



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

TESIS DOCTORAL

TÍTULO DEL PROYECTO DE TESIS DOCTORAL

Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar con nanopartículas de Cu, Se, Fe, y Zn sobre el rendimiento y calidad poscosecha de *Malus domestica* L. y *Pyrus communis* L.

Para obtener el grado de

Doctora en Ciencias Agropecuarias

PRESENTA

M.C Anay Montaña Herrera

Directora

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes

Codirector

Dr. José Manuel Pinedo Espinoza

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., abril de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

TESIS DOCTORAL

TÍTULO DEL PROYECTO DE TESIS DOCTORAL

Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar con nanopartículas de Cu, Se, Fe, y Zn sobre el rendimiento y calidad poscosecha de *Malus domestica* L. y *Pyrus communis* L.

Para obtener el grado de

Doctora en Ciencias Agropecuarias

PRESENTA

M.C Anay Montaña Herrera

Directora

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes

Codirector

Dr. José Manuel Pinedo Espinoza

Asesor

Dr. César Uriel López Palestina

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., abril de 2023

14/04/2023

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar
Presente.

El Comité Tutorial del **PROYECTO TERMINAL O TESIS** del programa educativo de posgrado titulado **"Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar con nanopartículas de Cu, Se, Fe, y Zn sobre el rendimiento y calidad poscosecha de *Malus domestica* L. y *Pyrus communis* L."**, realizado por la sustentante **Anay Montaña Herrera** con número de cuenta **117789**, perteneciente al programa de **Doctorado en Ciencias Agropecuarias**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

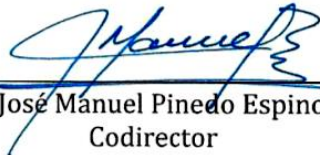
Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"
Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 14 de abril de 2023

El Comité Tutorial



Dra. Alma Delia Hernández Fuentes
Directora



Dr. José Manuel Pinedo Espinosa
Codirector



Dr. César Uriel López Palestina
Asesor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente **a Dios**, por permitir que este viva, por mostrarme tantas veces de su existencia y amor. Por permitir que llegaré hasta este momento, cuando mi cabeza me estaba traicionando y pensaba que no lo lograría y que esto no era para mí.

A la Dra. Alma Delia Hernández Fuentes, con admiración, respeto y cariño, por ser una excelente persona, por la oportunidad de realizar este trabajo bajo su dirección, por su apoyo y disposición, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por la ayuda y sabiduría que me ha transmitido. Gracias Dra.

Al Dr. César Uriel López Palestina, con respeto, admiración y cariño, por su apoyo y disposición incondicional, por sus extensas explicaciones tan interesantes, por llevarme de la mano en la investigación, por alentarme cuando no encontraba la salida, por su ayuda invaluable, por sus sabios consejos, por su alegría. Gracias Dr.

Al Dr. José Manuel Pinedo Espinoza, por su apoyo y disposición, por sus aportaciones al trabajo, por su ayuda en el trabajo de campo.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por ser ente de oportunidad, para realizar mis estudios de Doctorado. Gracias

A mis compañeros y amigos; Christian, Izanami, Mireya, César Andrés, Susan, Araceli. Gracias por su apoyo y amistad, los quiero mucho y deseo que la vida nos haga coincidir nuevamente en alguna etapa de nuestras vidas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-CVU/becario: 440998/753322), por la beca otorgada para realizar los estudios de Doctorado en Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, inscrito en el Programa Nacional de Posgrado de Calidad (PNPC). Gracias

Agradezco sinceramente y de corazón **a todos** aquellos que estuvieron involucrados directa e indirectamente en el desarrollo de esta investigación, sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

DEDICATORIAS

A mis hijos Zaira y Alonso, quienes son mi impulso, mi inspiración y mi motor para levantarme cada día seguir adelante y no rendirme jamás. Los amo con todo mi corazón, son lo más hermoso en mi vida.

A mi compañero de vida Armando, por tu apoyo y amor.

A mi mamá Rosalina, por tu apoyo incondicional, por ser el pilar más importante en mi vida, por siempre escucharme, por tus consejos, por demostrarme tantas veces tu cariño.

A mi papá Lázaro, no es mi padre biológico, pero lo considero como tal porque siempre se ha preocupado por mí, por su gran apoyo en todo momento, porque gracias a su ayuda inicié con los trámites del posgrado, por sus consejos, es el más grande ejemplo de perseverancia y lucha.

A mis abuelitos, Cleotilde, tú ya no estás físicamente conmigo y no sabes cuánto me duele, te extraño mucho, dejaste un gran vacío en mi vida, agradezco por todo lo que vivimos juntas, te amo abue y te mando un beso hasta el cielo. **A mi abuelito Florencio** por su apoyo, por sus consejos cuando podía, gracias a ustedes soy lo soy, son mi ejemplo a seguir.

A mis hermanos. Sandy, Omar y Paco, gracias por compartir conmigo momentos hermosos, por estar conmigo en situaciones difíciles, por su apoyo y por creer en mí, los amo mucho. Omar mi niño, estoy muy orgullosa de ti, por todo lo que has logrado a tu corta edad. El camino no es fácil, pero lograrás tus objetivos, sólo confía en ti, yo lo hago. Te extraño mucho hermano.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIAS.....	III
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN GENERAL	1
SUMMARY	3
INTRODUCCIÓN GENERAL	5
OBJETIVOS.....	8
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos	8
HIPÓTESIS	9
JUSTIFICACIÓN.....	9
DIAGRAMA METODOLÓGICO.....	11
CAPÍTULO I	13
APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES DE MACRO Y MICRONUTRIENTES ESENCIALES PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DEL FRUTOS EN FRUTALES.....	13
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. Nanofertilizantes de macronutrientes	16
2.1 Nitrógeno (N).....	17
2.2 Fósforo (P)	17
2.3 Potasio (K)	17
3. Nanopartículas de micronutrientes o microelementos.....	18

3.1 El Zinc (Zn).....	18
3.2 Hierro (Fe).....	19
3.3 Cobre (Cu).....	20
3.4 Selenio (Se)	20
4. Mecanismo de absorción de nanofertilizantes en árboles frutales	21
4.1 Absorción foliar de nanofertilizantes	21
4.2 Absorción de nanofertilizantes vía suelo.....	22
5. Aplicaciones foliares de nanopartículas	23
6. Aplicación de nanofertilizantes en árboles frutales.....	23
7. CONCLUSIONES.....	27
8. REFERENCIAS	28
CAPÍTULO II	33
EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN EDÁFICA Y APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE Se Y Zn SOBRE EL RENDIMIENTO Y COMPUESTOS BIOACTIVOS EN <i>Malus domestica</i> L.	33
RESUMEN	33
1. INTRODUCCIÓN.....	34
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
2.1 Reactivos	36
2.2 Sitio experimental, material vegetal y tratamientos	37
2.3 Rendimiento, número y peso de frutos	37
2.4 Azúcares totales, reductores y no reductores	38
2.5 Compuestos bioactivos y actividad antioxidante	38
2.6 Análisis estadístico.....	40
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1 Rendimiento de los cultivos	40

3.2 Azúcares totales, reductores y no reductores en los frutos de manzana	42
3.3 Contenido de fenoles totales, flavonoides y ácido ascórbico.....	43
3.4 Capacidad antioxidante	47
4. CONCLUSIONES.....	48
5. REFERENCIAS	49
CAPÍTULO III	54
COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTIOXIDANTE EN FRUTOS DE PERA POR LA APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE Se, Cu, Fe Y Zn....	54
RESUMEN.....	54
1. INTRODUCCIÓN.....	56
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	58
2.1 Reactivos	58
2.2 Sitio experimental, material vegetal y tratamientos	59
2.3 Contenido de azúcares totales, azúcares reductores y no reductores	59
2.4 Actividad antioxidante no enzimática.....	60
2.5 Determinación de la actividad antioxidante.....	61
2.6 Actividad antioxidante enzimática.....	62
2.7 Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂)	63
2.8 Peroxidación lipídica.....	64
Análisis estadístico.....	64
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
3.1 Azúcares: totales, reductores y no reductores en frutos de pera	64
3.2 Sistema de defensa no enzimáticos: fenoles totales (FT), flavonoides (FL) y ácido ascórbico (AcAs).....	66
3.3 Capacidad antioxidante en frutos de pera	68
3.4 Antioxidantes enzimáticos y concentración de H ₂ O ₂ en frutos de pera	69

3.5 Peroxidación lipídica y actividad de PPO	73
4. CONCLUSIONES.....	74
5. REFERENCIAS	75
CONCLUSIONES GENERALES	81
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	82
ANEXOS	86

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
CAPÍTULO I.....	13
Cuadro 1. Efecto de diferentes nanofertilizantes en el crecimiento y características físicoquímicas de los frutos en árboles frutales.....	25
CAPÍTULO II.....	33
Cuadro 1. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn, sobre el contenido de azúcares totales, reductores y no reductores, en frutos de manzana. Los datos mostrados son los promedios de los años de producción 2020 y 2021.....	43
Cuadro 2. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn, sobre el contenido de fenoles totales, flavonoides, ácido ascórbico y actividad antioxidante (ABTS y DPPH), en frutos de manzana. Los datos mostrados son promedio de los años de producción, 2020 y 2021.....	46
Cuadro 3. Análisis de correlación de Pearson entre variables de actividad antioxidante en los frutos de manzana tratados con fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn. Los datos mostrados son promedio de los años de producción, 2020 y 2021.....	47
CAPÍTULO III.....	54

Cuadro 1. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, sobre el contenido de azúcares totales, azúcares reductores y no reductores, en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 202166

Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, sobre el contenido de fenoles totales, flavonoides, ácido ascórbico y actividad antioxidante (ABTS y DPPH), en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.....72

Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, sobre el sistema antioxidante enzimático, en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.....72

Cuadro 4. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Cu, Se, Fe y Zn, en el contenido de la polifenoloxidasas, malondialdehído y peróxido de hidrógeno, en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.....74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO 1.....	13
Figura 1. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn, sobre el rendimiento (A), de frutos de manzana, número de frutos por árbol (B) y peso de frutos (C). Los datos mostrados son promedio de los años de producción, 2020 y 2021.....	45

RESUMEN GENERAL

El manzano y peral son de los cultivos caducifolios más importantes a nivel mundial por el aporte de nutrimentos biológicamente activos benéficos para la salud humana. Estos compuestos bioactivos se pueden incrementar aún más mediante la aplicación de diferentes fuentes de fertilización, incluyendo macro y micronutrientes necesarios para la nutrición de los árboles de manzano y peral, los cuales se pueden suministrar mediante aplicaciones al suelo y aplicaciones foliares. Dentro de las aplicaciones foliares se pueden aplicar nanopartículas de diferentes microelementos que debido a su tamaño pueden exhibir mejores respuestas en el rendimiento y la calidad de los frutos. Por lo tanto, los objetivos del presente estudio fueron: 1) evaluar el efecto de la fertilización edáfica con N, P y K (150-50-80, 100-60-60) y sin fertilización edáfica (SFE) y la fertilización foliar con nanopartículas (NPs) de Se y Zn (Se: 50 ppm, Zn:250 ppm y sin nanopartículas (NP0), sobre el rendimiento y los compuestos antioxidantes de las manzanas y 2) Evaluar la aplicación foliar con nanopartículas (NPs) de selenio (NPs Se-50 ppm), cobre (NPs Cu-250 ppm), hierro (NPs Fe-250 ppm), zinc (NPs Zn-250 ppm) y sin nanopartículas como control (SNPs 0), en el comportamiento del sistema antioxidante, enzimático y no enzimático en frutos de pera. Ambos experimentos se llevaron a cabo en huertos comerciales de manzano (*Malus domestica* L., Golden Delicious) y peral (*Pyrus communis*, Bartlett), bajo un diseño de bloques completos al azar con nueve tratamientos para el caso del manzano y cinco para el peral y tres repeticiones por tratamiento, en ambos frutales.

