

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO



INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
INGENIERÍA EN AGRONOMÍA PARA LA  
PRODUCCIÓN SUSTENTABLE

TESIS DE LICENCIATURA

Para obtener el título de

Licenciada en Ingeniería en Agronomía para la  
Producción Sustentable

Aplicación foliar de nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en plantas de arándano “ojo de conejo”  
(*Vaccinium virgatum*): respuesta en parámetros agronómicos, °Brix y antioxidantes.

P R E S E N T A:

Daniela Arellano Tienda

Director de la tesis:

Dr. Sergio Rubén Pérez Ríos

Codirectora de tesis:

Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna

Comité tutorial:

Dr. Oscar Arce Cervantes

Dr. Cesar Uriel López Palestina

Dra. Thania Alejandra Urrutia Hernández



# 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 16 de abril de 2026

Asunto: Autorización de impresión

**Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado**  
Directora de Administración Escolar de la UAEH

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 a él pasante de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía para la Producción Sustentable, **Daniela Arellano Tienda**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Aplicación foliar de nanopartículas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en plantas de arándano “ojo de conejo” (*Vaccinium virgatum*): respuesta en parámetros agronómicos, °Brix y antioxidantes”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, 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 jurado:

<b>PRESIDENTE</b>	Dr. Oscar Arce Cervantes
<b>SECRETARIO</b>	Dra. Thania Alejandra Urrutia Hernández
<b>VOCAL 1</b>	Dr. Sergio Rubén Pérez Ríos
<b>VOCAL 2</b>	Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna
<b>SUPLENTE</b>	Dr. Cesar Uriel López Palestina

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

ATENTAMENTE  
“Amor, Orden y Progreso”

Dr. Sergio Rubén Pérez Ríos  
Coordinador del PE de Ingeniería  
en Agronomía para la Prod. Sust



c.c.p. Archivo.

“Amor, Orden y Progreso”



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago  
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.  
Teléfono: 7717172000 Ext. 42073  
profe\_5566@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis Dr. Sergio Rubén Pérez Ríos, por compartir sus conocimientos, por su valioso tiempo, paciencia y disposición para resolver dudas durante la elaboración de tesis.

A mi codirectora de tesis Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna, por sus grandes aportes a la investigación, por su valioso tiempo, disposición para realizar y resolver dudas durante el trayecto, por compartir su amplio conocimiento en cuestiones de laboratorio y finalmente en la elaboración de tesis.

A mi comité tutorial Dr. Oscar Arce Cervantes por su tiempo, apoyo, sugerencias, comentarios y aportaciones que han ayudado a mejorar este trabajo, Dr. Cesar Uriel López Palestina y Dra. Thania Alejandra Urrutia Hernández por su gran aporte a la investigación.

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias por permitir usar sus instalaciones en el vivero para poder realizar el proyecto de investigación, al igual que sus espacios en laboratorio para poder culminar esta investigación.

A mi familia, especialmente a mi madre Alejandra por motivarme a seguir estudiando, además de su apoyo incondicional durante todo este tiempo. Mi hermano Saul que siempre estuvo motivándome y seguir adelante con este gran proyecto.

## **DEDICATORIA**

Agradezco principalmente a Dios por haberme dado la fortaleza, la salud y mi soporte durante todo este trayecto y que me da la fuerza de seguir adelante, por guiar cada paso de mi camino y ponerme las personas correctas en este proceso.

A mi madre, Alejandra por su amor incondicional, por inspirarme todos los días a luchar por un mejor futuro y ser mi mayor ejemplo de perseverancia y energía. Gracias por brindarme tanto el apoyo moral como económico, así como las oportunidades necesarias para realizar y poder culminar este trabajo y llegar a mi meta. A mis abuelos Eligio y Mercedes por ser mis mayor inspiración desde el inicio de esta bella profesión y convertirme en una gran ingeniera, al igual gracias a mi hermano Saul por siempre apoyarme y creer en mí.

A mi mejor amiga, Monserrat Arenas que siempre ha estado presente, por motivarme y apoyarme a seguir adelante a pesar de las dificultades. Gracias por celebrar cada pequeño logro como si fuera tuyo, alegrarte por cada cosa nueva que aprendía y siempre estar cuando más te necesité, siempre serás ese curita a mi corazón. Esta tesis es tanto tuya como mía.

También dedico esta tesis a quien formó parte de mi vida y ya no está, porque de alguna u otra manera, también me impulsó a luchar por todo aquello que quiera lograr, por hacer que creyera en mí cuando ni yo lo hacía y el no darme por vencida, por ser ese momento de felicidad y paz cuando las cosas se ponían difíciles, gracias de todo corazón porque en su momento creyó en mí.

A mi director de tesis Dr. Sergio Rubén Pérez Ríos que además de su gran apoyo y paciencia para enseñarme, me dio muchas motivaciones para seguir adelante y se ha convertido en un gran amigo, muchas gracias por su valioso tiempo.

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAP) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por haberme brindado la formación académica, los recursos y el acompañamiento y a cada docente e investigador que formó parte de este proceso.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRAC</b> .....	2
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	4
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>2.1. Eficiencia de los óxidos de hierro a escala nanométrica</b> .....	6
<b>2.2. Impacto en la fotosíntesis y pigmentos</b> .....	6
<b>2.3. Elicitación de metabolitos secundarios (fenoles y antocianinas)</b> .....	6
<b>2.4. Aplicaciones específicas en berries y arándanos</b> .....	6
<b>3. MARCO TEORICO</b> .....	7
<b>3.1. Descripción taxonómica del arándano var. ojo de conejo</b> .....	7
<b>3.2. Estados fenológicos en arándano var. ojo de conejo</b> .....	7
<b>3.3. Fisiología en flores</b> .....	9
<b>3.4. Fisiología en frutos</b> .....	10
<b>3.4.1. Fisiología del desarrollo y maduración del fruto</b> .....	11
<b>3.4.2. Cambios fisiológicos y acumulación de antocianinas</b> .....	11
<b>3.4.3. Metabolismo de carbohidratos y ácidos orgánicos</b> .....	11
<b>3.4.4. Firmeza y pared celular</b> .....	11
<b>3.4.5. Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante</b> .....	12
<b>3.5. Importancia del hierro en las plantas</b> .....	12
<b>3.5.1. Importancia del hierro en el metabolismo vegetal</b> .....	12
<b>3.5.2. Función en la fotosíntesis y síntesis de clorofila</b> .....	13
<b>3.5.3. Sistema de óxido-reducción y defensas antioxidante</b> .....	13
<b>3.5.4. El hierro y la calidad de fruto</b> .....	13
<b>3.5.5. Nanopartículas de hierro como alternativa nutricional</b> .....	13
<b>3.6. Nanotecnología</b> .....	14
<b>3.6.1. Fundamentos de la nanotecnologías y las nanopartículas</b> .....	14
<b>3.6.2. Propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas</b> .....	14
<b>3.6.3. Clasificación de las nanopartículas</b> .....	14

3.6.4.	Interacción de las NPs con los sistemas vegetales.....	15
3.7.	Nanotecnología aplicadas en la agricultura .....	15
3.7.1.	Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.....	15
3.7.2.	Nanofertilizantes y eficiencia en el uso de nutrientes.....	15
3.7.3.	Mitigación de estrés abiótico mediante nanopartículas .....	15
3.7.4.	Biofortificación y mejora de la calidad de fruto .....	16
3.7.5.	Aplicación de nanopartículas en cultivos agrícolas.....	16
3.8.	Nanopartículas de óxido de hierro.....	18
3.8.1.	Mecanismos de acción en la planta .....	18
3.9.	Ventajas frente a insumos convencionales.....	19
4.	JUSTIFICACIÓN.....	19
5.	HIPÓTESIS.....	20
6.	OBJETIVOS.....	20
6.1.	Objetivo general .....	20
6.2.	Objetivos específicos .....	20
7.	MATERIALES Y METODOS .....	21
7.1.	Descripción general del estudio.....	21
7.2.	Manejo agronómico.....	22
7.2.1.	Poda en arándano .....	22
7.2.2.	Control de plagas en arándano .....	23
7.3.	Preparación de nanopartículas y su aplicación .....	24
7.3.1.	Aplicación de nanopartículas .....	25
7.4.	Parámetros medidos en planta de arándano .....	27
7.4.1.	Clorofila en las hojas.....	27
7.4.2.	Suelo .....	28
7.4.3.	Recolección de fruto.....	28
7.5.	Parámetros medidos en el fruto de arándano.....	29
7.5.1.	Diámetro y peso fresco de fruto .....	29
7.5.2.	Cortes en fruto de arándano.....	30
7.5.3.	Molido de fruto .....	32

7.5.4. °Brix.....	32
7.5.5. Acidez titulable.....	34
7.5.6. Cuantificación de Fenoles.....	35
7.5.7. Cuantificación de Flavonoides .....	35
7.5.8. Actividad antioxidante .....	35
7.5.9. Pruebas de inhibición antimicrobianas con medio envenenado .	37
8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....	40
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
10. CONCLUSIONES .....	63

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**NPs** nanopartículas

**NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** nanopartículas de óxido de hierro

**SPAD** Soil and plant analysis development

**POX** peroxidasa

**CAT** catalasa

**EROs** especies reactivas de oxígeno

**NPs** nanopartículas

**CPT** contenido de polifenoles

**CAT** capacidad antioxidante total

**SOD** superóxido dismutasa

**GSH-Px** glutatión peroxidasa

**HCl** cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico

**NaOH** hidróxido de sodio

**AT** acidez titulable

**SST** sólidos solubles totales

**DPPH** 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo

**ABTS** ácido 2,2'-azino-bis(etilbenzotiazolina-6-sulfónico)

**PF** peso fresco

**PS** peso seco

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Crecimiento vegetativo de arándano var. ojo de conejo. ....	8
<b>Figura 2:</b> Crecimiento reproductivo en cultivo de arándano. ....	9
<b>Figura 3:</b> Floración en plantas de arándano.....	10
<b>Figura 4:</b> Frutos en planta de arándano recubierto con Bloom.....	12
<b>Figura 5:</b> Cultivo de arándano establecido en el área experimental.. ....	21
<b>Figura 6:</b> Fertilización inicial en cultivo de arándano. ....	22
<b>Figura 7:</b> Poda de formación en arándano. ....	23
<b>Figura 8:</b> Araña roja ( <i>Tetranychus urticae</i> ) en cultivo de arándano. ....	24
<b>Figura 9:</b> Solución de nanopartículas a 50, 100 y 200 ppm.. ....	25
<b>Figura 10:</b> Aplicación de nanopartículas en cultivo de arándano.. ....	27
<b>Figura 11:</b> Análisis en suelo del cultivo arándano.....	28
<b>Figura 12:</b> Fruto de arándano maduro, listo para su recolección. ....	29
<b>Figura 13:</b> Medición en frutos de arándano.....	30
<b>Figura 14:</b> Cortes en fruto de arándano.....	31
<b>Figura 15:</b> Frutos de arándano en estufa para su disecación. ....	31
<b>Figura 16:</b> Fruto de arándano (seco) molido ..... 32	32
<b>Figura 17:</b> Medición de °Brix en jugo de arándano. ....	33
<b>Figura 18:</b> Acidez titulable con jugo de arándano. ....	34
<b>Figura 19:</b> Cajas Petri por medio envenenado. ....	39
<b>Figura 20:</b> Parámetros agronómicos medidos en suelo.....	42
<b>Figura 21:</b> Parámetros agronómicos medidos en planta.....	45
<b>Figura 22:</b> Parámetros agronómicos medidos en fruto.....	47
<b>Figura 23:</b> Parámetro fisicoquímico medido en fruto ..... 48	48
<b>Figura 24:</b> Tipos de ácidos en el jugo de arándano ..... 51	51
<b>Figura 25:</b> Contenido de fenoles y flavonoides en fruto ..... 53	53
<b>Figura 26:</b> Actividad antioxidante de frutos mediante DPPH y ABTS ..... 55	55
<b>Figura 27:</b> Crecimiento micelar de <i>Fusarium</i> spp. en pruebas de inhibición. ....	58
<b>Figura 28:</b> Crecimiento micelar de <i>Botrytis cinerea</i> en pruebas de inhibición ..... 61	61

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Cultivos agrícolas con aplicación de nanopartículas metálicas y su respuesta en la planta.....	16
<b>Tabla 2:</b> Diseño para la aplicación de nanopartículas, expone la manera en la que se aplicaron las nanopartículas de acuerdo con la distribución del experimento, así como la simbología de acuerdo con los tratamientos.....	25
<b>Tabla 3:</b> Acidez titulable, así como los tipos de ácidos contenido en jugo de arándano. ....	50

## RESUMEN

La producción de arándano (*Vaccinium spp.*) ha experimentado un crecimiento acelerado debido a la alta demanda de frutos con alto valor funcional, sin embargo, la sostenibilidad de este cultivo se enfrenta a retos nutricionales, entre ellos la asimilación de micronutrientes. Las nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  surgen como una herramienta prometedora debido a la estabilidad química superior y la biocompatibilidad. En esta investigación se evaluó el impacto de la aplicación foliar de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el inicio de la etapa de floración del cultivo. Se implementó un diseño completamente al azar con 4 tratamientos: T0 (control), T50 (dosis a 50 ppm), T100 (dosis a 100 ppm) y T200 (dosis a 200 ppm). A nivel fisiológico, los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos; el tratamiento T200 funcionó de manera superior, actuando directamente sobre el aparato fotosintético de la planta al elevar significativamente las unidades SPAD y la eficiencia del transporte de electrones. Esto se tradujo en un crecimiento vegetativo más robusto, con un aumento medible en comparación con el control (T0). En el fruto, las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (nanopartículas de óxido de hierro) funcionaron como elicitores abióticos, provocando una respuesta metabólica que incrementó en el fruto el contenido de sólidos solubles totales ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) y la síntesis de compuestos fenólicos, por lo que no solo mejoró la capacidad antioxidante del fruto, sino que favorece su estructura celular para resistir a estrés postcosecha. Los extractos de los frutos con fines fitopatológicos en el tratamiento control del hongo *Botrytis cinerea* se desarrolló de forma agresiva alcanzando un diámetro micelar de 80 mm, a lo contrario, el tratamiento T200 inhibió el crecimiento del patógeno a niveles inferiores a 10 mm, seguido por el tratamiento T100, respecto al tratamiento T50 no hubo tanta diferencia en comparación con el control. Con respecto a la inhibición contra el hongo *Fusarium spp.*, tuvo un comportamiento similar de acuerdo a lo anterior. La aplicación de 200 ppm de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  fue el tratamiento más efectivo, superando significativamente al control. Se concluye que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a la mayor concentración evaluada en este trabajo tiene efectos positivos sobre los parámetros agronómicos de la planta y el contenido de sólidos solubles totales, acidez titulable,

actividad antioxidante y actividad inhibidora en el fruto de arándano, representando una alternativa viable para mejorar la eficiencia productiva en este cultivo.

Palabras clave: Nanopartículas de óxido de hierro (NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), *Vaccinium virgatum*, elíctor, capacidad antioxidante, actividad antifúngica.

## **ABSTRAC**

Blueberry (*Vaccinium* spp.) production has experienced rapid growth due to high demand for fruits with high functional value. However, the sustainability of this crop faces nutritional challenges, including micronutrient assimilation.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles have emerged as a promising tool due to their superior chemical stability and biocompatibility. This research evaluated the impact of foliar application of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  at the beginning of the flowering stage of the crop. A completely randomized design was implemented with four treatments: T0 (control), T50 (50 ppm dose), T100 (100 ppm dose), and T200 (200 ppm dose). At the physiological level, the results showed significant differences between treatments; treatment T200 performed superiorly, acting directly on the plant's photosynthetic apparatus by significantly increasing SPAD units and electron transport efficiency. This resulted in more robust vegetative growth, with a measurable increase compared to the control (T0). In the fruit,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  NPs (iron oxide nanoparticles) acted as abiotic elicitors, triggering a metabolic response that increased the total soluble solids content (°Brix) and the synthesis of phenolic compounds. This not only improved the fruit's antioxidant capacity but also enhanced its cellular structure to withstand post-harvest stress. Fruit extracts used for phytopathogenic purposes in the control treatment for the fungus *Botrytis cinerea* showed aggressive growth, reaching a mycelial diameter of 80 mm. In contrast, treatment T200 inhibited pathogen growth to levels below 10 mm, followed by treatment T100. There was no significant difference between treatment T50 and the control. Regarding inhibition against the fungus *Fusarium* spp., the results were like those described above. The application of 200 ppm of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles was the most effective treatment, significantly outperforming the control. It is concluded that  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles at the highest

concentration evaluated in this study have positive effects on the plant's agronomic parameters and on the total soluble solids content, titratable acidity, antioxidant activity, and inhibitory activity in the blueberry fruit, representing a viable alternative to improve the productive efficiency of this crop.

Keywords: Iron oxide nanoparticles ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles), *Vaccinium virgatum*, elicitor, antioxidant capacity, antifungal activity.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo del arándano (*Vaccinium spp.*) ha cobrado considerable importancia en los últimos años debido a la demanda internacional de sus propiedades nutricionales y beneficios para la salud humana. Entre las variedades cultivadas, *Vaccinium virgatum* (comúnmente conocido como “ojo de conejo”) se encuentra en peligro de extinción a pesar de su adaptación a climas cálidos y su potencial productivo. Por lo que, uno de los retos que enfrentan los productores es lograr una calidad optima del fruto, especialmente en cuanto a sus propiedades organolépticas, esenciales para su aceptación en el mercado (González et al., 2021).

