



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA EN AGRONOMÍA PARA LA PRODUCCIÓN SUSTENTABLE

TESIS

Efecto de nanopartículas de hierro funcionalizadas con *Allium sativum* en el crecimiento y compuestos fenólicos de tomates criollos

Para obtener el título de
Ingeniero agrónomo

Presenta

Juan Uriel Cruz Maldonado

Director

Dr. en C. Zeus Huitzilopochtli Pinedo Guerrero

Codirector

Dr. en C. José Manuel Pinedo Espinoza

Comité tutorial

Dra. en C. Alma Delia Hernández Fuentes

Dr. en C. Benito Flores Chávez

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo., México., 6 de Julio de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales

Academic Area of Agricultural and Forestry Sciences

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., a 06 de julio de 2026

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía para la Producción Sustentable, **Juan Uriel Cruz Maldonado**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"Efecto de nanopartículas de hierro funcionalizadas con *Allium sativum* en el crecimiento y compuestos fenólicos de tomates criollos"**, que después de revisarlo en reunión de comité de tesis, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del comité de tesis:

DIRECTOR	DR. ZEUS HUITZILOPOCHTLI PINEDO GUERRERO
CODIRECTOR	DR. JOSÉ MANUEL PINEDO ESPINOZA
ASESOR	DRA. ALMA DELIA HERNANDEZ FUENTES
ASESOR	DR. BENITO FLORES CHAVEZ
SUPLENTE	DRA. JOSEFA ESPITIA LOPEZ

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

DR. SERGIO RUBEN PEREZ RIOS
Coordinador nombre del P.E.

Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775.
Teléfono: 7717172001 Ext. 42173
profe_5566@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

PRIMERAMENTE, DOY GRACIAS Y TODO EL RECONOCIMIENTO A DIOS POR PERMITIRME PODER CULMINAR ÉSTA MUY BONITA ETAPA, FUE SU GRACIA Y SU AMOR ACOMPAÑÁNDOME EN CADA MOMENTO.

DOY GRACIAS A MIS PADRES POR TODO SU APOYO Y SU ENORME CARÍÑO QUE ME ACOMPAÑÓ EN CADA MOMENTO DE ESTA ETAPA, PORQUE SIN CONDICIÓN HAN CREÍDO Y HAN ESTADO PARA MI A PESAR DE LAS DIFERENTES SITUACIONES EN LAS QUE NOS ENCONTRÁBAMOS.

A MI DEMÁS FAMILIA; MIS ABUELOS, MIS HERMANAS, MIS TÍOS TAMBIÉN MUCHAS GRACIAS POR SU INCANSABLE APOYO A LO LARGO DE MI VIDA, ESE RESPALDO EN CADA DECISIÓN Y SU ENORME CARÍÑO.

A MI ALMA MATER LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO (UAEH) Y A MI QUERIDO INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS (ICAP) POR BRINDARME LAS HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA PODER FORMARME ACADÉMICAMENTE Y POR INSTRUIRME A TRAVÉS DE LOS DOCENTES A PODER GENERARME UN CONOCIMIENTO; POR ESE GRAN ORGULLO DE PERTENECER A ESTA MÁXIMA CASA DE ESTUDIOS DE MI QUERIDO ESTADO DE HIDALGO.

A MI PADRINO Y DIRECTOR DE TESIS DR. ZEUS HUITZILOPOCHTLI PINEDO GUERRERO, POR SU AMISTAD Y TODO ESE APRENDIZAJE ADQUIRIDO A TRAVÉS DE SU PERSONA, ADEMÁS DE SU APOYO EN TODO MOMENTO Y ESE GRAN CARÍÑO. A MI CODIRECTOR DR. JOSÉ MANUEL PINEDO GUERRERO, A MIS ASESORES DRA. ALMA DELIA HERNÁNDEZ FUENTES; DR. BENITO FLORES CHÁVEZ Y DEMÁS COMITÉ TUTORIAL POR SU VALIOSO TIEMPO Y APOYO EN ESTA INVESTIGACIÓN A TRAVÉS DE SU PACIENCIA Y SU GUÍA.

DEDICATORIAS

CON MUCHO AMOR Y GRATITUD A DIOS, A MIS PADRES Y A MI FAMILIA QUIENES SON EL PILAR DE MI VIDA Y MI SOSTÉN EMOCIONAL.

A MIS AMIGOS QUE FUERON PARTE DE TODO ESTE PROCESO. A USTEDES ES ESTE LO LOGRO, ¡SI SE PUDO!

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	OBJETIVOS	4
2.1	Objetivo General	4
2.2	Objetivos Específicos	4
3.	HIPÓTESIS	4
4.	JUSTIFICACIÓN.....	5
5.	MARCO TEÓRICO	5
5.1	Origen y clasificación botánica del jitomate criollo	5
5.2	Importancia económica y producción	7
5.3	Características morfológicas y agronómicas del jitomate criollo	9
5.4	Factores que influyen en el rendimiento y calidad	10
5.4.1	Fertilización y nutrición mineral.....	11
5.4.2	Riego y disponibilidad de agua	11
5.4.3	Control de plagas y enfermedades.....	11
5.4.4	Condiciones ambientales.....	12
5.4.5	Comparación con híbridos comerciales	12
5.5	Importancia de la conservación de variedades criollas	13
5.5.1	Riesgos de erosión genética.....	13
5.5.2	Estrategias de conservación in situ	14
5.5.3	Estrategias de conservación ex situ	14
5.5.4	Huertos comunitarios y programas participativos.....	14
5.5.5	Relevancia cultural y gastronómica	15
5.5.6	Papel en la seguridad alimentaria.....	15
5.6.1	Mercados diferenciados	15
5.6.2	Integración con nanotecnología.....	16
5.6.3	Resiliencia frente al cambio climático	16
5.6.4	Innovación en sistemas agroecológicos	16

5.6.5 Valorización cultural y gastronómica	17
5.7 Nanotecnología en la agricultura.....	17
5.7.1 Concepto y fundamentos	18
5.7.2 Aplicaciones en nutrición vegetal	18
5.7.3 Control de plagas y enfermedades.....	18
5.7.4 Mejora de la calidad nutraceutica	18
5.7.5 Sustentabilidad y reducción de insumos	19
5.7.6 Aplicaciones en otros cultivos	19
5.8 Nanopartículas de hierro y su funcionalización	19
5.8.1 Propiedades de las nanopartículas de hierro	19
5.8.2 Funcionalización con extractos naturales.....	20
5.8.3 Efectos fisiológicos en jitomate criollo	20
5.8.4 Comparación con aplicaciones convencionales	21
5.9 Compuestos fenólicos	22
5.10 Pigmentos fotosintéticos	23
5.11 Implicaciones en la calidad nutraceutica.....	23
6. MATERIALES Y MÉTODOS	26
6.1 Establecimiento del experimento	26
6.2 Tratamientos.....	26
6.3 Funcionalización de nanopartículas	27
6.4 Muestreo	27
6.5 Variables de crecimiento.....	27
6.6 Determinación de pigmentos fotosinteticos.....	28
6.7 Determinación de fenoles totales y flavonoides	29
6.8 Análisis estadístico	29
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
8. CONCLUSIONES	36
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

RESUMEN/ABSTRACT

El tomate criollo constituye un recurso genético de gran valor en México, variedades como ojo de venado y riñón, son variedades muy consumidas en el estado de Hidalgo, con importancia económica para familias mexicanas, esas variedades destacan por su rusticidad, sabor y concentración de compuestos bioactivos. Sin embargo, presentan limitaciones en rendimiento frente a híbridos comerciales, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas que fortalezcan su productividad y calidad. La nanotecnología aplicada a la agricultura ofrece nuevas posibilidades, particularmente mediante el uso de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum*, las cuales pueden mejorar la absorción de nutrientes, estimular la fotosíntesis y favorecer la acumulación de metabolitos secundarios.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de ajo en el crecimiento, parámetros fisiológicos y acumulación de compuestos fenólicos en tomates criollos. Se estableció un experimento donde se evaluaron las siguientes variables de crecimiento vegetativo, biomasa aérea y radicular, pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y carotenoides), así como fenoles totales y flavonoides en frutos.

Los resultados mostraron que la aplicación de nanopartículas funcionalizadas incrementó significativamente la altura de planta, el diámetro de tallo y el número de hojas, además de mejorar la biomasa aérea y radical. Asimismo, se observó un aumento en la concentración de pigmentos fotosintéticos y en el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, reforzando el potencial nutracéutico de los frutos. Sin embargo, los efectos fueron varietalmente diferenciados, ya que el ojo de venado mostró mayor acumulación de pigmentos y flavonoides, mientras que el riñón presentó incrementos más marcados en biomasa y fenoles totales. Estos hallazgos confirman que la nanotecnología, aplicada de manera sustentable, puede ser una herramienta eficaz para fortalecer la productividad y calidad de variedades criollas, contribuyendo a su conservación y valorización en sistemas agrícolas tradicionales.

The criollo tomato represents a valuable genetic resource in Mexico. Varieties such as ojo de venado and riñón are widely consumed in the state of Hidalgo and hold economic importance for Mexican families. These varieties stand out for their rusticity, flavor, and high concentration of bioactive compounds. However, they show yield limitations compared to commercial hybrids, which has encouraged the search for alternatives to improve their productivity and quality. Agricultural nanotechnology offers new possibilities, particularly through the use of iron nanoparticles functionalized with *Allium sativum* extract, which can enhance nutrient absorption, stimulate photosynthesis, and promote the accumulation of secondary metabolites.

The objective of this study was to evaluate the effect of iron nanoparticles functionalized with garlic extract on growth, physiological parameters, and phenolic compound accumulation in criollo tomatoes. An experiment was established to assess vegetative growth variables, aerial and root biomass, photosynthetic pigments (chlorophyll a, b, and carotenoids), as well as total phenols and flavonoids in fruits.

Results showed that the application of functionalized nanoparticles significantly increased plant height, stem diameter, and leaf number, in addition to improving aerial and root biomass. Likewise, an increase in the concentration of photosynthetic pigments and in the content of phenolic compounds and flavonoids was observed, reinforcing the nutraceutical potential of the fruits. However, the effects were varietal-specific, since ojo de venado showed greater accumulation of pigments and flavonoids, while riñón exhibited more pronounced increases in biomass and total phenols. These findings confirm that nanotechnology, applied sustainably, can be an effective tool to strengthen the productivity and quality of criollo tomato varieties, contributing to their conservation and valorization in traditional agricultural systems.

1. INTRODUCCIÓN

El jitomate es una hortaliza de amplia importancia agrícola, alimentaria y económica en México. Su consumo cotidiano y su presencia en la gastronomía tradicional lo convierten en un cultivo con valor cultural, mientras que su producción y comercialización representan una fuente relevante de ingresos para productores y cadenas hortícolas. En este contexto, el estudio de variedades criollas permite valorar recursos genéticos locales con potencial para sistemas agrícolas más sustentables.

Dentro de la diversidad genética del tomate, las variedades criollas como el ojo de venado y el riñón poseen un valor especial. Estas variedades han sido conservadas por generaciones de agricultores mediante prácticas tradicionales de selección y cultivo, lo que les ha permitido adaptarse a condiciones locales y mantener características organolépticas únicas. Sin embargo, presentan limitaciones en rendimiento y calidad frente a híbridos comerciales, lo que ha reducido su presencia en sistemas productivos intensivos. A pesar de ello, su rusticidad, resistencia a condiciones adversas y mayor concentración de compuestos bioactivos las convierten en un recurso estratégico para la agricultura sustentable y la seguridad alimentaria.