De los resultados del objetivo 1 se encontró que los tratamientos con dosis de fertilización 150-50-80 y 100-60-60 suplementados con NPs de Se y Zn en general incrementaron el rendimiento, el contenido de azúcares y el ácido ascórbico en los frutos de manzana. El incremento más alto en el rendimiento del fruto se encontró en el tratamiento SFE + NPZn (+ 193% en comparación con el control). Los tratamientos SFE + NPSe y SFE + NPZn condujeron a un mayor contenido de fenoles y flavonoides totales con valores máximos de 7,6 mg EAG y 15,82 mg EQ por gramo de peso seco respectivamente. Estos compuestos presentaron una correlación directa sobre la actividad antioxidante en los frutos. La aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn complementó la fertilización del suelo con

N, P, K para mejorar el rendimiento y la síntesis de compuestos bioactivos en los frutos de manzana.

Por otro lado, de los resultados del objetivo 2 mostraron que las aplicaciones foliares con NPs Se y NPs Zn, pueden aumentar el contenido de azúcares totales en los frutos de pera (+42-55%, respecto al tratamiento control), mientras que los frutos de los tratamientos NPs Se y NPs Cu exhibieron un mayor contenido de fenoles totales (4.92-5.02 mg EAG g⁻¹ PS), flavonoides (13.33-11.89 mg EQ g⁻¹ PS), ácido ascórbico (1.35 mg EAA g⁻¹ PS) y capacidad antioxidante (25.32-25.05 μM ETrolox g⁻¹ PS) mejorando el sistema antioxidante no enzimático de los frutos. Por otro lado, la actividad antioxidante enzimática, se vio favorecida de manera significativa con la aplicación de NPs de Fe y Cu, pues se mejoró la actividad de la superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa y peroxidasa, además este tratamiento con NPs de Fe redujo la actividad de la polifenoloxidasas, así como un menor índice de daño oxidativo a través de una menor acumulación de malondialdehído, respecto a los otros tratamientos con NPs. Los resultados obtenidos en el presente estudio, muestran que la aplicación foliar de nanopartículas de selenio, hierro, zinc y cobre principalmente, pueden mejorar el sistema antioxidante enzimático y no enzimático en frutos de pera, bajo condiciones de temporal.

SUMMARY

Apple and pear fruits are among the most important deciduous crops worldwide for the contribution of biologically active nutrients beneficial to human health. These bioactive compounds can be further increased by applying different sources of fertilization, including macro and micronutrients necessary for the nutrition of apple and pear trees, which can be supplied through soil applications and foliar applications. Inside the foliar applications can be applied nanoparticles of different microelements that due to their size can exhibit better responses in the performance and intrinsic quality of the fruits. Therefore, the objectives of the present study were: 1) to evaluate the effect of soil fertilization with N, P and K (150-50-80, 100-60-60) and without soil fertilization (SFE) and leaf fertilization with nanoparticles (NPs) of Se and Zn (Se: 50 ppm, Zn: 250 ppm and without nanoparticles (NP0), on yield and antioxidant compounds of apples and 2) evaluate foliar application with nanoparticles (NPs) of selenium (NPs Se-50 ppm), copper (NPs Cu-250 ppm), iron (NPs Fe-250 ppm), zinc (NPs Zn-250 ppm) and without nanoparticles as control (SNPs 0), in the behavior of the antioxidant, enzymatic and non-enzymatic system in pear fruits. Both experiments were carried out in commercial orchards of apple (*Malus domestica* L., Golden Delicious) and pear (*Pyrus communis*, Bartlett), under a random complete block design with nine treatments for the apple tree and five for the pear tree and three repetitions per treatment, in both fruit trees.

Objective one results found that treatments with fertilization doses 150-50-80 and 100-60-60 supplemented with Se and Zn NPs generally increased yield, sugar content and ascorbic acid in apple fruits. The highest increase in fruit yield was found in SFE + NPZn treatment (+ 193% compared to control). SFE + NPSe and SF + NPZn treatments led to a higher content of total phenols and flavonoids with maximum values of 7.6 mg AGE and 15.82 mg QE per gram of dry weight respectively. These compounds had a direct correlation on the antioxidant activity in the fruits. Foliar application of Se and Zn nanoparticles complemented soil fertilization with N, P, K to improve yield and synthesis of bioactive compounds in apple.

On the other hand, objective two results showed that foliar applications with NPs Se and NPs Zn, can increase the content of total sugars in pear fruits (+42-55%, regarding the control treatment), while the fruits of the treatments NPs Se and NPs Cu exhibited a higher content of total phenols (4.92-5.02 mg AGE g⁻¹ PS), flavonoids (13.33-11.89 mg QE g⁻¹ PS), ascorbic acid (1.35 mg AAE g⁻¹ PS) and antioxidant capacity (25.32-25.05 μM TroloxE⁻¹ PS) improving the non-enzymatic antioxidant system of fruits. On the other hand, the enzymatic antioxidant activity was significantly favored with the application of Fe and Cu NPs, as the activity of superoxide dismutase, catalase, ascorbate peroxidase and peroxidase were improved. In addition, this treatment with Fe NPs reduced the activity of polyphenoloxidase, as well as a lower rate of oxidative damage through a lower accumulation of malondialdehyde, compared to other treatments with NPs. The results obtained in the present study show that the foliar application of selenium, iron, zinc and copper nanoparticles, mainly, can improve the enzymatic and non-enzymatic antioxidant system in pear fruits, under storm conditions.

INTRODUCCIÓN GENERAL

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año mueren 17 millones de personas en todo el mundo por alguna enfermedad crónica degenerativa (OMS, 2023). Estas enfermedades están representadas principalmente por obesidad, enfermedades cardiovasculares, diabetes, enfermedad crónica renal, enfermedad inflamatoria del intestino, osteoporosis, artritis reumatoide y muchos tipos de cáncer, entre otras (Proestos, 2018). Los pronósticos estadísticos son alarmantes para los próximos años, y es que las proyecciones epidemiológicas informan, que para el año 2030 llegarán al 80% de todas las enfermedades en el mundo. Las principales causas asociadas a estos padecimientos son, la mala nutrición, ingesta reducida de frutas y verduras, elevado índice de masa muscular y una baja actividad física (Di Renzo et al., 2021).

Por otra parte, en los últimos años un gran número de estudios científicos han evidenciado una nueva generación de alimentos no procesados y cuya composición nutrimental es idónea para fortalecer el buen funcionamiento del cuerpo humano (Proestos, 2018). Estos alimentos son los llamados “superfoods” y se trata de productos alimenticios con concentraciones elevadas de nutrientes e ingredientes bioactivos como las vitaminas, minerales, antioxidantes, aminoácidos esenciales, enzimas, los cuales contribuyen al buen funcionamiento del organismo, gracias a una mayor biodisponibilidad de éstos (Fernández-Ríos et al., 2022). Estos superfoods se han vuelto populares, debido a su impacto positivo en la salud, estimulando el sistema inmunológico y el buen funcionamiento de órganos del cuerpo humano (Fernández-Ríos et al., 2022). El consumo de estos alimentos, con altas concentraciones de nutrimentos, podrían reducir los índices de muerte provocados por enfermedades crónicas degenerativas, al prevenir o contrarrestar los daños por estrés oxidativo (Kolniak-Ostek et al., 2020).

Un mayor consumo de frutas, es deseable para mantener una alimentación saludable y para ayudar a reducir el riesgo de sufrir alguna enfermedad crónica. Los frutales de manzano y peral, son de los cultivos caducifolios más importantes a nivel mundial, alcanzando en el caso de la manzana una producción de 86.44 millones de toneladas, mientras

que la pera alcanzó las 25.8 toneladas métricas en el año 2021 (FAOSTAT, 2023). Son de los frutos más consumidos en el mundo, forman parte importante de la dieta humana, debido a los beneficios que aporta a la salud, ya que son fuente de sustancias biológicamente activas, como fitoquímicos, azúcares solubles, aminoácidos, ácidos orgánicos, vitaminas y minerales los cuales les brindan a los frutos características organolépticas aceptables para ser consumidas, además de mejorar el sabor y aumentar su calidad nutraceútica (Azzini et al., 2019; Kumar et al., 2018; Wang et al., 2021).

Para satisfacer las demandas de alimentos tanto en producción, como en calidad se buscan estrategias para mejorar el rendimiento y la calidad de los frutos de manzana y pera. Una de estas estrategias, es la adición de fertilizantes que aportan los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (Seleiman et al., 2021). El nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), son los macronutrientes vegetales más importantes que requieren los manzanos y perales (Brunetto et al., 2015). La falta de estos macronutrientes impacta negativamente a la producción y crecimiento de las plantas (Sayah y Jameel, 2020).

Aunado a lo anterior, también se buscan alternativas novedosas y de vanguardia, que permitan incrementar el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en los frutos de manzana y pera para que puedan incluirse en los llamados superfoods, para obtener los beneficios que estos alimentos ofrecen. Una tecnología de vanguardia es la aplicación de micronutrientes esenciales en forma de nanopartículas para la nutrición de los cultivos (López-Vargas et al., 2018). Las nanopartículas, son agregados atómicos con un tamaño que oscila entre 1-100 nm al menos en una dimensión, debido a este pequeño tamaño exhiben propiedades fisicoquímicas diferentes como alta relación superficie-volumen, mayor reactividad, mayor poder de ionización, lo que les permite interactuar con estructuras intracelulares e inducir cambios en diferentes vías metabólicas, en comparación con la aplicación de micronutrientes en sus formas convencionales (Fortis-Hernández et al., 2022; García-López et al., 2019; Zahedi, Hosseini, et al., 2019). Particularmente las nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc, han mostrado efectos positivos en la morfología, fisiología y bioquímica de las plantas (Hernández-Hernández et al., 2019). Achari y Kowshik, (2018), en su estudio mencionan que las nanopartículas, también pueden ingresar al fruto, cuando se aplican foliarmente y pueden mejorar la calidad de los nutrientes. Estudios recientes

demuestran que la aplicación foliar de nanopartículas de algunos micronutrientes como zinc, cobre, hierro y selenio, se logra incrementar el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, en algunos cultivos tales como; chile habanero (García-López et al., 2019), chile jalapeño (Pinedo-Guerrero et al., 2017), tomate (López-Vargas et al., 2018), moringa (Juárez-Maldonado et al., 2018), plantas de café (Rossi et al., 2019), pepino (Guillén-Enríquez et al., 2022), fresas (Zahedi, Abdelrahman, et al., 2019), melón (Fortis-Hernández et al., 2022; Rivera-Gutiérrez et al., 2021), entre otros. Genaidy et al. (2020), revelaron que aplicaciones foliares en frutos de olivo a 20 ppm de NPs de trióxido de boro (B_2O_3) más 200 ppm de NPs óxido de zinc ZnO, se obtienen frutos con mejores características de defensa antioxidante no enzimática. Elsheery et al. (2020), informaron que aplicaciones combinadas de nanopartículas de ZnO (100 mg L^{-1}) y silicio (150 mg L^{-1}), mejoró la absorción de nutrientes por lo que incrementó la calidad intrínseca en frutos de mango. En árboles de granada Davarpanah et al. (2016), informaron en su estudio que aplicaciones combinadas de nanopartículas de boro y zinc, se obtienen frutos con mayor contenido de fenoles totales, azúcares totales y ácido ascórbico. En frutos membrillo Rahemi et al. (2020), mostraron que aplicaciones foliares de NPs de quelato de hierro indujo una mayor actividad de la enzima catalasa y mayor contenido de fenoles totales.

