 20 mg L⁻¹ de NPs Se + 10 o 50 mg L⁻¹ de NPs Cu. Un bajo contenido de ácido cítrico puede deberse a la disminución de los ácidos málico y fumárico

derivados de cambios en la glucólisis y el ciclo de Krebs, ya que son flujos de carbono predominantes durante el proceso de maduración de los frutos. Un aumento de la respiración durante la maduración, característico de los frutos climatéricos, determinará del contenido de algunos productos intermedarios del ciclo de Krebs (Oms-Oliu *et al.*, 2011). Es probable que la aplicación de NPs Ca influya en la respiración del fruto, lo que representa un retraso en la maduración y, como consecuencia, una disminución en la acidez titulable.

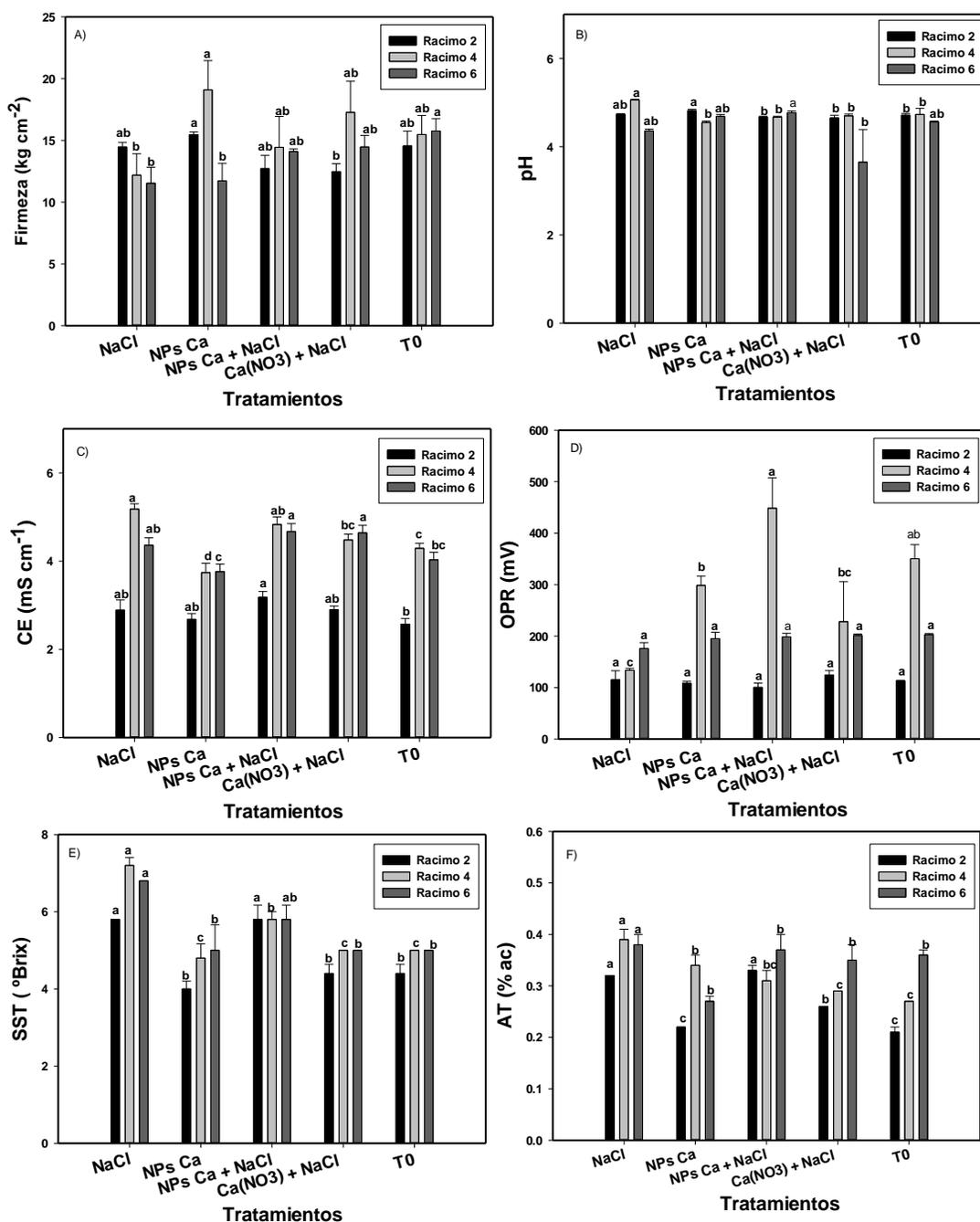


Figura 4. Calidad de los frutos de las plantas de tomate tratadas con nanopartículas de calcio y salinidad. pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; ORP: potencial de óxido-reducción; SST: sólidos solubles totales; TA: acidez titulable. Diferentes letras indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n = 5$, valores promedio \pm error estándar.

Contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas

Los datos observados en la figura 5A de la clorofila a se observan disminuciones en los tratamientos NaCl y Ca (NO₃) + NaCl del 17.84 % y del 16.40 % respectivamente con respecto al control. Para la clorofila b no se observan diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados (Fig. 5B), mientras que en la clorofila total se observó una disminución del 17.63 y 16.55 % en los tratamientos NaCl y Ca (NO₃) + NaCl (Fig. 5C).

Las clorofilas son muy importantes en las plantas, ya que controlan el potencial fotosintético al capturar la energía luminosa del sol. El contenido de clorofilas es un indicador clave en la capacidad fotosintética de las plantas (Morales-Espinoza *et al.*, 2019). Según lo reportado por Hernández-Hernández *et al.* (2019) el estrés por salinidad aumenta la cantidad de clorofila, sin embargo los autores no encontraron un aumento de las clorofilas con la aplicación de NPs Cu en el cultivo de tomate.

Estos resultados pueden ser atribuidos a la forma de aplicación de las NPs, ya que se ha reportado un aumento de las clorofilas con la aplicación de diversas NPs vía foliar, y este aumento se encuentra relacionado con la dosis de las NPs. Raliya *et al.* (2015) reportan un aumento del 62.67 al 272.42 % en las clorofilas en hojas de tomate con la aplicación foliar de NPs TiO₂.