En los últimos años, la nanotecnología aplicada a la agricultura ha emergido como una alternativa innovadora para mejorar la productividad y calidad de los cultivos. El uso de nanopartículas metálicas, particularmente de hierro, ha mostrado efectos positivos en la fotosíntesis, el crecimiento vegetativo y la acumulación de metabolitos secundarios. La funcionalización de estas nanopartículas con extractos naturales, como el ajo incrementa su estabilidad y bioactividad, favoreciendo la interacción con tejidos vegetales y estimulando la síntesis de compuestos fenólicos y flavonoides.

La relevancia de este enfoque radica en su posible contribución a prácticas agrícolas más sustentables, al mejorar la eficiencia del suministro de micronutrientes y reducir parcialmente la dependencia de insumos convencionales. Al mismo tiempo, la aplicación de nanopartículas funcionalizadas podría influir en la

calidad nutracéutica de los frutos mediante cambios en pigmentos fotosintéticos y metabolitos secundarios. Por ello, resulta pertinente estudiar su efecto en variedades criollas de tomate bajo condiciones controladas.

La presente investigación se orienta a evaluar el efecto de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum* L. sobre el crecimiento, parámetros fisiológicos y acumulación de compuestos fenólicos en tomates criollos. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos:

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum* sobre el crecimiento vegetativo, la biomasa aérea y radicular, los pigmentos fotosintéticos y la acumulación de fenoles totales y flavonoides en variedades criollas de tomate.

2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el efecto de las nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum* en el crecimiento vegetativo de plantas de tomate criollo, considerando altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y número de racimos.
2. Evaluar el efecto de las nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum* sobre la biomasa aérea y radicular de plantas de tomate criollo.
3. Cuantificar el contenido de pigmentos fotosintéticos, clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides, en plantas de tomate criollo tratadas con nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum*.
4. Analizar el contenido de fenoles totales y flavonoides en frutos de tomate criollo tratados con nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum*.

3. HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum* incrementa significativamente las variables de crecimiento vegetativo altura

de planta, diámetro de tallo, número de hojas y número de racimos, la biomasa aérea y radicular, la concentración de pigmentos fotosintéticos clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides, así como la acumulación de fenoles totales y flavonoides en variedades criollas de tomate, en comparación con plantas no tratadas.

4. JUSTIFICACIÓN

El tomate criollo constituye un recurso genético de gran valor en México, no solo por su importancia cultural y alimentaria, sino también por las características particulares de variedades como ojo de venado y riñón. Sin embargo, estas variedades suelen presentar menor rendimiento y menor uniformidad comercial frente a híbridos comerciales, lo que hace necesario evaluar alternativas que fortalezcan su crecimiento y calidad sin comprometer su conservación. En este contexto, el uso de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extracto de *Allium sativum* representa una opción de interés, ya que podría influir en el crecimiento vegetativo, la biomasa aérea y radicular, los pigmentos fotosintéticos y la acumulación de fenoles totales y flavonoides. Además, esta estrategia podría contribuir a mejorar la eficiencia del suministro de micronutrientes y reducir parcialmente la dependencia de insumos convencionales. De esta manera, la investigación aporta conocimiento sobre la interacción entre nanotecnología y metabolismo vegetal, al tiempo que ofrece información útil para el manejo de variedades criollas tradicionales como ojo de venado y riñón.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Origen y clasificación botánica del jitomate criollo

El tomate es una de las hortalizas más estudiadas y cultivadas en el mundo, con una historia que se remonta a las civilizaciones precolombinas. Su origen se sitúa en la región andina de Sudamérica, principalmente en Perú y Ecuador, donde se domesticaron poblaciones silvestres de *Solanum pimpinellifolium* y *Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme* (Peralta & Spooner, 2007). Posteriormente, el tomate fue introducido en México, donde adquirió gran relevancia cultural y gastronómica,

convirtiéndose en un componente esencial de la dieta mesoamericana (Peralta & Spooner, 2007).

La domesticación del tomate en México se consolidó gracias a la selección campesina, que permitió la adaptación de diferentes ecotipos a condiciones locales. Estas variedades criollas, como el ojo de venado y el riñón, representan un patrimonio genético invaluable, pues han sido conservadas por generaciones de agricultores mediante prácticas tradicionales de cultivo y selección de semillas (García-González et al., 2022).

Desde el punto de vista taxonómico, el tomate pertenece al género *Solanum*, dentro de la familia *Solanaceae*, la cual incluye especies de gran importancia agrícola como la papa (*Solanum tuberosum*), el chile (*Capsicum* spp.) y la berenjena (*Solanum melongena*). El género *Solanum* es uno de los más diversos de las angiospermas, con más de 1,500 especies descritas, muchas de ellas con potencial agrícola y medicinal (Knapp, 2002).

La clasificación botánica del tomate ha sido objeto de debate debido a la gran variabilidad morfológica y genética que presenta. Actualmente, se reconoce a *Solanum lycopersicum* como la especie cultivada, con múltiples variedades y ecotipos que van desde frutos pequeños y silvestres hasta variedades comerciales de gran tamaño. Los tomates criollos mexicanos se ubican dentro de esta diversidad, destacando por su rusticidad, tolerancia a condiciones adversas y características organolépticas únicas (Martínez-Ruiz et al., 2023).

El proceso de domesticación y diversificación del tomate ha sido influenciado por factores culturales y ambientales. En México, los agricultores han seleccionado variedades que se adaptan a suelos pobres, climas variables y sistemas de producción de baja tecnología. Esto ha permitido la conservación de genotipos con alto valor adaptativo, aunque con rendimientos menores frente a híbridos comerciales. Sin embargo, estas variedades poseen ventajas como resistencia a plagas, tolerancia a sequía y mayor concentración de metabolitos secundarios, lo que las convierte en un recurso estratégico para la agricultura sustentable (FAO, 2020).

El tomate criollo, además de su importancia agronómica, tiene un valor simbólico y cultural. En comunidades rurales, variedades como el ojo de venado y el riñón forman parte de la identidad gastronómica local y se utilizan en platillos tradicionales que refuerzan la conexión entre agricultura y cultura. Este vínculo cultural ha sido clave para su conservación, ya que los agricultores continúan sembrando estas variedades no solo por su utilidad productiva, sino también por su significado histórico y social (García-González et al., 2022).

5.2 Importancia económica y producción

El tomate es una de las hortalizas más relevantes a nivel mundial, tanto por su volumen de producción como por su valor económico. En el contexto global, se estima que más de 180 millones de toneladas se producen anualmente, siendo China, India, Estados Unidos y Turquía los principales productores (FAO, 2023). México ocupa un lugar destacado en este panorama, no solo por su producción interna, sino también por su papel como exportador hacia mercados internacionales, principalmente Estados Unidos y Canadá (USDA., 2024).

En México, el tomate representa uno de los pilares de la horticultura nacional. De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2024), la producción nacional superó los 3 millones de toneladas, con una superficie cultivada cercana a las 50 mil hectáreas. Los estados de Sinaloa, Michoacán, Baja California y San Luis Potosí concentran la mayor parte de la producción, gracias a sus condiciones climáticas favorables y al uso de tecnologías de agricultura protegida. El valor económico de esta producción se estima en más de 2,000 millones de dólares anuales, lo que convierte al tomate en una de las hortalizas más rentables del país (SIAP, 2024).

No obstante, las variedades criollas como el ojo de venado y el riñón ocupan un nicho particular dentro de este mercado. Aunque su producción es menor en comparación con los híbridos comerciales, poseen un valor agregado por su calidad organoléptica, rusticidad y potencial nutracéutico. Estas variedades suelen cultivarse en sistemas tradicionales y agroecológicos, donde la prioridad no es el

rendimiento máximo, sino la conservación de la diversidad genética y la producción de alimentos con identidad cultural (García-González et al., 2022).

La importancia económica del tomate criollo no se limita al mercado formal. En comunidades rurales, su cultivo asegura el autoconsumo y la venta en mercados locales, lo que contribuye a la economía familiar y a la seguridad alimentaria. Además, su resistencia a condiciones adversas reduce la necesidad de insumos externos, lo que disminuye los costos de producción y favorece la sustentabilidad de los sistemas agrícolas (Martínez-Ruiz et al., 2023).

En términos de comercio internacional, México es el principal exportador de tomate fresco hacia Estados Unidos, con más del 90% de las exportaciones destinadas a ese mercado (USDA, 2023). Sin embargo, las variedades criollas tienen un potencial creciente en mercados especializados, como el de productos orgánicos y gourmet, donde los consumidores valoran la autenticidad, el sabor y la calidad nutracéutica. Este nicho representa una oportunidad para posicionar variedades tradicionales en cadenas de valor diferenciadas (USDA, 2023).

La producción de tomate también tiene un impacto social significativo. Genera miles de empleos directos e indirectos en zonas rurales, desde la siembra y cosecha hasta la comercialización y exportación. En estados como Sinaloa y Michoacán, la horticultura del tomate constituye una fuente principal de ingresos para comunidades enteras, lo que refuerza su papel estratégico en el desarrollo regional (SIAP, 2024).

Finalmente, la importancia económica del tomate criollo debe analizarse desde una perspectiva de sustentabilidad. Aunque su rendimiento es menor frente a híbridos comerciales, su cultivo contribuye a la conservación de la biodiversidad agrícola, reduce la dependencia de agroquímicos y fortalece la resiliencia de los sistemas productivos frente al cambio climático. En este sentido, el tomate criollo no solo es un recurso económico, sino también un componente esencial para la seguridad alimentaria y la soberanía agrícola de México (FAO, 2020).

5.3 Características morfológicas y agronómicas del jitomate criollo

Las variedades criollas de jitomate en México, como ojo de venado y riñón, presentan una diversidad morfológica que refleja su proceso de domesticación y adaptación a condiciones locales. El ojo de venado se caracteriza por frutos pequeños, redondeados, de piel firme y color rojo intenso, mientras que el riñón produce frutos alargados, con mayor contenido de pulpa y menor proporción de semillas (Martínez-Ruiz et al., 2023).

En términos agronómicos, los tomates criollos suelen presentar ciclos de producción más largos y rendimientos menores frente a híbridos comerciales. Sin embargo, poseen ventajas adaptativas importantes: tolerancia a suelos pobres, resistencia a sequía y menor susceptibilidad a ciertas plagas y enfermedades. Estas características los hacen atractivos para sistemas de producción agroecológica y de baja tecnología, donde la prioridad es la sustentabilidad más que la maximización del rendimiento (García-González et al., 2022).

Estudios realizados en sistemas tradicionales de cultivo en Hidalgo y Puebla han demostrado que las variedades criollas presentan una mayor estabilidad fenotípica frente a variaciones ambientales. Por ejemplo, en condiciones de estrés hídrico, el jitomate criollo mantiene una producción aceptable gracias a su capacidad de ajustar la arquitectura foliar y reducir la transpiración (Hernández-López et al., 2021).