Por lo anterior el objetivo del presente estudio fue evaluar dos formulaciones de fertilización edáfica y aplicaciones foliares con nanopartículas de cobre, selenio, hierro y zinc, sobre el rendimiento y el contenido de compuestos bioactivos en frutos de manzana y pera.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de dos formulaciones de fertilización edáfica y aplicaciones foliares con nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc, sobre el rendimiento y compuestos bioactivos en frutos de *Malus domestica* L. y *Pyrus communis* L.

Objetivos específicos

- Presentar información reciente sobre el impacto del uso de nanofertilizantes de macro y micronutrientes esenciales en la nutrición de los cultivos frutales, para aumentar el rendimiento y características nutricionales en los frutos.
- Evaluar los efectos de las aplicaciones de fertilización edáfica con N, P y K y las aplicaciones foliares con nanopartículas de selenio y zinc sobre el rendimiento, el contenido de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante en los frutos de manzana.
- Evaluar el efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc sobre el sistema antioxidante, enzimático y no enzimático en frutos de pera.

HIPÓTESIS

Con la fertilización edáfica y aplicación foliar con nanopartículas de cobre, selenio, hierro y zinc, se obtiene un mayor rendimiento y calidad en frutos de manzana y pera.

JUSTIFICACIÓN

Los frutos de manzana y pera ofrecen nutrimentos importantes para la dieta humana, además de ofrecer al paladar una textura crujiente y sabor dulce, son una rica fuente de azúcares, minerales, fibra dietética y compuestos funcionales como ácido ascórbico y compuestos fenólicos (Kumar et al., 2018). Son de los cultivos frutales más consumidos a nivel mundial, después de todos los cítricos, uvas y plátanos (FAOSTAT, 2023). Sin embargo, a pesar de la importancia económica y nutritiva que poseen estos frutos, la producción de manzano y peral, en nuestro país, es generalmente baja, debido principalmente a una inadecuada aplicación de fertilización de macro y micronutrientes y un escaso nivel tecnológico, entre otros. Por lo cual, los rendimientos de estos cultivos son bajos. Varios estudios han demostrado que, sin los aportes de una fertilización eficiente y oportuna, los rendimientos de algunos cultivos de se ven seriamente afectados (Davarpanah et al., 2017). Por tanto, la nutrición es fundamental, para lograr una mayor producción agrícola y mayor calidad de los frutos.

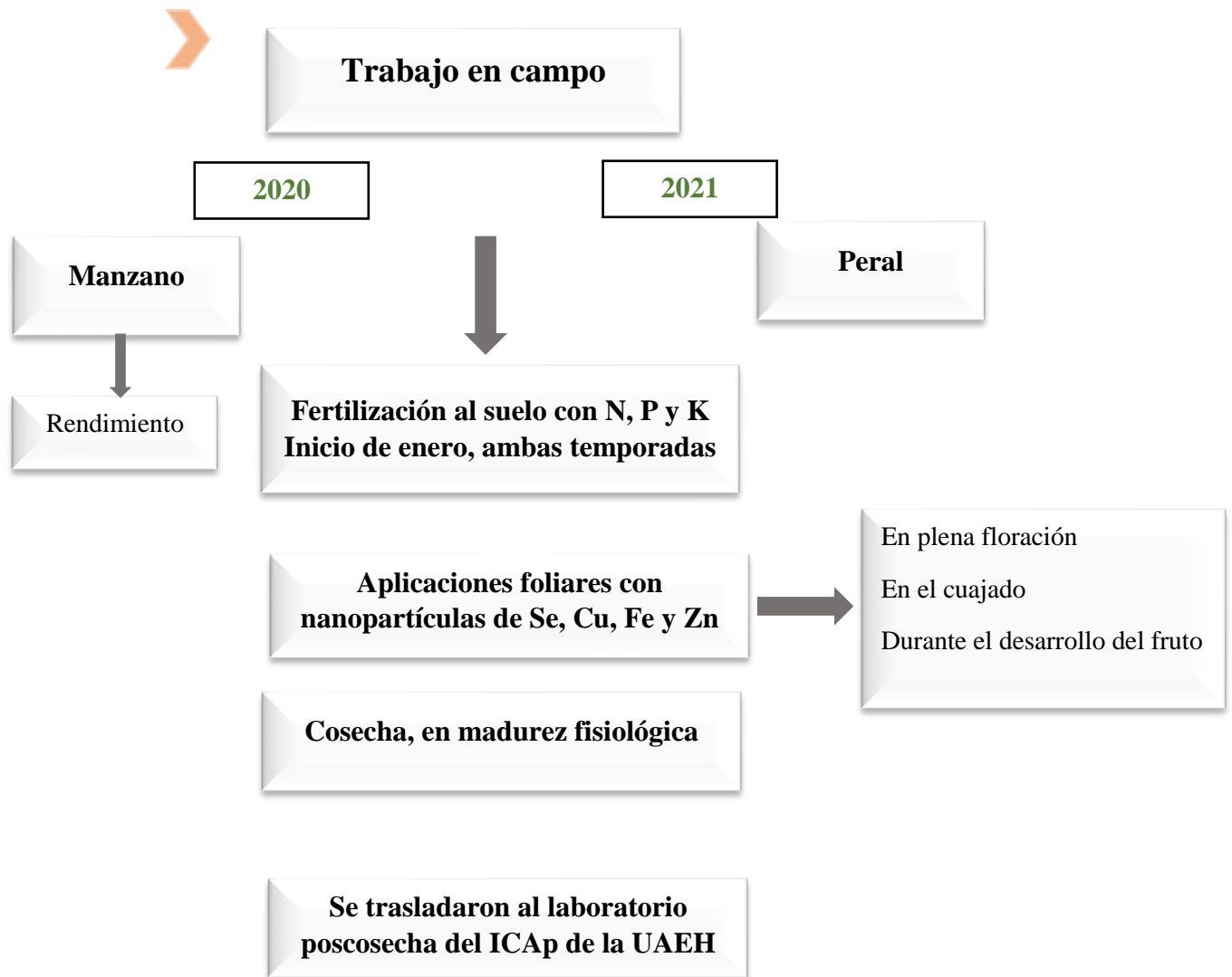
Por lo anterior, es necesario, el empleo de novedosas tecnologías que permitan aumentar la productividad en los sistemas agrícolas, siendo más amigables con el medio ambiente (Seleiman et al., 2021). El empleo de la nanotecnología, mediante el uso de nanopartículas, se ha convertido en uno de los campos científicos más innovadores para la nutrición de las plantas. Estos fertilizantes a escala nanométrica (1-100 nm), presentan características fisicoquímicas únicas, en comparación con sus contrapartes a granel, las cuales, por su tamaño reducido, permiten una mayor absorción de nutrientes, por lo que se

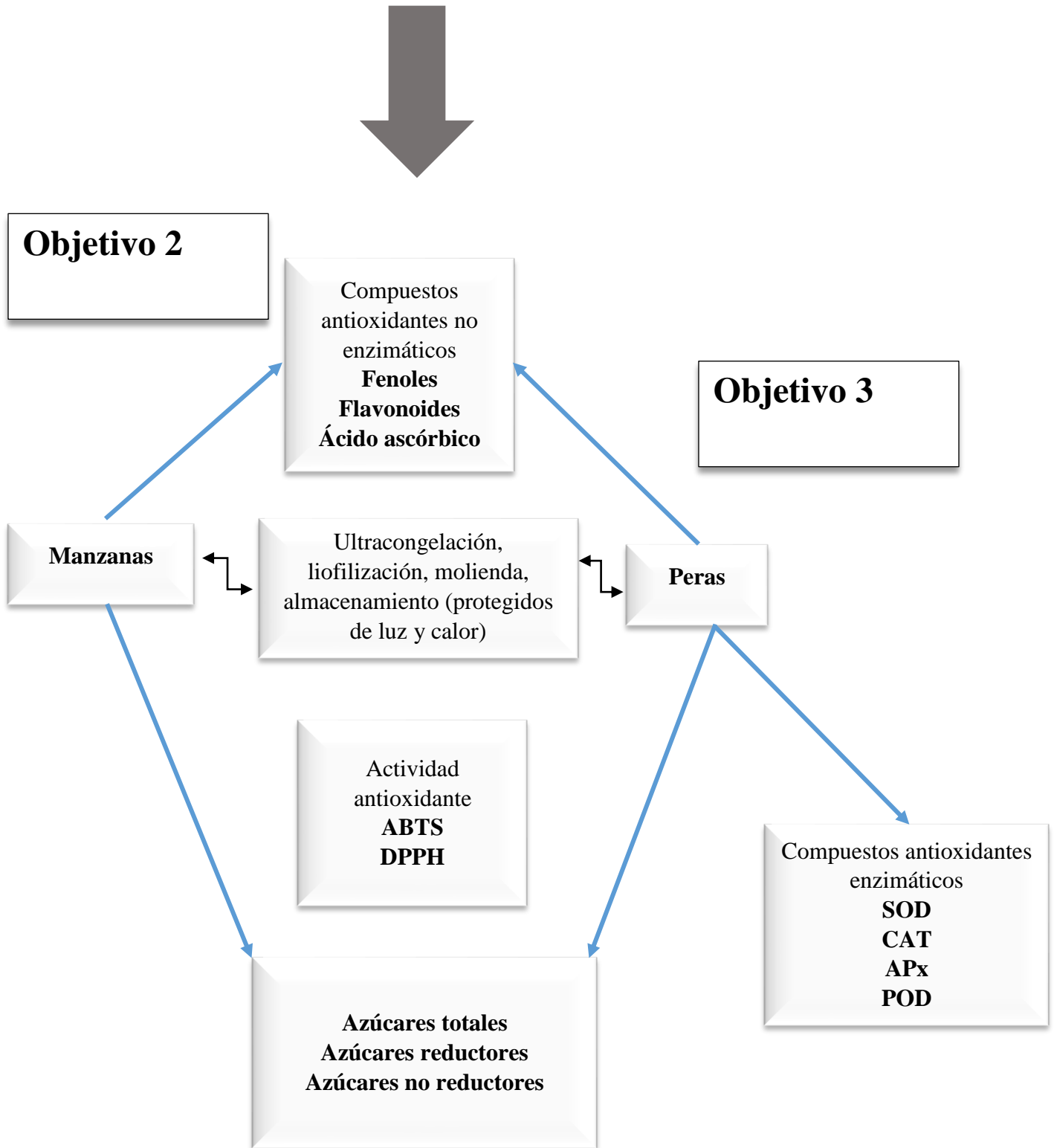
afecta positivamente el rendimiento y el contenido de compuestos bioactivos en los productos hortofrutícolas.

Los estudios sobre la aplicación de nanopartículas y su efecto en frutales aún son muy limitados. En manzano se ha reportado la aplicación de nanopartículas de calcio, para mejorar su calidad, retrasar la maduración y senescencia. Los resultados reportan que las NPs de Ca tienen el potencial para mejorar la calidad de los frutos de manzana (Ranjbar et al., 2018), mientras que en peral aún no existen aplicaciones de nanopartículas al respecto.