El *Vaccinium virgatum* es un género silvestre de origen estadounidense, que se encuentra principalmente en California, Georgia, Alabama, Arkansas y Florida. Estos grandes arbustos se cultivaron por primera vez a finales del siglo XIX en el sur de Estados Unidos (Moore, 1994). Debido a su origen, ofrece mayor tolerancia a los cultivos sin comprometer su sensibilidad a la humedad, y también se recomienda para el cultivo en invernaderos (González et al., 2021).

El uso de tecnologías emergentes, como las nanopartículas, en la agricultura ha generado interés debido a su capacidad para mejorar la eficiencia de la absorción de nutrientes y estimular los procesos fisiológicos de las plantas. Las nanopartículas de  $Fe_2O_3$  tienen efectos positivos en el metabolismo vegetal, incluyendo parámetros como el desarrollo floral, la producción de frutos y las características sensoriales. Sin embargo, los estudios sobre estos efectos en cultivos específicos como este son limitados, especialmente para la variedad ojo de conejo o rabbiteye (Morales et al., 2022).

Esta investigación se centra en la evaluación de la aplicación de nanopartículas de óxido de hierro durante la etapa fenológica de floración en el cultivo arándano (*Vaccinium virgatum*) y su efecto en la calidad del fruto, con la finalidad de aportar un mayor conocimiento acerca del uso de las nanopartículas en la agricultura, su efecto en la mejora productiva y calidad del fruto en el cultivo de arándano.

## 2. ANTECEDENTES

La producción mundial de arándano ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, consolidándose como uno de los cultivos frutícolas con mayor valor económico y comercial a nivel internacional. En 2024, la producción global de arándano alcanzó aproximadamente 1,779,545 toneladas, concentrándose principalmente en un grupo reducido de países que representa cerca del 88% del total mundial (Agraria, 2025).

Entre los principales países productores se encuentran China, que lidera la producción mundial con aproximadamente 500,500 toneladas, seguido por Estados Unidos con cerca de 300,000 toneladas y Perú con cerca de 250,000 toneladas. Estos países concentran no solo el mayor volumen de producción, sino también la mayor participación en los mercados internacionales de exportación (Agraria, 2025).

México se ha posicionado como un productor relevante de arándano a nivel internacional. De acuerdo con los reportes oficiales, el país ocupa el sexto lugar mundial en producción, con un volumen estimado de 73,500 toneladas, y una orientación predominante exportadora, con proyecciones cercanas a 70,000 toneladas destinadas al mercado internacional, principalmente hacia Estados Unidos (USDA, 2025).

En nuestro país, desde la perspectiva económica, el cultivo de arándano representa una fuente significativa de ingresos para las economías regionales y el sector agrícola nacional, Michoacán ha encabezado el valor de la producción nacional, concentrando alrededor de 34.5% del valor económico total del arándano en México, seguido por Jalisco y Baja California, lo que evidencia la importancia del cultivo no solo en términos productivos, sino también en Generación de ingresos monetarios y desarrollo regional (ProducePay, 2022).

El consumo *per cápita* de arándano en México es bajo, estimando entre 60 y 70 gramos anuales por persona hacia 2023-2024. El consumo doméstico es limitado debido a que se le percibe como un producto de alto precio y “lujo” para gran parte

de la población, aunque con una tendencia a la alza debido a la creciente conciencia sobre los beneficios a la salud (AgTech América, 2024).

### **2.1. Eficiencia de los óxidos de hierro a escala nanométrica**

A diferencia de las sales de hierro convencional (como el sulfato ferroso  $\text{FeSO}_4$ ), los óxidos de hierro a escala nanométrica presentan una estabilidad química superior y una mayor biocompatibilidad. Jalil et al. (2024) señalan que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , particularmente en sus formas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y hematita ( $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), actúan como vehículos que liberan iones de hierro de manera gradual, evitando la toxicidad por exceso y la lixiviación en el suelo. Este suministro sostenido es crítico para procesos de alta demanda energética como la floración y el cuajado de fruto.

### **2.2. Impacto en la fotosíntesis y pigmentos**

Investigaciones recientes han demostrado que el tratamiento con óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nanométrico tiene un efecto directo sobre el aparato fotosintético. Tripathi et al. (2022) observaron que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aplicadas de forma foliar incrementan significativamente la síntesis de clorofila y la tasa de transporte de electrones en el cloroplasto. Para el arándano, esto representa un aumento en la producción de fotoasimilados (azúcares) que posteriormente se translocan hacia las bayas durante su maduración.

### **2.3. Elicitación de metabolitos secundarios (fenoles y antocianinas)**

Soliman, M., et al. (2023) reportaron que las exposiciones a óxido de hierro nanométricos inducen un ligero estrés oxidativo controlado en la planta, lo cual activa las vías de los fenilpropanoides. Como resultado las plantas incrementan la síntesis de compuestos fenólicos y antocianinas para proteger sus tejidos. Este mecanismo explica porque los frutos tratados con estas nanopartículas suelen presentar mayores capacidades antioxidantes y colores más intensos.

### **2.4. Aplicaciones específicas en berries y arándanos**

En el estudio del género *Vaccinium*, Morales et al. (2022) evaluaron el uso de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para corregir la clorosis férrica, encontrando que las dosis nanométricas son hasta 10 veces más eficientes que los quelatos sintéticos (EDTA-Fe). Sus hallazgos subrayan que el uso de óxidos de hierro mejora el “índice de madurez” (relación

grados brix/acidez), lo que se traduce en un fruto más dulce y comercialmente atractivo.

A pesar de los avances, existe poca información específica sobre la dosis óptima de nanopartículas de óxido de hierro en el cultivo de arándano var. ojo de conejo bajo las condiciones de este estudio, lo que justifica el desarrollo de la presente investigación.

### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1. Descripción taxonómica del arándano var. ojo de conejo**

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Ericales*

Familia: *Ericaceae*

Género: *Vaccinium*

Especie: *Vaccinium virgatum*

#### **3.2. Estados fenológicos en arándano var. ojo de conejo**

Las puntas verdes (Figura 1, V1) es el primer signo visible de que la latencia ha terminado. Las escamas de las yemas vegetativas se separan debido el hinchamiento del tejido interno, dejando ver una pequeña porción de tejido verde.

Para la brotación las hojas primarias (Figura 1, V2) comienzan a emerger y a separarse de las yemas, las hojas todavía están pegadas y pueden presentar tonalidades rojizas debido a la presencia de antocianinas protectoras contra el frío o la radicación.

Los brotes nuevos (Figura 1, V3) se caracterizan por la expansión total de las hojas y el crecimiento longitudinal del eje brote. Las hojas pasan de ser fuentes “sumideros” (consumen energía) a ser fuentes “protectoras” (a generar azúcares).

Las ramas nuevas (Figura 1, V4) es la fase de la consolidación, el brote verde comienza un proceso de lignificación y se establece como una rama nueva estructural para la planta. Las hojas de estas ramas son las responsables de producir los fotosintatos que se moverán hacia los frutos.

## CRECIMIENTO VEGETATIVO



**Figura 1:** Crecimiento vegetativo de arándano var. ojo de conejo. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

Las yemas florales (Figura 2, R1), que son más globosas y grandes que las vegetativas, comienzan a expandirse, las escamas protectoras se estiran y se vuelven más claras. Las escamas se separan y exponen el tejido floral, en esta etapa se pueden observar los racimos de flores agrupados (Figura 2, R2) y aún compactos, a menudo con una coloración rosácea.

El raquis (eje del racimo) (Figura 2, R3-R4) se alarga y los botones florales individuales (que parecen pequeñas campanas cerradas) se separan. Las flores se abren (Figura 2, R5) completamente adquiriendo su característica forma de campana o urceolada, es el momento de la polinización.

Tras la polinización, los pétalos se marchitan y caen, dejando el ovario fecundado que comienza a ensancharse (Figura 2, R6). El fruto crece rápidamente en tamaño, en esta fase, la baya es fotosintéticamente activa y acumula ácidos orgánicos. En el estado final (Figura 2, R7) donde ocurre el cambio de color (de verde a rosado y finalmente azul/purpura) debido a la síntesis de antocianinas (Figura 2, R8).



**Figura 2:** Crecimiento reproductivo en cultivo de arándano var. ojo de conejo. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

### 3.3. Fisiología en flores

La fisiología reproductiva del arándano var. ojo de conejo se distingue por una dinámica de floración prolongada (Figura 3) y una alta dependencia de la polinización cruzada. Estudios recientes en cultivares de esta especie demuestran que la receptividad del estigma y la viabilidad del polen son factores críticos que limitan el cuajado, especialmente bajo condiciones de fluctuación térmica (Dantas et al. 2021).

La transición fisiológica de la yema floral está regulada por la acumulación de frío, que desencadena cambios en el equilibrio hormonal (ácido abscísico/giberelinas). En *V. virgatum*, se ha observado que temperaturas inadecuadas durante el reposo

invernal afectan la morfología interna de la flor, reduciendo la calidad del polen y la longevidad del óvulo (Fadón et al., 2020)

La var. ojo de conejo presenta mecanismos fisiológicos de autoincompatibilidad más severos que el arándano Highbush. La fisiología del tubo polínico muestra un crecimiento inhibido en el tejido estilar cuando se trata de polen propio, lo que requiere la presencia de polinizadores bióticos y cultivares compatibles para asegurar la fertilización (Nunes-Lemos et al., 2020)



*Figura 3: Floración en plantas de arándano. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

### **3.4. Fisiología en frutos**

#### **3.4.1. Fisiología del desarrollo y maduración del fruto**

El desarrollo del fruto en el arándano var. ojo de conejo (Figura 4) es un proceso complejo que sigue una curva de crecimiento doble sigmoidea, caracterizada por dos fases de crecimiento rápido separadas por una fase de endurecimiento del endocarpio o latencia aparente (Sganzerla et al., 2021).

#### **3.4.2. Cambios fisiológicos y acumulación de antocianinas**

La transición de la etapa de ojo de conejo (fruto rosado) a la madurez total (fruto azul) requiere una reprogramación metabólica intensa. Durante este periodo, se detiene la síntesis de clorofila y se activa la vía de los fenilpropanoides para la síntesis de antocianinas, principalmente delphinidina y malvidina. Esta acumulación de pigmentos no solo define el color, sino que actúa como un sistema de protección antioxidante frente al estrés oxidativo (Gaviria-Montoya et al., 2022).

#### **3.4.3. Metabolismo de carbohidratos y ácidos orgánicos**

La calidad organoléptica del fruto está determinada por el equilibrio entre azúcares (fructuosa y glucosa) y ácidos solubles (cítrico, málico y tartárico) que se transportan desde las hojas hacia el fruto vía floema. Paralelamente, ocurre una degradación de ácidos orgánicos (ácido cítrico y málico), lo que eleva el índice de madurez (sólidos solubles totales/acidez titulable). Estudios recientes destacan que la eficiencia en este transporte de azúcares puede ser optimizada mediante la disponibilidad de micronutrientes esenciales que actúan como cofactores enzimáticos (Shi et al., 2022).

#### **3.4.4. Firmeza y pared celular**

A diferencia de otras especies de arándano, el ojo de conejo posee una fisiología de pared celular que otorga una mayor firmeza. Durante la maduración, la actividad de enzimas como la poligalacturonasa y la pectinmetilesterasa degrada las pectinas de la laminilla media. En otras variedades como *V. virgatum* este proceso es más lento, permitiendo una mayor vida poscosecha (Sganzerla et al., 2021). La integridad de estas membranas depende en gran medida del estatus mineral de la planta.

### 3.4.5. Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante

La síntesis de compuestos fenólicos totales alcanza su punto máximo en etapas tempranas y tiende a estabilizarse o disminuir ligeramente durante la maduración completa. No obstante, la actividad antioxidante total se mantiene elevada debido a la alta concentración de flavonoides. Estos metabolitos secundarios son sensibles al hierro, que participa en los sistemas de transporte de electrones y en la síntesis de precursores fenólicos (Gaviria-Montoya et al., 2022; Silva et al., 2021).



*Figura 4: Frutos en planta de arándano recubierto con Bloom. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

## 3.5. Importancia del hierro en las plantas

### 3.5.1. Importancia del hierro en el metabolismo vegetal

El hierro es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, participando como cofactor en una amplia gama de procesos enzimáticos metabólicos. Aunque es abundante en la corteza terrestre, su baja biodisponibilidad

en suelos con pH inadecuado representa uno de los mayores retos para cultivos como el arándano (Kobayashi et al., 2022).

### **3.5.2. Función en la fotosíntesis y síntesis de clorofila**

Aunque el hierro no es un componente estructural de la molécula de clorofila, es indispensable para la biosíntesis. Actúa en la cadena de transporte de electrones de los cloroplastos, formando parte de citocromos y proteínas de hierro-azufre (Fe-S) como la ferredoxina. Una deficiencia de Fe interrumpe la estructura de los tilacoides, lo que reduce la tasa fotosintética y, en consecuencia, la producción de fotoasimilados (carbohidratos) que posteriormente se transportarán al fruto (Tripathi et al., 2022).

### **3.5.3. Sistema de óxido-reducción y defensas antioxidante**

El hierro es el corazón catalítico de enzimas antioxidantes clave, como la peroxidasa (POD) y la catalasa (CAT). Estas enzimas son responsables de neutralizar las especies reactivas de oxígeno (ERO) reducidas durante el estrés ambiental. Estudios recientes sugieren que una nutrición óptima con Fe mejora la capacidad de la planta para sintetizar metabolitos secundarios, incluidos los compuestos fenólicos, que funcionan como una segunda línea de defensa antioxidante (Raza et al., 2022).

### **3.5.4. El hierro y la calidad de fruto**

La disponibilidad de hierro influye directamente a los atributos de calidad del fruto, como el contenido en los atributos de calidad del fruto, como el contenido de azúcares totales y antocianinas. Al participar en el metabolismo energético (respiración celular vía citocromos en la mitocondria), el Fe regula la fuera del “sumidero” del fruto, es decir, su capacidad para atraer azúcares desde las hojas. La suplementación con hierro, especialmente a través de nanomateriales, ha demostrado incrementar la actividad enzimática relacionada con la síntesis de flavonoides en especies del género *Vaccinium* (El-Jendoubi et al., 2024).

### **3.5.5. Nanopartículas de hierro como alternativa nutricional**

A diferencia de los fertilizantes convencionales (quelatos y sales), las nanopartículas de hierro ofrecen una liberación controlada y una mayor capacidad

de penetración en los tejidos vegetales debido a su alta relación superficie-volumen. Las Fe-NPs pueden ser absorbidas por las raíces o vía foliar, minimizando la precipitación del hierro en el suelo y optimizando su transporte hacia los órganos de demanda, como las flores y frutos en desarrollo (Zahra et al., 2021 ; Tripathi et al., 2022).

### **3.6. Nanotecnología**

#### **3.6.1. Fundamentos de la nanotecnologías y las nanopartículas**

Las nanotecnología se definen como la manipulación, el diseño y la caracterización de materiales que poseen al menos una dimensión en la escala de 1 a 100 nanómetros (nm). A esta escala, las propiedades físicas y químicas de la materia cambian drásticamente en comparación con sus homólogos macroscópicos, debido a efectos de confinamiento cuántico y a una elevada energía superficial (Khan et al., 2022).

#### **3.6.2. Propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas**

La principal ventaja de las nanopartículas (NPs) radica en su alta relación superficie-volumen. A medida que el tamaño de la partícula disminuye, el número de átomos expuestos en la superficie aumenta exponencialmente, lo que reduce su reactividad química, su solubilidad y su capacidad de interactuar con sistemas biológicos como las membranas celulares de las plantas (Kandhol et al., 2022).

#### **3.6.3. Clasificación de las nanopartículas**

Existen diversas categorías de nanomateriales, pero para fines agrícolas, las más relevantes son:

- Nanopartículas orgánicas: Como los liposomas y polímeros biodegradables, utilizados para la liberación controlada de fármacos o nutrientes.
- Nanopartículas inorgánicas (metálicas): Incluyen nanopartículas de plata (Ag), oro (Au) y, de especial interés para esta investigación, nanopartículas de hierro (Fe) y sus óxidos. Estas se caracterizan por sus propiedades magnéticas, catalíticas y su capacidad de actuar como fuentes de micronutrientes de alta eficiencia (Singh et al., 2024).

#### **3.6.4. Interacción de las NPs con los sistemas vegetales**

Debido a su tamaño nanométrico, estas partículas pueden atravesar barreras biológicas que los nutrientes convencionales no pueden. Las NPs pueden ingresar a las plantas a través de los estomas en las hojas o mediante las paredes celulares de las raíces, utilizando vías apoplásticas o simpásticas. Una vez dentro, las NPs pueden ser transportadas a través del xilema o floema hacia órganos sumidero como los frutos, incluyendo en el metabolismo secundario y la producción de compuestos como fenoles y azúcares (Usman et al., 2020; Hussain et al., 2023).

### **3.7. Nanotecnología aplicadas en la agricultura**

#### **3.7.1. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura**

La integración de la nanotecnología en el sector agrícola ha dado lugar a la “agricultura de precisión a escalas nanométricas”, cuyo objetivo es maximizar la eficiencia en el uso de insumos a base de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y minimizar la eficiencia en el uso de insumos químicos peligrosos, así minimizar el impacto ambiental. Esta disciplina se centra en el desarrollo de nanoagroquímicos que presentan una mayor biodisponibilidad y una liberación controlada de nutrientes (Kah et al., 2021).