Otra característica relevante es la resistencia natural a enfermedades. Investigaciones han señalado que variedades criollas poseen mayor tolerancia a patógenos como *Fusarium oxysporum* y *Alternaria solani*, lo que se relaciona con la presencia de metabolitos secundarios y compuestos fenólicos en sus tejidos (Khan et al., 2023). Esta resistencia reduce la necesidad de fungicidas, lo que disminuye los costos de producción y favorece la sustentabilidad (Khan et al., 2023).

En cuanto a la arquitectura de la planta, los tomates criollos suelen presentar tallos más robustos y hojas de mayor tamaño, lo que incrementa la superficie fotosintética. Esto se traduce en una mayor capacidad de producción de fotoasimilados, aunque no siempre en un mayor rendimiento comercial, ya que parte

de la energía se destina a la formación de estructuras vegetativas más que a la producción de frutos (Valer et al., 2025).

Comparados con híbridos comerciales, los tomates criollos muestran ventajas en calidad organoléptica. Los consumidores suelen preferirlos por su sabor más intenso, mayor concentración de azúcares y acidez equilibrada. Además, presentan una textura firme y aromas característicos que los hacen ideales para platillos tradicionales mexicanos. En contraste, los híbridos comerciales, aunque más productivos y uniformes, suelen ser criticados por su sabor menos pronunciado y su dependencia de insumos externos para mantener la calidad (Martínez-Ruiz et al., 2023).

Finalmente, desde una perspectiva agronómica, los tomates criollos representan un recurso estratégico para enfrentar los retos del cambio climático. Su rusticidad y capacidad de adaptación a condiciones adversas los convierten en una alternativa viable para sistemas agrícolas sustentables. Además, su conservación y estudio permiten generar programas de mejoramiento genético que integren sus ventajas adaptativas con el rendimiento de híbridos comerciales, creando nuevas variedades más resilientes y productivas (FAO, 2020).

5.4 Factores que influyen en el rendimiento y calidad

El rendimiento y la calidad del jitomate dependen de una interacción compleja entre factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico, estudios recientes han demostrado que la respuesta de los cultivos frente a condiciones de estrés nutricional e hídrico está determinada por la variabilidad genética como por las prácticas de manejo, por lo que es de suma importancia considerar ambos factores de manera conjunta (Tripodi et al., 2022). En el caso de las variedades criollas como ojo de venado y riñón, estas condiciones adquieren mayor relevancia debido a su rusticidad y a la menor intervención tecnológica en los sistemas donde suelen cultivarse, haciéndolas más dependientes de su capacidad adaptativa y de la selección campesina (Tagiakas et al., 2022).

5.4.1 Fertilización y nutrición mineral

La disponibilidad de nutrientes es uno de los factores más determinantes en el rendimiento del jitomate. El nitrógeno (N) es esencial para el crecimiento vegetativo, mientras que el fósforo (P) favorece la floración y el desarrollo radicular. El potasio (K), por su parte, influye directamente en la calidad del fruto, mejorando el contenido de azúcares y la firmeza (Valer et al., 2025). En variedades criollas, se ha observado que una nutrición balanceada incrementa la concentración de compuestos fenólicos y carotenoides, lo que mejora su valor nutracéutico (Khan et al., 2023).

El hierro (Fe) es particularmente relevante, ya que participa en la síntesis de clorofila y en procesos de transporte electrónico durante la fotosíntesis. En sistemas tradicionales, la deficiencia de hierro puede limitar el rendimiento de los tomates criollos. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que la aplicación de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extractos vegetales mejora la biodisponibilidad del nutriente y estimula la acumulación de metabolitos secundarios (Ashraf et al., 2024).

5.4.2 Riego y disponibilidad de agua

El jitomate es una especie sensible al déficit hídrico, lo que afecta tanto el rendimiento como la calidad del fruto. En variedades criollas, se ha observado una mayor tolerancia a la sequía gracias a su capacidad de ajustar la arquitectura foliar y reducir la transpiración (Hernández-López et al., 2021). No obstante, un manejo adecuado del riego es fundamental para evitar problemas como la pudrición apical, que se relaciona con deficiencia de calcio y estrés hídrico. Los sistemas de riego por goteo han demostrado ser más eficientes en el uso del agua y en la distribución uniforme de nutrientes. En cultivos de jitomate criollo, este tipo de riego favorece la estabilidad del rendimiento y mejora la calidad organoléptica del fruto, al mantener un balance hídrico más constante en el suelo (Martínez-Ruiz et al., 2023).

5.4.3 Control de plagas y enfermedades

Las plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y el trips (*Frankliniella occidentalis*) representan una amenaza constante para el jitomate. Sin embargo, las variedades criollas suelen mostrar mayor resistencia natural, atribuida a la presencia

de metabolitos secundarios con actividad insecticida o repelente (García-González et al., 2022). En cuanto a enfermedades, patógenos como *Fusarium oxysporum* y *Alternaria solani* afectan gravemente a los híbridos comerciales, mientras que los criollos presentan tolerancia relativa, lo que reduce la necesidad de fungicidas y favorece la sustentabilidad del sistema productivo (Khan et al., 2023).

El uso de biofertilizantes y extractos vegetales, como el ajo ha mostrado eficacia en el control de patógenos y en la estimulación de mecanismos de defensa en jitomates criollos. Estos insumos naturales no solo reducen la dependencia de agroquímicos, sino que también mejoran la calidad nutracéutica del fruto al inducir la síntesis de compuestos fenólicos (Ashraf et al., 2024).

5.4.4 Condiciones ambientales

La temperatura, la radiación solar y la humedad relativa son factores ambientales que influyen directamente en el rendimiento y calidad del jitomate. En variedades criollas, se ha observado una mayor capacidad de adaptación a climas variables, lo que les permite mantener una producción aceptable en condiciones adversas. Sin embargo, temperaturas extremas pueden afectar la polinización y el cuajado de frutos, reduciendo el rendimiento (FAO, 2020).

La radiación solar, por su parte, favorece la síntesis de carotenoides y fenoles, lo que incrementa el valor nutracéutico del fruto. En sistemas tradicionales, donde los tomates criollos se cultivan a cielo abierto, esta exposición directa a la luz solar contribuye a su sabor más intenso y a su mayor concentración de compuestos bioactivos (Martínez-Ruiz et al., 2023).

5.4.5 Comparación con híbridos comerciales

Los híbridos comerciales suelen mostrar rendimientos superiores bajo condiciones controladas, pero requieren altos niveles de insumos externos (fertilizantes, agroquímicos y riego tecnificado). En contraste, los tomates criollos, aunque menos productivos en términos de volumen, destacan por su resiliencia, menor dependencia de insumos y mayor calidad organoléptica y nutracéutica. Esta diferencia refleja la importancia de conservar y promover las variedades criollas

como una alternativa viable para sistemas agrícolas sustentables y resilientes frente al cambio climático (Tagiakas et al., 2022; Tripodi et al., 2022).

5.5 Importancia de la conservación de variedades criollas

La conservación de variedades criollas de jitomate, como ojo de venado y riñón, es un tema de gran relevancia tanto en el ámbito científico como en el social y cultural. Estas variedades representan un recurso genético único, resultado de siglos de domesticación y selección campesina, y constituyen un patrimonio agrícola y cultural ya que forman parte de la identidad gastronómica mexicana y de la seguridad alimentaria de comunidades rurales. La expansión de híbridos comerciales ha reducido la diversidad genética, poniendo en riesgo ecotipos locales y sus potencias adaptativo (FAO, 2024; Marín-Montes et al., 2016).

5.5.1 Riesgos de erosión genética

La sustitución de variedades criollas por híbridos de alto rendimiento ha generado una pérdida significativa de diversidad genética en los sistemas agrícolas. Este fenómeno, conocido como erosión genética, se traduce en una reducción de la base genética limitando la capacidad de adaptación de los cultivos frente al cambio climático, nuevas plagas y enfermedades emergentes, afectando no solo la productividad, sino también la resiliencia de los cultivos, limitando la capacidad de los cultivos para adaptarse a los cambios ambientales (FAO, 2020).

En México se ha documentado la variabilidad genética en colecciones nativas de tomate, identificando diferencias morfológicas y moleculares en 55 acciones de tomate criollo, lo que evidencia un acervo genético valioso que se encuentra en riesgo por la homogeneización de la producción (Marín-Montes et al., 2016), de manera similar, Valencia-Juárez et al. (2024) evaluaron líneas élite de jitomate nativo en el centro y sur de México, resaltando su potencial para programas de mejoramiento y la necesidad de estrategias de conservación sustentable.

La erosión genética tiene implicaciones socioeconómicas y culturales, ya que, al perderse variedades criollas, nos lleva a la desaparición de sabores, aromas

y características organolépticas únicas que forman parte de la identidad gastronómica mexicana. Esto además reduce la autonomía de comunidades rurales que dependen de estas semillas locales para asegurar su alimentación y economía familiar (Tagiakas et al., 2022)

5.5.2 Estrategias de conservación in situ

La conservación in situ consiste en mantener las variedades criollas en sus ambientes naturales de cultivo, bajo las prácticas tradicionales de los agricultores. Este enfoque permite que las plantas continúen evolucionando y adaptándose a condiciones locales, asegurando su resiliencia frente a factores ambientales. En México, huertos familiares y parcelas comunitarias cumplen un papel fundamental en la conservación in situ, ya que los agricultores seleccionan semillas de los mejores frutos para sembrarlas en la siguiente temporada, perpetuando así la diversidad genética (García-González et al., 2022).

5.5.3 Estrategias de conservación ex situ

La conservación ex situ se realiza en bancos de germoplasma, donde las semillas de variedades criollas se almacenan bajo condiciones controladas para garantizar su viabilidad a largo plazo. Instituciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y la FAO han impulsado programas de recolección y almacenamiento de semillas de jitomates criollos mexicanos, con el objetivo de preservar su diversidad genética y ponerla a disposición de futuros programas de mejoramiento (FAO, 2020).

5.5.4 Huertos comunitarios y programas participativos

Los huertos comunitarios representan una estrategia complementaria, donde agricultores y comunidades trabajan de manera conjunta para conservar y multiplicar variedades criollas. Estos espacios no solo cumplen una función productiva, sino también educativa y cultural, al transmitir conocimientos tradicionales sobre el manejo del jitomate criollo. Programas participativos de rescate genético han demostrado que la colaboración entre investigadores y agricultores fortalece la conservación y promueve el uso de variedades criollas en sistemas agroecológicos (Martínez-Ruiz et al., 2023).

5.5.5 Relevancia cultural y gastronómica

La conservación de variedades criollas no se limita a aspectos agronómicos, sino que también tiene un fuerte componente cultural. El jitomate criollo forma parte de la identidad gastronómica mexicana, presente en platillos tradicionales como salsas, guisos y moles. Su sabor más intenso y sus características organolépticas únicas lo diferencian de los híbridos comerciales, reforzando su valor cultural y patrimonial (Hernández-López et al., 2021).

5.5.6 Papel en la seguridad alimentaria

La conservación de variedades criollas es esencial para la seguridad alimentaria, ya que asegura la disponibilidad de recursos genéticos capaces de enfrentar los retos del cambio climático y la creciente demanda de alimentos saludables. Su rusticidad y capacidad de adaptación a condiciones adversas los convierten en una alternativa viable para sistemas agrícolas sustentables. Además, su mayor concentración de compuestos bioactivos contribuye a mejorar la nutrición de las comunidades rurales y urbanas (Khan et al., 2023).