Por todo lo anterior, en el presente estudio, se evaluó el efecto de dos formulaciones de fertilización al suelo, complementando con aplicaciones foliares con nanopartículas de cobre, selenio, hierro y zinc, sobre el rendimiento y calidad intrínseca de los frutos del manzano y peral.

DIAGRAMA METODOLÓGICO





CAPÍTULO I

APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES DE MACRO Y MICRONUTRIENTES ESENCIALES PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DEL FRUTOS EN FRUTALES

RESUMEN

Hoy en día, existen muchas amenazas que aquejan a una agricultura sostenible, de las más preocupantes, es el cambio climático y un creciente aumento de la población, por lo cual, es necesario y urgente el empleo de novedosas tecnologías, que permitan aumentar el rendimiento y la calidad en los cultivos frutales, al mismo tiempo que sean amigables con el medio ambiente. La nanotecnología con el uso de nanofertilizantes (NF), proporciona soluciones sostenibles al reemplazar los fertilizantes convencionales con sus equivalentes nanopartículas (NPs), las cuales, debido a su tamaño, presentan características únicas para la nutrición de las plantas. El empleo de estos nanofertilizantes en la horticultura presentan beneficios importantes en el crecimiento vegetativo, mejorando el crecimiento reproductivo y la floración, aumentando así el rendimiento agrícola, la calidad de los frutos y en última instancia mejorando su vida útil. Estos materiales a escala nanométrica (1-100 nm), presentan características fisicoquímicas únicas, son una alternativa eficaz a los fertilizantes convencionales, ya que, al tener un tamaño reducido y aplicarse a bajas concentraciones, permite aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes, por lo que se ve favorecido el rendimiento y la calidad en los frutos. En esta revisión, se discute el uso de diferentes nanopartículas en cultivos frutales, sus beneficios, productividad y como afecta en la nutrición de los frutos.

Palabras clave: Agricultura sostenible; compuestos bioactivos; metabolitos secundarios; nanotecnología agrícola; nutrición vegetal; rendimiento; seguridad alimentaria.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector agrícola enfrenta múltiples desafíos para seguir alimentando a una población en constante aumento y afrontar con éxito las inclemencias del cambio climático que cada día se convierte en una amenaza importante para la población humana (Habib-ur-Rahman et al., 2022; Usman et al., 2020). El uso de fertilizantes químicos sintéticos, incrementan los rendimientos en los cultivos frutícolas, sin embargo, el uso indiscriminado y concentraciones elevadas de estos fertilizantes, provocan efectos negativos en la calidad de los frutos y deterioro del suelo (Sharma et al., 2020).

Por otro lado, incrementar el consumo de frutas es importante para reducir el riesgo de desarrollar algún tipo de enfermedad crónica degenerativa, que cada año cobra la vida de más de 17 millones de personas en el mundo (OMS, 2023). Los principales factores que originan estos padecimientos son, una mala nutrición, bajo consumo de frutas y verduras, escasa actividad física, entre otros. Por ello, es importante mantener los cultivos frutales, con los requerimientos nutricionales adecuados, para una mayor productividad y mayor calidad en los frutos (Sharma et al., 2020).

Por lo anterior, se buscan alternativas novedosas y de vanguardia, que permitan resolver los problemas que aquejan a una agricultura sostenible. La nanotecnología, proporciona soluciones sostenibles, para hacer frente a los peligros del hambre, aumentar la seguridad alimentaria, aumentar la biodisponibilidad de los nutrientes y por ende tener una mejor vida (Fadiji et al., 2022; Seleiman et al., 2021). La nanotecnología, con el uso de nanofertilizantes (NF, partículas que se encuentran en un rango de tamaño de 1-100 nm), está cobrando enfoques novedosos para la nutrición de los cultivos frutales. El uso de NF en la agricultura, permiten la liberación de nutrientes de forma gradual, se utilizan para reducir las dosis de los fertilizantes convencionales, aumentar el rendimiento y la eficacia en el uso de nutrientes, además de una mayor biodisponibilidad, actividad biológica y reactividad (Meena y Aravinda, 2017; Nongbet et al., 2022), esto debido a sus características fisicoquímicas que presentan como tamaño más pequeño, alta relación superficie-volumen, mayor reactividad, alto poder ionizante, mejor estabilidad química, mayor absorción, mayor tolerancia al pH, mayor estabilidad térmica y alta eficiencia en el uso de nutrientes, lo cual les permite interactuar a nivel celular y hacer cambios en diferentes vías metabólicas, en comparación

con los efectos de los fertilizantes en sus formas convencionales (Fatima et al., 2020; Seleiman et al., 2021).

El factor más ampliamente investigado y desarrollado relacionado con los árboles frutales son los nanofertilizantes (NF), se utilizan ampliamente en la horticultura, para la nutrición de los árboles, mediante aplicaciones al suelo, inyectados *in vitro* y foliares, los cuales proporcionan nutrientes con alta eficiencia y bajo desperdicio, debido a su translocación más rápida a los diferentes órganos de las plantas (Rico et al., 2011; Sharma et al., 2020; Zahedi et al., 2020). Los NF son los activos más importantes de la nanotecnología en la agricultura y podrían ser una opción en el sector hortícola para aumentar el rendimiento y calidad intrínseca en los frutos (Sharma et al., 2020), además Abou El-Nour et al. (2010), informan que la aplicación de NF a cultivos frutales puede reducir el estrés abiótico, lo que afectaría positivamente la calidad de los frutos. Estos NF juegan un papel muy importante en el aumento del crecimiento vegetativo, mejorando el crecimiento reproductivo y la floración, por lo que se vería beneficiado el rendimiento, la calidad y vida útil de los frutos (Zahedi et al., 2020), además estudios muestran que estos NF, pueden aumentar la fertilidad natural del suelo, la biodisponibilidad de los nutrientes en las plantas y la calidad de los frutos, esto es por una mejor eficiencia en el uso de nutrientes, lo cual reduce la toxicidad del suelo, reduce la pérdida de nutrientes, por lo que se garantiza la seguridad alimentaria (Chhipa, 2017; Nongbet et al., 2022).

Según los requisitos de nutrición de las plantas, los nanofertilizantes se dividen en, macro y micronutrientes (Chhipa, 2017; Seleiman et al., 2021; Sharma et al., 2020). Estudios muestran que debido a varios procesos complejos edáficos los macronutrientes aplicados en sus formas convencionales, se inmovilizan dentro del suelo, obstruyendo su disponibilidad y absorción por parte de las plantas, ocasionando que menos de la mitad sean utilizados por las plantas, es decir, que no llegan a sus sitios activos, debido a diferentes factores como fotólisis, lixiviación, mineralización, inmovilización y degradación microbiana, causando contaminación ambiental (Fatima et al., 2020; Seleiman et al., 2021; Sharma et al., 2020), por lo cual, la aplicación de estos nutrientes en sus correspondientes nanopartículas, puede disminuir estos terribles efectos ambientales.

Por lo anterior, esta revisión, tiene como objetivo presentar información reciente sobre el impacto del uso de nanofertilizantes de macro y micronutrientes esenciales en la nutrición de los cultivos frutales, para aumentar el rendimiento y características nutricionales en los frutos.

2. Nanofertilizantes de macronutrientes

Los nanofertilizantes (NF), son sustancias innovadoras, creadas por técnicas nanotecnológicas que tienen el potencial de reemplazar a los fertilizantes convencionales, en sus correspondientes nanopartículas (Abdelmigid et al., 2022). Los elementos nutritivos en los cultivos frutales, se dividen en dos categorías: macronutrientes y micronutrientes. Los primeros forman parte en la estructura de las moléculas y su nombre de macronutrientes hace referencia a que se necesitan en grandes cantidades, mientras que los micronutrientes son constituyentes enzimáticos y por tanto se necesitan en pequeñas cantidades (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

Por lo anterior, se buscan estrategias para un óptimo manejo de macronutrientes, para un correcto crecimiento y producción (Sharma et al., 2020). Las necesidades nutricionales de cada cultivo dependen de varios factores entre los que destacan, disponibilidad de nutrientes del suelo, pH, contenido de materia orgánica, humedad y la variedad del cultivo. Las aplicaciones de fertilizantes de macronutrientes, están sujetas al resultado de un análisis químico del suelo, análisis foliar y observaciones de campo. Una fertilización eficiente depende de los requerimientos nutricionales de la planta, estado nutricional del suelo, y la época de aplicación (Brunetto et al., 2015). La aplicación oportuna de fertilizantes a los cultivos frutales, son indispensables para el crecimiento, para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos, estos nutrientes proporcionan los elementos necesarios para el desarrollo de las plantas. Los cultivos frutales requieren de macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en grandes cantidades, sin embargo, debido a su baja eficiencia de absorción, sólo una pequeña fracción es aprovechada por los árboles, causando pérdidas económicas importantes y contaminación ambiental grave (Adeyemi et al., 2020; Ahmad et al., 2022; Brunetto et al., 2015; Chhipa, 2017; Predoi et al., 2020). Por ello, el empleo de N, P y K presenta funciones vitales dentro de los cultivos frutales, sin embargo, sus formas convencionales de aplicación, producen problemas de absorción por parte de la planta.

2.1 Nitrógeno (N)

El nitrógeno es el nutriente más importante para el desarrollo de las plantas, forma parte estructural de biomoléculas como proteínas y ácidos nucleicos. Este macronutriente, ayuda al crecimiento y desarrollo de las plantas, es indispensable para lograr un buen rendimiento y calidad del fruto (Hu et al., 2018). El N, participa en diferentes funciones importantes para un adecuado crecimiento, ya que es componente de la estructura, división y crecimiento celular, se requiere para la síntesis de clorofila a través de su participación en el proceso de fotosíntesis, donde ingresa a la síntesis de enzimas y proteínas (Davarpanah et al., 2017; Sayah y Jameel, 2020). Participa en la formación de carbohidratos, determina el desarrollo de las hojas y brotes. Una deficiencia de N impacta en el color de las hojas y reduce el tamaño de los frutos, en la mayoría de los suelos agrícolas, este macronutriente se encuentra como deficiente y aunque existe en gran porcentaje en la atmósfera, las plantas no lo pueden aprovechar y utilizan las formas asimilables que son los nitratos y amonio (Davarpanah et al., 2017; Nongbet et al., 2022; Toranzo, 2016).

2.2 Fósforo (P)

Presenta un papel muy importante en el aumento de la división celular, en la estimulación del crecimiento de raíces y flores ya que se encuentra en las partes jóvenes como los extremos de raíces y brotes. La deficiencia de fósforo conlleva a retrasos en la maduración de la planta (Sayah y Jameel, 2020).

Los principales inconvenientes de los materiales fosfatados, son su baja absorción por parte de la planta, ya que cambian muy rápido de sus formas asimilables a sus formas menos accesibles, por lo que de 80-90% del fósforo no puede ser absorbido y se pierde en el medio ambiente (Carmona et al., 2022; Nongbet et al., 2022)

2.3 Potasio (K)

Es el tercer macronutriente más importante después del N y el P, y tiene un papel regulador vital en todas las funciones fisicoquímicas de las plantas para mantener el crecimiento y desarrollo normal (Seleiman et al., 2021). Interviene en funciones fisiológicas relacionadas a la salud de la planta. Se caracteriza por la gran movilidad y solubilidad en el interior de los tejidos vegetales, ejerce una gran influencia en la permeabilidad de las

membranas celulares y en la hidratación de los tejidos. Interviene en la economía hídrica de la planta, regulando la absorción y la pérdida por transpiración, así como también interviene en la síntesis de proteínas, actividad enzimática, fotosíntesis y translocación de carbohidratos (Coitiño-López et al., 2016; Yfran et al., 2017). El potasio, es uno de los nutrientes más abundantes en la fruta donde afecta positivamente el tamaño, firmeza, color de la piel, sólidos solubles totales, acidez, jugosidad y aroma (Brunetto et al., 2015).