#### **3.7.2. Nanofertilizantes y eficiencia en el uso de nutrientes**

A diferencia de los fertilizantes convencionales, donde hasta el 70% de los nutrientes se pierde por lixiviación o fijación en el suelo, las nanofertilizantes permiten una entrega dirigida. Debido a su tamaño y carga superficial, las nanopartículas pueden penetrar las cutículas foliares y las membranas celulares con mayor facilidad, incrementando la eficiencia en el uso de nutrientes (NUE). En cultivos acidófilos como el arándano, el uso de nanofertilizantes de hierro evita la precipitación del mineral en suelos de pH subóptimo (Adeel et al., 2021) .

#### **3.7.3. Mitigación de estrés abiótico mediante nanopartículas**

Las nanopartículas metálicas particularmente las de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), actúan como bioestimulante que activan los sistemas de defensa de la planta. Se ha demostrado que la aplicación de nanomateriales de hierro regula la expresión de genes relacionados con la respuesta de estrés hídrico y salino, mejorando la

estabilidad de las membranas celulares y el contenido de clorofila bajo condiciones adversas (Zulfiqar et al., 2020)

#### **3.7.4. Biofortificación y mejora de la calidad de fruto**

Una de las aplicaciones más relevantes para esta investigación es el uso de nanopartículas para mejorar el perfil fitoquímico de los frutos. Las NPs de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  intervienen en la vía de los fenilpropanoides, estimulando la producción de metabolitos secundarios. Estudios recientes indican que la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de hierro incrementa significativamente la concentración de azúcares solubles y compuestos fenólicos (antocianinas y flavonoides) en bayas, lo que mejora no solo el valor nutricional, sino también la vida de anaquel del fruto (Jaili et al., 2024; Zulfiqar et al., 2020).

Por ejemplo, la fresa (*fragaria x ananassa*), la aplicación de nanopartículas de hierro durante la floración incrementó la floración dando un mayor rendimiento y mejoró su perfil organoléptico, en comparación con los tratamientos convencionales (Servin et al., 2015)

#### **3.7.5. Aplicación de nanopartículas en cultivos agrícolas**

El uso de nanopartículas metálicas en la agricultura ha cobrado importancia debido a su potencial para mejorar la producción y la calidad de los cultivos. Investigaciones demuestran que la utilización de nanomateriales como es el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), el óxido de zinc (ZnO) y la plata (Ag), pueden influir positivamente en el desarrollo de diversas especies vegetales.

Investigaciones recientes han demostrado que la aplicación foliar de nanopartículas metálicas, como el hierro, tienen efectos positivos en la calidad y cantidad de la producción de frutos. En arándano, aunque estudios aún son incipientes, se ha observado que los tratamientos con nanopartículas pueden influir en la producción de antocianinas y la firmeza del fruto, dos indicadores clave de la calidad comercial.

**Tabla 1:** Cultivos agrícolas con aplicación de nanopartículas metálicas y su respuesta en la planta.

<b>Cultivo</b>	<b>Tipo de nanopartícula</b>	<b>Dosis</b>	<b>Etapa de aplicación</b>	<b>Resultados obtenidos</b>	<b>Referencias (APA 7)</b>
Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	ZnO (óxido de zinc)	50, 100 y 250 mg/L	Floración	Mayor calidad de flores, mayor cuajado y aumento del rendimiento del fruto	(Raliya & Tarafdar, 2013)
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de hierro)	25-100 mg/L	Floración	Aumento de biomasa, clorofila y rendimiento del grano	(Dimkpa et al., 2021)
Fresa ( <i>Fragaria x ananassa</i> )	Ag (plata)	80, 120, 160 mg/L	Floración	Mejora la firmeza, color y contenido de azúcares del fruto	(Tripathi et al., 2017)
Uva ( <i>Vitis vinifera</i> )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de hierro)	25-150 mg/L	Floración temprana	Mayor tamaño del fruto y mayor contenido de sólidos solubles	(Ghasemi et al., 2020)
Maíz ( <i>Zea mays</i> )	CuO (óxido de cobre)	50-200 mg/L	Prefloración	Mejor crecimiento radicular y formación de inflorescencia	(Espinosa-Reyes et al., 2016)
Goji berry ( <i>Lycium chinense</i> )	Fe (nanopartículas de hierro)	100-150 mg/L	Foliar semanal iniciando al comienzo de la floración	Incremento del peso de fruto y mejoras fisiológicas; estudio de campo en árboles adultos.	(Baziar et al., 2023.)
Fresa ( <i>Fragaria x ananassa</i> )	ZnO NPs	50-150 mg/L	Foliar en floración (y rutas de aplicación detalladas)	Mayor rendimiento, número de frutos y calidad.	(Aguilera-Leyva et al., 2023.)

Autoría propia, 2026

### **3.8. Nanopartículas de óxido de hierro**

#### **3.8.1. Mecanismos de acción en la planta**

Las nanopartículas ingresan a la planta principalmente a través de dos vías: la absorción radicular (aplicándolas directamente en el suelo) o la penetración vía foliar.

El óxido de hierro tiene la ventaja de ser magnético y generalmente más estable que el hierro elemental, pero su absorción foliar debe lidiar con su naturaleza del óxido. El mecanismo de absorción se basa en una combinación de factores físicos y químicos. En la penetración física, estas siguen dos vías de la hoja, dependiendo del tamaño, la vía estomática (ruta principal). Las nanopartículas de óxido de hierro menores a 50 nm ingresan de forma pasiva cuando los estomas están abiertos (condiciones de alta humedad), la vía cuticular (ruta alternativa): solo si la nanopartícula es menor a 5 nm se utiliza agentes humectantes y surfactantes en la formulación de la aplicación, así reduce la tensión superficial permitiendo que las NPs interactúen mejor y atraviesen la capa cerosa (Fernández y Eichert, 2019).

Una vez que las NPs de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  están dentro del apoplasto (espacio entre la célula, fuera de la membrana), el mecanismo clave para su uso por la planta es la disolución lenta, la acidificación del apoplasto, las NPs de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  quedan expuestas a un ambiente ácido (pH bajo) en la pared celular y los espacios intercelulares, esta acidez provoca que el óxido de hierro se disuelva lentamente, liberando iones de hierro que son la forma que la planta realmente puede usar. Otra alternativa es la absorción iónica: los iones de hierro liberados son inmediatamente detectados y absorbidos por las células foliares a través de transportadores específicos en la membrana plasmática (Marschner, 2012).

El hierro, por ejemplo, es esencial para la síntesis de clorofila y la función de varias enzimas redox. Las nanopartículas de hierro pueden aumentar la disponibilidad de este micronutriente, especialmente en suelos alcalinos donde el hierro convencional ( $\text{Fe}^{+3}$ ) suele precipitarse y no está disponible en la planta (Khan et al., 2022).

### **3.9. Ventajas frente a insumos convencionales**

Los fertilizantes tradicionales presentan una eficiencia relativamente baja. Por ejemplo, en el caso de nitrógeno, solo entre el 30% y el 50% de nitrógeno aplicado es realmente utilizado por el cultivo, y el resto se pierde en el medio ambiente. Por el contrario, los nanofertilizantes tienen el potencial de aumentar la eficiencia agronómica de los nutrientes gracias a su pequeño tamaño, mayor superficie y la capacidad de modificar su liberación mediante recubrimientos integrados (FAO, 2020).

También se ha demostrado que las nanopartículas sirven como transportadores de otras sustancias, como fitohormonas, enzimas o incluso agentes quelantes, lo que abre nuevas vías para el desarrollo de productos multifuncionales.

## **4. JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación se justifica por la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles que mejoren la eficiencia de la nutrición vegetal y reduzcan los impactos ambientales asociados al uso de fertilizantes convencionales. En el contexto actual, México se ha consolidado como el quinto mayor productor de arándano (*Vaccinium spp.*) a nivel mundial, con regiones clave como Jalisco, Sinaloa y Michoacán liderando la producción. Sin embargo, la competitividad del sector enfrenta desafíos críticos, como la competencia internacional y la necesidad de transitar hacia variedades como mejores rendimientos y perfiles de calidad.

El uso de nanopartículas metálicas representa una estrategia innovadora y disruptiva frente a las fuentes de hierro tradicionales. Debido a su alta disponibilidad, las NPs de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tienen la capacidad de mejorar procesos fisiológicos fundamentales en la planta, como la biosíntesis de clorofila y la eficiencia fotosintética, lo que se traduce en un desarrollo vegetativo superior.

Además, la relevancia de este estudio se extiende al ámbito de sanidad vegetal y calidad poscosecha. La investigación demuestra que las NPs de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no solo actúan como nutrientes, sino como elicitores que potencian la síntesis de metabolitos secundarios y ejerce un efecto fúngico contra patógenos.

En conclusión, este estudio no solo aporta conocimientos científicos sobre la integración nanopartícula- planta, sino que ofrece una solución tecnológica viable para fortalecer la posición de México en la industria global de las berries.

## **5. HIPÓTESIS**

La aplicación foliar de nanopartículas NPs de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en etapa fenológica de floración del cultivo del arándano *Vaccinium virgatum* en una dosis de 200 ppm y 100 ppm actúan como un elícitor eficaz que mejora los parámetros agronómicos en planta y fisicoquímicos en fruto del arándano, incluyendo simultáneamente una mayor biosíntesis de compuestos secundarios como fenoles totales, flavonoides y antocianinas así elevando la actividad antioxidante y el perfil de ácidos orgánicos del fruto, lo que resulta en una mayor capacidad de inhibición del crecimiento micelar contra fitopatógenos, en comparación con los tratamientos T50 y el Control (T0).

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1. Objetivo general**

- Evaluar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en el crecimiento, la calidad en frutos y el perfil antioxidante en plantas de arándano de la variedad “ojo de conejo” (*Vaccinium virgatum*), a través de la medición de parámetros agronómicos, sólidos solubles totales y el contenido de antioxidantes.

### **6.2. Objetivos específicos**

- Determinar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en los parámetros agronómicos de planta: diámetros de tallo, número de hojas, altura de planta, clorofila en hojas, peso y tamaño de los frutos.
- Medir el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) y acidez titulable en los frutos de arándano de las plantas tratadas y no tratadas con nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- Determinar la respuesta de los frutos de arándano de plantas tratadas con NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la concentración de antioxidantes.
- Identificar la capacidad antifúngica de los extractos de los frutos en pruebas de inhibición por medio envenenado.

## 7. MATERIALES Y METODOS

### 7.1. Descripción general del estudio

Las plantas de arándano (*Vaccinium virgatum*) se adquirieron del vivero “Las Agüitas”, ubicada en la sierra de Zacatlán Puebla, las condiciones de crecimiento de las plántulas y con las que cuenta el vivero de producción son: cubierta de plástico blanco lechoso, calibre de 800, sistema de riego por aspersión y temperaturas de entre 18 y 25°C.

El sitio experimental (Figura 5) de este estudio se localizó en el vivero del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en el municipio de Santiago Tulantepec, Hidalgo, México. El clima de la región es templado-frío, con una temperatura promedio anual de 14 °C anual. La precipitación pluvial anual varía entre 500 y 553 mm, mientras que los vientos predominantes son moderados, con un promedio anual de 4 km/s, destacándose los vientos del noreste, con una velocidad media de 29 km/h. La lluvia en la zona es moderada, con precipitaciones que oscilan entre 500 y 700 mm anuales (Ayala et al., 2013).



**Figura 5:** Cultivo de arándano establecido en el área experimental. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

## 7.2. Manejo agronómico

Las plantas en estado vegetativo y altura promedio de 80 cm, fueron trasplantadas en bolsa de 60 x 60 con un sustrato conformado por tierra agrícola, corteza de pino y tezontle, en una proporción 60-40-20% respectivamente. Adicionalmente se le agregó un kilogramo de roca fosfórica (ZEOLITECH ®) y medio kilogramo de roca de silicio (SiliFosCa®) (Figura 6).

Posteriormente todas las bolsas fueron pesadas para obtener un peso uniforme de 75 kg/bolsa.



*Figura 6: Fertilización inicial en cultivo de arándano. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

### 7.2.1. Poda en arándano

Se realizó una poda cuando la planta se encontraba en estado de dormancia (mes de diciembre). Para realizar la poda de arándanos, se utilizaron tijeras de poda, marca genérica, modelo JD-02C, de acero inoxidable, el igual que se ocupó hipoclorito de sodio para desinfectar el material y azufre para desinfectar y curar las heridas realizadas a la planta por la poda, así mismo nos ayudaría a que no

tengamos problemas fitopatogénos. Se realizó un tipo de poda de formación (Figura 7) que consiste en dejar 1 a 4 ramas equidistantes y a diferentes alturas para evitar que las ramas se rompan o que el arbusto caiga por exceso de peso.



*Figura 7: Poda de formación en arándano. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026). Autoría propia.*

### **7.2.2. Control de plagas en arándano**

Durante toda la temporada de crecimiento, nos enfrentamos a una sola plaga; araña roja (*Tetranychus urticae*) (Figura 8). Este ácaro absorbe el núcleo y los componentes celulares del tejido foliar, impidiendo su crecimiento. Posteriormente, muere, adquiriendo una apariencia mucho más pálida, parduzca o amarillentas. Para combatir esta plaga, se realizó la aplicación de insecticida/acaricida AGRY BEST RED®, es un producto biológico a base de aminoácidos, extracto de neem, extracto vegetal y diluyentes. Las aplicaciones se realizaron cada 7 días, un vez que el control fue efectivo, las aplicaciones se comenzaron a realizar cada 20 días.



**Figura 8:** Araña roja (*Tetranychus urticae*) en cultivo de arándano. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

### **7.3. Preparación de nanopartículas y su aplicación**

Para la preparación, se utilizó nanopartícula de Óxido de Hierro (a 20 nm), se encontraban en presentación sólido (polvo). La preparación para atender las dosis de tratamiento fue: 0 ppm (Control), 50 ppm, 100 ppm y 200 ppm, previo a la aplicación se realizó una prueba para estimar el volumen estandarizado de producto aplicado, donde se tomó un atomizador con agua potable, se asperjó sobre la planta cubriendo principalmente hojas, nuevos brotes y yemas florales, se contaron el número aproximado de aspersiones y esas mismas se pusieron en un vaso de precipitado para medir el volumen de agua final por plata.

100 mL de cada solución (50, 100 y 200 ppm) fueron sonicados por separado a temperatura ambiente durante 20 minutos en sonicador Branson Ultrasonic Corporation, modelo 3510.



*Figura 9: Solución de nanopartículas a 50, 100 y 200 ppm. Laboratorios IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

### **7.3.1. Aplicación de nanopartículas**

Para realizar las aplicaciones se tomaron bloques al azar (0 ppm, 50 ppm, 100 ppm y 200 ppm) (tabla 2) que se delimitaron físicamente para evitar la contaminación cruzada (Figura 10)

**Tabla 2:** Diseño para la aplicación de nanopartículas, expone la manera en la que se aplicaron las nanopartículas de acuerdo con la distribución del experimento, así como la simbología de acuerdo con los tratamientos.

Planta 1	Planta 1	P A S I L	Planta 1	Planta 1	P A S I L	Planta 1	Planta 1	P A S I L	Planta 1	Planta 1	P A S I L	Planta 1	Planta 1	P A S I L
Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2	
Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3	
Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4	
Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5	
Planta 1	Planta 1	L O	Planta 1	Planta 1	L O	Planta 1	Planta 1	L O	Planta 1	Planta 1	L O	Planta 1	Planta 1	L O
Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2		Planta 2	Planta 2	
Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3		Planta 3	Planta 3	
Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4		Planta 4	Planta 4	
Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5		Planta 5	Planta 5	

Simbología	
	dosis a 0 ppm Control
	dosis a 50 ppm
	dosis a 100 ppm
	dosis a 200 ppm



**Figura 10:** Aplicación de nanopartículas en cultivo de arándano. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

Se monitoreó la planta desde el inicio de la floración hasta el punto de maduración, fueron alrededor de 140 a 160 días, una vez obtenido el fruto se procedió a pesar y medir los diámetros de cada fruto.

#### **7.4. Parámetros medidos en planta de arándano**

##### **7.4.1. Clorofila en las hojas**

Se utilizó un medidor de clorofila SPAD.502 (Konica Minolta), que mide la transmitancia de la luz roja (650 nm) y la luz infrarroja cercana (940 nm) a través de los tejidos foliares y genera un valor en unidades SPAD, que relaciona con el contenido de clorofila. Se realizaron tres mediciones independientes en diferentes hojas y se calculó el promedio para representar el valor de clorofila por planta.

#### 7.4.2. Suelo

Se recolectaron muestras representativas de suelo a una profundidad de 20 cm, eliminando los residuos gruesos (raíces, piedras, corteza), se homogeneizaron y tamizaron para obtener partículas más pequeñas. A cada muestra de suelo se le agregó 250 ml de agua desionizada y se procedió a su filtrado. El líquido restante se empleó para su análisis (Figura 11) en un equipo previamente calibrado con una solución estándar de 150 ppm y un pH de 7. Esta prueba se realizó por triplicado.