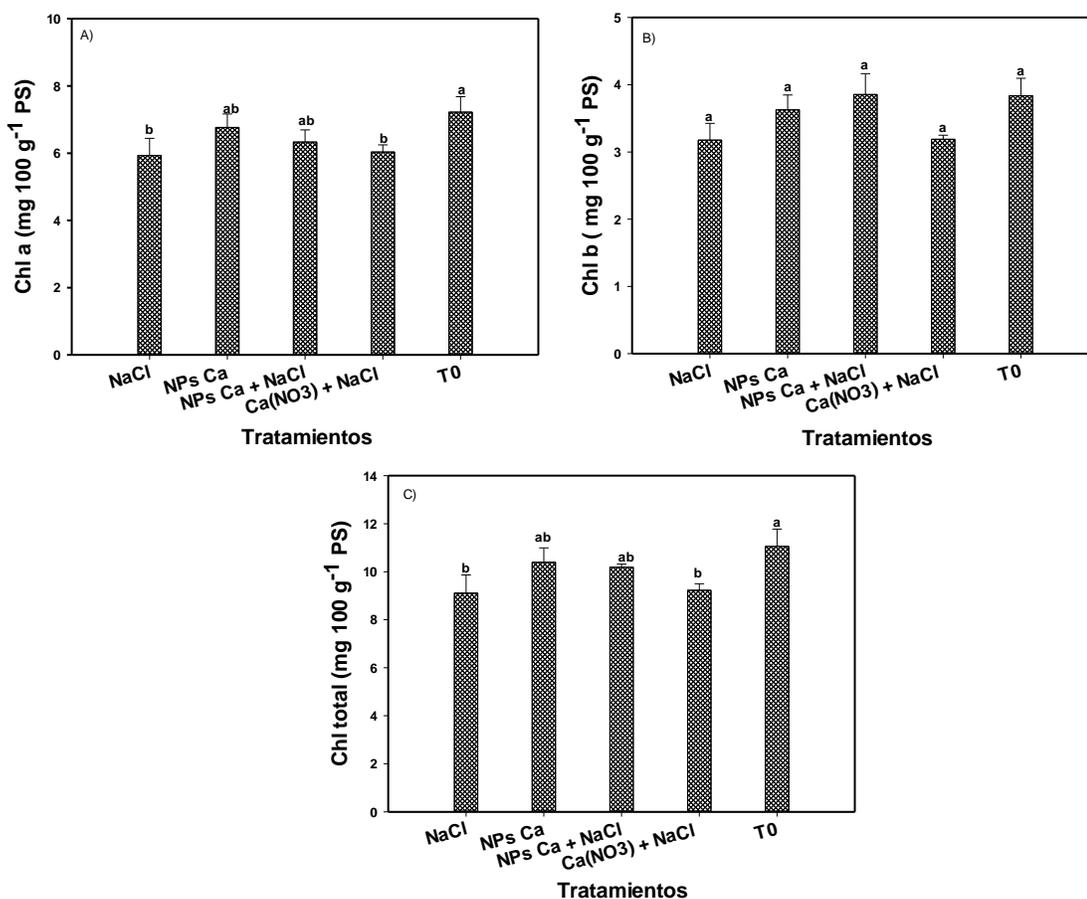


Figura 5. Pigmentos fotosintéticos de las hojas de tomate tratadas con salinidad Y nanopartículas de calcio. Chl: clorofila a, b y clorofila total; PS: peso seco. Diferentes letras indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n = 5$, valores promedio \pm error estándar.

Compuestos antioxidantes no enzimáticos de hojas de plantas de tomate

Para los datos reportados en la figura 6A con respecto a la vitamina C, no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados. Respecto al contenido de flavonoides representado en la figura 6B, se observa una disminución del 13.12 % en el tratamiento Ca (NO₃) + NaCl comparado con el control, mientras que el contenido de fenoles incremento 11.83 % con la adición de NPs Ca en comparación con el control (Fig. 6C). Por otra parte, no se observaron diferencias estadísticas en el contenido de licopeno entre los tratamientos evaluados (Fig. 6D), mientras betacaroteno que disminuyó en los tratamientos NPs Ca + NaCl y Ca (NO₃) + NaCl 26.19 y 37.31 % respectivamente (Fig. 6E). Estos resultados son diferentes a los reportados por

Hernández-Hernández *et al.* (2019) quienes reportan una disminución del 14 y 16 % de los fenoles con la aplicación de 10 y 50 mg L⁻¹ de NPs Cu en hojas de tomate. Se ha reportado un incremento de fenoles con la aplicación de NPs Cu en frutos de tomate, por lo que se sugiere que la aplicación de NPs tiene un efecto estimulante sobre la inducción de compuestos antioxidantes (Hernández-Fuentes *et al.*, 2017).

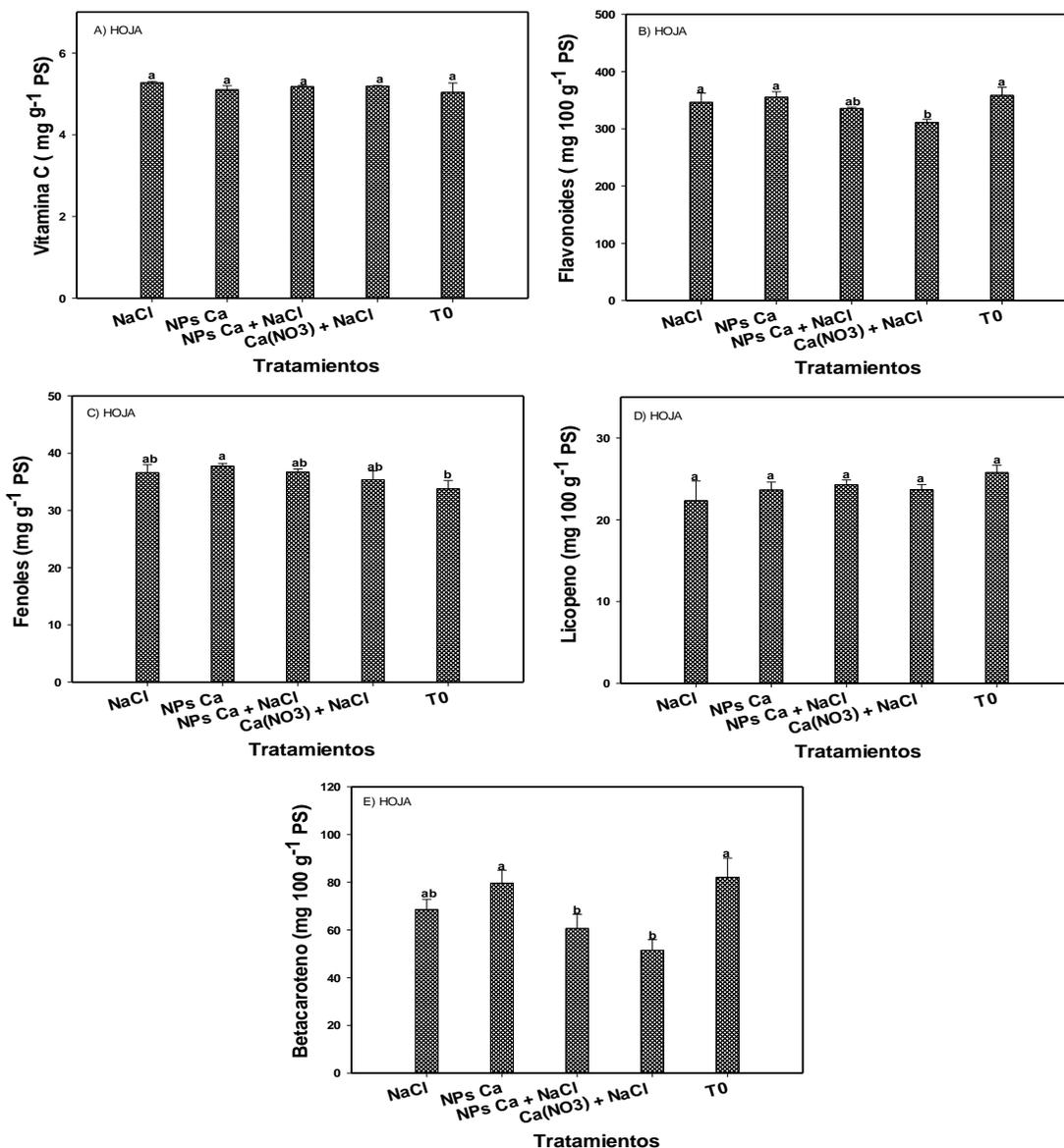


Figura 6. Compuestos antioxidantes no enzimáticos en hojas de plantas de tomate sometidas a estrés salino tratadas con NPs Ca. Vitamina C (mg g⁻¹ PS); Flavonoides (mg 100 g⁻¹ PS); Fenoles (mg g⁻¹ PS); Licopeno (mg 100 g⁻¹ PS); Betacaroteno (mg 100 g⁻¹ PS). Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher (p ≤ 0.05) n = 5, valores promedio ± error estándar.

Compuestos antioxidantes no enzimáticos de frutos de tomate

Para los datos presentados en las figuras 7A para la variable vitamina C, solo fue diferente en los tratamientos pertenecientes al racimo cuatro, en donde se observó, una disminución 14.69, 8.31 y 5.05 % de la vitamina C en los tratamientos NaCl, NPs Ca + NaCl y Ca (NO₃) + NaCl, respectivamente. La vitamina C en los frutos de tomate es uno de los compuestos más importantes, ya que puede actuar como antioxidante al atrapar especies reactivas de oxígeno (ROS), previniendo o minimizando el daño oxidativo (Martí *et al.*, 2018). Por lo tanto, una mayor acumulación de vitamina C proporcionará una mejor calidad a los frutos. Se ha reportado un aumento en la vitamina C con la aplicación de NPs Cu en frutos de tomate (Pérez-Labrada *et al.*, 2019). Hernández-Hernández *et al.* (2019) reportaron un aumento en el contenido de vitamina C hasta en un 36 % en frutos de tomate con la aplicación de NPs Se.