5.6 Perspectivas a futuro

El futuro de las variedades criollas de jitomate, como ojo de venado y riñón, se encuentra en la intersección entre la conservación genética, la innovación tecnológica y la valorización cultural. Aunque las variedades criollas tienen un rendimiento menor frente a híbridos comerciales, su potencial en términos de calidad nutracéutica, rusticidad y valor cultural abre múltiples escenarios de desarrollo. Estudios han señalado que estas variedades pueden insertarse en mercados diferenciados, aprovechar tecnologías emergentes como la nanotecnología aplicada a la nutrición vegetal, y ser integradas en programas de mejoramiento participativo que fortalezcan la autonomía de comunidades rurales y su identidad gastronómica (FAO, 2020; Arana Gallardo, 2025; Bioleft, 2026).

5.6.1 Mercados diferenciados

Las variedades criollas poseen un nicho creciente en mercados especializados como el orgánico, gourmet y local, donde los consumidores valoran la autenticidad,

el sabor y la calidad nutraceutica. En países con alta demanda de productos diferenciados, como Estados Unidos y la Unión Europea, los tomates criollos pueden posicionarse como productos premium, con certificaciones de origen y atributos culturales que refuercen su identidad, además, su inclusión en cadenas cortas de comercialización fortalece la economía local y promueve la soberanía alimentaria (FAO, 2020).

5.6.2 Integración con nanotecnología

La incorporación de nanotecnología aplicada a la nutrición vegetal representa una oportunidad para mejorar la productividad de los tomates criollos sin perder sus características tradicionales. El uso de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extractos naturales, como el ajo ha demostrado efectos positivos en el crecimiento, la fotosíntesis y la acumulación de compuestos fenólicos, esta integración tecnológica puede aumentar la competitividad de los criollos frente a híbridos comerciales, al tiempo que mantiene prácticas agrícolas sustentables. (Ashraf et al., 2024; Valer et al., 2025).

5.6.3 Resiliencia frente al cambio climático

El cambio climático plantea retos significativos para la agricultura, como sequías prolongadas, temperaturas extremas y aparición de nuevas plagas. En este contexto, las variedades criollas destacan por su capacidad de adaptación y rusticidad, lo que las convierte en una alternativa viable para sistemas agrícolas resilientes. Su conservación y estudio permiten generar programas de mejoramiento genético que integren sus ventajas adaptativas con el rendimiento de híbridos, creando nuevas variedades más resistentes y productivas (Hernández-López et al., 2021).

5.6.4 Innovación en sistemas agroecológicos

El futuro de los tomates criollos también está ligado a su integración en sistemas agroecológicos y sustentables, donde se prioriza la reducción de insumos químicos y el aprovechamiento de recursos locales. La combinación de prácticas tradicionales con tecnologías emergentes puede generar modelos productivos más

equilibrados, que aseguren la conservación de la biodiversidad y la producción de alimentos saludables (García-González et al., 2022).

5.6.5 Valorización cultural y gastronómica

La identidad cultural de los tomates criollos es un factor clave para su permanencia. Su inclusión en platillos tradicionales mexicanos y su reconocimiento como patrimonio agrícola refuerzan su valor simbólico. A futuro, la promoción de estos productos en festivales gastronómicos, ferias locales y programas de turismo rural puede fortalecer su presencia en mercados nacionales e internacionales, consolidando su papel como símbolo de la diversidad agrícola mexicana (Martínez-Ruiz et al., 2023).

Así mismo, las perspectivas a futuro de los tomates criollos se centran en su posicionamiento en mercados diferenciados, integración con nanotecnología, resiliencia frente al cambio climático y valorización cultural. Estos escenarios no solo aseguran su conservación, sino que también los convierten en protagonistas de una agricultura más sustentable y diversa.

5.7 Nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología se ha consolidado en las últimas dos décadas como una herramienta innovadora para enfrentar los retos de la agricultura moderna. Su aplicación permite mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes, incrementar la resistencia de las plantas frente a condiciones de estrés y reducir la dependencia de agroquímicos convencionales. En el caso del jitomate criollo, la nanotecnología abre nuevas posibilidades para potenciar su productividad y calidad nutracéutica sin perder sus características tradicionales (Echeverría-Pérez et al., 2025).

Estudios recientes han documentado que el uso de nanomateriales como fertilizantes en tomate mejora la germinación, el desarrollo vegetativo y el rendimiento de frutos, además de incrementar la acumulación de compuestos bioactivos como carotenoides y fenoles. Nanopartículas de óxidos metálicos (ZnO, Fe₂O₃, TiO₂) y de sílice han mostrado efectos positivos en la fotosíntesis y en la

resistencia frente a patógenos, lo que refuerza su potencial en sistemas agrícolas sustentables (Echeverría-Pérez et al., 2025.) o como nano-elicitador, modulando el metabolismo de las plantas para inducir respuestas de defensa y mejorar la calidad nutracéutica de los frutos. (Khan et al., 2023; Ashraf et al., 2024).

5.7.1 Concepto y fundamentos

La nanotecnología aplicada a la agricultura se basa en el uso de materiales en escala nanométrica (1–100 nm), cuyas propiedades físico-químicas difieren significativamente de las mismas sustancias en tamaños mayores. Estas nanopartículas pueden actuar como vehículos de liberación controlada de nutrientes, mejorar la biodisponibilidad de minerales esenciales y estimular procesos fisiológicos en las plantas (Chen et al., 2020).

5.7.2 Aplicaciones en nutrición vegetal

Uno de los usos más estudiados es la aplicación de nanopartículas metálicas como hierro, zinc y cobre. En el jitomate, las nanopartículas de hierro han demostrado mejorar la síntesis de clorofila, incrementar la eficiencia fotosintética y estimular el crecimiento vegetativo (Valer et al., 2025). Además, la funcionalización de estas nanopartículas con extractos naturales, como el ajo potencia su estabilidad y bioactividad, favoreciendo la interacción con tejidos vegetales y la acumulación de compuestos fenólicos (Raiesi-Ardali et al., 2022).

5.7.3 Control de plagas y enfermedades

La nanotecnología también se utiliza en el manejo fitosanitario. Nanopartículas de plata y cobre han mostrado eficacia en el control de patógenos como *Alternaria solani* y *Fusarium oxysporum*, reduciendo la necesidad de fungicidas convencionales (Olivarez-Rodríguez et al., 2024). En sistemas de jitomate criollo, estas aplicaciones pueden fortalecer la resistencia natural de las plantas y disminuir los costos de producción.

5.7.4 Mejora de la calidad nutracéutica

Diversos estudios han señalado que la aplicación de nanopartículas metálicas puede incrementar la concentración de compuestos bioactivos como fenoles,

flavonoides y carotenoides en frutos de jitomate (Khan et al., 2023; Ashraf et al., 2024). Esto se traduce en un mayor valor nutracéutico, lo que posiciona al jitomate criollo como un alimento funcional con beneficios adicionales para la salud humana.

5.7.5 Sustentabilidad y reducción de insumos

La nanotecnología contribuye a la sustentabilidad agrícola al permitir una liberación controlada de nutrientes, lo que reduce pérdidas por lixiviación y contaminación de suelos y aguas. Además, al mejorar la eficiencia en la absorción de minerales, disminuye la necesidad de fertilizantes convencionales, reduciendo el impacto ambiental y los costos de producción (Sampaio et al., 2024).

5.7.6 Aplicaciones en otros cultivos

Más allá del jitomate, la nanotecnología se ha aplicado en cultivos como maíz, arroz y trigo, donde ha mostrado efectos positivos en el crecimiento, la resistencia a estrés y la calidad del grano. Estos avances sugieren que la integración de nanotecnología en sistemas agrícolas puede ser una estrategia transversal para mejorar la productividad y la sustentabilidad en diferentes especies (Tombuloglu et al., 2024).

5.8 Nanopartículas de hierro y su funcionalización

El hierro es un micronutriente esencial para las plantas, ya que participa en procesos clave como la síntesis de clorofila, el transporte de electrones en la fotosíntesis y la actividad de enzimas relacionadas con la respiración celular. Sin embargo, en su forma convencional, el hierro suele presentar problemas de baja biodisponibilidad, especialmente en suelos alcalinos, donde se precipita y se vuelve inaccesible para las raíces. En este contexto, las nanopartículas de hierro (NPs-Fe) representan una alternativa innovadora, ya que su tamaño reducido y sus propiedades superficiales mejoran la absorción y el transporte del nutriente en la planta (Valer et al., 2025).

5.8.1 Propiedades de las nanopartículas de hierro

Las nanopartículas de hierro poseen una alta relación superficie-volumen, lo que incrementa su reactividad y facilita su interacción con tejidos vegetales. Además, su tamaño nanométrico permite atravesar barreras celulares y participar directamente

en procesos metabólicos. En estudios con jitomate, se ha demostrado que las NPs-Fe incrementan la concentración de clorofila, mejoran la eficiencia fotosintética y estimulan el crecimiento vegetativo (Sampaio et al., 2024).

5.8.2 Funcionalización con extractos naturales

Los extractos vegetales se suelen emplear de dos maneras, una la síntesis verde, donde los fitoquímicos provenientes de hojas, corteza, semillas, cascara y raíces actúan como agentes reductores, recubridores y estabilizadores, de modo que el extracto no solo funciona como materia, sino que forma parte de la química superficial de las nanopartículas (Villagrán et al., 2024). Los metabolitos que se encuentran en los extractos vegetales pueden causar un ajuste en el tamaño, morfología, carga superficial y propiedades ópticas de las nanopartículas (Kumari et al 2024). Un segundo uso es la funcionalización post-síntesis: después de un paso de la síntesis de la partícula, se recubren o se conjugan adicionalmente para mejorar la estabilidad coloidal, biocompatibilidad (Hariram & Vivekanandhan., 2018)

5.8.3 Efectos fisiológicos en jitomate criollo

La aplicación de nanopartículas de hierro (NPs-Fe) funcionalizadas con extractos naturales ha mostrado efectos relevantes en la fisiología del jitomate criollo. Al estar recubiertas con compuestos orgánicos, estas nanopartículas presentan una mayor solubilidad y biodisponibilidad, lo que facilita su transporte hacia los tejidos vegetales y mejora la absorción de hierro en comparación con fuentes convencionales. Este incremento en la disponibilidad del micronutriente se traduce en una mejor eficiencia metabólica y en un aprovechamiento más eficaz de los recursos del suelo.

Diversos estudios han documentado que la aplicación de NPs-Fe induce un aumento en los pigmentos fotosintéticos, incluyendo clorofila a, clorofila b y carotenoides, lo que favorece la eficiencia fotosintética y la capacidad de producción de fotoasimilados, esenciales para el crecimiento y desarrollo de la planta (Khan et al., 2023). Asimismo, la funcionalización con extractos de ajo estimula la síntesis de metabolitos secundarios como fenoles y flavonoides, incrementando la capacidad

antioxidante del fruto y mejorando su calidad nutracéutica (Raiesi-Ardali et al., 2022).

Otro aspecto relevante es la reducción del estrés metabólico. Los compuestos organosulfurados presentes en el ajo actúan como protectores frente a señales de estrés, modulando la expresión de genes relacionados con la homeostasis del hierro y con la respuesta antioxidante. Este efecto contribuye a mantener la estabilidad fisiológica de la planta bajo condiciones adversas, favoreciendo su resiliencia y capacidad de adaptación (Chen et al., 2020).