El uso de nanofertilizantes (NF), de macronutrientes en árboles frutales, se está investigando y tienen efectos positivos en la nutrición de los árboles frutales.

3. Nanopartículas de micronutrientes o microelementos

La aplicación de micronutrientes en árboles frutales, juegan un papel muy importante en el crecimiento, floración, cuajado, rendimiento y calidad de los frutos (Davaranpanah et al., 2017; García-López et al., 2019; Nithin Kumar et al., 2017). Estudios han demostrado que la aplicación de micronutrientes, proporcionan una respuesta más rápida que la aplicación al suelo, debido principalmente a que los nutrientes se absorben fácilmente a través de la superficie de las hojas, lo que mejora el equilibrio de nutrientes y ayuda en el cuajado y retención de los frutos, lo que ayuda a incrementar su rendimiento y calidad intrínseca (Elsheery et al., 2020; García-López et al., 2019; Nithin Kumar et al., 2017). Abou-Aly et al. (2015), informan que concentraciones bajas de micronutrientes como zinc, hierro, y manganeso, aplicados por pulverización foliar, aumentaron significativamente el rendimiento de los cultivos. Estos elementos afectan las funciones metabólicas en el sistema vegetal.

Dentro de los micronutrientes el zinc, hierro, cobre y selenio participan en muchas funciones importantes en el desarrollo de las plantas, algunas de ellas se describen a continuación

3.1 El Zinc (Zn)

Considerado como uno de los ocho micronutrientes esenciales para las plantas, es esencial para humanos y animales. Se requiere en todos los tejidos fotosintéticos y la biosíntesis de clorofila. Desempeña un papel importante en el cuajado y retención de los frutos, así como en su rendimiento y calidad. Es importante para el metabolismo de las

auxinas fitorreguladoras del crecimiento, las cuales influyen en la elongación y división celular (Méndez-Argüello et al., 2016). El Zn es esencial para la actividad de diferentes enzimas como son las deshidrogenasas, aldolasas, isomerasas, transfosforilasas, ARN y ADN polimerasas, debido a que actúa como cofactor (Nithin Kumar et al., 2017). También participa en la síntesis del triptófano, división celular, mantenimiento de la estructura de la membrana y fotosíntesis. El Zn es necesario en la biosíntesis de proteínas y el metabolismo de los carbohidratos, presenta un papel importante en la expresión génica relacionada con el estrés ambiental (Davarpanah et al., 2016; García-López et al., 2019; Genaidy et al., 2020).

Por otro lado, la deficiencia de zinc causa; clorosis intervenal, hojas angostas y puntiagudas, entrenudos cortos, apertura tardía de los brotes vegetativos y florales y una disminución significativa en la producción y calidad del fruto (Saa et al., 2018).

Estudios muestran que la utilización de fertilizantes aplicados foliarmente con microelementos como Zn, B, Cu, Mn, Fe, tienen ventajas para su uso en campo, presentan una buena efectividad y una respuesta favorable de la planta, además de que aplicarlos foliarmente ayudan a evitar los síntomas de toxicidad al suelo (Fernández et al., 2013; A. Singh et al., 2017).

3.2 Hierro (Fe)

El hierro es un micronutriente importante requerido para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Nemati et al., 2018). Está involucrado en la formación de la clorofila, ADN, estructura del cloroplasto, respiración y varias vías metabólicas (Seleiman et al., 2021).

La deficiencia del hierro causa trastornos a las plantas conocido como clorosis foliar y atrofia (Malhotra et al., 2020). La deficiencia o baja actividad de hierro en la planta hace que la clorofila no se produzca en cantidades suficientes y las hojas se presenten pálidas y se vean como color amarillento entre las venas de las hojas, especialmente en hojas jóvenes, lo que en consecuencia podría provocar la necrosis de todas estas hojas. El hierro está involucrado en varios procesos fisiológicos; sirve como activador de procesos bioquímicos como la respiración, reacción redox, la fotosíntesis y la fijación simbiótica de nitrógeno (Pawar et al., 2019). Los síntomas por deficiencia de hierro pueden ocurrir en suelos (pH >7.0). El hierro es más importante para las plantas que otros micronutrientes, ya que es un

cofactor de aproximadamente 140 enzimas que catalizan reacciones bioquímicas únicas (Nemati et al., 2018).

El hierro se encuentra en el suelo de forma abundante, aunque existen reportes en la literatura que sugieren que el 30% del suelo en el mundo es deficiente de hierro y esto se debe a la presencia de hierro en forma insoluble (Fe^{3+}), en lugar de la forma disponible (Fe^{2+}), que usan las plantas. Esta deficiencia en el suelo no solo afecta el crecimiento de las plantas, sino que también conduce a una deficiencia en los seres humanos que causa anemia (Pawar et al., 2019).

3.3 Cobre (Cu)

El cobre es un micronutriente esencial, para el crecimiento normal de las plantas (Da Costa y Sharma, 2016). Por sus múltiples estados de oxidación, está involucrado en muchos procesos fisiológicos. Actúa como componente estructural en proteínas reguladoras y en aquellas que están involucradas en el transporte de electrones fotosintéticos, respiración mitocondrial, respuestas al estrés oxidativo, al metabolismo de la pared celular y la señalización hormonal. Es un cofactor de antioxidantes como la superóxido dismutasa y la ascorbato oxidasa (Seleiman et al., 2021). A nivel celular el Cu también juega un papel importante en la señalización de la transcripción, la maquinaria de tráfico de proteínas, la fosforilación oxidativa y la movilización del hierro (Da Costa y Sharma, 2016).

La deficiencia de cobre conduce a diversos trastornos; necrosis, retraso en el crecimiento, bajo número de semillas, granos y frutas, aunado a un bajo rendimiento de las cosechas (Seleiman et al., 2021).

3.4 Selenio (Se)

Es un micronutriente esencial para muchos organismos vivos, incluidos los humanos y otros animales (Pezzarossa et al., 2011). Es un nutriente beneficioso para las plantas, importante para los cultivos alimentarios, ya que es una de las especies dominantes en el suelo, pero aún se desconoce el mecanismo de su absorción por las plantas (Pezzarossa et al., 2011; M. Singh et al., 2019).

El selenio, es necesario para la defensa antioxidante, ya que induce la expresión de genes de asimilación de azufre y es parte integral de la enzima glutatión peroxidasa. La suplementación con Se puede mejorar la glutatión peroxidasa (GPx) y la actividad de otras proteínas basadas en Se. Este microelemento, se utiliza para contrarrestar diversos estreses abióticos como sequía, estrés salino, radiación UV-B, senescencia, metales pesados, alta temperatura y desecación (Hernández-Hernández et al., 2019; Zahedi et al., 2019).

Estudios muestran que la aplicación de concentraciones bajas de selenio en las plantas, estimula el crecimiento y la calidad de los frutos, mejora la fotosíntesis, así como también activa el mecanismo de defensa contra el estrés abiótico y biótico (Hernández-Hernández et al., 2019).

4. Mecanismo de absorción de nanofertilizantes en árboles frutales

Los nanofertilizantes son considerados como la aplicación más importante de la nanotecnología en la horticultura, su aplicación, se puede hacer mediante dos mecanismos; vía foliar y vía raíces, cuando se aplican sobre las hojas, se hace en forma de aerosol o aspersión, la penetración es por las estomas y luego se desplazará por el floema hacia diferentes tejidos de las plantas. Cuando se aplica a la zona de las raíces, es mediante el riego y de esta manera las NP se pueden desplazar por el sistema conductivo del xilema (Lira-Saldivar et al., 2018).

4.1 Absorción foliar de nanofertilizantes

Cuando la aplicación se realiza vía foliar, las NP, se enfrentan a la barrera cuticular antes de entrar a los tejidos vegetales (Pollard et al., 2008). En árboles frutales las NP se rocían en las ramas y en las hojas para mejorar el crecimiento, los rasgos fisiológicos y de productividad, ya que estos compuestos, pueden penetrar fácilmente en los tejidos de las plantas, a través de los estomas (Ahmed et al., 2017; Zahedi et al., 2020). Su efecto se puede deber a su tamaño pequeño, una de las propiedades más importantes de las NP, gracias al cual, las NPs pueden cruzar la epidermis a través de los estomas, grietas o poros de las hojas, luego trasladarse a través de las vías apoplasto y simplasto, seguido de un transporte a las células del mesófilo, en donde gracias al xilema y floema se distribuyen a diferentes partes de la planta (Zhu et al., 2020). Las NP dentro de las células, pueden interactuar con estructuras intracelulares, que estimulan la formación de especies reactivas de oxígeno y

mensajeros de señalización secundarios, que activan la maquinaria de defensa antioxidante tanto enzimática como no enzimática (incluidos fenoles totales y flavonoides), para eliminar el exceso de ROS (Fortis-Hernández et al., 2022; Rivero-Montejo et al., 2021).

4.2 Absorción de nanofertilizantes vía suelo

Las nanopartículas aplicadas al suelo se absorben inicialmente en la superficie de las raíces y luego cruzan varias barreras, hasta llegar al sistema vascular (Lv et al., 2019). Las NP atraviesan la cutícula de la superficie de la raíz y llegan a la epidermis de la raíz, posteriormente pueden seguir las vías apoplásticas o simplásticas (Lv et al., 2019; Seleiman et al., 2021). Los nanofertilizantes, presentan una alta absorción, posteriormente se van liberando elementos nutritivos gradualmente (Zahedi et al., 2020).

Por tanto, se puede decir que los NF, pueden ser absorbidos por las raíces cuando se aplican al suelo o por las hojas cuando la aplicación es foliar (Zahedi et al., 2020). El tamaño de las nanopartículas es fundamental, con diámetros pequeños, permiten la entrada más fácilmente a la cutícula, mientras que con diámetros mayores la absorción se ve afectada. Sin embargo, la absorción, translocación y acumulación de NP, depende de la especie vegetal, la morfología de las hojas, número y tamaño de los estomas, configuración química, estabilidad y concentración de las NP (Singh et al., 2017).

En la aplicación al suelo, la translocación de NF, puede seguir las vías apoplásticas o simplásticas. En la vía apoplástica, las NP entran en primer lugar en los poros de la pared celular y luego se trasladan al espacio intercelular, sin embargo, cabe mencionar que el diámetro de los poros de la pared celular restringe las NP mayores de 20 nm a través de la vía apoplástica (Seleiman et al., 2021).

En la actualidad las aspersiones foliares de nutrientes en la mayoría de los huertos frutales se han vuelto habitual y sus efectos sobre las características de crecimiento en brotes y frutos han sido positivos (Kamiab y Zamanibahramabadi, 2016).

La absorción foliar, está influenciada por varios factores, como pueden ser; la especie vegetal, la edad de las hojas, tipo y concentración de nutrientes, formulación del producto, condiciones climáticas y el estado nutricional de la planta (Nithin Kumar et al., 2017).