En la figura 7B para los flavonoides, se observó una disminución del 27.35 % con la aplicación de Ca (NO₃) + NaCl en los frutos pertenecientes al racimo dos y un aumento del 34.46 % en el mismo tratamiento en los frutos pertenecientes al racimo seis, mientras que los demás tratamientos se comportaron estadísticamente similares al control. Estos resultados son diferentes a lo reportado por Pérez-Labrada *et al.* (2019) quienes reportan un aumento del 18% de los flavonoides con la aplicación foliar de NPs Cu en el cultivo de tomate. El aumento de los flavonoides puede estar relacionado con la dosis y la forma de aplicación de las NPs. López-Vargas *et al.* (2018) reportan una disminución del 12.48 % en los flavonoides con la aplicación de 500 mg L⁻¹ de NPs Cu en el cultivo de tomate. Una disminución de los flavonoides podría deberse a una disminución en la acumulación de carbohidratos en las vacuolas usados en la respiración celular (Hussain *et al.*, 2019).

En la figura 7C para los resultados en los fenoles, los fenoles mostraron un incremento en el racimo dos en los tratamientos NPs Ca y NPs Ca + NaCl del 37.18 y 35.82 % respectivamente, así como el tratamiento NPs Ca + NaCl incrementaron 12.15 % en los frutos del racimo cuatro, mientras que los fenoles de los frutos del racimo seis disminuyeron en todos los tratamientos en

comparación con el control. Se ha reportado el aumento de los fenoles en tomates estresados (Klunklin y Savage, 2017), de igual manera se ha informado un aumento de los fenoles en tomates con la aplicación de NPs. La aplicación de NPs Ca induce la síntesis de fenoles en los frutos de tomate con y sin salinidad, este aumento se va limitando en la medida que aumentan el número de los racimos, ya que se observa una disminución de la síntesis de fenoles en medida que aumentan los racimos. Estos resultados difieren de los reportados por Moradbeygi *et al.* (2020) quienes reportan un aumento del contenido fenólico en las raíces del cultivo de *Dracocephalum moldavica* L. con la aplicación de NPs FeO, y ninguna diferencia estadística con la interacción de NaCl + NPs FeO sobre el contenido fenólico de los brotes.

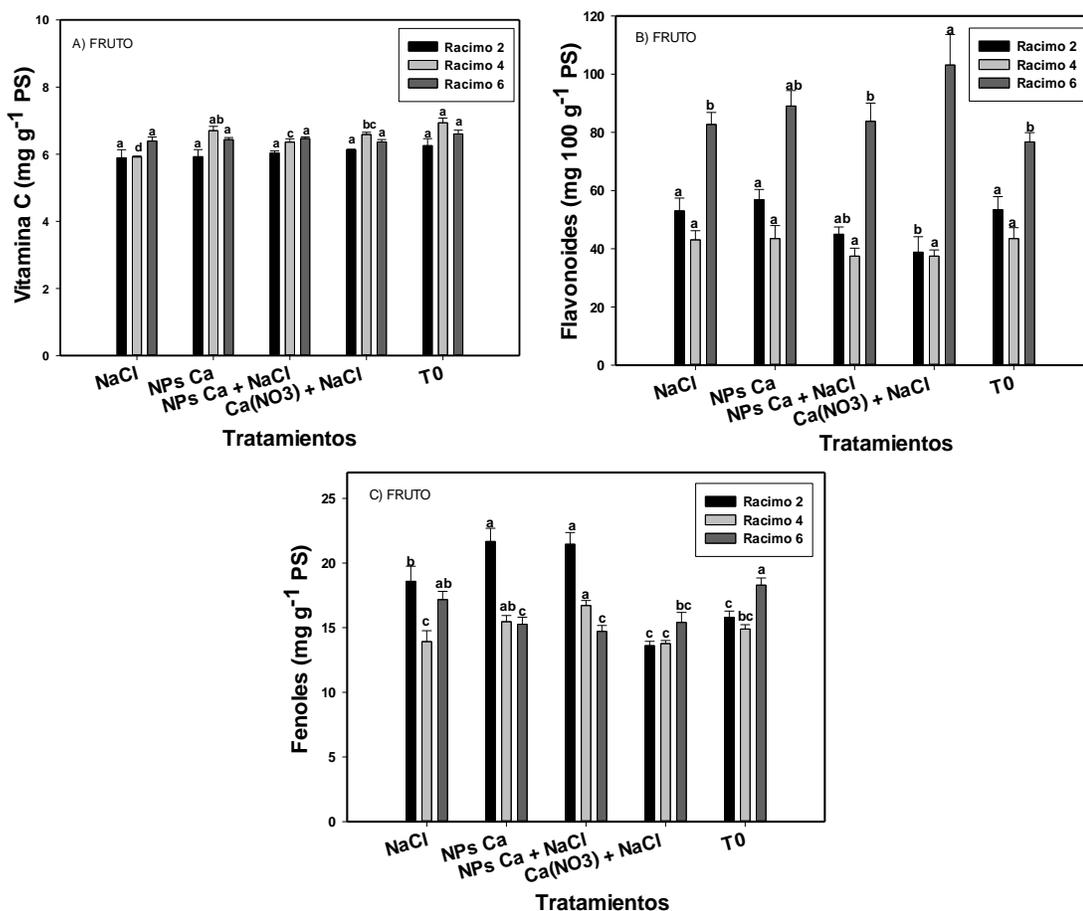


Figura 7. Compuestos antioxidantes no enzimáticos en frutos de plantas de tomate sometidas a estrés salino tratadas con NPs Ca. Vitamina C (mg g⁻¹ PS); Flavonoides (mg 100 g⁻¹ PS); Fenoles (mg g⁻¹ PS). Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n = 5$, valores promedio \pm error estándar.

Carotenoides en frutos de tomate

Los resultados observados en la figura 8A con respecto a β -caroteno se observa un incremento en el β -caroteno del racimo dos en el tratamiento NPs Ca + NaCl del 19 %, mientras que en el mismo tratamiento del racimo cuatro se observa una disminución del 21.61 % en comparación con el control.

En el licopeno ninguno de los tratamientos evaluados supero a sus respectivos controles, sin embargo, el mayor contenido de licopeno se encuentra en el tratamiento NPs Ca + NaCl con 229.29 de licopeno en 100 g⁻¹ de PS en los racimos cuatro y seis (Fig. 8B). Estos resultados son similares a los reportados por Hernández-Hernández *et al.* (2019) quienes reportan que la aplicación de NPs Se y NPs Cu no modifico el contenido de fenoles y β -caroteno en frutos de tomate, sin embargo difieren de lo reportado por (López-Vargas *et al.*, 2018) quienes reportan un aumento del 125.26 % en el licopeno con la aplicación de 50 mg L⁻¹ de NPs Cu vía foliar, sin embargo, los mismos autores reportan una disminución del licopeno con la aplicación de 250 mg L⁻¹ de NPs Cu. Por lo que el aumento del licopeno como del β -caroteno podría estar directamente relacionado con la dosis y la forma de aplicación de NPs.