5.8.4 Comparación con aplicaciones convencionales

La funcionalización convierte principalmente una nanopartícula básica en un portador más controlable, al modificar la superficie se cambia la biocompatibilidad, la absorción ya que la adición de ligandos, polímeros o biomoléculas que mejoran la estabilidad, la capacidad de direccionamiento, penetración intracelular y la unión selectiva (Sanita et al., 2020; Siafaka et al., 2016; Jiang et al., 2013; Friedman et al., 2013).

En comparación con las nanopartículas convencionales no modificadas, la principal ventaja de las nanopartículas funcionalizadas es un mejor desempeño biológico en contextos donde la liberación es importante: son más fáciles (Sanita et al., 2020; Siafaka et al., 2016; Jiang et al., 2013; Friedman et al., 2013). La desventaja de las nanopartículas funcionalizadas es la complejidad, ya que la funcionalización implica pasos sintéticos extra, que no siempre se traducen en mejores resultados (Chang et al., 2012).

Las nanopartículas de hierro funcionalizadas aplicadas al suelo suele presentarse como sistemas de liberación mas eficiente que las fuentes convencionales (sin recubrimiento). Los recubrimientos y la química superficial de las nanopartículas mejoran la biodisponibilidad y con frecuencia se traducen en mayores niveles de biomasa, clorofila, floración, tolerancia al estrés y una mayor acumulación de hierro en tejidos (Nohesara et al., 2025)

La respuesta en las plantas sigue siendo dependiente de la dosis y de la especie (Mazaheri-Tirani et al., 2022)., como en tomate donde se aplicaron nanopartículas de Fe₃O₄ recubiertas con ácido húmico y en cempasúchil donde las nanopartículas estaban recubiertas con nanocelulosa, ambos superaron a los tratamientos con hierro convencional, mientras que en ají picante aplicaciones de hierro funcionalizado con quitosan cuaternizado y fosfato no se observaron efectos claros de fitotoxicidad ni beneficios claros (Raiesi-Ardali et al., 2022; Nohesara et al., 2025; Velásquez et al., 2024).

5.9 Compuestos fenólicos

Las plantas de tomate producen un conjunto amplio de compuestos fenólicos, principalmente ácidos fenólicos y flavonoides, estos compuestos incluyen ácido clorogénico, ácido cafeico, rutina, naringenina, quercetina y glicósidos relacionados, cuyos niveles varían según el cultivar, el tejido, la etapa de maduración, la luz, así como otras condiciones agronómicas como la nutrición, riego y manejo (Chaudhary et al., 2018; Slimestad & Verheul., 2009).

El patrón mejor sustentado es que los compuestos fenólicos actúan como parte de la química de respuesta al estrés a la que esta sometida la planta; en tomate Cherry. El estrés hídrico incrementó los fenoles y flavonoides totales en hojas, mientras que el estrés térmico promueve la acumulación de fenoles (Días et al., 2015; Hassan et al., 2015). El fenotipo está vinculado a la vía fenilpropanoide, con la felalanina amoníaco-liasa como enzima clave bajo el control lumínico. Esto convierte a los compuestos fenólicos en un blanco dinámico: no representan tantos contenidos fijos del tomate sino resultados de la interacción genotipo x ambiente x desarrollo (Días et al., 2015).

En tomate la evidencia indica que las nanopartículas de hierro tienden a incrementar el contenido de fenoles y flavonoides especialmente cuando la formulación activa la vía del fenilpropanoide más allá de solo la fertilización con hierro (Wang et al., 2022; Rahman et al., 2023)

5.10 Pigmentos fotosintéticos

En tomate los principales pigmentos fotosintéticos corresponden a las clorofilas, particularmente a y b, junto con carotenoides como la luteína, las xantofilas y el β -caroteno. Estudios en hojas de tomate han demostrado que las clorofilas (a y b), la xantofila (luteína) y el caroteno (predominantemente β) se sintetizan a lo largo de las distintas fases de desarrollo, alcanzando su máxima actividad en la etapa de floración (Djibrilla et al., 2024).

El equilibrio entre los compuestos fenólicos se modifica conforme avanza el desarrollo: la clorofila predomina en las fases iniciales, pero durante la maduración se degrada y los carotenoides se empiezan a sintetizar en abundancia, este cambio explica la transición del fruto verde al rojo, resultado de la sustitución de un estado rico en clorofila por otro enriquecido en carotenoides (Zhang et al., 2026). Mientras que desde la perspectiva de la fisiología foliar, la clorofila a/b constituye el núcleo del sistema de captura de luz, mientras que los carotenoides desempeñan funciones de fotoprotección (Zhang et al., 2026).

La aplicación de nanopartículas de hierro en tomate suele incrementar la clorofila foliar, los carotenoides y la fotosíntesis neta a dosis bajas o moderadas, pero la respuesta depende de la dosis y la frecuencia de aplicación; un exceso revierte el efecto (Tombuloglu et al., 2024; El-Desouky et al., 2021; Singh et al., 2024)

5.11 Implicaciones en la calidad nutracéutica

La presencia de fenoles, flavonoides y carotenoides en el jitomate ha sido ampliamente asociada con efectos positivos en la salud humana, ya que estos compuestos poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, lo que convierte al tomate en un alimento funcional de interés, lo que lo convierte en un alimento funcional de interés creciente en nutrición y salud pública (Giovannucci, 2002; Rao & Agarwal, 2018).

La síntesis de estos metabolitos se ve influenciada por factores ambientales, tales como estrés hídrico, radiación solar, estos factores tienden a estimular la

acumulación de compuestos fenólicos y pigmentos fotosintéticos en frutos cultivados bajo sistemas tradicionales (Hernandez-López et al., 2021). Cabe destacar, que en variedades criollos que en variedades criollas mexicanas se ha demostrado una mayor concentración de vitamina C, licopeno y flavonoides en comparación con híbridos comerciales, lo que incrementa su capacidad antioxidante y su potencial nutraceutico (Giovannucci, 2002; Rao & Agarwal, 2018).

El jitomate es considerado un alimento funcional por su aporte de compuestos bioactivos que contribuyen a la salud humana. Su composición incluye carbohidratos simples, fibra dietética, vitaminas (A, C, E, K y complejo B), minerales (potasio, magnesio, hierro, fósforo) y una amplia gama de metabolitos secundarios como carotenoides, fenoles y flavonoides, estos compuestos no solo cumplen funciones fisiológicas en la planta, sino que también poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas en el organismo humano. (Giovannucci, 2002).

Uno de los componentes más estudiados es el licopeno, un carotenoide responsable del color rojo característico del fruto. El licopeno actúa como antioxidante al neutralizar radicales libres, reduciendo el riesgo de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer, especialmente el de próstata (Giovannucci, 2002; Rao & Agarwal, 2018). En variedades criollas mexicanas, se ha reportado una concentración superior de licopeno en comparación con híbridos comerciales, lo que les confiere un mayor potencial nutraceutico (Martínez-Ruiz et al., 2023).

Además del licopeno, el jitomate contiene vitamina C, esencial para la síntesis de colágeno y el fortalecimiento del sistema inmunológico. Estudios han demostrado que las variedades criollas presentan niveles más altos de vitamina C, lo que las convierte en una fuente importante de antioxidantes naturales (Peralta-Hernández et al., 2021). También aportan flavonoides como la quercetina y el kaempferol, que poseen efectos antiinflamatorios y protectores frente a enfermedades neurodegenerativas (Khan et al., 2023).

En cuanto a los fenoles totales, investigaciones recientes han señalado que los tomates criollos tienden a acumular mayores concentraciones de estos compuestos, lo que se traduce en una mayor capacidad antioxidante (Ashraf et al., 2024). Esto se relaciona con su rusticidad y adaptación a condiciones de estrés, ya que las plantas suelen incrementar la síntesis de metabolitos secundarios como mecanismo de defensa (Ashraf et al., 2024; Montesinos-Cortes et al., 2026).

La comparación con híbridos comerciales revela diferencias significativas. Mientras los híbridos suelen priorizar características como uniformidad de tamaño, resistencia al transporte y mayor rendimiento, los criollos destacan por su sabor más intenso, mayor concentración de azúcares y acidez equilibrada, además de un perfil nutracéutico superior. Por ejemplo, el jitomate ojo de venado ha mostrado niveles elevados de flavonoides y carotenoides, mientras que el riñón presenta mayor contenido de licopeno y vitamina C (García-González et al., 2022).

Desde la perspectiva de la salud pública, el consumo de jitomates criollos puede contribuir a la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles, como hipertensión, diabetes y cáncer. Su inclusión en dietas tradicionales mexicanas refuerza la importancia de conservar estas variedades, no solo por su valor cultural, sino también por su impacto positivo en la nutrición y la salud de las comunidades rurales y urbanas (Montesinos-Cortes et al., 2026; Cruz-Chamorro et al., 2024; Chávez-Servia et al., 2023).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Establecimiento del experimento

El estudio se realizó bajo condiciones de invernadero en el Instituto de Ciencias Agropecuarias (UAEH), en Tulancingo, Hidalgo. Se utilizaron semillas de tomate criollo de las variedades ojo de venado y riñón, adquiridas en el mercado local. Las plantas se establecieron en bolsas de polietileno de 10 L con una mezcla de peat moss y perlita (1:1 en base a volumen) como sustrato. El sistema de riego consistió en goteros tipo estaca, con un gasto aproximado de 1.5–2 L esto variaba dependiendo las condiciones climáticas al día con solución nutritiva Steiner diaria, ajustada según la etapa fenológica: trasplante, crecimiento vegetativo, floración y producción (25, 50, 75 y 100%).

6.2 Tratamientos

En total se tuvieron un total de seis tratamientos: Riñón Control (R control), Riñón 100 mg/L NP's Fe (R 100), Riñón 200 mg/L NP's Fe (R 200), Control Ojo de venado (OV Control), Ojo de venado 100 mg/L NP's Fe (OV 100), Ojo de venado 200 mg/L (OV 200).

Las nanoparticulas se pusieron en solución agregando 100 y 200 mg (100 y 200 mg) de las nanoparticulas en un litro de agua destilada con 1 mL de Agrex (coadyuvante), para después pasarlos 15 min a un ultrasonido y se dispersen las nanoparticulas en la solución.

La aplicación de los tratamientos se realizó vía drench, aplicando 10 mL de la solución en la base de la planta, las aplicaciones se realizaron a los 30 días después de trasplante (DDT) y se repitieron cada 15 días teniendo un total de 7 aplicaciones.

6.3 Funcionalización de nanopartículas

Las nanopartículas de hierro fueron funcionalizadas con extracto de ajo para mejorar su estabilidad y bioactividad. La funcionalización consistió en la incorporación de compuestos organosulfurados del ajo, que actúan como agentes reductores y estabilizantes, favoreciendo la interacción con tejidos vegetales.

6.4 Muestreo

Para las variables se tomaron frutos totalmente maduros de tamaño uniforme, sin daños físicos, estos fueron lavados con una solución de hipoclorito de sodio y luego fueron almacenados en un ultracongelador a -87 °C y posteriormente liofilizadas. Las muestras se molieron en mortero de porcelana para realizar los análisis bioquímicos.