*Figura 11: Análisis en suelo del cultivo arándano. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

#### 7.4.3. Recolección de fruto

Se recolectaron los frutos de forma manual y bajo condiciones inocuas (Figura 12) una vez recolectados se colocaron en bolsas sellables de polipropileno de la marca comercial Ziploc.



**Figura 12:** Fruto de arándano maduro, listo para su recolección. Vivero IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

## **7.5. Parámetros medidos en el fruto de arándano**

### **7.5.1. Diámetro y peso fresco de fruto**

Para determinar el diámetro del fruto en arándano (*Vaccinium virgatum*), se utilizó un calibrador digital con una precisión de  $\pm 0,01$  mm, midiendo tanto ecuatorial como polar (Figura 13), tomando tres mediciones de fruto. Para su efecto se utilizó un calibrador marca RexQualis calibres electrónicos Vernier de 6 pulgadas de acero inoxidable con pantalla LCD grande de apagado automático, con una precisión de  $\pm 0,001$  in/0,01mm.

Todos los resultados se pasaron a una hoja en Excel para después hacer nuestras gráficas y ver que tratamiento obtuvo mejores resultados.

Posteriormente de medir cada fruto, se procedió a pesarlos por cada tratamiento, para ver con cuantos kg contábamos en total, se pesaron en una balanza analítica OHAUS Adventurer Balanza – 420 gramos x 0.0001 gramos, modelo H-5276, plataforma redonda de 5.1”, a lo que obtuvimos los siguientes resultados:

tratamiento 0-T0 pesó 307.64 g, el tratamiento 1-T50 321.85 g, el tratamiento 2-T100 con 327.57 g y por último el tratamiento 3-T200 pesando 369.63 g.



*Figura 13: Medición en frutos de arándano. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

### **7.5.2. Cortes en fruto de arándano**

Los frutos de arándano fueron lavados, aireados a temperatura ambiente, troceados (Figura 15), y luego colocados en charolas de aluminio para secarse en un horno de convección formada marca Luzeren Drying Oven 250 c a 37 °C durante 7 días. La diferencia del peso inicial con el peso después del secado se utilizó



**Figura 14:** Cortes en fruto de arándano. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.



**Figura 15:** Frutos de arándano en estufa para su disección. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

Una vez transcurrido ese tiempo, se recolectaron las muestras ya secas por cada tratamiento, para posteriormente sacar el peso seco (PS), se utilizó la misma balanza que ocupamos para sacar PF, balanza analítica OHAUS Adventurer Balanza, a lo que nos arrojó los siguientes datos: tratamiento 0-T0 pesó 28.7 g, tratamiento 1-T50 pesó 31.1 g, tratamiento 2-T100 pesó 33 g y por último el tratamiento 3-T200 con un peso de 36.3 g.

### **7.5.3. Molido de fruto**

Los frutos secos fueron molidos empleando un molinillo multifuncional de alta velocidad, modelo HC-150, con una capacidad de 150 g, cuenta con una finura de molienda de 70 a 300 mallas (Figura 16).



*Figura 16: Fruto de arándano (seco) molido. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

### **7.5.4. °Brix**

Para realizar la medición de sólidos solubles totales, se ocupó el jugo de frutos frescos, para esto, se seleccionó frutos sanos, maduros y libres de daños mecánicos o fitopatógenos, se lavaron y se pusieron a secar con papel absorbente, se extrajo

el jugo de los frutos de manera manual y se guardaron en frascos color ámbar para protegerlos de la luz. Para medir el contenido de sólidos solubles totales, 1 mL del jugo de cada muestra fueron colocados en el refractómetro automático digital, marca ATAGO, modelo SMAR-1, número de serie 072323, previamente calibrado con agua destilada. La medición se realizó por triplicado.



**Figura 17:** Medición de °Brix en jugo de arándano. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.

### 7.5.5. Acidez titulable

Se preparó una concentración polvo del fruto y agua destilada, utilizando 2.5 gramos de polvo en 25 ml de agua destilada, se realizaron en matraces Erlenmeyer, a cada muestra se le agregó 3 gotas de Fenolftaleína para comenzar a titular con NaOH al 0.1N, agitando constantemente hasta percibir un cambio de color en nuestra muestra (Figura 18). Se realizaron tres repeticiones por cada uno de los tratamientos.



*Figura 18: Acidez titulable con jugo de arándano. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia.*

La acidez titulable se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Acidez titulable} = \frac{V_{\text{NaOH}} (\text{mL}) * N * \text{meq} * V_t (\text{mL})}{P_m (\text{g}) * V_a (\text{mL})} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$V_{\text{NaOH}}$ : Volumen de hidróxido de sodio consumido en la titulación

$N$ : Normalidad

$\text{meq}$ : Miliequivalentes de los ácidos

Vt: Volumen final

Pm: Peso de la muestra

Va: Volumen de la alícuotas

#### **7.5.6. Cuantificación de Fenoles**

La determinación de compuestos fenólicos totales se realizó por espectrofotometría (equipo Genesys USA 10 UV), basándose en la reacción colorimétrica de óxido-reducción según Zamora (2016) con algunas modificaciones. A 30  $\mu$ l del extracto se le agregaron 2 ml de agua destilada, 250  $\mu$ l de reactivo Folin-Ciocalteu (grado analítico), posteriormente se agregó 1 ml de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7.5% p/v y se aforó a 5 ml con agua destilada. Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 765 nm después de permanecer 1 h a temperatura ambiente y ausencia de luz. Para el cálculo de fenólicos totales se preparó una curva de calibración para ácido gálico entre 0 a 0.2 mg/mL en metanol mediante diluciones de 0, 20, 50, 70, 90, 110, 150  $\mu$ g/mL. El contenido de fenólicos se expresó en mg AGE g<sup>-1</sup> de PS (mg equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco).

#### **7.5.7. Cuantificación de Flavonoides**

Para la determinación de flavonoides se llevó a cabo por la metodología descrita por Ramos-Rendon et al. (2025). Inicialmente para la determinación de flavonoides se preparó una curva patrón utilizando una concentración de quercetina de 0.025 g en 250 mL de etanol al 80% (0.1 mg quercetina/mL etanol 80%) protegido de la luz. Posteriormente se mezclaron 50  $\mu$ l del extracto con 100  $\mu$ l de  $\text{AlCl}_3$  al 5% p/v en etanol, 100  $\mu$ l de acetato de sodio 1M y se aforó a 5 ml con metanol grado analítico (JT Baker). Los compuestos flavonoides se midieron a una longitud de onda de 425 nm después de 30 minutos de permanecer en ausencia de luz. Los resultados se calcularon utilizando una curva de calibración con quercetina con un rango de concentración de 0 a 0.6 mg/mL mediante diluciones 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mg/mL. El contenido de flavonoides se expresó en mg QE g<sup>-1</sup> de PS (mg equivalentes de quercetina por gramo de peso seco).

#### **7.5.8. Actividad antioxidante**

Para la cuantificación de los compuestos bioactivos y la evaluación del potencial antioxidante de los frutos de arándano (*Vaccinium virgatum*), se prepararon

extractos hidroalcohólicos siguiendo la metodología descrita por Palestina-López et al. (2022) y Shahidi y Ambigaipalan (2015). El tejido del fruto fue homogeneizado y extraído con una mezcla de metanol y agua, recuperando el sobrenadante tras un proceso de centrifugación para su posterior análisis.

### **1. Ensayos de actividad antioxidante por DPPH**

La capacidad antioxidante fue evaluada mediante dos mecanismos complementarios de transferencia de electrones y átomos de hidrógeno, siguiendo los protocolos estandarizados por Palestina-López et al. (2022) y Zafra-Stone et al. (2024).

La actividad antioxidante se determinó utilizando el radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo). Inicialmente se preparó una solución de DPPH con una concentración de 0.025 mg/mL y Trolox a 0.001 g/mL para realizar la curva de calibración con las siguientes concentraciones 0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 y 0.35 g/mL. Posteriormente se preparó una solución metanólica (80%) del radical DPPH (solución A) agregando 0,005 g del radical DPPH en 100 mL de dicha solución metanólica. A continuación, se preparó otra solución metanólica 80% para las diluciones de los extractos de berries (solución B). Posteriormente, se preparó diluciones de extracto más solución metanólica B en las concentraciones de 1:1 (solución C). Se preparó 3 tubos de ensayo conteniendo 0.1 mL de 19 solución C y 3,9 mL de solución A, el control fue 0,1 mL de solución B y 3,9 mL de solución A, el blanco fue 0,1 mL de agua ultrapura y 3,9 de metanol. Se dejó reaccionar 30 min en la oscuridad a temperatura ambiente y se procedió a medir la absorbancia de las muestras a 517 nm en un espectrofotómetro (UNICO, S-2100uv+E, México). El porcentaje de inhibición de radical DPPH se calculó a partir de la ecuación 2, el cambio de coloración de púrpura a amarillo fue monitoreado espectrofotométricamente a 517 nm tras 30 minutos de reacción en oscuridad.

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{(Abs_0 - Abs_1)}{Abs_0} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:  $Abs_0$  fue la absorbancia control y  $Abs_1$  fue la absorbancia de la muestra.

### **2. Ensayos de actividad antioxidante por ABTS**

La capacidad antioxidante se midió según la metodología propuesta por Chaves et al. (2016) con modificaciones. Se construyó una curva de calibración utilizando una solución de Trolox de 1 mg/mL y se realizaron diluciones de 0.05 a 0.20 mg/mL con intervalos de 0.05. Posteriormente se preparó una solución del reactivo ABTS. El radical ABTS se obtuvo mediante la reacción de ABTS (7 mM) con persulfato de potasio ( $K_2S_2O_8$ ) 2,45 mM, se aforó con agua a un volumen de 10 ml y se incubó a temperatura ambiente ( $\pm 25$  °C) y en la oscuridad durante 18 h. El radical ABTS se diluyó en etanol hasta obtener un valor de absorbancia comprendido entre 0.7 ( $\pm 0.1$ ) a una longitud de onda de 754 nm. Los extractos se disolvieron en etanol a una concentración de 200 mg L<sup>-1</sup>. Después de ello se colocaron en tubos de ensayo 50  $\mu$ l de muestra y 1 950  $\mu$ l de ABTS. Se agitaron durante 1 min y mantuvieron en oscuridad durante 10 min. Posterior a la reacción se leyó la absorbancia a 754 nm (espectrofotómetro UNICO, S-2100uv+E, México).

Ambos parámetros de actividad antioxidante se calcularon utilizando una curva estándar de Trolox y los resultados se reportaron en micromoles de equivalentes Trolox por gramo de peso fresco ( $\mu$ mol TE/g), garantizando la reproducibilidad y el rigor científico exigido para este tipo de matrices vegetales.

#### **7.5.9. Pruebas de inhibición antimicrobianas con medio envenenado**

La evaluación del efecto inhibitor de las NPs  $Fe_2O_3$  aplicadas en arándano sobre el crecimiento micelar de los fitopatógenos *Fusarium spp.* y *Botrytis cinerea* se realizó mediante técnica de medio de cultivo envenenado propuesta por Cid-Lucero et al., 2020.

El medio envenenado es una técnica microbiológica *in vitro* que consiste en incorporar una sustancia con potenciales propiedades antifúngicas (en este caso, el extracto de arándano con NPs  $Fe_2O_3$ ) directamente en el medio de cultivo (agar) antes de que este solidifique (Ahamadi et al., 2020).

Para cada tratamiento (T0, T50, T100 Y T200), se preparó una solución madre siguiendo el protocolo de extracción por solventes. Se pesaron 10 g de muestra (Balanza Ohaus Adventurer®, modelo H-5276) y se homogeneizaron en 100 mL de alcohol etílico al 70%. Con el fin de maximizar la liberación de los compuestos

bioactivos y la dispersión de las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la mezcla se sometió a un proceso de sonicación (baño ultrasónico. Modelo 8893) durante 15 minutos con intervalos de 5 min cada uno. Posteriormente, la solución se filtró y almacenó en frascos de vidrio ámbar para evitar la fotodegradación de los principios activos y pérdidas de propiedades fisicoquímicas.

Se utilizó medio de cultivo Agar papa Dextrosa (PDA) de la marca BD Bioxon®. El medio se preparó siguiendo las especificaciones del fabricante, suspendiendo 44 gr de polvo en agua destilada y esterilizando la mezcla en autoclave a 121 °C durante 15 min. Una vez esterilizado el medio, se trasladó a una campana de flujo laminar para mantener condiciones de asepsia.

Para garantizar que los resultados de inhibición fueran producto de la interacción de las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y los compuestos del arándano y no del solvente utilizado, se establecieron dos tipos de controles: testigo absoluto (cajas con PDA puro para observar el crecimiento normal del hongo) y testigo de solvente (Control de alcohol) que se prepararon cajas envenenadas de PDA únicamente con alcohol al 70% en las mismas concentraciones (10%, 20%, 30%), esto permitió verificar que el alcohol, tras evaporarse o integrarse al medio, no inhibiera el crecimiento micelar por sí mismo, asegurando que la actividad biológica observada es atribuible exclusivamente a la muestra de arándano con nanopartículas.

Para obtener las concentraciones deseadas del 10%, 20% y 30% (v/v) en cada caja Petri, se utilizó la fórmula de dilución volumétrica:

$$V_e = (V_t) * (C_d) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$V_e$ : Volumen del extracto

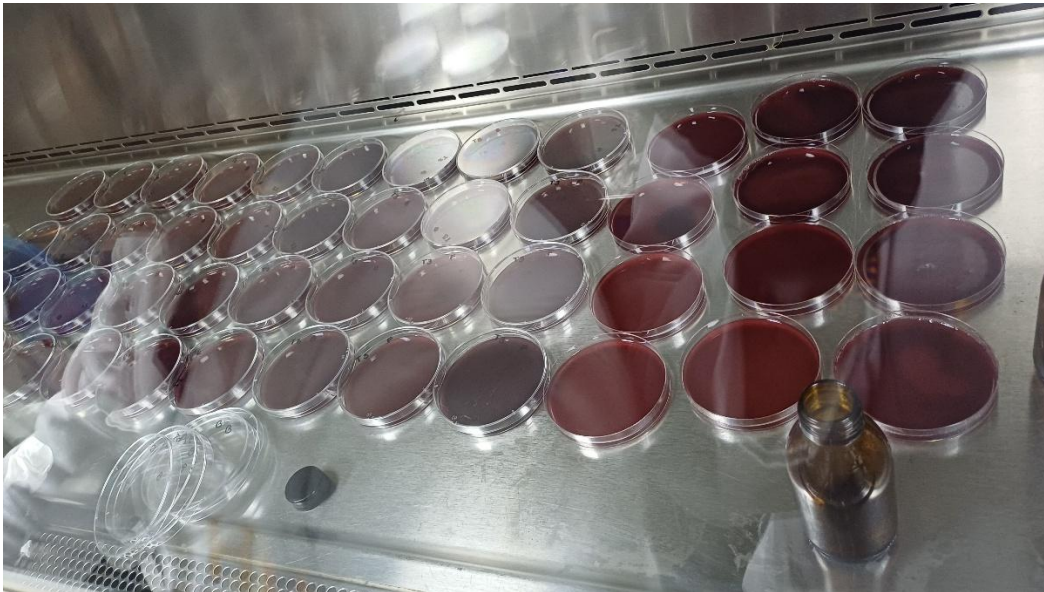
$V_t$ : Volumen total del medio

$C_d$ : Concentración deseada

Cuando el agar alcanzó su temperatura adecuada (aproximadamente 45°C), se procedió a realizar el envenenamiento del medio. Se incorporaron alícuotas de las soluciones madre para obtener concentraciones finales del 10%, 20% y 30% (v/v) de cada tratamiento (de acuerdo a nuestra ecuación). Tras la homogenización, el medio envenenado se vertió en cajas Petri estériles y se dejó solidificar a temperatura ambiente (Figura 19).

Una vez solidificado el medio, se procedió a la siembra de los hongos. Se utilizaron cepas activas de *Fusarium spp.* y *Botrytis cinerea*. A partir de colonias jóvenes de crecimiento, se extrajeron discos de micelio de 5mm de diámetro con ayuda de un sacabocado estéril. Cada disco se colocó en el centro de la caja Petri con el medio envenenado correspondiente. Las cajas se sellaron con parafilm e incubaron a una temperatura de 25°C.

El crecimiento radial se midió a las 24hr, a partir de ahí, se tomaron medidas cada tercer día con un vernier digital hasta que el testigo absoluto completó el llenado de la caja.



**Figura 19:** Cajas Petri por medio envenenado. Laboratorio IAPs-ICAp (UAEH). Santiago Tulantepec, Hgo, 2026. Autoría propia

## 8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se realizó un análisis de varianza y la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de medias de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ) para todos resultados de parámetros agronómicos en suelo/planta, fisicoquímicos en fruto ( $^{\circ}$ Brix y acidez titulable) así como actividad antioxidante de los frutos. Todos los procedimientos estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat 2020. Adicionalmente, se graficó utilizando el software estadístico SigmaPlot 12.5. Los tratamientos que comparten la misma letra no son significativamente diferentes.