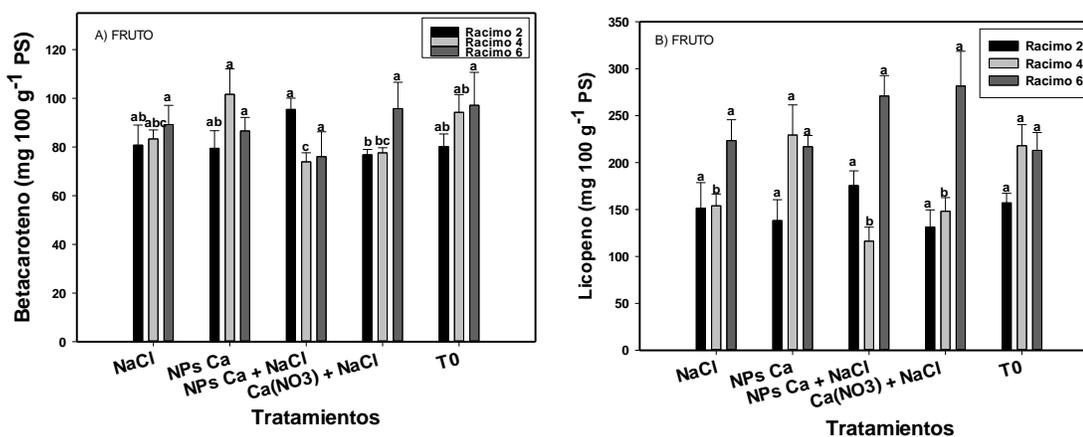


Figura 8. Carotenoides en frutos de plantas de tomate sometidas a estrés salino tratadas con CaNPs. Betacaroteno (mg 100 g⁻¹ PS); Licopeno (mg 100 g⁻¹ PS). Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo a Fisher ($p \leq 0.05$) $n = 5$, valores promedio \pm error estándar.

CONCLUSIONES

La aplicación de NPs Ca incrementó los valores de las variables agronómicas de plantas sometidas a estrés salino, ya que se mostró un efecto positivo al aumentar el número de racimos, número de frutos amarrados y número de frutos totales, así como la aplicación de NPs Ca a plantas sin estrés salino incrementó la altura de las plantas, aumento el peso de los frutos totales y a su vez inhibió la formación de frutos dañados.

Con respecto a la calidad de fruto, la aplicación de NPs Ca incrementó la firmeza de los frutos sin estrés salino, mientras que aumentó el contenido de sólidos solubles totales en plantas sometidas a estrés salino, las demás variables evaluadas (CE, pH y AT) mostraron tendencias similares al NaCl.

La aplicación de NPs Ca no indujo ninguna respuesta sobre los pigmentos fotosintéticos de las hojas con y sin estrés salino, con respecto a la capacidad antioxidante la adición de NPs Ca indujeron la síntesis de fenoles en plantas sin salinidad.

Para los compuestos no enzimáticos en frutos de tomate la aplicación de CaNPs puede incrementó el contenido fenoles y β -caroteno en los frutos de plantas con estrés salino.

REFERENCIAS

- Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., & Hernandez, J. A. (2017). Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 1–38. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- Adrees, M., Saeed, Z., Hafeez, M., Rizwan, M., Hussain, K., Asrar, M., Nasser, M., Wijaya, L., & Ali, S. (2021). Ecotoxicology and Environmental Safety Foliar exposure of zinc oxide nanoparticles improved the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and decreased cadmium concentration in grains under simultaneous Cd and water deficient stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208(July 2020), 111627. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111627>
- Afzal, S., Aftab, T., & Singh, N. K. (2021). Impact of Zinc Oxide and Iron Oxide Nanoparticles on Uptake, Translocation, and Physiological Effects in *Oryza sativa* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10388-1>
- Ageeb Akladios, S., & Ibrahim Mohamed, H. (2018). Ameliorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 236(December 2017), 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.047>
- Ahmad, P., Allah-Abd, F. E., Alyemeni Nasser, M., Wijaya, L., Alam, P., Bhardwaj, R., & M. Siddique, K. H. (2018). Exogenous application of calcium to 24-epibrassinosteroid pre- treated tomato seedlings mitigates NaCl toxicity by modifying ascorbate – glutathione cycle and secondary metabolites. *Scientific Reports*, August, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31917-1>
- Ahmad, R., Hussain, S., Anjum, M. A., Khalid, M. F., Saqib, M., Zakir, I., Ahmad, H., Fahad, S., & Ahmad, S. (2019). Oxidative Stress and Antioxidant Defense Mechanisms in Plants Under Salt Stress. *Plant Abiotic Stress Tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches*, 1–490. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0>
- AL-Aloosy, Y. A. M., AL-Tameemi, A. J. H., & Jumaa, S. S. (2019). The role of enzymatic and non-enzymatic antioxidants in facing the environmental stresses on plant: A review. *Plant Archives*, 19(June), 1057–1060. <https://www.researchgate.net/publication/333557871%0ATHE>
- Al-Amri, N., Tombuloglu, H., Slimani, Y., Akhtar, S., Barghouthi, M., Almessiere, M., Alshammari, T., Baykal, A., Sabit, H., Ercan, I., & Ozcelik, S. (2020). Size effect of iron (III) oxide nanomaterials on the growth, and their uptake and

translocation in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194(February), 110377. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110377>

Alajrami, M. A., & Abu-naser, S. S. (2020). Type of Tomato Classification Using Deep Learning. *International Journal of Academic Pedagogical Research (IJAPR)*, 3(12), 21–25.

Ali, Safdar, Shafique, O., Mahmood, T., Hanif, M. A., Ahmed, I., & Khan, B. A. (2018). A Review about Perspectives of Nanotechnology in Agriculture. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 31(2). <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2018/31.2.116.121>

Ali, Shahid, Mehmood, A., & Khan, N. (2021). *Uptake , Translocation , and Consequences of Nanomaterials on Plant Growth and Stress Adaptation: Review Article. 2021.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/6677616>

Ali, Y., Ibn Sina, A. A., Saif Khandker, S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, I., & Hua Gan, S. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: A review. *Foods*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/foods10010045>

AOAC, (Association of Official Analytical Chemists). (1990). Official methods of analysis; Methods 932.06, 925.09, 985.29, 923.03. *Arlington, VA, USA.*

Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A., & Hayat, S. (2020). Plant Physiology and Biochemistry Salinity induced physiological and biochemical changes in plants : An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156(July), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.042>

Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P. (1994). Standardization of a propolis extract and identification of the main constituents. *Journal de Pharmacie de Belgique*, 49, 462–468.

Aslani, F., Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Shukor Juraimi, A., Golestan Hashemi, F. S., & Baghdadi, A. (2014). Effects of Engineered Nanomaterials on Plants Growth: An Overview. *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>

Avellan, A., Yun, J., Morais, B. P., Clement, E. T., Rodrigues, S. M., & Lowry, G. V. (2021). Critical Review: Role of Inorganic Nanoparticle Properties on Their Foliar Uptake and in Planta Translocation. *Environmental Science and Technology*, 55(20), 13417–13431. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00178>

Baazaoui, N., Sghaier-Hammami, B., Hammami, S. B. M., Khefacha, R., Chaari, S., Elleuch, L., Ben Messoud, M., & Abdelly, C. (2021). A handbook guide to better use of nanoparticles in plants. *Communications in Soil Science and*

Plant Analysis, 52(4), 287–321.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1836198>