6.5 Variables de crecimiento

Para la evaluación del crecimiento se midieron diferentes parámetros morfológicos de las plantas. La altura se registró en centímetros utilizando un flexómetro, tomando las medidas desde el cuello de la planta hasta el ápice de crecimiento. El diámetro del tallo se determinó con un calibrador Vernier digital electrónico de acero inoxidable de alta precisión (marca Mitutoyo, rango de medición de 0–150 mm y resolución de ± 0.02 mm), colocado entre la primera hoja verdadera y los cotiledones. También se contabilizó el número de hojas y el número de racimos por planta.

El peso húmedo aéreo se obtuvo en gramos mediante una balanza analítica de alta precisión (marca OHAUS, serie Pioneer, con resolución de ± 0.0001 g). Para el peso seco aéreo, las plantas fueron cortadas en segmentos de aproximadamente 10 cm de largo y colocadas en bolsas de papel, que posteriormente se introdujeron en un horno de secado a 100 °C (marca GRIEVE, modelo LW-201C) hasta alcanzar un peso constante. En el caso de la biomasa de raíz, se realizó un lavado con agua para medir la longitud con un flexómetro, y el peso fresco se determinó en gramos utilizando la misma balanza analítica de alta precisión. Finalmente, las raíces fueron colocadas en bolsas de papel y sometidas al horno de secado a 100 °C (marca

GRIEVE, modelo LW-201C) hasta obtener un peso estable, con lo cual se determinó el peso seco radicular.

6.6 Determinación de pigmentos fotosintéticos

La cuantificación de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b, total y carotenoides) se realizó una vez por semana empleando el método descrito por Arnon en 1949. El material vegetal fue lavado y secado, posteriormente se pesaron 0.1 g de muestra, la cual se maceró en un mortero con 1.5 mL de acetona al 80%. El contenido obtenido se vació en un tubo de ensayo y las muestras se conservaron en un lugar oscuro y frío para evitar la degradación de la clorofila. Posteriormente, se transfirieron 1.5 mL a tubos Eppendorf negros y se centrifugaron a 2000 rpm durante 4 minutos en una microcentrífuga HARMLE modelo Z 233 M-2. El sobrenadante se colocó en cubetas de cuarzo y se midió la absorbancia de cada muestra a 663 nm, 645 nm y 440.5 nm en un espectrofotómetro JENWAY 6400. El cálculo de la concentración de pigmentos fotosintéticos se realizó mediante las fórmulas establecidas para determinar clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides, expresadas en miligramos por mililitro:

El cálculo de la concentración de pigmentos se realizó con las siguientes fórmulas:

- **Clorofila a (Ca):**

$$Ca = (12.7 \cdot A_{663} - 2.7 \cdot A_{645}) \times 6 \text{ mL acetona}$$

Expresado en mg Clorofila a / mL

- **Clorofila b (Cb):**

$$Cb = (22.9 \cdot A_{645} - 4.7 \cdot A_{663}) \times 6 \text{ mL acetona}$$

Expresado en mg Clorofila b / mL

- **Clorofila total (Ca+b):**

$$CT = (8.05 \cdot A_{663} + 20.2 \cdot A_{645}) \times 6 \text{ mL acetona}$$

Expresado en mg Clorofila total / mL

- **Carotenoides (Ccar):**

$$Ccar=4.695 \cdot A_{440.5} - 0.268 \cdot (Ca+b)$$

Expresado en mg Carotenoides / mL

6.7 Determinación de fenoles totales y flavonoides

Los fenoles totales se determinaron, utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu (Singleton et al., 1999), una muestra conocida de sobrenadante se mezcló con el reactivo de Folin-Ciocalteu al 50% y se añadió 1.5 mL de solución de carbonato de sodio al 2 % la mezcla se dejó reaccionar durante 1 hora en completa oscuridad. Posterior al tiempo se midió la absorbancia a 725 nm. Los resultados fueron expresados en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (mg EAG g⁻¹ PS). La determinación del contenido de flavonoides se realizó de acuerdo a lo descrito por Lahlou et al. (2014), con algunas modificaciones. Una muestra conocida del sobrenadante se mezcló con 2 mL de una solución de AlCl₃ al 2%, se dejó reaccionar por 20 minutos y se midió la absorbancia a 415 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina por gramo de peso fresco (mg EQ g⁻¹ PS).

6.8 Análisis estadístico

El experimento se estableció usando un diseño experimental de bloques completos al azar. Para el análisis estadístico de cada una de las variables se utilizó el programa estadístico Infostat (2016) en el que se realizó un análisis de varianza y un aprueba de comparación de medias de Fisher LSD ($P \leq 0.05$)

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 1 se observaron diferencias ($\alpha \leq 0.05$) en todas las variables, la mayor altura se observó en el tratamiento Riñón con 200 mg/L encontrando una altura 15.5% mayor que el tratamiento control riñón y un 26% mayor que el control ojo de venado, cabe señalar que no se observó un efecto significativo en la altura en las plantas de ojo de venado. En la variable estudiada de diámetro de tallo en la variedad riñón se encontró la misma tendencia, encontrando un mayor diámetro en el tratamiento de 200 mg/L con aumento del 3% en el diámetro, en la variedad ojo de venado observamos una tendencia similar a lo observado en la altura donde no se encontraron diferencias en el diámetro de tallo. En el número de hojas encontramos el mayor número en el tratamiento ojo de venado con 200 mg/L de nanopartículas de Fe con un 5.9% más hojas que el tratamiento control Ojo de venado y un 29.77% más de hojas que el tratamiento control Riñón, en el número de racimos se observó la misma tendencia encontrando el mayor número de racimos en el tratamiento ojo de venado 200 mg/L con 9 y 33% más de racimos en comparación con el tratamiento control Ojo de Venado y control Riñón respectivamente.

Cuadro 1. Crecimiento vegetativo de plantas de tomate riñón (R) y ojo de venado (OV) tratadas con NP's de Fe funcionalizadas con ajo en concentraciones de 100 y 200 mg/L.

Tratamiento	Altura (cm)	Tallo (mm)	No. De hojas	No. De racimos
R Control	263 ab ^z	14.13 ab	35.60 b	9 b
R 100	261.2 ab	12.08 b	39 ab	10 ab
R 200	304 a	14.56 a	40.4 ab	10 ab
OV Control	241.2 b	16.26 a	43.6 ab	11 ab
OV 100	235 b	16.16 a	42.8 ab	11 ab
OV 200	235.8 b	15.88 a	46.20 a	12 a

CV	13.09	12.14	15.11	15.36
----	-------	-------	-------	-------

²Letras diferentes en las barras indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($\alpha = 0.05$). Donde: Riñon Control (R control), Riñon 100 mg/L NP's Fe (R 100), Riñon 200 mg/L NP's Fe (R 200), Control Ojo de venado (OV Control), Ojo de venado 100 mg/L NP's Fe (OV 100), Ojo de venado 200 mg/L (OV 200).

El hierro al estar en forma mejora la eficiencia en la absorción (Valer, et al. 2025) y la biodisponibilidad, al ser un cofactor esencial en enzimas relacionadas con la biosíntesis de lignina y celulosa en la pared celular, esto puede contribuir indirectamente al engrosamiento del tallo (Olivarez-Rodríguez et al., 2024). Otro efecto observado en las nanopartículas de hierro es que mejoran el contenido de clorofila y mejoran la eficiencia fotosintética, lo que se traduce en un mayor crecimiento vegetativo y desarrollo foliar (Sampaio et al., 2024), esto coincide con lo encontrado por Olivarez-Rodríguez et al. 2024, donde las aplicaciones foliares de nanopartículas aumentaron el número de hojas. Al tener un mayor número de hojas funcionales se tiene una mayor superficie fotosintética y una mejor capacidad de producción de fotoasimilados, al tener una mayor cantidad de fotoasimilados se estimula la formación de racimos florales y fructíferos (Olivarez-Rodríguez et al., 2024).

Para el cuadro 2 se observaron diferencias ($\alpha \leq 0.05$) en todas las variables estudiadas, encontrándose el mayor contenido de biomasa aérea en peso húmedo y peso seco en el tratamiento ojo de venado con 100 mg/L de NP's de Fe con un 12% más de peso fresco con respecto al control ojo de venado y 26% más peso que el control riñón, mientras que en el peso seco se tuvo un 23% más de peso que el control ojo de venado y un 25% más que el control riñón. En la biomasa radicular el mayor peso fresco se observó en el tratamiento control riñón y en el tratamiento ojo de venado con 200 mg/L encontrándose en este último un 16% más peso que el control ojo de venado, este tratamiento mostró el mayor peso seco con un 46%

más peso que el control ojo de venado y un 26% más que el control riñón. El mayor largo de raíz se encontró en el tratamiento riñón con 200 mg/L.

Cuadro 2. Biomasa aérea y radical de plantas de tomate tratadas con NP's de Fe funcionalizadas con ajo en concentraciones de 100 y 200 mg/L.

Tratamiento	Peso húmedo aéreo	Peso seco aéreo	Raíz Peso fresco	Raíz peso seco	Largo raíz
RC	391.38 b ^z	80.48 b	145.56 a	22.80 b	60.80 ab
R 100	458.08 ab	90.52 ab	80.02 b	21.42 b	48.40 b
R 200	460.46 ab	86.78 ab	78.36 a	23.48 ab	60.40 a
OVC	440.72 ab	81.90 b	143.56 b	19.70 bc	61.60 ab
OV 100	494.12 a	100.74a	70.14 b	13.90 c	51.80 ab
OV 200	424.16 ab	88.46 ab	166.82 a	28.82 a	63.44 ab
CV	16.38	14.86	25.38	20.85	18.07

^zLetras diferentes en las barras indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($\alpha = 0.05$). Donde: Riñón Control (R control), Riñón 100 mg/L NP's Fe (R 100), Riñón 200 mg/L NP's Fe (R 200), Control Ojo de venado (OV Control), Ojo de venado 100 mg/L NP's Fe (OV 100), Ojo de venado 200 mg/L (OV 200).

Estos resultados se pueden deber a diversos factores; uno puede deberse a que el hierro en forma nano con la recubierta del ajo se encuentra más biodisponible y al suministrarlo directamente donde las raíces lo pueden absorber, favoreciendo la actividad radicular, lo que se traduciría a una mayor biomasa (Raiesi-Ardali et al., 2022; Shankramma et al., 2016), otro efecto y que nos explicaría el crecimiento en las raíces es que las nanopartículas de hierro estimulan un programa de crecimiento al reducir la señalización del estrés afectando negativamente genes relacionados con el ABA (Chen et al., 2020; Kong et al., 2025), estimulando el crecimiento de las raíces y por último es la ganancia fotosintética y la homeostasis del hierro, ya que

su aplicación mejora el transporte de clorofila y electrones así como una estimulación positiva de genes de ferritina, mejorando el manejo del hierro y generando una mayor fijación de carbono para favorecer la acumulación de materia seca, cabe señalar que el efecto depende de la dosis, la exposición frecuente o elevada a nanopartículas puede suprimir la fotosíntesis y el crecimiento en lugar de potenciarlos (Tombuloglu et al., 2024).