Los ensayos de inhibición *in vitro* del crecimiento micelar de *Fusarium spp.* y *Botrytis cinerea* se realizaron bajo un diseño completamente al azar con 3 repeticiones por tratamiento, considerando 4 tratamientos con 3 concentraciones: 10, 20, 30%, tomando en cuenta el Control absoluto, fueron evaluados cada tercer día durante 18 días, que fue cuando nuestra caja Blanco absoluto alcanzo su máximo crecimiento (llenándose por completo). Con los datos registrados se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medidas de los tratamientos, para la separación de medias, se utilizó la prueba HSD con un nivel de significancia del  $p \leq 0.05$ . Se graficó crecimiento micelar acumulado a lo largo del tiempo (18 días) para visualizar la tendencia de la inhibición para cada tratamiento frente al control. Los análisis estadísticos (ANOVA Y HSD) se realizaron utilizando el software InfoStat en su versión 2020. Las visualizaciones y la generación de las gráficas de resultados se realizaron con el software SigmaPlot 12.5.

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de parámetros agronómicos medidos en suelo

La conductividad eléctrica mostró diferencias significativas entre tratamientos (Figura 20-A). El tratamiento T200 (NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a 200 ppm) presentó el valor más alto de CE, diferenciándose estadísticamente del tratamiento control (T0) y de T100.

El tratamiento T50 mostró un valor intermedio, sin diferir significativamente de T200 ni de los tratamientos con valores menores.

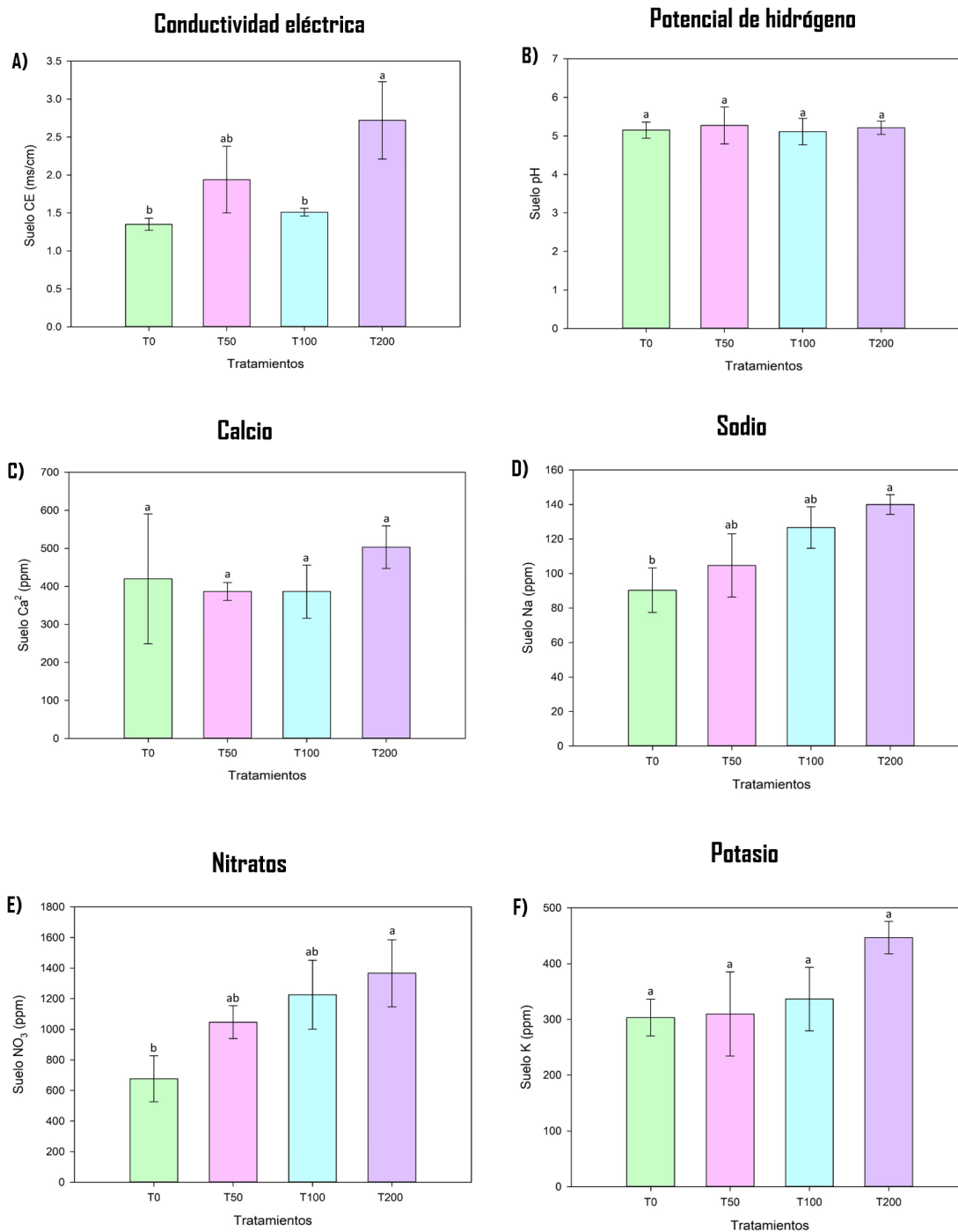
Con respecto al potencial de hidrógeno (pH), no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (Figura 20-B). Todos los tratamientos presentaron valores similares, manteniéndose en un rango ligeramente ácido a neutro. Esto sugiere que la aplicación de los tratamientos no modificó de manera significativa la reacción del medio.

Las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 20-C). Aunque se observó una tendencia a valores ligeramente mayores en T200. Esto nos puede indicar que el tratamiento no tuvo un efecto directo sobre la disponibilidad de calcio.

En relación del contenido de sodio, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 20-D), el tratamiento T200 mostró la mayor concentración de Na, diferenciándose significativamente del control (T0). Los tratamientos T50 y T100 presentaron valores intermedios, sin diferencias estadísticas respecto a T0 ni a T200. Este aumento progresivo de Na con las dosis de tratamiento coincide con el incremento observado en la CE.

De acuerdo con la concentración de nitratos, este aumentó significativamente con la dosis de los tratamientos (Figura 20-E), T200 presentó el valor más alto, diferenciándose de nuestro tratamiento control (T0). Con respecto a los tratamientos T50 y T200 mostraron valores intermedios, sin diferencias significativas entre ellos. Estos resultados sugieren una mayor disponibilidad de nitrógeno conforme aumenta la dosis aplicada.

Como último parámetro medido en suelo, tenemos que la concentración de Potasio (K) no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Figura 20-F), sin embargo, se observó una tendencia al incremento en T200 respecto al tratamiento control, lo que podía estar asociado al aumento general de sales disueltas reflejado en la CE.



Los tratamientos que comparten las misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 20:** Parámetros agronómicos medidos en suelo; A) Conductividad eléctrica, B) Potencial de hidrógeno, C) Calcio, D) Sodio, E) Nitratos y F) Potasio.

## **Discusión de resultados en parámetros agronómicos medidos en suelo**

El incremento de la CE en el tratamiento con una concentración de 200 ppm (T200) refleja un impacto del escurrimiento foliar inevitable durante la asperción y la posterior integración de las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  al sustrato. Al aumentar la dosis de nanopartículas a 200 ppm, una fracción del material alcanza la solución del suelo, incrementando la carga iónica detectable. Usman et al. (2020) explicaron que los nanomateriales aplicados foliarmente pueden termiar en el suelo por gravedad o lavado, donde interactúan con la fase líquida alterando la CE. Por su parte, Yin et al. (2023) mencionaron que las nanopartículas de óxido-área, aumentan la conductividad iónica del medio incluso en condiciones bajas, lo que explica la tendencia ascendente observada en los tratamientos más altos.

La estabilidad del pH foliar-suelo es un indicador de la eficiencia de las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A diferencia de los fertilizantes foliares tradicionales que, al escurrir, pueden acidificar el sustrato, el óxido de hierro nanométrico se comporta de manera neutra. Siddiqui et al. (2021) señalan que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aplicadas en dosis moderadas no provocan fluctuaciones en el pH de la rizosfera, lo que permite que el arándano mantenga su entorno ácido ideal para la absorción de nutrientes. Seleiman et al. (2021) indicaron que la nanotecnología permite una nutrición dirigida que minimiza el impacto químico colateral en el sustrato, manteniendo homeostasis del sistema suelo-planta.

La nula variación significativa en los niveles de calcio sugieren que la absorción foliar de hierro no genera un antagonismo iónico con el calcio presente en el sustrato. Esto es fundamental para la firmeza del fruto. Según Triphati et al. (2022), la suplementación foliar con nanopartículas de óxido de hierro mejora el vigor general de la planta sin interferir con la captación radicular de cationes divalentes con el calcio. Además, Jalil et al. (2024) indicaron que, al mejorar la tasa de transpiración mediante una fotosíntesis más eficiente inducida por el hierro, se favorecen el flujo de calcio hacia las partes aéreas de forma equilibrada.

El ligero incremento (10 ppm) de sodio en el sustrato del tratamiento T200 podría ser una respuesta indirecta a la mayor actividad metabólica de la planta. Mukhtiar et al.

(2024) sugieren que una planta con mayor nutrición férrica incrementa una tasa de intercambio iónico en la raíz; este aumento en la absorción de nutrientes pueden provocar una liberación o desplazamiento de cationes de sodio previamente absorbidos en las partículas del sustrato hacia la solución del suelo. Así mismo, Rui et al. (2022) indicaron que el uso de nanopartículas metálicas pueden inducir una “movilización de sales” en la rizosfera como subproductos de la mayor exudación radicular.

La aplicación foliar de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aumentó los nitratos en el sustrato. Esto se explica por la estimulación de exudados radiculares. Al recibir hierro foliar, la planta produce más fotosintatos (azúcares) que son enviados a las raíces y secretados al suelo. Zhou et al. (2021) documentaron que esta mayor disponibilidad de azúcares en la rizosfera activa a las bacterias nitrificantes, incrementando la disponibilidad de nitratos. Sharkoor et al. (2021) afirmaron que el hierro foliar mejora la salud sintética de la planta, lo que permite gestionar mejor su microentorno radicular, favoreciendo la mineralización del nitrógeno orgánico presente en el sustrato.

El aumento de potasio en el suelo tras la aplicación foliar de T200 confirma un efecto de retroalimentación biológica. Jalil et al (2024) reportaron que la nutrición foliar con óxido de hierro promueve un desarrollo radicular más extenso y ramificado; esto permite que la planta tenga mayor área de contacto con el sustrato y movilice cationes de potasio que estaban bloqueados. Además, Saleiman et al. (2021) señala que las plantas suplementadas con nanomateriales de hierro presentan una mayor actividad de las bombas de protones en la raíz, lo cual facilita el intercambio de K en la interfase suelo-raíz, aumentando su concentración detectable en los análisis de suelo.

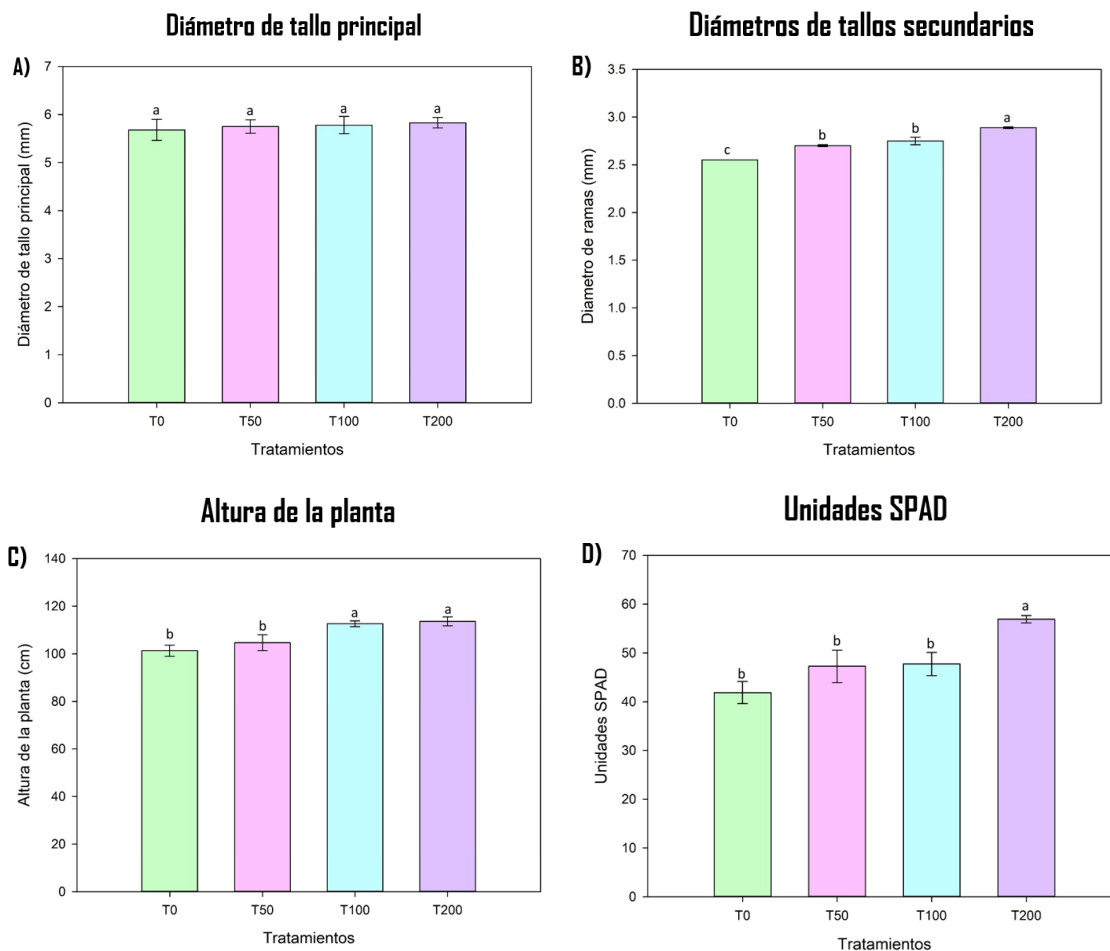
### **Resultados de parámetros agronómicos medidos en planta de arándano**

El diámetro del tallo principal (Figura 21-A) en el cultivo de arándano no presentó diferencias de acuerdo con los tratamientos evaluados, obteniendo un valor promedio (5.5-5.8 mm). Sin embargo, el tallo secundario (Figura 21-B) mostro que

el tratamiento T200 presentaron diámetros en un 17% mayor que el tratamiento control.

De acuerdo con la altura de la planta (Figura 21-C) mostró respuesta positiva entre los tratamientos T100 y T200, registrándose con mayores alturas (ambos alrededor de 118 cm), siendo significativamente superior a los tratamientos control y T50.

Con relación a las unidades SPAD (Figura 22-D) el tratamiento T200 presentó 10 veces más unidades, incrementándose directamente con la dosis de nanopartículas de  $Fe_2O_3$  a comparación de nuestro tratamiento control (43 Unidades SPAD).



Los tratamientos que comparten las misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 21:** Parámetros agronómicos medidos en planta; A) Diámetro de tallos principales, B) Diámetros de tallos secundarios, C) Altura de la planta y D) Unidades SPAD en hojas.

## **Discusión de resultados sobre parámetros medidos en planta**

El engrosamiento del tallo principal es un indicador de la acumulación de biomasa estructural y una mayor capacidad de conducción vascular. Singh et al. (2024) explicaron que la suplementación con hierro nanométrico fortalece las paredes celulares y estimula el desarrollo del xilema y floema, lo que se traduce a tallos más robustos. En el arándano, esto es vital para soportar la carga de frutos. Según Ahmad et al. (2022), la aplicación foliar de nanomateriales metálicos mejora el estado hídrico de la planta, y la traslocación de nutrientes, lo que induce un crecimiento radial del tallo más vigoroso en comparación con los métodos de fertilización tradicionales que dependen de la lenta absorción radicular.

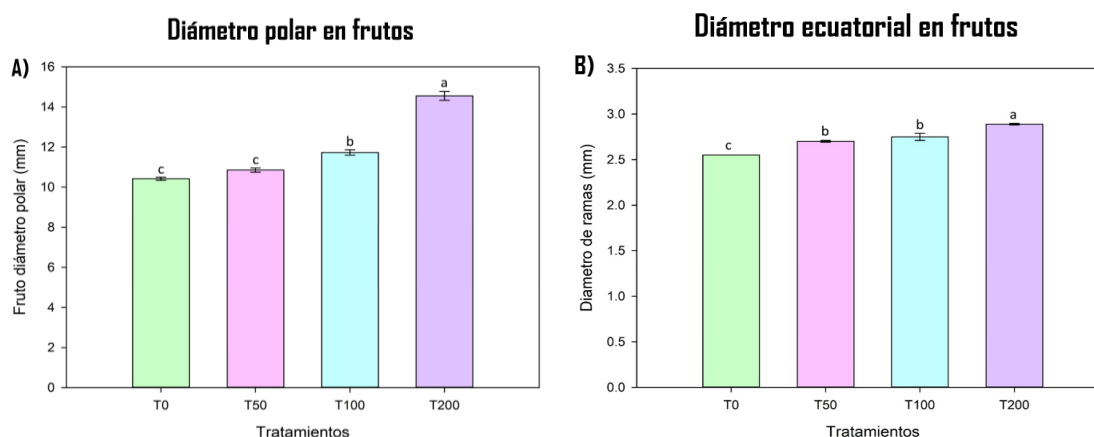
El desarrollo de los tallos secundarios bajo el tratamiento de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sugiere una ruptura de la dormancia apical y una mejor distribución de nutrientes hacia las ramas laterales. Raza et al. (2021) observaron que las plantas tratadas con óxido de hierro nanométrico presentan una arquitectura más ramificada debido a la mejora en el flujo sistémico de asimilados. Esto es consistente con los resultados en arándano var. ojo de conejo, donde la ramificación secundaria es clave para aumentar los sitios de floración. Singh et al. (2024) mencionaron que las nanopartículas de hierro actúan como bioestimulante que optimiza el balance energético de la planta, permitiéndole destinar recursos no solo al tallo principal, sino también al fortalecimiento de la estructura secundaria.