- Bai, Y., Kissoudis, C., Yan, Z., Visser, R. G. F., & van der Linden, G. . (2018). Plant behaviour under combined stress: tomato responses to combined salinity and pathogen stress. *International Journal of Laboratory Hematology*, 38(1), 42–49. <https://doi.org/10.1111/ijlh.12426>
- Benazzouk, S., Dobrev, P. I., Djazouli, Z. E., Motyka, V., & Lutts, S. (2020). Positive impact of vermicompost leachate on salt stress resistance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) at the seedling stage: a phytohormonal approach. *Plant and Soil*, 446(1–2), 145–162. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04361-x>
- Birlanga, V., Acosta-Motos, J. R., & Pérez-Pérez, J. M. (2022). *Mitigation of Calcium-Related Disorders in Soilless*. 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy12030644>
- Cadenas-Pliego, G., Martinez-Aguilera, L. M. R., Angélica Mara, B., Rosales-Hoz, M. D. J., Contreras, R., Claude, D. J., Halut, S., & Flores-parra, A. (1993). NEW PERHYDRODITHIAZINES, NMR AND X-RAY DIFFRACTION STUDIES. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 81(1–4), 111–123. <https://doi.org/10.1080/10426509308034380>
- Cirillo, C., De Micco, V., Arena, C., Carillo, P., Pannico, A., De Pascale, S., & Roupheal, Y. (2019). Biochemical, physiological and anatomical mechanisms of adaptation of *Callistemon citrinus* and *Viburnum lucidum* to NaCl and CaCl₂ salinization. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00742>
- de la Rosa, G., Vázquez-Núñez, E., Molina-Guerrero, C., Serafín-Muñoz, A. H., & Vera-Reyes, I. (2021). Interactions of nanomaterials and plants at the cellular level: current knowledge and relevant gaps. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00100-1>
- de Souza Alonso, T. A., Ferreira Barreto, R., De Mello Prado, R., Pereira de Souza, J. J., & Falleiros Carvalho, R. (2020). *Silicon spraying alleviates calcium deficiency in tomato plants , but Ca-EDTA is toxic*. 1–6. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000055>
- de Vos, R. C. H., Hall, R. D., & Moing, A. (2018). Metabolomics of A Model Fruit: Tomato. In *Annual Plant Reviews online* (Vol. 43). <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0465>
- del Río, L. A., Corpas, F. J., López-Huertas, E., & Palma, J. M. (2018). Plant superoxide dismutases: Function under abiotic stress conditions.

Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants, 1–26.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-75088-0_1

- Dumanović, J., Nepovimova, E., Natić, M., Kuča, K., & Jačević, V. (2021). The Significance of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense System in Plants: A Concise Overview. *Frontiers in Plant Science*, 11(January).
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
- Dumont, S., & Rivoal, J. (2019). Consequences of oxidative stress on plant glycolytic and respiratory metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10(February), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00166>
- Ealias, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- Egamberdieva, D., Wirth, S., Bellingrath-Kimura, S. D., Mishra, J., & Arora, N. K. (2019). Salt-Tolerant Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Enhancing Crop Productivity of Saline Soils. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2791.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02791>
- Farhangi-Abriz, S., & Torabian, S. (2018). *Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00709-017-1202-0>
- Fiol, D. F., Terrile, M. C., Frik, J., Mesas, F. A., Álvarez, V. A., & Casalongué, C. A. (2021). Nanotechnology in plants: recent advances and challenges. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 96(8), 2095–2108.
<https://doi.org/10.1002/jctb.6741>
- Gaiotti, F., Lucchetta, M., Rodegher, G., Lorenzoni, D., Longo, E., Boselli, E., Cesco, S., Belfiore, N., Lovat, L., Delgado-I, M., Carmona, F. J., Guagliardi, A., Masciocchi, N., & Pii, Y. (2021). Urea-Doped Calcium Phosphate Nanoparticles as Sustainable Nitrogen Nanofertilizers for Viticulture: Implications on Yield and Quality of Pinot Gris Grapevines. *Agronomy*, 11(6).
[10.3390/agronomy11061026](https://doi.org/10.3390/agronomy11061026)
- Gandhi, N., Shruthi, Y., Sirisha, G., & Anusha, C. R. (2021). Facile and Eco-Friendly Method for Synthesis of Calcium Oxide (CaO) Nanoparticles and its Potential Application in Agriculture. *Haya: The Saudi Journal of Life Sciences*, 6(5), 89–103. <https://doi.org/10.36348/sjls.2021.v06i05.003>
- García-Caparrós, P., Hasanuzzaman, M., & Lao, M. T. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under high temperature. *Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants: Production, Metabolism, Signaling and Defense Mechanisms*, 1(Ashraf 2009), 337–352.

<https://doi.org/10.1002/9781119468677.ch14>

- Gavicho Uarrota, V., Vieira Stefen, D. L., Santini Leolato, L., Medeiros Gindri, D., & Nerling, D. (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. 207–232. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75088-0>
- Ghasemnezhad, A., Ghorbanpour, M., Sohrabi, O., & Ashnavar, M. (2019). A general overview on application of nanoparticles in agriculture and plant science. In *Comprehensive Analytical Chemistry* (1st ed., Vol. 87). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.10.001>
- Godoy, F., Olivos-Hernández, K., Stange, C., & Handford, M. (2021). Abiotic stress in crop species: Improving tolerance by applying plant metabolites. *Plants*, 10(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/plants10020186>
- Gohari, G., Safai, F., Panahirad, S., Akbari, A., Rasouli, F., Dadpour, M. R., & Fotopoulos, V. (2020). Modified multiwall carbon nanotubes display either phytotoxic or growth promoting and stress protecting activity in *Ocimum basilicum* L. in a concentration-dependent manner. *Chemosphere*, 249, 126171. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126171>
- González-Moscoso, M., Martínez-Villegas, N. V., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Del Carmen Rivera-Cruz, M., González-Morales, S., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of silicon nanoparticles on the antioxidant compounds of tomato fruits stressed by arsenic. *Foods*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120612>
- Guo, J., Zhou, R., Ren, X., Jia, H., Hua, L., Xu, H., Lv, X., Zhao, J., & Wei, T. (2018). Effects of salicylic acid, Epi-brassinolide and calcium on stress alleviation and Cd accumulation in tomato plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157(September 2017), 491–496. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.010>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Al Mahmud, J., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 1–52. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. Al, Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H., & Fujita, M. (2017). Coordinated actions of glyoxalase and antioxidant defense systems in conferring abiotic stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(1). <https://doi.org/10.3390/ijms18010200>

- Hasanuzzaman, M., Raihan, M. R. H., Masud, A. A. C., Rahman, K., Nowroz, F., Rahman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2021). Regulation of reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under salinity. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17). <https://doi.org/10.3390/ijms22179326>
- Hemraj, C. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. In *Methods in Microbiology* (1st ed., Vol. 46). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/bs.mim.2019.01.002>
- Hernández-Fuentes, A. D., López-Vargas, E. R., Pinedo-Espinoza, J. M., Campos-Montiel, R. G., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2017). Postharvest behavior of bioactive compounds in tomato fruits treated with Cu nanoparticles and NaCl stress. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/app7100980>
- Hernández-Hernández, H., Juárez-Maldonado, A., Benavides-Mendoza, A., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Sánchez-Aspeytia, D., & González-Morales, S. (2018). Chitosan-PVA and Copper Nanoparticles Improve Growth and Overexpress the SOD and JA Genes in Tomato Plants under Salt Stress. *Agronomy*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy8090175>
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>
- Hernández-Pérez, O. I., Valdez-Aguilar, L. A., Alia-Tejacal, I., Cartmill, A. D., & Cartmill, D. L.. Tomato Fruit Yield , Quality , and Nutrient Status in Response to Potassium: Calcium Balance and Electrical Conductivity in the Nutrient Solution. *J Soil Sci Plant Nutr* 20, 484–492 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42729-019-00133-9>
- Hong, J., Peralta-Videa, J. R., Rico, C., Sahi, S., Viveros, M. N., Bartonjo, J., Zhao, L., & Gardea-Torresdey, J. L. (2014). Evidence of translocation and physiological impacts of foliar applied CeO₂ nanoparticles on cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Environmental Science and Technology*, 48(8), 4376–4385. <https://doi.org/10.1021/es404931g>
- Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). Foliar application of nanoparticles: Mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, 8(5), 1196–1210. <https://doi.org/10.1039/d0en01129k>
- Huang, H., Ullah, F., Zhou, D. X., Yi, M., & Zhao, Y. (2019). Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses. *Frontiers in Plant Science*, 10(June), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00800>