5. Aplicaciones foliares de nanopartículas

En la actualidad las aspersiones foliares de nutrientes en la mayoría de los huertos frutales se han vuelto habitual y sus efectos sobre las características de crecimiento en brotes y frutos han sido positivos (Kamiab y Zamanibahramabadi, 2016). La absorción foliar, está influenciada por varios factores, como pueden ser; la especie vegetal, la edad de las hojas, tipo y concentración de nutrientes, formulación del producto, condiciones climáticas y el estado nutricional de la planta (Nithin Kumar et al., 2017).

6. Aplicación de nanofertilizantes en árboles frutales

La nanotecnología es utilizada ampliamente en la agricultura y la horticultura, con la aplicación de nanofertilizantes (NF) se logra aumentar el crecimiento vegetativo, la polinización y la fertilidad de las flores, lo que conlleva a un mayor rendimiento y una mejor calidad de los frutos (Al-Hchami y Alrawi, 2020; Zahedi et al., 2020). Aunque como mencionan Elsheery et al. (2020), siguen siendo limitados los hallazgos sobre el uso de nanomateriales para mejorar el crecimiento, el desarrollo y la productividad en los árboles. Los mismos autores mostraron que aplicaciones combinadas de NP ZnO a 100 ppm, con nanopartículas de silicio NP Si a 150 ppm, se logra incrementar el crecimiento, el rendimiento y calidad en los frutos de mango. Por otra parte, Genaidy et al. (2020), mostraron que aplicaciones foliares en frutos de olivo a 20 ppm de NP B₂O₃ más 200 ppm de NP ZnO se obtiene un mayor rendimiento de frutos, con alto porcentaje de aceite en la semilla y con baja acidez. En árboles de granada Davarpanah et al. (2016), aplicaron pulverizaciones foliares de NP de B y NP de Zn a bajas concentraciones, con lo que mostraron que una sola aplicación fue suficiente para lograr aumentos en el rendimiento y mejora en la calidad intrínseca en los frutos. En manzanos Ranjbar et al. (2018), compararon los efectos de aplicaciones foliares con NP de Ca y aplicaciones convencionales de cloruro de calcio, los resultados mostraron que los fertilizantes a base de nanopartículas de calcio, mejoraron la calidad poscosecha. Zahedi et al. (Zahedi et al., 2019), estudiaron el efecto de aspersiones foliares de selenio (Se) y nanopartículas de selenio (NP Se), sobre el rendimiento y la calidad del fruto de granada a concentraciones de 1 y 2 μ M. Los resultados mostraron que aplicaciones foliares con NP de Se, resulta en aumentos significativos en el área foliar, en el contenido de clorofila, en el número de frutos por árbol, en el grosor de la cáscara, en el

diámetro de la fruta y en el rendimiento. Una concentración alta de NP de Se ocasiona un mayor impacto y es más beneficioso que una concentración baja. Los tratamientos con Se y NP Se, mejoraron el índice de madurez y disminuyeron el agrietamiento de la fruta de granada. Así mismo Davarpanah et al. (2018), evaluaron el efecto de aplicaciones foliares con NP de Ca a 0.25 y 0.50 g Ca L⁻¹ y cloruro de calcio (CaCl₂·2H₂O) a 2.73 y 5.45 g Ca L⁻¹, sobre el rendimiento y calidad de frutos de granada. Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares con NP Ca lograron el mejor efecto que las aplicaciones convencionales con Ca. En frutos de granada (*Punica granatum* L.), Davarpanah et al. (2016) Aplicaron foliarmente nanopartículas de zinc (NP Zn, 0, 60 y 120 mg Zn L⁻¹) y boro (NP B, 0, 3.25 y 6.5 mg B L⁻¹) sobre el rendimiento y calidad en frutos de granada. Los resultados mostraron aumentos en el rendimiento, debido principalmente a aumentos en el número de frutos por árbol también reportaron cambios con respecto a características físicas, incluyendo menor agrietamiento, mayor grosor de la cascara, mayor longitud del fruto, mayor diámetro, mayor peso promedio y contenido de jugo. Se observó un mayor porcentaje de sólidos solubles totales y hubo una mejora significativa en la calidad del fruto. Davarpanah et al. (2017), evaluaron los efectos de aplicaciones foliares de nanopartículas de nitrógeno (NP N, 1.3 y 2.7 g N/árbol) y urea (24.4 y 48.8 g N/árbol), sobre las propiedades físicas y químicas de los frutos de granada. La aplicación la realizaron en plena floración y un mes después durante dos años consecutivos 2014 y 2015. Los tratamientos de N foliar nN2 a 2.7 g N/árbol y urea 24.4 g N/árbol respectivamente, presentaron los mejores contenidos de N en hojas, mejor rendimiento y calidad del fruto. Todos estos estudios se resumen en el cuadro 1.

En un estudio reciente Montaña-Herrera et al. (2022), evaluaron el efecto de fertilizaciones al suelo y foliares en *Malus domestica* L. Las aplicaciones al suelo fueron con macronutrientes de N, P y K, usando dos fórmulas de fertilización (150-50-80 y 100-60-60), mientras que las aplicaciones foliares fueron con NP de Se a 50 ppm y NP de Zn. La aplicación de fertilizantes al suelo y foliares mostraron cambios importantes. Sin embargo, la aplicación con NP de Zinc a 250 ppm produjo el mayor rendimiento, número de frutos por árbol, mayor incremento en el contenido de azúcares, así como también aumentó el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante.

Cuadro 1. Efecto de diferentes nanofertilizantes en el crecimiento y características fisicoquímicas de los frutos en árboles frutales.

Fertilizante y NF	Aplicación	Concentración	Cultivo frutal	Efectos	Referencia
Urea y NP N	Foliar	NP N (0.25 y 0.50 g N/L). Urea (4.6 y 9.2 g N/L)	En frutos de granada	La aplicación de 1.50 g N L ⁻¹ de NP N, incrementó el rendimiento, número de frutos por árbol, incrementó el jugo por arilo y los SST	(Davarpanah et al., 2017)
NP ZnO y NP Si	Foliar	NP ZnO (50, 100 y 150 ppm). NP Si (150 y 300 ppm)	En frutos de mango	La aplicación combinada de 100 ppm de NP ZnO con 150 ppm de NP Si, mejoró el crecimiento, rendimiento y calidad en los frutos de mango	(Elsheery et al., 2020)
NP B ₂ O ₃ y NP ZnO	Foliar	NP B ₂ O ₃ (10 y 20 ppm) NP ZnO (100 y 200 ppm)	En frutos del olivo	La aplicación combinada de 20 ppm de NP B ₂ O ₃ con 200 ppm de NP ZnO mayor rendimiento de frutos.	(Genaidy et al., 2020)
NP Ca y CaCl ₂	Foliar	NP Ca (0, 1, 1.5 y 2%) CaCl ₂ (0, 1.5, 2 y 2.5%)	En frutos de manzana	La aplicación de NP Ca mejoró la calidad poscosecha de los frutos de manzana y redujo las actividades de las enzimas de la pared celular.	(Ranjbar et al., 2018)
NP Se y Se (Na ₂ SeO ₄)	Foliar	1 y 2 μM	En frutos de granada	NP Se a la mayor concentración 2 μM aumento significativamente características fisicoquímicas, como mayor área foliar, contenido de clorofila, número de frutos por árbol.	(Zahedi, Hosseini, et al., 2019)
N, P y K; NP Se y NP Zn	Suelo y Foliar	N, P y K (150-50-80, 100-60-60) NP Se (50 ppm), NP Zn (250 ppm)	En frutos de manzana	El mayor efecto en el rendimiento y compuestos bioactivos, se debió al uso de NP. El mayor rendimiento, número de frutos por árbol, azúcares totales, y compuestos bioactivos, se observó con la	(Montaño-Herrera et al., 2022)

Nano-quelato super plus ZFM	Foliar	NP-quelato ZFM (zinc, hierro y manganeso 2 gL ⁻¹)	En almendros	<p>aplicación foliar con NP Zn a 250 ppm.</p> <p>Aumentó el número de panículas de flores y frutos de panículas maduras.</p> <p>Se recomienda para aumentar la productividad y calidad en los almendros.</p> <p>La aplicación con 5 mL L⁻¹ de nano-quitosano aumento el rendimiento, el número de frutos por árbol y mejoró la calidad en los frutos de mango.</p> <p>La aplicación con NP K mostró efectos positivos en los frutos de kaki. Mejoró el proceso de fotosíntesis, disminuyó la peroxidación lipídica. Mejor rendimiento, peso y número de frutos por árbol.</p> <p>La aplicación foliar de nano-Fe, en dos tiempos, resultó ser más eficaz que el quelato de hierro en la mejora en la calidad intrínseca de los frutos de membrillo y en la clorosis</p>	(Kamiab & Zamanibahramabadi, 2016)
Nano-quitosan	Foliar	Nano-quitosan (2.5 y 5 mL L ⁻¹)	En frutos de mango (Zebda y Ewais)		(Ahmed et al., 2017)
Tres formas de aplicación con K, KCl, K ₂ SO ₄ y NPsK	Foliar	Todas las formas de K fueron al 3%	En frutos de Kaki		(Lo'ay et al., 2021)
Nano-hierro Quelato de hierro	Suelo y Foliar	2000 mg L ⁻¹	En frutos de membrillo		(Rahemi et al., 2020)

NP: Nanopartículas; NP N: Nanopartículas de nitrógeno; NP ZnO: Nanopartículas de óxido de zinc; NP Si: Nanopartículas de silicio; SST: sólidos solubles totales; NP B₂O₃: Nanopartículas de trióxido de boro; NP Ca: Nanopartículas de calcio; CaCl₂: Cloruro de calcio; NP Se: nanopartículas de selenio; Na₂SeO₄: Selenato de sodio; N, P y K: Nitrógeno, fósforo y potasio; NP Se: Nanopartículas de selenio; NP Zn: Nanopartículas de zinc; ZFM: Zinc, hierro y manganeso; K: potasio; KCl: cloruro de potasio, K₂SO₄: Sulfato de potasio; NP K: Nanopartículas de potasio.

7. CONCLUSIONES

La aplicación, tanto foliar como al suelo de nanofertilizantes de macro y micronutrientes a árboles frutales presenta múltiples beneficios en la nutrición de las plantas, gracias al potencial para mejorar la calidad de los frutos y aumentar la productividad de los cultivos a nivel mundial. Los efectos tanto positivos como negativos van a depender del cultivo, del tamaño de las nanopartículas, de la etapa de aplicación, las concentraciones usadas entre otros factores.

Lo anterior muestra que se requiere de mayor investigación sobre los efectos que presentan las nanopartículas en árboles frutales y estudiar más cultivares porque las respuestas son muy diferentes entre especies y cultivares.