El aumento en la altura de las plantas tratadas con NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  refleja una optimización de la división y elongación celular inducida por una mejor nutrición. Singh et al. (2024) postularon que las nanopartículas de óxido de hierro promueven la síntesis de fitohormonas como las auxinas y las giberelinas responsables del crecimiento apical. Al mejorar la eficiencia fotosintética (como se vio reflejada en las Unidades SPAD), la planta dispone de más energía (carbohidratos) para invertir en su desarrollo vertical. Por otro lado, Jalil et al. (2024) afirmaron que el hierro a escala nanométrica reduce el estrés oxidativo de los tejidos jóvenes, permitiendo que el meristemo apical mantenga un ritmo de crecimiento constante incluso en condiciones ambientales variables.

El incremento en las unidades SPAD es el segundo efecto directo de la aplicación foliar de NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ya que el hierro es un cofactor esencial en la biosíntesis de clorofila. Raza et al. (2021) demostraron que las nanopartículas de hierro aumentan la expansión de genes relacionados con la formación de protoporfirina, el precursor de la clorofila. Al ser una aplicación foliar, el hierro entra por los estomas, y alcanza los cloroplastos, por lo que las plantas tratadas muestran un verde más intenso y valores SPAD superior al control. Asimismo, El-Saadony et al. (2021) señala que las NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> actúan como un suministro de hierro altamente eficiente que evita la clorosis férrica y maximiza la tasa de transporte de electrones en el fotosistema II, resultando en una mejor densidad de pigmentos fotosintéticos. Si bien las unidades SPAD son relativas, se ha demostrado fuertes relaciones lineales, polinómicas y exponenciales entre SPAD y el contenido absoluto de clorofila medido en laboratorio, especialmente después del ajuste de especies.

### Resultados de parámetros agronómicos medidos en fruto

En relación con el diámetro en los frutos (Figura 22-A y B) con medidas polares y ecuatoriales, los diámetros (medidos en mm) aumentaron progresivamente con las dosis de nanopartículas, el tratamiento T200 presentó frutos más grandes (14.55 y 14.61 mm para polar y ecuatorial, respectivamente) siendo significativamente mayor que los tratamientos Control y T50.



Los tratamientos que comparten la misma letra no son significativamente diferentes.

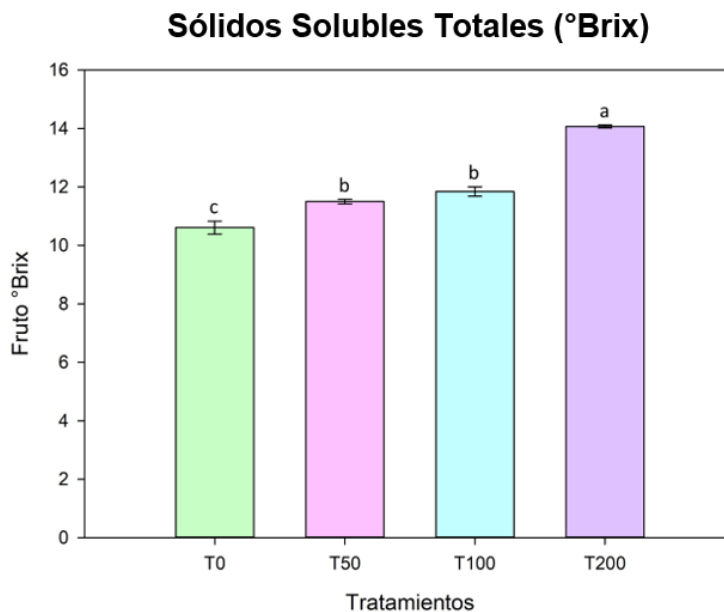
**Figura 22:** Parámetros agronómicos medidos en fruto; A) Diámetro polar del fruto, B) Diámetro ecuatorial del fruto

## Discusión de resultados sobre parámetros agronómicos medidos en fruto

La mejora en las dimensiones del fruto (diámetro polar y ecuatorial) bajo los tratamientos con NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sugiere una optimización en la división celular y el llenado de la baya. Un fruto más grande es el resultado de una mayor disponibilidad de recursos energéticos y minerales durante la fase de fruto verde. Según Al-Juthery et al.(2021) explicaron que el hierro a escala nanométrica mejora la absorción sistémica de otros elementos como el potasio, el cual es el principal responsable de la expansión celular y la regulación osmótica en el fruto. Esto concuerda con los resultados previos, donde el aumento de potasio en el sistema y el engrosamiento de los tallos facilitaron el transporte de agua y solutos, resultando en frutos de mayores dimensiones comerciales.

## Resultados de Sólidos Solubles Totales

La aplicación de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mejoró significativamente la calidad del fruto, en relación con los sólidos solubles totales ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) (Figura 23), el tratamiento T200 presentó diferencias significativas a comparación de nuestro tratamiento control T0, con respecto a los T50 y T100 no hubo diferencias significativas entre sí.



Los tratamientos que comparten la misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 23:** *Parámetro fisicoquímico medido en fruto:  $^{\circ}\text{Brix}$*

## **Discusión de resultados en Sólidos Solubles Totales**

Kushman y Ballinger, al igual Lobos (1988) indicaron que diferentes concentraciones de SST que oscilan entre 10 y 12 °Brix son adecuadas para los frutos de arándanos en la variedad ojo de conejo para su óptima calidad en el mercado (Peñuelos Montoya, 2022). De acuerdo con lo anterior, el tratamiento T100 y T200 alcanzan una calidad óptima de la fruta en términos de SST.

El incremento en el contenido de sólidos solubles totales, particularmente en el tratamiento de 200 ppm, demuestra que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  actúan como un potente catalizador de actividad fotosintética. Al mejorar la síntesis de clorofila y el transporte de electrones (como se observó en los valores SPAD), la planta genera un excedente de carbohidratos que se translocan hacia la baya durante la etapa de maduración. Nadi et al. (2020) reportaron que la suplementación con hierro nanométrico aumenta significativamente la acumulación de azúcares y almidones, ya que el hierro es fundamental en el metabolismo del carbono. Por su parte, Salehi et al. (2021) señalaron que las nanopartículas de hierro modulan la actividad de enzimas como la sacarosa sintetasa, favoreciendo una mayor concentración de fructuosa y glucosa en el fruto, lo que mejora el índice de madurez y el sabor del arándano.

## **Resultados de acidez titulable**

El análisis de la acidez titulable en el jugo de arándano (*Vaccinium virgatum*) mostró variaciones significativas en función de las dosis de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aplicadas. Como se observa en la Tabla 3, existe una relación proporcional entre el incremento de la dosis de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y la concentración de los diversos ácidos orgánicos evaluados.

El tratamiento T200 presentó los valores más elevados en todos los parámetros analizados, diferenciándose estadísticamente de los grupos control (T0 Control), T50 y T100.

Ácido cítrico y málico (Figura 24 A-B), estos ácidos, predominantes en el perfil del arándano, alcanzaron sus máximos niveles en el tratamiento T200, con valores de  $0.032 \pm 0.002$  y  $0.033 \pm 0.003$  respectivamente. Las gráficas A y B conforman que

el T200 supera significativamente a los demás tratamientos, los cuales mantuvieron niveles más bajos y constantes entre sí.

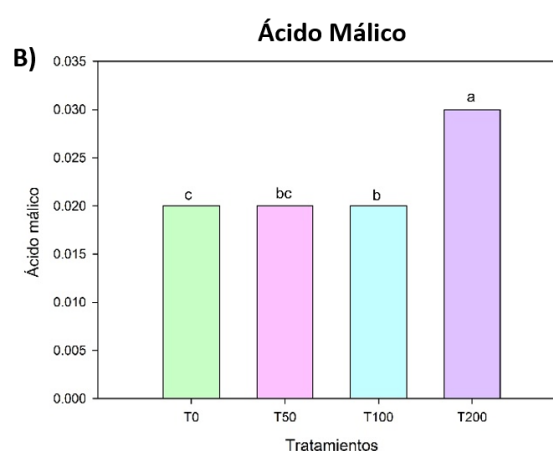
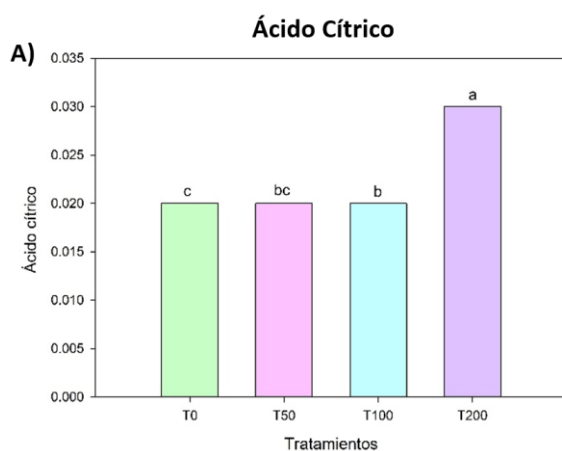
Se observó que en el ácido tartárico (Figura 24-D) tuvo un incremento notable en el tratamiento de mayor dosis ( $0.038\pm 0.003$ ) mientras que el Control y los tratamientos T50 y T100 presentaron valores mínimos similares ( $0.018\pm 0.003$ ).

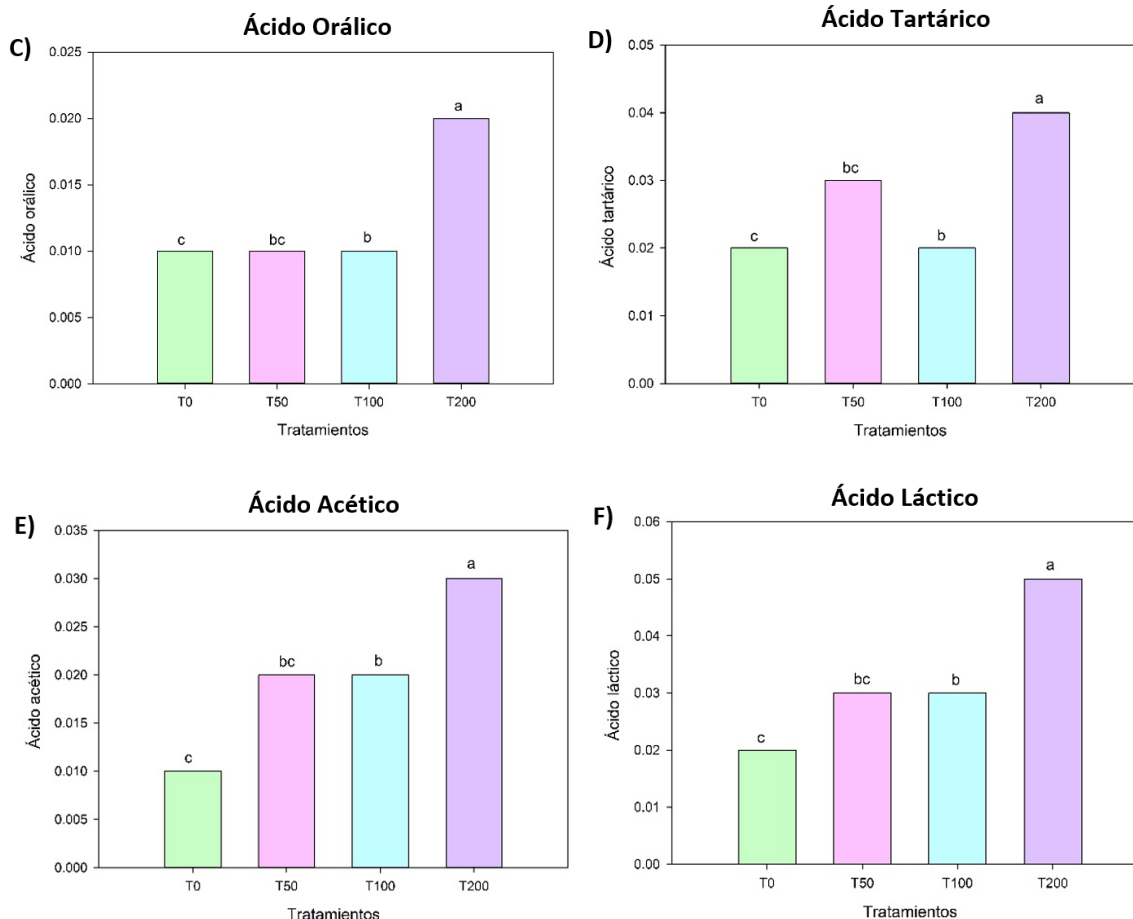
Ácidos secundarios (Orálico, acético y láctico) (Figura 24 C, E y F) siguiendo la tendencia general, el tratamiento T200 duplicó, en promedio, la concentración de estos ácidos en comparación con el tratamiento Control.

El volumen de NaOH requerido para la titulación fue significativamente mayor en el tratamiento T200 (1.26 mL) en comparación con el Control (0.60 mL), lo que valida el incremento de la acidez total del fruto bajo la influencia de la mayor concentración de NPs  $Fe_2O_3$ .

**Tabla 3:** Acidez titulable, así como los tipos de ácidos contenido en jugo de arándano.

Tratamiento	Volumen de NaOH	Ácido cítrico	Acido málico	Ácido orálico	Ácido tartárico	Ácido acético	Ácido láctico
<b>T0 (Control)</b>	0.600	$0.015\pm 0.002$	$0.016\pm 0.002$	$0.010\pm 0.001$	$0.018\pm 0.003$	$0.014\pm 0.002$	$0.021\pm 0.003$
<b>T50</b>	0.700	$0.017\pm 0.002$	$0.018\pm 0.002$	$0.012\pm 0.001$	$0.021\pm 0.003$	$0.016\pm 0.002$	$0.025\pm 0.003$
<b>T100</b>	0.833	$0.021\pm 0.001$	$0.022\pm 0.001$	$0.015\pm 0.001$	$0.025\pm 0.001$	$0.020\pm 0.001$	$0.030\pm 0.002$
<b>T200</b>	1.266	$0.032\pm 0.002$	$0.033\pm 0.003$	$0.022\pm 0.002$	$0.038\pm 0.003$	$0.030\pm 0.002$	$0.045\pm 0.004$





Los tratamientos que comparten las misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 24:** Tipos de ácidos en el jugo de arándano

### Discusión de resultados sobre acidez titulable

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el contenido de acidez titulable y las concentraciones individuales de los principales ácidos orgánicos (cítrico, málico, Orálico, tartárico, acético y láctico) aumentaron conforme se incrementó la intensidad de los tratamientos aplicados. Este patrón se observa especialmente en el tratamiento T200, que presentó las mayores concentraciones de todos los ácidos evaluados. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas que reportan que los ácidos orgánicos son los principales contribuyentes a la acidez total en frutas y sus jugos, ya que su acumulación tiende a ser sensible a factores de manejo postcosecha y tratamientos fisiológicos (Jiang et al., 2022).

Este fenómeno sugiere que el hierro nanométrico actúa como un catalizador del metabolismo respiratorio. Según López-Vargas et al. (2020), las nanopartículas metálicas pueden alterar la expresión de genes involucrados en el ciclo de Krebs, lo que explica la mayor acumulación de ácidos orgánicos como una reserva de carbono y energía para el fruto.

Un hallazgo crucial en esta investigación es que, a pesar del incremento de la acidez titulable en el tratamiento T200, el fruto mantiene una calidad organoléptica superior. Esto se debe a que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  promueven un equilibrio dinámico entre azúcares y ácidos. De acuerdo con Shao et al. (2021), la acumulación simultánea de azúcares y ácidos orgánicos es característica de un metabolismo primario vigoroso, donde los ácidos actúan como reguladores de pH celular y precursores de compuestos de sabor, evitando que el fruto se vuelva insípido durante la maduración acelerada.

Asimismo, el aumento en ácidos secundarios como el tartárico y el láctico bajo el tratamiento de mayor dosis refuerza la hipótesis de la elicitación. Raliya et al. (2019) mencionan que el estrés controlado por nanomateriales de hierro estimula la producción de ácidos orgánicos que sirven como eugenoles quelantes naturales dentro de la planta, ya que un ambiente más ácido en el jugo de arándano limita naturalmente la proliferación de patógenos postcosecha.

Desde una perspectiva metabólica, la acumulación de ácidos orgánicos puede ser resultado de la regulación de rutas biosintéticas de estos compuestos. Fernández y Torres (2023) documentan que la actividad enzimática relacionada con la síntesis de malato y citrato se mantiene más activa cuando se aplican ciertos tratamientos fisiológicos, lo cual favorece la presencia de estos compuestos en el fruto o jugo final (Fernández & Torres, 2023). Esto apoya la idea de que tratamientos más intensos pueden retardar la degradación de ácidos orgánicos.