- Hung, C. Y., & Yen, G. C. (2002). Antioxidant activity of phenolic compounds isolated from *Mesona procumbens* Hemsl. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*(10), 2993–2997. <https://doi.org/10.1021/jf011454y>
- Husen, A. (2020). Interactions of metal and metal-oxide nanomaterials with agricultural crops: an overview. In *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817852-2.00007-x>
- Hussain, S., Khalid, M. F., Hussain, M., Ali, M. A., Nawaz, A., Zakir, I., Fatima, Z., & Ahmad, S. (2018). Role of micronutrients in salt stress tolerance to plants. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, 363–376. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_15
- Hussain, S., Rao Junaid, M., Anjum, M. A., Ejaz, S., Zakir, I., Ali, M. A., Ahmad, N., & Ahmad, S. (2019). Oxidative Stress and Antioxidant Defense in Plants Under Drought Conditions. In: *Plant Abiotic Stress Tolerance*. Springer, Cham. 207–219. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0>
- Ioannou, A., Gohari, G., Papaphilippou, P., Panahirad, S., Akbari, A., Dadpour, M. R., Krasia-Christoforou, T., & Fotopoulos, V. (2020). Advanced nanomaterials in agriculture under a changing climate: The way to the future? *Environmental and Experimental Botany*, *176*, 104048. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104048>
- Islam, S., Zaid, A., & Mohammad, F. (2021). Role of Triacntanol in Counteracting the Ill Effects of Salinity in Plants: A Review. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*(1). <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10064-w>
- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., & de Sousa, L. (2019). Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*, *231*, 111260. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111260>
- Janků, M., Luhová, L., & Petřivalský, M. (2019). On the Origin and Fate of Reactive Oxygen Species in Plant Cell Compartments. *Botany Letters*, *166*(3), 269–273. <https://doi.org/10.1080/23818107.2019.1652851>
- Jogawat, A. (2019). Osmolytes and their Role in Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Molecular Plant Abiotic Stress: Biology and Biotechnology*, 91–104. <https://doi.org/10.1002/9781119463665.ch5>
- Johansen, K., Morton, M. J. L., Malbeteau, Y. M., Aragon, B., Al-Mashharawi, S. K., Ziliani, M. G., Angel, Y., Fiene, G. M., Negrão, S. S. C., Mousa, M. A. A., Tester, M. A., & McCabe, M. F. (2019). Unmanned aerial vehicle-based phenotyping using morphometric and spectral analysis can quantify responses of wild tomato plants to salinity stress. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00370>

- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, Á., Cabrera-De la Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Cadenas-Pliego, G., & Benavides-Mendoza, A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Pérez-Labrada, F., Cadenas-Pliego, G., & Benavides-Mendoza, A. (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *89*, 183–189. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2016.089.023>
- Juárez Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Pérez-Labrada, F., cadenas-pliego, G., & Benavides-Mendoza, A. (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *89*, 183–189. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2016.089.023>
- Kapoor, D., Singh, S., Kumar, V., Romero, R., & Gene, P. (2019). Antioxidant Enzymes Regulation in Plants in Reference to Reactive Oxygen Species (ROS) and Reactive Nitrogen Species (RNS). *Plant Gene*, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2019.100182>
- Kumari, N., Mishra, P., Prasad Moharana, D., Aamir, M., Singh, B., & Prasanna, H. C. (2020). Transcriptional regulation-mediating ROS homeostasis and physio-biochemical changes in wild tomato (*Solanum chilense*) and cultivated tomato (*Solanum lycopersicum*) under high salinity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*(8), 1999–2009. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.032>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(7), 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Kibria, M. G., Hossain, M., Murata, Y., & Hoque, M. A. (2017). Antioxidant Defense Mechanisms of Salinity Tolerance in Rice Genotypes. *Rice Science*, *24*(3), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2017.05.001>
- Klunklin, W., & Savage, G. (2017). Effect on Quality Characteristics of Tomatoes Grown Under Well-Watered and Drought Stress Conditions Warinporn. *Foods* *6*(8). <https://doi.org/10.3390/foods6080056>
- Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A. K., Srivastava, S., & Verma, J. P. (2020). Plant Growth-Promoting Bacteria: Biological Tools for the Mitigation of Salinity Stress in Plants. *Frontiers in Microbiology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01216>

- Kumar, S. P., Srinivasulu, A., & Raja Babu, K. (2018). Symptomology of major fungal diseases on tomato and its management. ~ 1817 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 1817–1821.
- Kumari, H. P., Kumar, A. S., Rajasheker, G., Madhavi, D., Jalaja, N., Shridhar, K. K., Scinthia, P. K., Sri, S. M., Akhila, C., Sujatha, E., Rathnagiri, P., & Kishor Kavi, P. B. (2021). Transgenic Tomatoes for Abiotic Stress Tolerance and Fruit Traits: A Review of Progress and Preview of Potential. In *Genetically Modified Crops* (Vol. 2). https://doi.org/10.1007/978-981-15-5932-7_6
- Lamz, P. A. L., & González, C. M. C. (2013). Salinity as a problem in agriculture: plant breeding an immediate solution A-review. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31–42.
- Li, Y., Wang, H., Zhang, Y., & Martin, C. (2018). Can the world's favorite fruit, tomato, provide an effective biosynthetic chassis for high-value metabolites? *Plant Cell Reports*, 37(10), 1443–1450. <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2283-8>
- Lichtfouse, E. (2020). *Sustainable Agriculture Reviews* 44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38881-2_6
- Liu, S., & Yang, R. (2020). Regulations of reactive oxygen species in plants abiotic stress: an integrated overview. In *Plant Life Under Changing Environment*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818204-8.00017-5>
- Lopez-Alvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Morán-Ramírez, J., & Arango-Galvan, C. (2021). Edaphological and water quality conditions that limit agricultural development in semi-arid zones of Northeastern Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08805-1>
- López-Moreno, M. L., Avilés, L. L., Pérez, N. G., Irizarry, B. Á., Perales, O., Cedeno-Mattei, Y., & Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of the Total Environment*, 550, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.063>
- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. de A., de la Fuente, M. C., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Lv, J., Christie, P., & Zhang, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological

- challenges. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 41–59. <https://doi.org/10.1039/C8EN00645H>
- Ma, Y., He, X., Zhang, P., Zhang, Z., Ding, Y., Zhang, J., Wang, G., Xie, C., Luo, W., Zhang, J., Zheng, L., Chai, Z., & Yang, K. (2017). Xylem and Phloem Based Transport of CeO₂ Nanoparticles in Hydroponic Cucumber Plants. *Environmental Science and Technology*, 51(9), 5215–5221. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05998>
- Mahil, E., & Kumar, B. (2019). Foliar application of nanofertilizers in agricultural crops-Areview. *J. Farm Sci*, 32 (3), 238–249. <https://www.researchgate.net/publication/336669474>
- Manjunatha, R. L., Naik, D., & Usharani, K. (2019). Nanotechnology application in agriculture : A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 8(3), 1073–1083.
- Martí, R., Leiva-Brondo, M., Lahoz, I., Campillo, C., Cebolla-Cornejo, J., & Roselló, S. (2018). Polyphenol and L-ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments. *Food Chemistry*, 239, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.102>
- Martinez-Aguilera, L. M. R. ., Cadenas-Pliego, G., Contreras, R., & Flores-Parra, A. (1995). N-BH₃ adducts of trialkyl-1,3,5-triazacyclohexanes with stable stereogenic nitrogen atoms, stereochemical study. *Tetrahedron: Asymmetry*, 6(7), 1585–1592. [https://doi.org/10.1016/0957-4166\(95\)00202-Z](https://doi.org/10.1016/0957-4166(95)00202-Z)
- Maurya, A. . (2020). Oxidative Stress in Crop Plants, in: Hasanuzzaman, M. (Ed.), *Agronomic Crops*. In *Agronomic Crops* (Vol. 3). Springer Singapore, Singapore, pp. 349–380. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0025-1>
- Medina-Velo, I. A., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-torresdey, J. L. (2017). *Assessing plant uptake and transport mechanisms of engineered nanomaterials from soil*. *MRS Bulletin*, 42(5), 379-384. <https://doi.org/10.1557/mrs.2017.87>
- Meier, S., Moore, F., Morales, A., González, M. E., Seguel, A., Meriño-Gergichevich, C., Rubilar, O., Cumming, J., Aponte, H., Alarcón, D., & Mejías, J. (2020). Synthesis of calcium borate nanoparticles and its use as a potential foliar fertilizer in lettuce (*Lactuca sativa*) and zucchini (*Cucurbita pepo*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 151(March), 673–680. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.025>
- Mittler, R. (2017). ROS Are Good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>