En la tabla 3 se observaron diferencias ($\alpha \leq 0.05$), En general, la variedad ojo de venado presentó una mayor concentración en los pigmentos fotosintéticos (carotenoides, clorofila a, clorofila b y clorofila total),

Cuadro 3. Pigmentos fotosintéticos de plantas de tomate tratadas con NP's de Fe funcionalizadas con ajo en concentraciones de 100 y 200 mg/L.

Tratamiento	Carotenoides	Clorofila a	Clorofila B	Clorofila total
RC	1.57 ab	33.46 a	30.76 ab	64.22 ab
R 100	1.38 b	30.59 b	27.24 b	57.82 b
R 200	1.61 ab	34.47 a	27.76 b	62.23 ab
OVC	1.69 a	34.20 a	36.70 a	70.90 a
OV 100	1.80 a	34.23 a	34.57 ab	68.81 a
OV 200	1.75 a	34.27 a	33.99 ab	68.27 a
CV	16.05	6.56	24.76	14.50

²Letras diferentes en las barras indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($\alpha = 0.05$). Donde: Riñón Control (R control), Riñón 100 mg/L NP's Fe (R 100), Riñón 200 mg/L NP's Fe (R 200), Control Ojo de venado (OV Control), Ojo de venado 100 mg/L NP's Fe (OV 100), Ojo de venado 200 mg/L (OV 200).

Esto nos sugiere que dicha variedad puede tener una mayor eficiencia en cuanto a la captación de luz y un mayor potencial fotosintético comparado con la variedad riñón. En particular la mayor concentración de carotenoides se observó en todos los tratamientos de ojo de venado, mientras que en la variedad riñón se mostró una disminución en el tratamiento 100 mg/L con una disminución del 12.1% con respecto

al tratamiento control riñón y un 18.3% con respecto al control ojo de venado, encontramos la misma tendencia en cuanto al contenido de clorofila a donde se registró una disminución del 8.5% con respecto al conteo riñón y una disminución del 10.5% respecto al control ojo de venado. Este comportamiento se siguió observando en el contenido de clorofila b encontrando una disminución con la aplicación de nanopartículas, registrando la mayor concentración del contenido en el control ojo de venado. La clorofila total también fue superior en la variedad ojo de venado en todos los tratamientos, esto nos confirma que la diferencia principal responde más a un efecto varietal que un cambio inducido por la aplicación de NPs

Estos resultados nos sugieren que la variedad ojo de venado podría tener una mayor demanda o capacidad de asimilación de hierro, elemento esencial para la biosíntesis de clorofila y otros pigmentos fotosintéticos (Gitelson et al., 2003), El hierro participa en la formación del anillo porfirínico de la clorofila y en la actividad de enzimas como la ferroquelatasa y la protoporfirina-IX oxidasa; por ello, genotipos con mayor eficiencia en la absorción de hierro tienden a acumular más pigmentos fotosintéticos (Gandul Rojas, 1992; Gitelson et al., 2003). En estudios recientes con nanopartículas de hierro en tomate, se ha reportado que la fertilización con Fe nano o quelatado incrementa el contenido de clorofila a, clorofila b y carotenoides totales, así como la actividad antioxidante del fruto (Ashraf et al., 2024; Khan et al., 2023).

No obstante, en este trabajo el efecto de las nanopartículas sobre los pigmentos fotosintéticos fue menor que el efecto varietal, ya que la variabilidad entre variedades (ojo de venado vs. riñón) fue más marcada que la variación entre tratamientos dentro de cada variedad. Esto concuerda con trabajos que muestran que genotipos de tomate responden de forma diferencial a la aplicación de nanopartículas de hierro, tanto en la síntesis de clorofila como en la acumulación de carotenoides (Ashraf et al., 2024; Khan et al., 2023). En consecuencia, la mayor acumulación de pigmentos fotosintéticos en ojo de venado podría relacionarse con una mayor eficiencia fisiológica en el uso de hierro y otros micronutrientes, más que con una respuesta uniforme a la aplicación de NPs.

Se encontraron diferencias significativas ($\alpha \leq 0,05$) en el contenido total de fenoles y flavonoides en plantas de tomate tratadas con nanopartículas de hierro (Fe) funcionalizadas con ajo a 100 y 200 mg/L, lo que sugiere que la aplicación de estas NPs modula la síntesis de compuestos fenólicos, pero esta respuesta depende tanto de la variedad como de la concentración utilizada (Tabla 4).

Cuadro 4. Contenido de fenoles totales y flavonoides de plantas de tomate tratadas con NP's de Fe funcionalizadas con ajo en concentraciones de 100 y 200 mg/L.

Tratamiento	Fenoles totales	Flavonoides
RC	5.62 ab	1.29 c
R 100	6.24 a	1.32 c
R 200	4.90 b	1.37 c
OVC	4.93 b	2.18 a
OV 100	5.02 b	2.22 a
OV 200	4.51 b	1.78 b
CV	24.65	13.25

²Letras diferentes en las barras indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($\alpha = 0.05$). Donde: Riñón Control (R control), Riñón 100 mg/L NP's Fe (R 100), Riñón 200 mg/L NP's Fe (R 200), Control Ojo de venado (OV Control), Ojo de venado 100 mg/L NP's Fe (OV 100), Ojo de venado 200 mg/L (OV 200).

El contenido total completo de fenoles se encontró en el tratamiento con Riñón con 100 mg/L de Fe-ajo NPs, con un aumento del 11% frente al control de Riñón (RC) y del 26% frente al control de Ojo de Venado (OVC). Este incremento, que indica que al formular las Fe NPs funcionalizadas (con extracto de ajo) se generó una respuesta fisiológica en la variedad Riñón promoviendo la vía de los fenoles como un mecanismo de protección frente a posibles señales de estrés generadas por el metal o por la propia formulación vegetal. En trabajos previos con nanopartículas de hierro en tomate se han reportado aumentos en fenoles total de y flavonoides (Khan

et al., 2023; Ashraf et al., 2024), lo cual concuerda con lo observado en la variedad riñón con 100 mg/L. Sin embargo, se observa un efecto varietal en los flavonoides, ya que en la variedad riñón se observa una disminución muy marcada en todos los tratamientos y en la variedad ojo de venado se observa una mayor concentración.

Como se comentaba en el caso de flavonoides, la mayor concentración la observamos en los tratamientos Control ojo de venado y ojo de venado con 100 mg/L, lo que nos podría indicar que esta variedad tiende a generar más flavonoides independientemente de la aplicación de NPs. Se observa una disminución en el tratamiento de 200 mg/L lo que nos podría sugerir que a esta concentración las NPs estarían induciendo un ligero estrés metabólico que desvía la síntesis fenólica hacia otras rutas. Estudios con diferentes formulaciones de nanopartículas en tomate han mostrado que, mientras algunas dosis moderadas aumentan flavonoides y actividad antioxidante, dosis más altas pueden no incrementar o incluso reducir ciertos compuestos fenólicos, dependiendo del genotipo (Ashraf et al., 2024; Khan et al., 2023).

Estos hallazgos apoyan la idea de que el uso de nanopartículas de hierro funcionalizadas con extractos vegetales, pueden ser una estrategia para modular la calidad nutracéutica de tomate, aunque el efecto depende claramente de la combinación variedad-dosis y del tipo de metabolito analizado (fenoles o flavonoides).

8. CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de hierro funcionalizadas con *Allium sativum* mostró efectos positivos en el crecimiento vegetativo. En la variedad riñón, la dosis de 200 mg/L incrementó la altura y el diámetro de tallo; en la variedad ojo de venado, el efecto más notable se observó en el número de hojas y racimos. Estos resultados indican que la respuesta depende tanto de la dosis aplicada como del genotipo evaluado.

En cuanto a biomasa se observó un efecto positivo, sobre todo en la variedad ojo de venado, encontrándose mayor biomasa aérea con 100 mg/L y mayor biomasa radicular con 200 mg/L, estos resultados sugieren que la aplicación de hierro en forma nano mejora su biodisponibilidad, estimulando la actividad radicular, cabe señalar que el efecto varía según la concentración y la variedad.

La variedad Ojo de venado presento mayores niveles de pigmentos carotenoides, clorofila a, b y total en todos los tratamientos, mientras que la variedad riñón se observó una disminución sobre todo con el tratamiento con 100 mg/L, evidenciando que el efecto varietal fue más determinante que la aplicación de nanopartículas.

La aplicación de 100 mg/L de NP's de Hierro incremento significativamente el contenido de fenoles totales en la variedad riñón y los flavonoides en la variedad ojo de venado, lo que nos sugiere una activación de mecanismos de defensa y mejora nutracéutica. A dosis más altas (200 mg/L) se observa una disminución, posiblemente asociada a estrés metabólico.

Se demostró que las nanopartículas de hierro funcionalizadas con ajo, tienen potencial para modular crecimiento, biomasa, los pigmentos fotosintéticos y la calidad nutracéutica de tomates criollos. Sin embargo, los efectos dependen de la interacción variedad-dosis-metabolito, lo que abre la ventana para futuras investigaciones con protocolos diferenciados para cada genotipo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Hassan, M., Martínez Fuertes, M., Ramos Sánchez, F. J., Vicente, O., & Boscaiu, M. (2015). Effects of salt and water stress on plant growth and on accumulation of osmolytes and

- antioxidant compounds in cherry tomato. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(1), 1–11. <https://doi.org/10.15835/nbha4319793>
- Arana Gallardo, J. A. (2025). Aprovechamiento y transformación de seis variedades de jitomate nativo (*Solanum lycopersicum* L.). Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Ashraf, M. A., et al. (2024). Green iron oxide nanoparticles and magnetic nanobiochar: Effects on phytochemicals and productivity of nematode-infected tomato plants. *BMC Plant Biology*, 24, 1–14.
- Bioleft. (2026). Protocolo de Evaluación Participativa de Tomates Criollos.
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., & otros. (2018). Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2833–2849. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>
- Chávez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., & Montesinos-Cortes, S. B. (2023). Variation in agromorphological traits and phenolic content in tomato landraces from Oaxaca, Mexico. En *Tomato Landraces: Genetic Resources and Antioxidant Properties*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100000>.
- Chen, Y., Lu, J., Liu, M., Li, H., Sun, Q., Nechitaylo, G. S., Bogoslovskaya, O. A., Olkhovskaya, I. P., & Glushchenko, N. N. (2020). Tomato response to metal nanoparticles introduction into the nutrient medium. *IET Nanobiotechnology*, 14(5), 382–388. Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.0183> (doi.org in Bing)
- Cruz-Chamorro, I., Santos-Sánchez, G., Martín, F., Fernández-Pachón, M. S., Hornero-Méndez, D., & Cerrillo, I. (2024). Evaluation of the impact of the ripening stage on the composition and antioxidant properties of fruits from organically grown tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Spanish varieties. *Foods*, 13(15), 2337. <https://doi.org/10.3390/foods13152337>
- Días, M. I., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., & otros. (2015). Nutritional and phytochemical characterization of *Solanum lycopersicum* under different stress conditions. *Ciência Rural*, 45(4), 693–700. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140098>
- Echeverría-Pérez, E. G., Cruz-López, V., Herrera-Rivera, R., Romellón-Cerino, M. J., Rosas-Díaz, J., & Cruz-Martínez, H. (2025). Recent developments of nanomaterials in crop growth and production: The case of the tomato (*Solanum lycopersicum*). *Agronomy*, 15(7), 1716. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071716>