8. REFERENCIAS

- Abdelmigid, H. M., Morsi, M. M., Hussien, N. A., Alyamani, A. A., Alhuthal, N. A., & Albukhaty, S. (2022). Green Synthesis of Phosphorous-Containing Hydroxyapatite Nanoparticles (nHAP) as a Novel Nano-Fertilizer: Preliminary Assessment on Pomegranate (*Punica granatum* L.). *Nanomaterials*, 12(9), 1–22. <https://doi.org/10.3390/nano12091527>
- Abou-Aly, H. E., Zaghloul, R. A., El-Meihy, R. M., & El-Saadony, M. T. (2015). Improvement of Growth and Yield of Pea Plants Using Integrated Fertilization Management. *Universal Journal of Agricultural Research*, 3(4), 135–143. <https://doi.org/10.13189/ujar.2015.030404>
- Abou El-Nour, K. M. M., Eftaiha, A., Al-Warthan, A., & Ammar, R. A. A. (2010). Synthesis and applications of silver nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 3(3), 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.04.008>
- Adeyemi, O., Keshavarz-Afshar, R., Jahanzad, E., Battaglia, M. L., Luo, Y., & Sadeghpour, A. (2020). Effect of wheat cover crop and split nitrogen application on corn yield and nitrogen use efficiency. *Agronomy*, 10(8), 2–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081081>
- Ahmad, Z., Tahseen, S., Wasi, A., Ganie, I. B., Shahzad, A., Emamverdian, A., Ramakrishnan, M., & Ding, Y. (2022). Nanotechnological Interventions in Agriculture. *Nanomaterials*, 12(2667), 1–31. <https://doi.org/10.3390/nano12152667>
- Ahmed, Z. O., Momtaz, G. M., & Hafez, N. K. (2017). Effect of Nano-chitosan on Vegetative Growth, Fruiting and Resistance of Malformation of Mango. *Trends in Horticultural Research*, 7(1), 11–18. <https://doi.org/10.3923/thr.2017.11.18>
- Al-Hchami, S. H. J., & Alrawi, T. K. (2020). Nano fertilizer, benefits and effects on fruit trees: A review. *Plant Archives*, 20, 1085–1088.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de Fisiología vegetal*.
- Brunetto, G., Melo, G. W. bastos, Toselli, M., Quartieri, M., & Tagliavini, M. (2015). The Role of Mineral Nutrition on Yields and Fruit Quality in Grapevine, Pear and Apple. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(4), 1089–1104. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-103/15>
- Carmona, F. J., Guagliardi, A., & Masciocchi, N. (2022). Nanosized Calcium Phosphates as Novel Macronutrient Nano-Fertilizers. *Nanomaterials*, 12(15).
- Chhipa, H. (2017). Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 15–22. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4>
- Coitiño-López, J., Barbazán, M., & Ernst, O. (2016). Fertilización con potasio en soja: asociación de la respuesta del cultivo con características edáficas y topográficas. *Agrociencia Uruguay*, 20(2), 109–120. <https://doi.org/10.2477/vol20iss2pp109-120>
- Da Costa, M. V. J., & Sharma, P. K. (2016). Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 54(1), 110–119. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>

- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Abadía, J., Val, J., Davarynejad, G., Aran, M., & Khorassani, R. (2018). Foliar calcium fertilization reduces fruit cracking in pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani). *Scientia Horticulturae*, 230, 86–91.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.11.023>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Aran, M., Abadía, J., & Khorassani, R. (2017). Effects of foliar nano-nitrogen and urea fertilizers on the physical and chemical properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. ardestani) fruits. *HortScience*, 52(2), 288–294.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI11248-16>
- Elsheery, N. I., Helaly, M. N., El-Hoseiny, H. M., & Alam-Eldein, S. M. (2020). Zinc oxide and silicone nanoparticles to improve the resistance mechanism and annual productivity of salt-stressed mango trees. *Agronomy*, 10(4), 558. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040558>
- Fadiji, A. E., Mthiyane, D. M. N., Onwudiwe, D. C., & Babalola, O. O. (2022). Harnessing the Known and Unknown Impact of Nanotechnology on Enhancing Food Security and Reducing Postharvest Losses: Constraints and Future Prospects. *Agronomy*, 12(7), 1–14.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12071657>
- Fatima, F., Hashim, A., & Anees, S. (2020). Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 1292–1303.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11218-9>
- Fernández, V., Sotiropoulos, T., & Brown, P. H. (2013). Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices. In *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1, Issue International Fertilizer Industry Association).
- García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinas, P. A., & Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, 8(254), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/plants8080254>
- Genaidy, E. A. E., Abd-Alhamid, N., Hassan, H. S. A., Hassan, A. M., & Hagagg, L. F. (2020). Effect of foliar application of boron trioxide and zinc oxide nanoparticles on leaves chemical composition, yield and fruit quality of *Olea europaea* L. cv. Picual. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(106), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00335-7>
- Habib-ur-Rahman, M., Ahmad, A., Raza, A., Hasnain, M. U., Alharby, H. F., Alzahrani, Y. M., Bamagoos, A. A., Hakeem, K. R., Ahmad, S., Nasim, W., Ali, S., Mansour, F., & EL Sabagh, A. (2022). Impact of climate change on agricultural production; Issues, challenges, and opportunities in Asia. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–22.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.925548>

- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>
- Hu, F., Tan, Y., Yu, A., Zhao, C., Coulter, J. A., Fan, Z., Yin, W., Fan, H., & Chai, Q. (2018). Low N Fertilizer Application and Intercropping increases N concentration in Pea (*Pisum sativum* L.) Grains. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1763. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01763>
- Kamiab, F., & Zamanibahramabadi, E. (2016). The Effect of Foliar Application of Nano-chelate super plus ZFM on Fruit Set and some Quantitative and Qualitative Traits of Almond Commercial Cultivars. *Journal of Nuts*, 7(01), 9–20.
- Lira-Saldivar, R. H., Méndez-Argüello, B., De los Santos-Villarreal, G., & Vera-Reyes, I. (2018). Nanotechnology potential in sustainable agriculture. *Acta Universitaria*, 28(2), 9–24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Lo'ay, A. A., EL-Ezz, S. F. A., & Awadeen, A. A. (2021). Effect of different foliar potassium fertilization forms on vegetative growth, yield, and fruit quality of kaki trees grown in sandy soil. *Scientia Horticulturae*, 288(110420). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110420>
- Lv, J., Christie, P., & Zhang, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 41–59. <https://doi.org/10.1039/C8EN00645H>
- Malhotra, H., Pandey, R., Sharma, S., & Bindraban, P. S. (2020). Foliar fertilization: possible routes of iron transport from leaf surface to cell organelles. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(3), 279–300. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1616288>
- Meena, D. S., & Aravinda, K. B. N. (2017). Bio Efficacy of Nano Zinc Sulphide (ZnS) on Growth and Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) and Nutrient Status in the Soil. *International Journal of Agriculture Sciences*, 9(6), 3795–3798. <https://www.researchgate.net/publication/320009311>
- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente-Urbina, B. A., & R.H., L.-S. (2016). Growth promotion of *Capsicum annuum* plants by zinc oxide nanoparticles. *Nova Scientia*, 8(2), 140–156.
- Montaño-Herrera, A., Santiago-Saenz, Y. O., López-Palestina, C. U., Cadenas-Pliego, G., Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., & Pinedo-Espinoza, J. M. (2022). Effects of Edaphic Fertilization and Foliar Application of Se and Zn Nanoparticles on Yield and Bioactive Compounds in *Malus domestica* L. *Horticulturae*, 8(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060542>
- Nemati, L. Z., Jafari, A. A., Moradi, P., & Ladan Moghadam, A. (2018). Impact of Foliar Application of Iron-chelate and Iron Nano Particles on Some Morpho-physiological Traits and Rssential Oil Composition of Peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 21(5), 1374–1384. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1556122>
- Nithin Kumar, C. J., Rajangam, J., Balakrishnan, K., & Bora, L. (2017). Influence of Foliar Fertilization of Micronutrients on Leaf Micro Nutrient Status of Mandarin Orange (*Citrus*

- reticulata* Blanco.) in Lower Pulney Hills. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(5), 516–522. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.060>
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K. H., & Chakrabartty, I. (2022). Nanofertilizers: A Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture. *Plants*, 11(19), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- Pawar, V. A., Ambekar, J., Kale, B., & Laware, S. L. (2019). Response in chickpea (*Cicer arietinum* L.) seedling growth to seed priming with iron oxide nanoparticles. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 14(03), 82–91. <https://doi.org/10.12692/ijb/14.3.82-91>
- Pezzarossa, B., Remorini, D., Gentile, M. L., & Massai, R. (2011). Effects of foliar and fruit addition of sodium selenate on selenium accumulation and fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(4), 781–786. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4644>
- Pollard, M., Beisson, F., Li, Y., & Ohlrogge, J. B. (2008). Building lipid barriers: biosynthesis of cutin and suberin. *Trends in Plant Science*, 13(5), 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.03.003>
- Predoi, D., Rodica, G. V., Iconaru, S. L., Cimpeanu, C. L., & Raita, M. S. (2020). Application of Nanotechnology Solutions in Plants Fertilization. *Urban Horticulture-Necessity of the Future*, 1–24. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91240>
- Rahemi, M., Gharechahi, S. R., & Sedaghat, S. (2020). The Application of Nano-Iron Chelate and Iron Chelate to Soil and as Foliar Application: Treatments against Chlorosis and Fruit Quality in Quince. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 300–313. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1628684>
- Ranjbar, S., Rahemi, M., & Ramezani, A. (2018). Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious. *Scientia Horticulturae*, 240, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.035>
- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. *Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3485–3498. <http://theoakstreet.com/opiate-abuse-treatment/help-goes-wrong-suboxone-methadone/>
- Saa, S., Negron, C., & Brown, P. (2018). Foliar zinc applications in *Prunus*: From lab experience to orchard management. *Scientia Horticulturae*, 233, 233–237. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.040>
- Sayah, Z. N., & Jameel, D. A. (2020). Effect of nano NPK balanced fertilizer (20-20-20) on some vegetative and fruiting growth of *Cucurbita pepo* L. *Journal of BioSciences*, 14, 6627–6633.
- Seleiman, M. F., Almutairi, K. F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B. A., & Battaglia, M. L. (2021). Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from its use? *Plants*, 10(2), 1–27. <https://doi.org/10.3390/plants10010002>
- Sharma, S., Rana, V. S., Pawar, R., Lakra, J., & Racchappannavar, V. K. (2020). Nanofertilizers for sustainable fruit production: a review. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01125-3>

- Singh, A., Singh, N. B., Afzal, S., Singh, T., & Hussain, I. (2017). Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. *J Materi Sci*, 53(1), 185–201. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1544-1>
- Singh, M., Srivastava, M., Kumar, A., & Pandey, K. (2019). Biosynthesis of nanoparticles and applications in agriculture. In *Role of Plant Growth Promoting Microorganisms in Sustainable Agriculture and Nanotechnology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817004-5.00012-9>
- Toranzo, J. (2016). Producción mundial de manzanas y peras. http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_produccion-mundial-de-manzanas-y-peras_0.pdf
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. ur, Ashraf, I., & Sanaulah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, 721, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
- World health organization, (WHO). (2023). World health organization.
- Yfran, M. D. las M., Chabbal, M. D., Píccoli, A. B., Giménez, L. I., Rodríguez, V. A., & Martínez, G. C. (2017). Foliar fertilization with potassium, calcium and boron. Incidence on nutrition and quality of fruits in ‘Nova’ mandarin. *Cultivos Tropicales*, 38(4), 22–29. <https://doi.org/10.1234/ct.v38i4.1399>
- Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Daneshvar Hakimi Meybodi, N., & Teixeira da Silva, J. A. (2019). Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany*, 124, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>
- Zahedi, S. M., Karimi, M., & Teixeira da Silva, J. A. (2020). The use of nanotechnology to increase quality and yield of fruit crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 25–31. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10004>
- Zhu, J., Li, J., Shen, Y., Liu, S., Zeng, N., Zhan, X., White, J. C., Gardea-Torresdey, J., & Xing, B. (2020). Mechanism of zinc oxide nanoparticle entry into wheat seedling leaves. *Environmental Science: Nano*, 7(12), 1–42. <https://doi.org/10.1039/d0en00658k>

CAPÍTULO II

EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN EDÁFICA Y APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE Se Y Zn SOBRE EL RENDIMIENTO Y COMPUESTOS BIOACTIVOS EN *Malus domestica* L.