- Mohanavelu, A., Naganna, S. R., & Al-Ansari, N. (2021). Irrigation induced salinity and sodicity hazards on soil and groundwater: An overview of its causes, impacts and mitigation strategies. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture11100983>
- Moradbeygi, H., Jamei, R., Heidari, R., & Darvishzadeh, R. (2020). Investigating the enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense by applying iron oxide nanoparticles in *Dracocephalum moldavica* L. plant under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, *272*, 109537. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109537>
- Morales-Espinoza, M. C., Cadenas-Pliego, G., Pérez-Alvarez, M., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Benavides-Mendoza, A., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under nacl stress. *Molecules*, *24*(17). <https://doi.org/10.3390/molecules24173030>
- Munns, R., & Gilliam, M. (2015). Salinity tolerance of crops - what is the cost? *New Phytologist*, *208*, 668–673. <https://doi.org/10.1111/npn.12519>
- Munns, R., Passioura, J. B., Colmer, T. D., & Byrt, C. S. (2020). Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil. *New Phytologist*, *225*, 1091–1096. <https://doi.org/10.1111/nph.15862>
- Mustafa, H., Ilyas, N., Akhtar, N., Iqbal, N., & Zainab, T. (2021). Ecotoxicology and Environmental Safety Biosynthesis and characterization of titanium dioxide nanoparticles and its effects along with calcium phosphate on physicochemical attributes of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *223*, 112519. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112519>
- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit Masayasu N. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology*, *39*(10), p925-928.
- Nasrallah, A. K., Kheder, A. A., Kord, M. A., Fouad, A. S., El-Mogy, M. M., & Atia, M. A. M. (2022). Mitigation of Salinity Stress Effects on Broad Bean Productivity Using Calcium Phosphate Nanoparticles Application. *Horticulturae*, *8*(1). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010075>
- , K., Nafady, A., Uddin, S., & Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. *Heliyon*, *7*(12), e08539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>
- Nsor-Atindana, J., Zhong, F., Mothibe, K. J., Bangoura, M. L., & Lagnika, C.

- (2012). Quantification of total polyphenolic content and antimicrobial activity of cocoa (*Theobroma cacao* L.) Bean shells. *Pakistan Journal of Nutrition*, 11(7), 574–579. <https://doi.org/10.3923/pjn.2012.672.677>
- Oliveira da Silva, P. S., de Oliveira Alves Sena, E., Silva Gonzaga, M. I., Ganassali de Oliveira Junior, L. F., dos Santos Maciel, L. B., Fiaes dos Santos, M. P., Costa de Mattos, E., Lima Dias, K. L., Botelho Carneiro, R., & Gutierrez Carnelossi, M. A. (2019). Calcium carbonate particle films and water regimes affect the acclimatization, ecophysiology and reproduction of tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 165, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.05.017>
- Oms-Oliu, G., Hertog, M. L. A. T. M., Van de Poel, B., Ampofo-asiama, J., Geeraerd, A. H., & Nicolaï, B. M. (2011). Metabolic characterization of tomato fruit during preharvest development, ripening, and postharvest shelf-life. *Postharvest Biology and Technology*, 62(1), 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.04.010>
- Orabi, S. A., & Hussein-Abou, S. D. (2019). Antioxidant defense mechanisms enhance oxidative stress tolerance in plants. A review. *Current Science International*, 8, 565–576.
- Orozco-Mosqueda, M. del C., Glick, B. R., & Santoyo, G. (2020). ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): An efficient mechanism to counter salt stress in crops. *Microbiological Research*, 235, 126439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126439>
- Pengfei, Z., Masateru, S., Kohei, Y., Kengo, I. T. O., Yan yan, D. A. I., & Fuping, Z. (2017). Effects of Low Salinity Stress on Growth, Yield and Water Use Efficiency of Tomato under Soilless Cultivation. *Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, 85(1), I_15-I_21. https://doi.org/https://doi.org/10.11408/jsidre.85.I_15
- Pérez-de-Luque, A. (2017). Interaction of nanomaterials with plants: What do we need for real applications in agriculture? *Frontiers in Environmental Science*, 5, 1–7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00012>
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of Tomato Plants under Saline Stress to Foliar Application of Copper Nanoparticles. *Plants*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/plants8060151>
- Pinedo-Guerrero, Z. H., Delia Hernández-Fuentes, A., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2017). Cu nanoparticles in hydrogels of chitosan-PVA affects the characteristics of post-harvest and bioactive compounds of jalapeño pepper. *Molecules*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/molecules22060926>

- Pradeep Kumar, S., Pragati, M., & Chittaranjan, K. (2016). Uptake, Translocation, Accumulation, Transformation, and Generational Transmission of Nanoparticles in Plants. In *Plant Nanotechnology: Principles and Practices*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42154-4>
- Qi, J., Song, C. P., Wang, B., Zhou, J., Kangasjärvi, J., Zhu, J. K., & Gong, Z. (2018). Reactive oxygen species signaling and stomatal movement in plant responses to drought stress and pathogen attack. *Journal of Integrative Plant Biology*, *60*(9), 805–826. <https://doi.org/10.1111/jipb.12654>
- Qi, J., Wang, J., Gong, Z., & Zhou, J. M. (2017). Apoplastic ROS signaling in plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*, *38*, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.04.022>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J.-P., & Lutts, S. (2019). Tomato Fruit Development and Metabolism. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- Rahman, M., Hossain, M., Hossain Binte, K. F., Sikder, T., Shammi, M., Rasheduzzaman, M., Hossain, M. A., Alam, A. M., & Uddin Khabir, M. (2018). Effects of NaCl-Salinity on Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Plants in a Pot Experiment. *Open Agriculture*, *3*(1), 578–585. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0061>
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, *7*(12), 1584–1594. <https://doi.org/10.1039/c5mt00168d>
- Ramadoss, B. R., Subramanian, U., Alagarsamy, M., & Gangola, M. P. (2021). Non-Enzymatic Antioxidants' Significant Role in Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. *ResearchGate*, 365–392. <https://doi.org/10.1201/9781003022879-18>
- Ramírez Flores, I., Vásquez-Murrieta, M. S., Franco-Hernández, M. O., Márquez Herrera, C. E., López-Cortéz, M. del S., & Ponce-Mendoza, A. (2020). Bioactive compounds in tomato (*Solanum lycopersicum*) variety saladette and their relationship with soil mineral content. *Food Chemistry*, 128608. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128608>
- Rivas-García, T., Luis Gustavo Gonzalez-Gomez, Boicet-Fabré, T., Jiménez-Arteaga, M. C., Falcón-Rodríguez, A. B., & Terrero-Soler, J. C. (2021). Respuesta agronómica de dos variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación del bioestimulante con quitosano. *Revista Terra*

Latinoamericana, 39, 1–9. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.796>