- El-Desouky, H. S., Islam, K. R., Bergefurd, B., Gao, G., Harker, T., Abd-El-Dayem, H., ... Zewail, R. M. Y. (2021). Nano iron fertilization significantly increases tomato yield by increasing plants' vegetable growth and photosynthetic efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 44(11), 1649–1663. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1871749>
- FAO. (2020). *The State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. FAO.
- Friedman, A. D., Claypool, S. E., & Liu, R. (2013). The smart targeting of nanoparticles. *Current Pharmaceutical Design*, 19(35), 6315–6329. <https://doi.org/10.2174/13816128113199990375>
- Gandul-Rojas, B. (1992). El hierro en la biosíntesis de clorofila: participación en la formación del anillo porfirínico y en la actividad de enzimas como ferroquelatasa y protoporfirina IX oxidasa. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- García-González, J., López, M., & Hernández, R. (2022). Diversidad genética de tomates criollos en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(2), 123–135.
- Giovannucci, E. (2002). A review of epidemiologic studies of tomatoes, lycopene, and prostate cancer. *Experimental Biology and Medicine*, 227(10), 854–859.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Chivkunova, O. B. (2003). Optical properties and non-destructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 77(1), 38–45. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2003\)077<0038:OPANEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2003)077<0038:OPANEO>2.0.CO;2)
- Gobierno de México. (2026). El futuro del jitomate se cultiva en Chapingo. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Gupta, D., & Meena, R. (2022). The role of iron nanoparticles on morpho-physiological and biochemical attributes of plants. *Plant Molecular Biology*, 110, 1292–1305.
- Hassan, M. A., & otros. (2024). Iron nanoparticle-induced modulation of tomato physiology under abiotic stress. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 2044. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62044>
- Hernández, J., López, R., & Martínez, F. (2024). Evaluation of the application of suspensions of iron oxide magnetic nanoparticles in agronomic systems. *Hyperfine Interactions*, 245, 1843. <https://doi.org/10.1007/s10751-024-01843-y>
- Hernández-López, J., Ramírez, P., & Torres, M. (2021). Respuesta fisiológica de variedades criollas de jitomate bajo estrés hídrico en sistemas tradicionales de cultivo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(1), 45–58.

- Khan, M. A., Christou, P., & otros. (2023). Distinct immune responses confer partial resistance to *Fusarium* wilt in tomato landraces: implications for sustainable breeding. *Plant Pathology*, 72(5), 945–957. <https://doi.org/10.1111/ppa.13789>.
- Khan, M. N., Ashraf, M., & AlQuraishi, A. M. (2023). Nano and chelated iron fertilization influences marketable yield, phytochemical properties, and antioxidant capacity of tomatoes. *PLoS ONE*, 18(11), e0293177.
- Khan, M. R., Rizwan, M., Hafeez, M., Ali, S., & Javed, M. R. (2022). Improved iron use efficiency in tomato using organically coated iron oxide nanoparticles. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9, 318. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00318-y>
- Knapp, S. (2002). Solanaceae taxonomy: A historical perspective. *Annals of Botany*, 90(4), 449–459.
- Kong, M., Wang, F., Jing, H., Xu, H., White, J. C., & Shen, Y. (2025). Insights into tomato growth stimulation and induced resistance against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by magnetite nanoparticles. *Environmental Technology & Innovation*, 38, 104103. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104103>
- Kumari, M., Sadhu, P., Talele, C., & Shah, N. (2024). Green Nanotechnology: How Plants Can Help Synthesize Nanoparticles for Biomedical and Environmental Purposes. *Journal of Natural Remedies*, 24(5), 1021–1034. <https://doi.org/10.18311/jnr/2024/36086>
- Lahlou, F. A., El Midaoui, M., El Midaoui, M., & otros. (2014). Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content determination in plant extracts. *Journal of Plant Sciences*, 2(4), 50–56. <https://doi.org/10.15835/nbha4319793>
- Martínez-Ruiz, J., Pérez, L., & Hernández, A. (2023). Caracterización morfológica de variedades criollas de tomate en sistemas tradicionales de México. *Agrociencia*, 57(3), 215–229.
- Montesinos-Cortes, S. B., Pérez-Ochoa, M. L., Vera-Guzmán, A. M., Carrillo-Rodríguez, J. C., Benito-Bautista, P., & Chávez-Servia, J. L. (2026). Effect of crop cycles on the antioxidant compound contents in tomato landraces undergoing phenotypic selection. *Agronomy*, 16(9), 868. <https://doi.org/10.3390/agronomy16090868>.
- Olivarez-Rodríguez, J. M., Apáez-Barrios, P., Raya-Montaño, Y. A., & Apáez-Barrios, M. (2024). Producción de tomate bajo condiciones protegidas con aplicaciones foliares de nanopartículas metálicas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(3), 635–648. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i3.3667>

- Peer, D., Karp, J. M., Hong, S., Farokhzad, O. C., Margalit, R., & Langer, R. (2007). Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy. *Science*, 319(5860), 1226338. <https://doi.org/10.1126/science.1226338>
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum*). In M. Razdan & A. K. Mattoo (Eds.), *Genetic improvement of solanaceous crops* (pp. 1–27). CRC Press.
- Peralta-Hernández, J., Ramírez, G., & Torres, M. (2021). Contenido de vitamina C y compuestos fenólicos en tomates criollos mexicanos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 89–102.
- Peralta-Hernández, J., Ramírez, G., & Torres, M. (2021). Contenido de vitamina C y compuestos fenólicos en tomates criollos mexicanos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 89–102.
- Rahman, A., Harker, T., Lewis, W., & Islam, K. R. (2023). Nano and chelated iron fertilization influences marketable yield, phytochemical properties, and antioxidant capacity of tomatoes. *PLoS ONE*, 18(11), e0294033. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294033>
- Raiesi-Ardali, T., Ma'mani, L., Chorom, M., & Moezzi, A. (2022). Improved iron use efficiency in tomato using organically coated iron oxide nanoparticles as efficient bioavailable Fe sources. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(59), 1–16. SpringerOpen. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00318-y>
- Rao, A. V., & Agarwal, S. (2018). Role of antioxidant lycopene in cancer and heart disease. *Journal of the American College of Nutrition*, 19(5), 563–569.
- Sampaio Gama, J. P., Campos, F. G., Riccardi, C. S., & Boaro, C. S. F. (2024). Iron oxide nanoparticles for photosynthetic recovery in iron-deficient 'Micro-Tom' tomato plants. *Environments*, 12(10), 346. MDPI.
- Sanità, G., Carrese, B., & Lamberti, A. (2020). Nanoparticle surface functionalization: How to improve biocompatibility and cellular internalization. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, 587012. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2020.587012>
- Shankramma, K., Yallappa, S., Shivanna, M. B., & Manjanna, J. (2016). Fe₂O₃ magnetic nanoparticles to enhance *Solanum lycopersicum* (tomato) plant growth and their biomineralization. *Applied Nanoscience*, 6(8), 983–990. Springer. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0510-y>
- Sharma, P., Singh, A., & Verma, R. (2025). Effect of nanocellulose-assisted green-synthesized iron nanoparticles on growth and physiology of pot marigold (*Calendula officinalis*). *BMC Plant Biology*, 25, 6758. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06758-6>

- Siafaka, P. I., Üstündağ Okur, N., Karavas, E., & Bikiaris, D. N. (2016). Surface Modified Multifunctional and Stimuli Responsive Nanoparticles for Drug Targeting: Current Status and Uses. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1440. <https://doi.org/10.3390/ijms17091440>
- Singh, N., Singh, M. K., Raghuvansi, J., Yadav, R. K., & Azim, Z. (2024). Green synthesis of nano iron oxide using *Emblica officinalis* L. fruit extract and its impact on growth, chlorophyll content, and metabolic activity of *Solanum lycopersicum* L. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 12(2), 173–181. <https://doi.org/10.7324/JABB.2024.165651>.
- Singh, R., Lillard, J. W., & Nan, A. (2015). Surface functionalized nanoparticles for biomedical applications. *Nanoscale*, 5(8), 3127–3140. <https://doi.org/10.1039/C2NR32643A>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Slimestad, R., & Verheul, M. (2009). Review of flavonoids and other phenolics from tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(8), 1255–1270. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3605>
- Sundar, S., & Kumar, K. (2018). Biogenic synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their applications: A review. *ChemistrySelect*, 3(31), 8799–8813. <https://doi.org/10.1002/slct.201802748>.
- Tagiakas, R. I., Avdikos, I. D., Goula, A., Koutis, K., Nianiou-Obeidat, I., & Mavromatis, A. G. (2022). Characterization and evaluation of Greek tomato landraces for productivity and fruit quality traits related to sustainable low-input farming systems. *Frontiers in Plant Science*, 13, 994530. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.994530>.
- Tombuloglu, G., Tombuloglu, H., Almessiere, M. A., Baykal, A., Kirat, G., & Ercan, İ. (2024). Effects of foliar iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) application on photosynthetic parameters, distribution of mineral elements, magnetic behaviour, and photosynthetic genes in tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 210, 108616. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108616>
- Tripodi, P., Figàs, M. R., Leteo, F., Soler, S., Díez, M. J., Campanelli, G., Cardí, T., & Prohens, J. (2022). Genotypic and environmental effects on morpho-physiological and agronomic performances of a tomato diversity panel in relation to nitrogen and water stress under organic farming. *Frontiers in Plant Science*, 13, 936596. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.936596>.

- USDA Foreign Agricultural Service. (2024). Tomatoes and Products Annual: Mexico. Report No. MX2024-0028. Guadalajara: USDA FAS. Disponible en: <https://www.fas.usda.gov>
- Valer, V., Rossi, L., Balestrazzi, A., & Marmioli, N. (2025). Physiological, metabolic and ionic responses of *Solanum lycopersicum* plants to Fe_3O_4 and FePO_4 nanoparticles. *Plant Nano Biology*, 13, 100182. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.plnbio.2025.100182>
- Villagrán, Z., Anaya-Esparza, L. M., Velázquez-Carriles, C. A., Silva-Jara, J. M., Ruvalcaba-Gómez, J. M., Aurora-Vigo, E. F., Rodríguez-Lafitte, E., Rodríguez-Barajas, N., Balderas-León, I., & Martínez-Esquivias, F. (2024). Plant-Based Extracts as Reducing, Capping, and Stabilizing Agents for the Green Synthesis of Inorganic Nanoparticles. *Resources*, 13(6), 70. <https://doi.org/10.3390/resources13060070>
- Wang, Z., Le, X., Cao, X., Wang, C., Chen, F., Wang, J., Feng, Y., Yue, L., & Xing, B. (2022). Triiron Tetrairon Phosphate ($\text{Fe}_7(\text{PO}_4)_6$) Nanomaterials Enhanced Flavonoid Accumulation in Tomato Fruits. *Nanomaterials*, 12(8), 1341. <https://doi.org/10.3390/nano12081341>
- Zhang, W., Xie, Y., Yuan, Y., Long, Q., Shao, Z., Zheng, J., Ru, X., Luo, J., Pan, G., Babalola, O. O., Deng, W., & otros. (2026). Metabolism and regulation of chlorophyll and carotenoids in tomato fruits. *Horticulture Research*, 13(7), uhag084. <https://doi.org/10.1093/hr/uhag084>