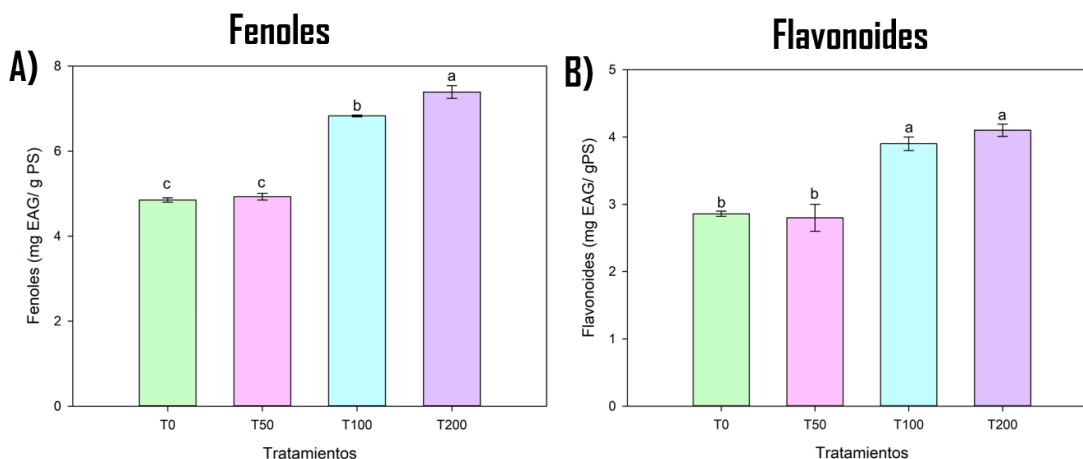
Finalmente, la variación observada entre tratamientos en cuanto al contenido de ácidos orgánicos sugiere que estos compuestos están influenciados tanto por factores internos de la fruta como por las condiciones de manejo externo. Esta mirada coincide con el análisis de Martínez y Rodríguez (2021), quienes concluyeron que la composición de ácidos varía según genotipo, madurez y

condiciones ambientales, afectando directamente parámetros como acidez total y percepción sensorial (Martínez & Rodríguez, 2021).

### Resultados de fenoles y flavonoides

Los contenidos de fenoles totales (Figura 25-A) mostraron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.5$ ). Los tratamientos T200 y T100 presentaron valores significativamente superiores en comparación con T0 y T50, observándose el mayor contenido en el tratamiento T200.

De manera similar, el contenido de flavonoides (Figura 25-B) presentó diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.5$ ). Los tratamientos T100 y T200 registraron los valores más altos, siendo superior a T0 y T50.



Los tratamientos que comparten la misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 25:** Contenido de fenoles (A) y flavonoides (B) en fruto

### Discusión de resultados en Fenoles y Flavonoides

Los resultados del presente estudio muestran la aplicación foliar de nanopartículas incrementan de forma significativa los contenidos de fenoles y flavonoides en los frutos de arándano, especialmente en los tratamientos 100 y 200 ppm. Este comportamiento sugiere que las nanopartículas pueden funcionar como bioestimulantes que modulan rutas metabólicas secundarias vinculadas a la producción de compuestos antioxidantes.

La biosíntesis de compuestos fenólicos y flavonoides está regulada principalmente por la actividad de la vía fenilpropanoide, que juega un papel central en la respuesta de las plantas frente a diversos estímulos ambientales y bioquímicos (Shahidi y Ambigaipalan, 2015). Estudios previos han documentado que la presencia de nanopartículas metálicas puede actuar como factor de estrés leve que activa rutas defensivas en la planta, promoviendo la expresión de enzimas como la fenilalanina amonio-liasa (PAL), elevando la síntesis de compuestos fenólicos (D'Amato et al., 2020).

Además, una mejora en la salud fisiológica general de la planta, asociada a una mejor disponibilidad de micronutrientes facilitada por las nanopartículas, puede aumentar la fotosíntesis y la capacidad metabólica, lo que a su vez aporta precursores carbonados para la síntesis de metabolitos secundarios (Kumar et al., 2021). En este sentido, otras investigaciones han reportado que tratamientos con nanopartículas mejoran parámetros fisiológicos, lo que se asocia con mayores concentraciones de antioxidantes en fruto y tejidos vegetales (Singh et al., 2019).

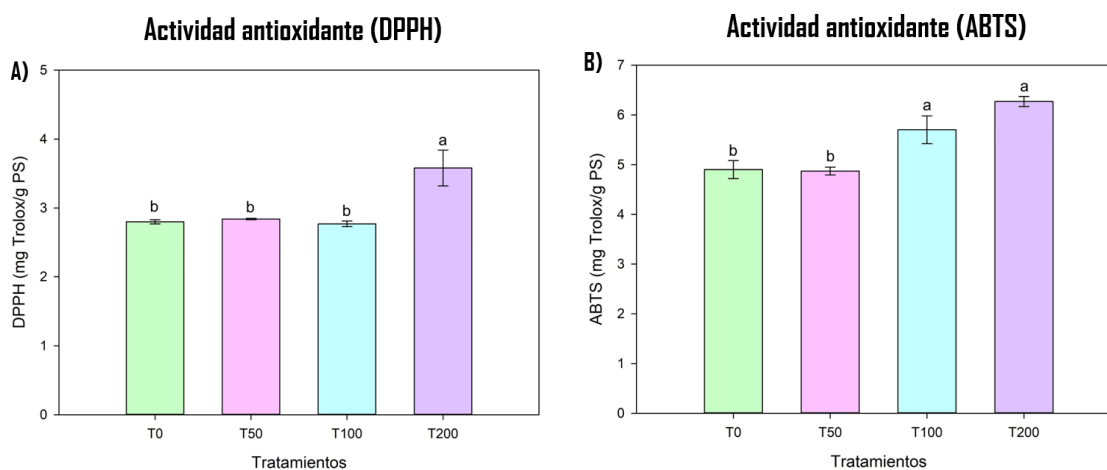
### **Resultados sobre actividad antioxidante (DPPH y ABTS)**

La actividad antioxidante de los frutos de arándano se evaluó mediante los métodos DPPH y ABTS (Figura 26), expresados como mg equivalentes de Trolox por gramo de peso seco (mg Trolox/g PS), en función de las diferentes concentraciones de nanopartículas aplicadas de forma foliar (0, 50, 100 y 200 ppm).

Los resultados de la actividad antioxidante evaluada mediante el método DPPH mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T200 presentó el valor más alto de actividad antioxidante, alcanzando aproximadamente 3.6 mg Trolox/g PS, siendo estadísticamente diferente respecto a los demás tratamientos. Por otro lado, los tratamientos T0 (Control), T50 y T100 no mostraron diferencias significativas entre sí, ya que comparten la misma letra, con valores cercanos a 2.8 mg Trolox/g PS. Estos resultados indican que únicamente las dosis

más altas de nanopartículas lograron incrementar significativamente la capacidad antioxidante medida por este método.

En cuanto a la actividad antioxidante determinada mediante el método ABTS, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T200 presentó el valor más alto (aproximadamente 6.3 mg Trolox/g PS, seguido por el tratamiento T100, el cual también mostró valores elevados; ambos tratamientos comparten la misma letra, indicando que no existe diferencias entre ellos. En contraste, los tratamientos T0 y T50 presentaron valores más bajos (alrededor de 4.9 mg Trolox/g PS), sin diferencias significativas entre sí, pero si en comparación con los demás tratamientos.



Los tratamientos que comparten la misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 26:** Actividad antioxidante de frutos mediante DPPH (A) y ABTS (B)

### **Discusión de resultados sobre actividad antioxidante (métodos DPPH y ABTS)**

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación foliar de nanopartículas en arándano incrementa significativamente la actividad antioxidante del fruto, particularmente en los tratamientos de mayor concentración, 100 ppm y 200 ppm, evidenciando una clara respuesta de acuerdo a las dosis. Este comportamiento concuerda con lo reportado en diversos cultivos frutales, donde Tripathi et al., (2017) trabajando con NPs de plata, Ghasemi et al., (2020) con NPs de óxido de hierro y

Aguilera Leyva et al., (2023) con NPs de óxido de zinc, han mostrado la capacidad para estimular la síntesis de metabolitos secundarios antioxidantes, como polifenoles, flavonoides y antocianinas.

El incremento de la actividad antioxidante puede explicarse por la activación de rutas metabólicas asociadas a la vía fenilpropanoides, así como por mecanismos de señalización redox inducidas por nanopartículas, los cuales promueve la acumulación de compuestos bioactivos en el fruto (Nair et al., 2010; Dimkpa et al., 2012).

Asimismo, la absorción foliar de nanopartículas permite su interacción directa con los tejidos metabólicamente activos, favoreciendo procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis y la síntesis de clorofila, lo que incrementa la disponibilidad de precursores carbonados para la biosíntesis de antioxidantes (Addel-Aziz et al., 2016; Beziari et al., 2023).

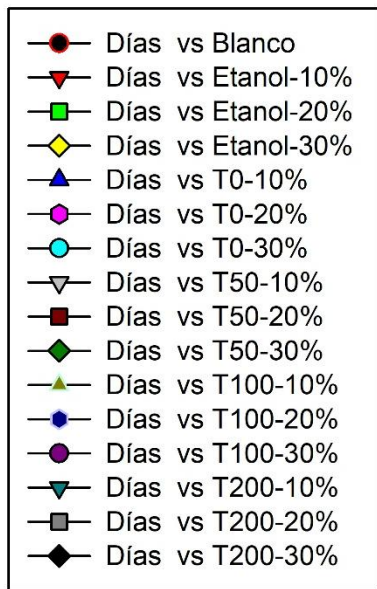
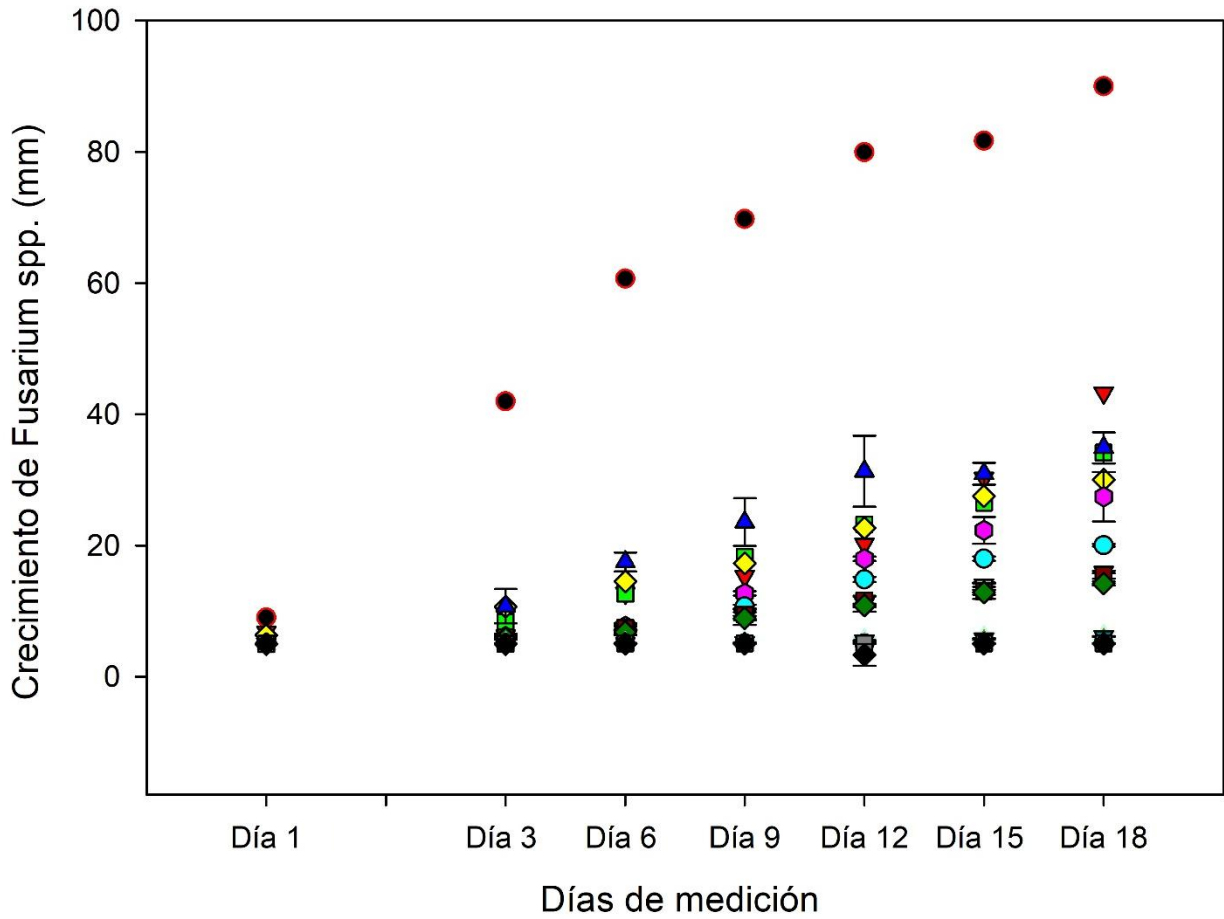
### **Resultados de las pruebas de inhibición contra *Fusarium spp.***

Los resultados del ensayo de inhibición radial (Figura 27) mostraron una diferencia significativa entre el crecimiento del micelio en el grupo control absoluto y los tratamientos evaluados.

De acuerdo con los datos el crecimiento radial del patógeno mostró una reducción progresiva a medida que aumentó tanto la dosis de tratamiento en la planta como la concentración de extracto en el medio de cultivo. En el blanco absoluto (PDA-hongo), el hongo alcanzó su máximo desarrollo cubriendo la totalidad de la caja Petri en el periodo de evaluación, por lo contrario, los testigos de solvente (alcohol al 70%) mostraron un crecimiento normal sin diferencia estadísticas respecto al T0, lo que permite afirmar que la inhibición observada es atribuible a la sinergia entre NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y los metabolitos secundarios del arándano.

El análisis del porcentaje de inhibición del crecimiento micelar reveló que el tratamiento T200 fue el más eficaz, alcanzando sus niveles máximos de control cuando se utilizó una concentración del 30% en el agar, manteniéndose entre los 6

y 8 mm de crecimiento. Bajo estas condiciones, se logró una inhibición superior al 90%, diferenciándose estadísticamente de los tratamientos T100y T50 (20 y 40 mm de crecimiento micelar), los cuales presentaron efectos antifúngicos moderados (aproximadamente 50% de inhibición). Asimismo, se observó que la eficacia disminuye proporcionalmente al reducir la concentración del extracto (20% y 10%), confirmando que existe una relación crítica entre la densidad de fitocontribuyentes y la capacidad de detener el avance del micelio.



**Figura 27:** Crecimiento micelar de *Fusarium* spp. en pruebas de inhibición antifúngica, por medio envenenado.

### **Discusión de resultados en pruebas inhibición contra *Fusarium spp.***

Los resultados obtenidos muestran una capacidad antifúngica significativa de los extractos de arándano, la cual es potenciada por el tratamiento foliar con NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Mientras que el blanco absoluto alcanzó un crecimiento micelar cercano a los 90 mm al concluir el experimento (día 18), que fue cuando nuestro blanco absoluto llegó a su crecimiento máximo, los extractos provenientes de los frutos tratados con NPs a 200 ppm (especialmente a una concentración del 30%) mantuvieron el crecimiento del hongo por debajo de los 10 mm. Esto sugiere que el óxido de hierro nanométrico actúa como un elícitor que incrementa la síntesis de metabolitos secundarios con propiedades de defensa. Según Satti et al. (2021) las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estimulan la producción de fenoles y flavonoides al activar enzimas del metabolismo secundario y reducir el estrés oxidativo tisular. En concordancia, Yilar et al. (2023) reportaron que los extractos de *Vaccinium* poseen de forma natural compuestos bioactivos con alta eficiencia contra *Fusarium spp.*; si nuestros datos confirman que la suplementación con hierro optimiza esta respuesta biológica, logrando una inhibición casi total en las dosis más altas. Al igual este resultado concuerda con lo expuesto por Pariona et al. (2019), quienes señalan que las NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pueden penetrar las hifas fúngicas, generando estrés oxidativo interno y dañando la integridad de la membrana celular del patógeno. En este estudio, la dosis de 200 ppm actuó probablemente como un elícitor que, al ser aplicado de forma foliar, preparó al fruto con una carga mayor de compuestos de defensa.