- Sadik Polash, M. A., Sakil, A., & Hossain, A. (2019). Plants responses and their physiological and biochemical defense mechanisms against salinity: A review. *Tropical Plant Research*, 6(2), 250–274. <https://doi.org/10.22271/tpr.2019.v6.i2.35>
- Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A., Ul Hussan, M., & Ishtiaq Sarwar, M. (2019). A review: Impact of salinity on plant growth. *Nature and Science*, 17(1), 34–40. <https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06>
- Sanower, H. (2019). Present Scenario of Global Salt Affected Soils, its Management and Importance of Salinity Research. *International Research Journal of Biological Sciences Perspective*, 2663–5976.
- Sanzari, I., Leone, A., & Ambrosone, A. (2019). Nanotechnology in Plant Science: To Make a Long Story Short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00120>
- Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018a). Introduction to Soil Salinity, Sodidity and Diagnostics Techniques. In *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_1
- Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018b). Soil Salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*, 43–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Sharma, A., Shahzad, B., Kumar, V., Kohli, S. K., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Handa, N., Kapoor, D., Bhardwaj, R., & Zheng, B. (2019). Phytohormones regulate accumulation of osmolytes under abiotic stress. *Biomolecules*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/biom9070285>
- Sharma, P., Thakur, S., & Negi, R. (2019). Recent Advances in Breeding of Tomato- A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(03), 1275–1283. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.151>
- Shokat, S., & Großkinsky, D. K. (2019). Tackling Salinity in Sustainable Agriculture — What Developing Countries May Learn from Approaches of the Developed World. *Sustainability*, 11(4558;), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su11174558>
- Siddiqui, H., Ahmed Mukhtar, B. K., Sami, F., & Hayat, S. (2020). Silicon Nanoparticles and Plants : Current Knowledge and Future Perspectives. *Sustainable Agriculture Reviews*, 41, 129–142. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-33996-8_7

- Singh, R. P., Handa, R., & Manchanda, G. (2021). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 329, 1234–1248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>
- Srivastava, P., Wu, Q.-S., & Giri, B. (2019). Salinity: An Overview. In *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18975-4_1
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Sturião, W. P., Martinez, H. E. P., Oliveira, L. A., Jezler, C. N., Pereira, L. de J., Ventrella, M. C., & Milagres, C. do C. (2020). Deficiency of calcium affects anatomical, biometry and nutritional status of cherry tomato. *South African Journal of Botany*, 132, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.003>
- Sultana, B., Anwar, F., & Ashraf, M. (2009). Effect of extraction solvent/technique on the antioxidant activity of selected medicinal plant extracts. *Molecules*, 14(6), 2167–2180. <https://doi.org/10.3390/molecules14062167>
- Szymanska, R., Latowski, D., Nowicka, B., & Strzalka, K. (2014). Lipophilic Molecules as a Part of Antioxidant System in Plants. In *Oxidative Damage to Plants: Antioxidant Networks and Signaling*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00010-1>
- Tanveer, K., Gilani, S., Hussain, Z., Ishaq, R., Adeel, M., & Ilyas, N. (2020). Effect of salt stress on tomato plant and the role of calcium. *Journal of Plant Nutrition*, 43(1), 28–35. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659324>
- Thabet, S. G., Alomari, D. Z., & Alqudah, A. M. (2021). Exploring natural diversity reveals alleles to enhance antioxidant system in barley under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166(April), 789–798. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.030>
- Tommonaro, G., Abbamondi, G. R., Nicolaus, B., Poli, A., D'Angelo, C., Iodice, C., & De Prisco, R. (2021). Productivity and nutritional trait improvements of different tomatoes cultivated with effective microorganisms technology. *Agriculture*, 11(2), 1–10. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020112>
- Treviño López, E. A., Sandoval-Rangel, A., Benavides Mendoza, A., Ortega Ortiz, H., Cadenas Pliego, G., & Cabrera de la Fuente, M. (2021). Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 159–169. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2946>

- Tuzet, A., Rahantaniaina, M., & Noctor, G. (2018). Analyzing the function of catalase and the ascorbate-glutathione pathway in H₂O₂ processing: Insights from an experimentally constrained kinetic model. *Antioxidant & Redox Singnaling*, 1, 1–93. <https://doi.org/10.1089/ars.2018.7601>
- Vaishnav, A., Singh, J., Singh, P., Rajput, R. S., Singh, H. B., & Sarma, B. K. (2020). *Sphingobacterium* sp. BHU-AV3 Induces Salt Tolerance in Tomato by Enhancing Antioxidant Activities and Energy Metabolism. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00443>
- Vargas-Hernandez, M., Macias-Bobadilla, I., Guevara-Gonzalez, R. G., Rico-Garcia, E., Ocampo-Velazquez, R. V., Avila-Juarez, L., & Torres-Pacheco, I. (2020). Nanoparticles as potential antivirals in agriculture. *Agriculture*, 10(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100444>
- Vedamurthy, A. B., Bhattacharya, S., Das, A., & Shruthi, S. D. (2021). 20 - Exploring nanomaterials with rhizobacteria in current agricultural scenario. In *Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture* (pp. 487–503). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820092-6.00020-3>
- Vijai Anand, K., Reshma, M., Kannan, M., Muthamil Selvan, S., Chaturvedi, S., Shalan, A. E., & Govindaraju, K. (2021). Preparation and characterization of calcium oxide nanoparticles from marine molluscan shell waste as nutrient source for plant growth. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 11(3), 409–422. <https://doi.org/10.1007/s40097-020-00376-4>
- Waheed, K., Nawaz, H., Hanif, M. A., & Rehman, R. (2019). Tomato. In *Medicinal Plants of South Asia: Novel Sources for Drug Discovery* (Vol. 46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102659-5.00046-X>
- Wu, H., Hu, P., Xu, Y., Xiao, C., Chen, Z., Liu, X., Jia, J., & Xu, H. (2021). Phloem Delivery of Fludioxonil by Plant Amino Acid Transporter-Mediated Polysuccinimide Nanocarriers for Controlling Fusarium Wilt in Banana. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(9), 2668–2678. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07028>
- Wu, X., Qin, R., Wu, H., Yao, G., Zhang, Y., Li, P., Xu, Y., Zhang, Z., Yin, Z., & Xu, H. (2020). Nanoparticle-immersed paper imprinting mass spectrometry imaging reveals uptake and translocation mechanism of pesticides in plants. *Nano Research*, 13(3), 611–620. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-2700-5>
- Yan, A., & Chen, Z. (2019). Impacts of silver nanoparticles on plants: A focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5), 23–25. <https://doi.org/10.3390/ijms20051003>
- Yang Xiao, L., Yang Yang, L., Colgando, C., Huang, J., Zhang, Y., Qi, M., Liu, Y.,

- & Li, T. (2020). Photosynthetic Response Mechanism of Soil. *Plants*, 9(363), 1–15.
- Yang, Y., & Guo, Y. (2018). Unraveling salt stress signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 60(9), 796–804. <https://doi.org/10.1111/jipb.12689>
- Yu, Z., & Dahlgren, R. A. (2000). Evaluation of methods for measuring polyphenols in conifer foliage. *Journal of Chemical Ecology*, 26(9), 2119–2140.
- Zeeshan, M., Lu, M., Sehar, S., Holford, P., & Wu, F. (2020). Comparison of biochemical, anatomical, morphological, and physiological responses to salinity stress in wheat and barley genotypes differing in salinity tolerance. *Agronomy*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010127>
- Zhang, Y., Fu, L., Li, S., Yan, J., Sun, M., Giraldo, J. P., Matyjaszewski, K., Tilton, R. D., & Lowry, G. V. (2021). Star Polymer Size, Charge Content, and Hydrophobicity Affect their Leaf Uptake and Translocation in Plants. *Environmental Science & Technology*, 55(15), 10758–10768. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01065>
- Zhao, S., Liu, J.-J., Banerjee, S., Zhou, N., Zhao, Z.-Y., Zhang, K., & Tian, C.-Y. (2018). Soil pH is equally important as salinity in shaping bacterial communities in saline soils under halophytic vegetation. *Scientific Reports*, 8(1), 4550. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22788-7>
- Zhou, Y., Tang, N., Huang, L., Zhao, Y., Tang, X., & Wang, K. (2018). Effects of Salt Stress on Plant Growth, Antioxidant Capacity, Glandular Trichome Density, and Volatile Exudates of *Schizonepeta tenuifolia* Briq. *International Journal of Molecular Sciences*. <https://doi.org/10.3390/ijms19010252>
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. *Cell*, 167(2), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>