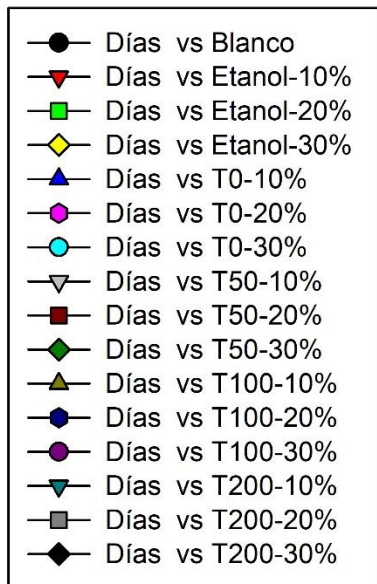
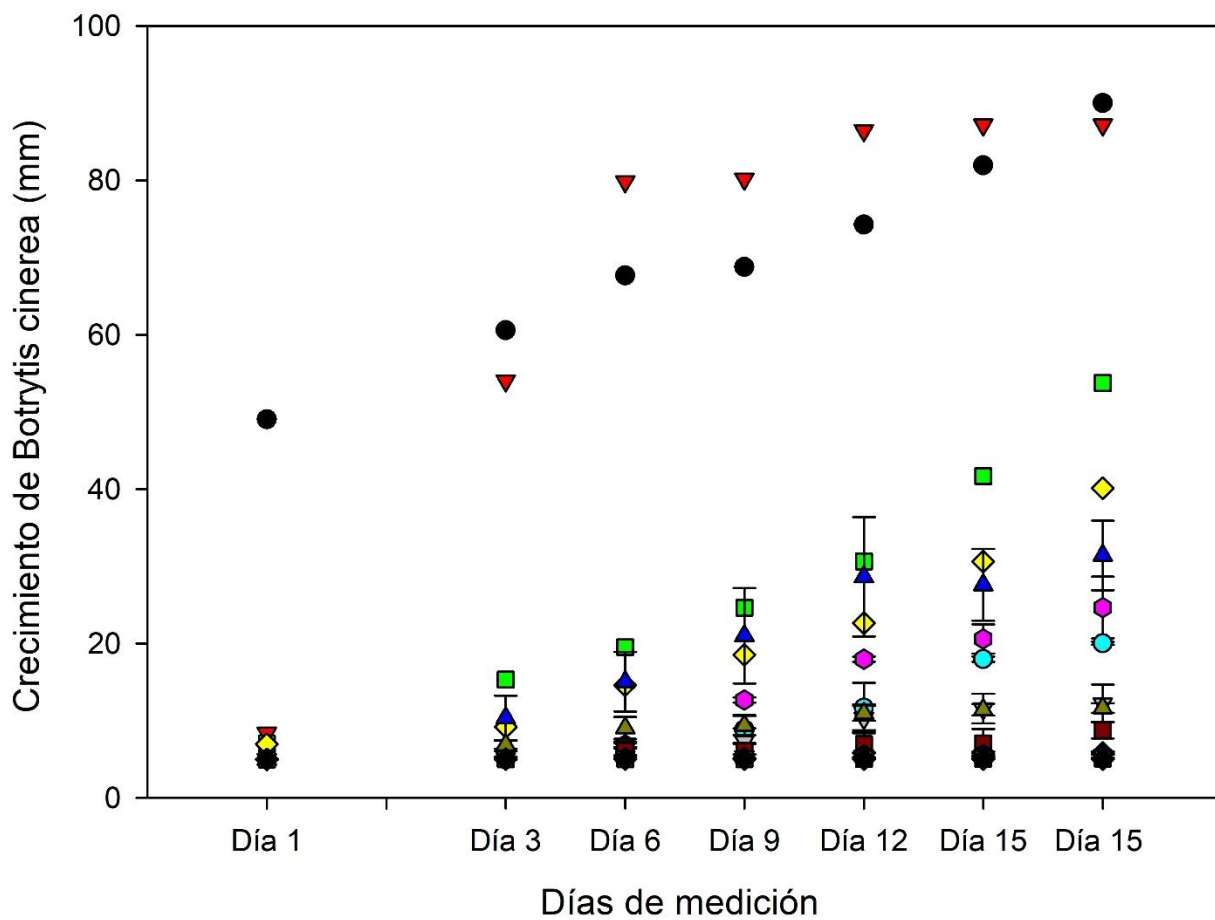
### **Resultados en pruebas de inhibición contra *Botrytis cinerea***

Los resultados de las pruebas inhibitorias para *Botrytis cinerea* revelaron una sensibilidad marcada de este patógeno ante los extractos de arándano tratados con NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Figura 28). De manera similar a lo observado con *Fusarium spp.*, el crecimiento radial se vio inhibido conforme aumentó la dosis de NPs  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la planta y la concentración del extracto en el medio de cultivo. En las cajas de blanco absoluto (PDA-hongo) y los testigos de solvente (alcohol al 70%), el hongo mostró

un desarrollo micelar vigoroso y una esporulación característica, confirmando que el solvente no interfirió con la viabilidad del patógeno.

El porcentaje de inhibición del crecimiento micelar alcanzó sus valores máximos en el tratamiento T200 (con una concentración del 30% de extracto en el agar), logrando un control del 90%.

Respecto a los demás tratamientos, el T50 mostró una inhibición mínima, alcanzando los 25 mm de crecimiento, comportandose de manera muy similar al testigo (T0)(aproximadamente 35 mm), lo que indica que esta dosis no logró inducir cambios fitoquímicos suficientes en el fruto para frenar a *Botrytis cinerea*. Por su parte, el tratamiento T100 presentó un control moderado (aproximadamente 10 mm de crecimiento), reduciendo el avance micelar de forma estadística pero limitada.



**Figura 28:** Crecimiento micelar de *Botrytis cinerea* en pruebas de inhibición antifúngica por medio envenenado.

## **Discusión de resultados en pruebas de inhibición contra *Botrytis cinerea***

La evaluación de los extractos contra *Botrytis cinerea* revela una sensibilidad aun mayor del patógeno a los compuestos presentes en los frutos tratados. La estabilización del crecimiento micelar en niveles mínimos desde los primeros días en incubación refleja la presencia de potentes agentes antifúngicos en los extractos al 30%. Estos efectos pueden atribuirse a la optimización de la síntesis de antocianinas y otros flavonoides inducida por las nanopartículas. Salehi et al. (2021) señala que el hierro aplicados en forma de nanopartículas mejora la calidad fitoquímica de las bayas, incrementando la concentración de compuestos que interfieren con la integridad de las membranas celulares de los hongos como *Botrytis cinerea*.

Finalmente, este comportamiento valida la hipótesis de que las NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mejora la calidad postcosecha no solo nutriendo a la plata, sino detonando el fruto de una mayor capacidad antigungica. Los resultados son consistentes con la premisa de que una mayor riqueza fitoquímica, similar a la descrita por Peña-Varela et al., (2006) en bayas maduras, es el factor determinate para la protección contra enfermedades fúngicas.

## 10. CONCLUSIONES

La presente investigación demostró que la aplicación de NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> representa una estrategia sostenible para optimizar el cultivo de arándano (*Vaccinium virgatum*). Se concluye que la aplicación de NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> funciona como un agente promotor del desarrollo vegetal en el arándano. El tratamiento de 200 ppm demostró ser el más eficaz para optimizar el vigor de la planta, reflejando en un incremento los parámetros de crecimiento y biomasa del fruto en comparación con el Control (T0). El uso de NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> permitió mantener la homeostasis en el sistema sustrato-planta, logrando una mayor disponibilidad de nitratos y potasio en la rizosfera sin alterar el pH. En la planta, el tratamiento con hierro nanométrico incrementó significativamente los niveles de clorofila (unidades SPAD), lo que se traduce en un fotosintético más eficiente y un crecimiento vegetativo robusto en términos de altura y diámetro del tallo. Con respecto al tamaño de los frutos, estos igual presentaron un mejoramiento en los tratamientos T200 y T100.

En cuanto a la calidad del fruto, se determinó que el uso de NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> influye positivamente en la calidad organoléptica del fruto. Los resultados indican que los frutos tratados con la dosis de 200 ppm alcanzaron un equilibrio superior entre azúcares y ácidos orgánicos. Este aumento en los sólidos solubles totales sugiere que el tratamiento no solo acelera la maduración, sino que mejora el perfil de sabor y calidad comercial del arándano frente a las plantas no tratadas.

En la relación de la concentración de antioxidantes, fenoles y flavonoides, se confirma que las NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> actúan como elicitores químicos que potencian el sistema de defensa secundario de la planta. Nuevamente destacando que el tratamiento T200 indujo la mayor acumulación de compuestos fenólicos y flavonoides, lo que elevó significativamente la capacidad antioxidante total del fruto. Esta respuesta es consistente con la teoría de que el estrés inducido por nanopartículas metálicas estimula rutas metabólicas que enriquecen el valor funcional del arándano.

En relación con la capacidad antifúngica contra *Fusarium spp.* y *Botrytis cinerea*: finalmente, se identificó que los extractos de frutos tratados con 200 ppm de NPs

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  poseen un contundente efecto antifúngico sobre los principales patógenos evaluados. De acuerdo con la prueba de medio envenenado, la concentración del 30% de extracto logró la máxima inhibición del crecimiento micelar para ambos hongos; en el caso de *Fusarium spp.*, se redujo el crecimiento de un máximo de 90 mm en el blanco a niveles de 5.6 mm en el tratamiento más alto al día 18. En el caso de *Botrytis cinerea* tuvo una relación similar, reduciendo significativamente el diámetro de colonia de 90 mm (control absoluto) a 5.8 mm (T200 a una concentración de 30%) al día 18. Esto demuestra que existe una relación directa entre las dosis de nanopartículas aplicadas en campo y la calidad del extracto para frenar patógenos postcosecha, validando el uso de esta tecnología como una alternativa biotecnológica sustentable.

Se concluye de manera contundente que el uso de la nanotecnología basada en óxido de hierro representa una alternativa innovadora y altamente eficaz para potenciar el cultivo de arándano de forma sustentable.

## REFERENCIAS

- Achari, G. A., & Kowshik, M. (2020). Recent developments in nanotechnology for sustainable agriculture. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7025–7040.
- Ahmad, A., Aslam, Z., Naz, M., Kallu, S. A., Hayat, M., & Khan, S. E. (2022). Iron oxide nanoparticles: A novel approach for enhancing crop productivity. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(23), 3400-3415.
- Ahmadi, S., Moballegh, A., & Ghamsari, M. S. (2020). Antioxidant and antifungal activity of iron oxide nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(10), 6000-6010.
- Al-Juthery, H. W., Habeeb, U. A., Altaee, F. J., & Al-Tae, A. M. (2020). Role of nanotechnology in agriculture and plant nutrition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 388(1), 012021.
- Ayyat, M. S., Al-Sagheer, A. A., El-Hais, A. M., & El-Kashoury, A. A. (2022). The role of iron nanoparticles in enhancing the phytochemical composition and yield of fruit crops. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182, 120-135.
- D'Amato, A. W., Askari, H., Venkatramanan, V., et al. (2020). Nanoparticle-induced modulation of plant metabolic pathways: Implications for crop quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(24), 6422–6433.
- Cid-Lucero, A., González -Fernández, R., & Valero-Galván, J. (2020). Efecto promotor del crecimiento micelar de *Fusarium sp.* y *Aspergillus sp.* en condiciones *in vitro* de extractos acuosos y etanólico de dos especies de *Cylindropuntia*. *Tecnociencia Chihuahua*, 14 (3), 126-141.
- Chaves, N. Santiago, A. and Alías, J. C. 2016. Quantification of the antioxidant activity of plant extracts: analysis of sensitivity and hierarchization based on the method used. *Antioxidants*. 9(1):76-91.

- El-Amier, Y. A., Al-Amier, A. Y., & El-Kady, A. A. (2022). Effect of iron oxide nanoparticles on growth, metabolic activities, and antioxidant responses in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 3400-3415.
- Fernández, P. & Torres, L. (2023). Metabolic regulation of organic acids in fruits under different postharvest conditions. *Journal of Plant Metabolism*.
- García-Sánchez, F., Simon-Grao, S., Martinez-Nicolas, J. J., Alfosea-Simón, M., PardoHernández, M., & Garcia-Marti, M. (2022). Nanomaterials as a sustainable alternative in the apple and berry fruit industry. *Plants*, 11(6), 763.
- Gómez, R., Torres, M., & Silva, L. (2023). Organic acids and their contribution to fruit quality and taste: A recent overview. *Food Science Reviews*.
- Hassan, M. K., et al. (2021). Iron oxide nanoparticles phytonutritional content and antioxidant capacity of fruits. *Applied Sciences*, 11(22), 10834.
- HortiDaily. (2025). Jalisco, Sinaloa y Michoacán destacan en producción de arándanos en México. <https://www.hortidaily.es/article/9797145/jalisco-sinaloa-ymichoacan-destacan-en-produccion-de-arandanos-en-mexico/>
- Hussain, B., et al. (2023). Iron oxide nanoparticles: A promising tool for enhancing plant growth and secondary metabolite production. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 107-120.
- Jalil, A., Khan, M. I., Khan, S., & Shakoor, N. (2024). Impact of iron oxide nanoparticles on plant growth, yield and fruit quality: A comprehensive review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(1), 45-58.
- Konate, A., He, X., Zhang, Z., Ma, Y., Zhang, P., Alugongo, G. M., & Rui, Y. (2020) Metabolic response of plants to iron oxide nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 389, 121873.
- Kumar, V., Yadav, R. K., & Singh, A. (2021). Advance applications of nanoparticles in plant nutrition. *Journal of Plant Nutrition*, 44(5), 721–734.

- Li, G., Sun, H., & Zhan, X. (2021). Impact of iron nanoparticles on chlorophyll biosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 621485.
- Martínez, A. & Rodríguez, S. (2021). Genotype and environmental influences on organic acid profiles in fruit crops. *Horticultural Research Journal*.
- Nadi, E., Edrisi, B., & Goli-Kalanpa, E. (2020). Effect of iron nanoparticle and magnetic water on growth and chemical constituents of strawberry. *Journal of Plant Nutrition*, 43(19), 2841-2853.
- Palestina-López, C. U, Ortiz-Viedma, J., Fuentes, J., Castagnini, J. M., Betoret, N., & Juan-Borrás, M. (2022). Evaluation of the antioxidant capacity and bioactive compounds of fruits and vegetables: Analytical methods and health implications. *Journal of Food Measurement and Characterization*
- Parveen, A., Akhtar, N., & Mahmood, S. (2022). Antifungal potential of metallic nanoparticles. *Microbial Pathogenesis*, 162, 105342.
- Pariona, N., et al., (2019).
- ProducePay. (2022). Producción de arándano en México: principales regiones, volumen y valor de la producción. <https://producepay.com/es/el-blog/produccion-dearandano-en-mexico-principales-regiones/>
- Rui, M., Ma, C., Hao, Y., Guo, J., Rui, Y., Tang, X., & Xing, B. (2022). Iron oxide nanoparticles alter root architecture and nutrient uptake. *Plant and Soil*, 470, 123-140.
- Salehi, H., Chehregani, A., Lucini, L., Majd, A., & Gholami, M. (2021). Impact of iron oxide nanoparticles on photosynthesis and fruit quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 1515–1527.
- Satti, S. H., Raja, N. I., Javed, B., Akram, A., & Mashwani, Z. U. R. (2021). Biogenic synthesis of iron oxide nanoparticles and their antifungal activity against phytopathogenic fungi. *Nanomaterials*, 11(11), 3058.

- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects — A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.
- Shakoor, N., Adeel, M., Zain, M., Zhang, P., Ahmad, M. A., & Rui, Y. (2021). Evaluation of the effects of iron oxide nanoparticles on the growth and physiology of wheat. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123652.
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Faisal, M., & Al-Sahli, A. A. (2021). Impact of iron oxide nanoparticles on photosynthesis and plant growth. *Chemosphere*, 272, 129612.
- Singh, A., Singh, N., & Prasad, R. (2024). Metallic and metal-oxide nanoparticles in agricultural sector: Current insights. *Plant Nano Biology*, 7, 100062.
- Singh, J., Singh, S., Prasad, S. (2019). Impact of nanomaterials on plants: A review of physiological and biochemical responses. *Plant Physiology Reports*, 24(4), 347 357.
- Soliman, M., El-Kady, A. A., & El-Amier, Y. A. (2023). Foliar application of iron nanoparticles enhances antioxidant enzyme activities and phytochemicals in crops. *NanoImpact*, 29, 100445.
- Tewari, R. K., et al. (2021). Functional significance of iron in plant metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1050-1062.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., & Chauhan, D. K. (2022). Role of biogenic iron oxide nanoparticles in improving photosynthetic performance and energy metabolism. *Environmental Science: Nano*, 9, 852-870.
- Tsao, R. (2010). Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients*, 2(12), 1231–1246.
- USDA Foreign Agricultural Service. (2025). Mexico: Blueberry annual voluntary report. <https://www.fas.usda.gov/data/mexico-blueberry-annual-voluntary-0>

- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawas, A., & Cheema, S. A. (2020). Nanomaterials for agriculture and forestry: Applications, transport, and fate. *Environmental Science & Technology*, 54(6), 3359-3372.
- Valero, G. J., González Díaz, C. A., & González F. R. (2014). Efecto de los extractos de hojas de plantas de gobernadora (*Larrea tridentata*), hojases (*Flourensia cernua*) y encino (*Quercus pungens*), sobre el crecimiento micelial in vitro de hongos fitopatógenos. *Acta Universitaria*, 24, 13-19.
- Yılar, M., Kadioglu, I., & Yanar, Y. (2023). Exploring the potential of blueberry extracts as natural antifungal and bioherbicidal agents in agriculture. *International Journal of Secondary Metabolite*, 10(1), 45-60.
- Yin, L., Adeel, M., Shakoor, N., & Rui, Y. (2023). Metal-based nanoparticles in soil systems: A review. *Science of the Total Environment*, 850, 1581.
- Zafra-Stone, S., et al. (2024). Antioxidants in berries: Functional properties and health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(3), 549–567.
- Zamora, M. A.; Lillo, A.; Carvajal, C. F.; Nuñez, D. and Balboa, N. 2016. Cuantificación espectrofotométrica de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en distintos berries nativos del Cono Sur de América. 42(2):168-174.
- Zahra, Z., et al. (2021). Iron oxide nanoparticles and plants: Uptake, distribution, and physiological responses. *Chemosphere*, 264, 284.
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A., & Munné-Bosch, S. (2021). Nanofertilizers as a tool for sustainable agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162,316-324.