RESUMEN

En este estudio, se evaluó el efecto de la fertilización edáfica con N, P, K (150-50-80, 100-60-60 y sin fertilización edáfica (SFE)) y la fertilización foliar con nanopartículas (NPs) de Se y Zn (Se-50 ppm, Zn-250 ppm y sin nanopartículas (NP0)), sobre el rendimiento y los compuestos antioxidantes de los frutos de manzana. Este estudio se realizó en un huerto comercial de veinte años de edad. El diseño experimental fue un diseño de bloques completos al azar con nueve tratamientos. Se encontró que los tratamientos con dosis de fertilización 150-50-80 y 100-60-60 suplementados con NPs de Se y Zn en general incrementaron el rendimiento, el contenido de azúcar y el ácido ascórbico en los frutos de manzana. El incremento más alto en el rendimiento de la fruta se encontró en el tratamiento SFE + NPZn (+193% en comparación con el control). Los tratamientos SFE + NPSe y SFE + NPZn condujeron a un mayor contenido de fenoles y flavonoides totales con valores máximos de 7,6 mg EAG y 15,82 mg EQ por gramo de peso seco respectivamente. Estos compuestos presentaron una correlación directa sobre la actividad antioxidante en los frutos. La aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn complementó la fertilización del suelo con N, P, K para mejorar el rendimiento y la síntesis de compuestos bioactivos en manzana.

Palabras clave: Antioxidantes; azúcares; compuestos fenólicos; frutos de manzana; nanotecnología agrícola; nutrición vegetal.

1. INTRODUCCIÓN

Las manzanas (*Malus domestica* L.) son una de las frutas más consumidas en todo el mundo después de todos los cítricos, uvas y plátanos (FAOSTAT, 2022). La producción de manzana para el año 2020 fue de 86,443,757 toneladas, siendo China, Estados Unidos de América y Turquía los principales productores del mundo (FAOSTAT, 2023; Musacchi y Serra, 2018). Las manzanas son importantes para la dieta humana, debido a su excelente sabor, beneficios para la salud, sustancias biológicamente activas como compuestos fenólicos, polisacáridos, ácidos orgánicos, así como el alto contenido de fibra (Alberti et al., 2017; Patocka et al., 2020). Generalmente, se consume fresca cuando la fruta está madura, pero también se puede encontrar en alimentos procesados como jugos, sidras, vinos, purés, jaleas, mermeladas, entre otros (Iordănescu et al., 2021; Patocka et al., 2020).

Para satisfacer la demanda de alimentos tanto en producción como en calidad es necesario buscar alternativas que mejoren el rendimiento y la calidad intrínseca de los frutos de manzana. Dentro de estas alternativas se encuentra la adición de fertilizantes que aporten los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (Seleiman et al., 2021). El nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), son los macronutrientes más importantes que necesitan los manzanos y generalmente se aplican al suelo (Brunetto et al., 2015). La falta de estos elementos afecta negativamente la producción y el crecimiento de las plantas (Sayah y Jameel, 2020). En general, los manzanos pueden extraer estos elementos minerales del suelo en cantidades de 2,3 kg de N, 0,6 kg de P (como P_2O_5), y 3 kg de K (como K_2O) por tonelada de cosecha. En base a las necesidades de promover el equilibrio entre el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la calidad del fruto, se establecen diferentes fórmulas o dosis de fertilización (Agustí, 2010). Soto-Parra et al. (2016), evaluaron el impacto de la fertilización en el rendimiento y calidad de la manzana Golden Delicious producida en el norte de México y encontraron que una dosis de fertilización de 138-45-40, aumentó el rendimiento y la calidad de la fruta en la cosecha y poscosecha. Por otro lado, para complementar los requerimientos nutricionales de los cultivos que no son suministrados por la fertilización del suelo, se utiliza la fertilización foliar, a través de la cual se pueden aplicar micronutrientes que mejoran el equilibrio de la nutrición en la planta, actúan en el cuajado y desarrollo del

fruto, por lo tanto, se mejora el rendimiento y la calidad de la fruta (Elsheery et al., 2020; García-López et al., 2019).

En los últimos años los investigadores han utilizado nanopartículas para la aplicación de estos microelementos, que, debido a su tamaño reducido (<100 nm), presentan características fisicoquímicas únicas en comparación con la fertilización convencional (Akanbi-Gada et al., 2019; García-López et al., 2019). La aplicación de nanopartículas metálicas en la agricultura ha sido todo un éxito; sus propiedades garantizan la entrega efectiva de los nutrientes necesarios para las plantas y una respuesta fisiológica más rápida, con una reducción sustancial de los requerimientos de fertilización convencional (Elsheery et al., 2020). El uso de nanopartículas mejora la resistencia de las plantas a tolerar diferentes tipos de estrés abiótico y biótico, como el estrés salino, bajas temperaturas y enfermedades de las plantas, y para aumentar el rendimiento de los cultivos y los niveles de compuestos antioxidantes en las plantas (Attia y Elsheery, 2020; Helaly et al., 2014). La aplicación de nanopartículas de zinc, cobre, hierro, selenio y boro, aumentó el rendimiento, el contenido de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante, en algunos vegetales como el chile habanero (García-López et al., 2019), chile jalapeño (Pinedo-Guerrero et al., 2017), tomate (López-Vargas et al., 2018), moringa (Juárez-Maldonado et al., 2018), plantas de café (Rossi et al., 2019), y fresa (Zahedi, Abdelrahman, et al., 2019) entre otros.

En árboles frutales, las nanopartículas aumentaron el crecimiento vegetativo y mejoraron el crecimiento reproductivo y la floración, aumentando así la productividad y la calidad de la fruta (Zahedi et al., 2020). Genaidy et al. (2020) obtuvieron un mayor rendimiento de frutos de olivo, con un alto porcentaje de aceite en la semilla y baja acidez, con aplicaciones foliares a 20 ppm de NP B₂O₃ más 200 ppm de NP ZnO. Elsheery et al. (2020) reportaron una mayor absorción de nutrientes después de aplicaciones combinadas de nanopartículas de ZnO y Si, que modificaron positivamente el crecimiento, la productividad y la calidad de los frutos de mango. Davarpanah et al. (2016) informaron que, en los árboles de granada, las aplicaciones combinadas de NP B y Zn aumentaron el rendimiento y mejoraron la calidad de los frutos. Ranjbar et al. (2018) compararon el efecto de NPs de Ca con las aplicaciones convencionales de cloruro de calcio en manzanos, los fertilizantes con NPs de Ca mejoraron los atributos de calidad poscosecha. La aplicación foliar de NPs de Se

en árboles de Granada mejoró el índice de madurez, aumentó el rendimiento de la fruta y el contenido de compuestos antioxidantes, y disminuyó el agrietamiento en los frutos (Zahedi, Hosseini, et al., 2019).

La investigación demuestra la eficacia de las NP de Se y Zn en el rendimiento de los cultivos y la mejora de la calidad; sin embargo, faltan evaluaciones sobre sus efectos en la complementación de la fertilización edáfica con N, P y K en manzanos. Por lo tanto, en este estudio, nuestro objetivo fue evaluar los efectos de las aplicaciones de fertilización edáfica con N, P y K y las aplicaciones foliares con nanopartículas de selenio y zinc sobre el rendimiento, el contenido de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante en los frutos de manzana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Reactivos

Se adquirió el carbonato de sodio anhidro y tricloruro de aluminio de J.T. Baker S.A. de C.V. (Avantor Performance Materials, Center Valley, Pennsylvania, EUA). Compramos ácido gálico; quercetina 2,2'-difeníl-1-picrilhidrazilo (DPPH); 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS); Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,8-tetrametilcroman-2-carboxílico); reactivo de Folin-Ciocalteu; antrona; ácido sulfúrico; ácido 3,5-dinitrosalicílico; tartrato de potasio sódico; hidróxido sódico; ácido tricloroacético; y etanol de Química Meyer (Química Suastes S.A. de C.V. Tlahuac, México, D.F., México).

El Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México, proporcionó las nanopartículas de Se y Zn. Según el proveedor, las NPs de Se son de morfología esférica, con un rango de tamaño de 2-20 nm, determinado por microscopía electrónica de transmisión (TEM). González-García et al. (2021) y Treviño-López et al. (2021) proporcionaron caracterizaciones completas. Sintetizamos las NPs de ZnO según el procedimiento reportado por Garza-Alonso et al. (2021), y tenían una forma cuasi-esférica y un tamaño promedio de partícula de 16.49 nm, determinado por TEM. Las fuentes de fertilización fueron urea (46-00-00), superfosfato de calcio triple (00-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60).

2.2 Sitio experimental, material vegetal y tratamientos

Este estudio se llevó a cabo durante dos temporadas de producción (2020 y 2021) en un huerto comercial de manzano (*Malus domestica* L., Golden Delicious), de 20 años de edad. El huerto está ubicado en Cuaunepantla, municipio de Acaxochitlan, Hidalgo, México (20°09'37.6" N y 98°13'46.7" O), a 2260 m.s.n.m. El diseño de plantación de los árboles fue un marco cuadrado (5 x 5 m), bajo condiciones de temporal.

Para el establecimiento del experimento, se seleccionaron tres árboles por tratamiento, con diámetro de tallo y copa similares, quedando distribuidos en un diseño de bloques completos al azar, con nueve tratamientos de fertilización con fertilización edáfica con N, P y K, la aplicación foliar de nanopartículas (NP) de Se a 50 ppm y Zn a 250 ppm y tres repeticiones por tratamiento: T1, control, sin fertilización edáfica y sin aplicación foliar (SFE + NP0); T2, sin fertilización edáfica + aplicación foliar de NPs de Se a 50 ppm (SFE + NPSe); T3, sin fertilización edáfica + aplicación foliar de NPs de Zn a 250 ppm (SFE + NPZn); T4, edáfica 150-50-80 + sin aplicación foliar (150-50-80 + NP0); T5, edáfico 150-50-80 + aplicación foliar de NPs de Se a 50 ppm (150-50-80 + NPSe); T6, edáfico 150-50-80 + aplicación foliar de NPs de Zn a 250 ppm (150-50-80 + NPZn); T7, edáfico 100-60-60 + sin aplicación foliar (100-60-60 + NP0); T8, edáfico 100-60-60 + aplicación foliar de NPs de Se a 50 ppm (100-60-60 + NPSe); y T9, edáfico 100-60-60 + aplicación foliar de NPs de Zn a 250 ppm (100-60-60 + NPZn).

La fertilización al suelo se realizó a principios de enero en ambas temporadas de producción. Las aplicaciones foliares con nanopartículas, se realizaron, en plena floración (primera semana de abril), en el cuajado (primera semana de mayo) y durante el desarrollo del fruto (primera semana de junio). Se utilizaron cinco litros por árbol hasta humedecer completamente el follaje. Los frutos de manzana, se cosecharon en madurez fisiológica en el mes de julio de 2020 y 2021. Se cosecharon sin daños mecánicos visibles y libres de enfermedades y plagas.

2.3 Rendimiento, número y peso de frutos

Para el rendimiento, se consideró el número total de frutos y el peso total (kg) por árbol. Los resultados se expresaron como kilogramos por árbol (kg árbol^{-1}).

2.4 Azúcares totales, reductores y no reductores

Se determinó el contenido total de Azúcares según Zahedi, Hosseini, et al. (2019). Se mezcló una cantidad conocida de muestra con 10 mL de agua destilada, y luego se sónico en un baño ultrasónico (Ultrasonic Cleaner, Mod. 32V118A, Freeport, IL, EUA) durante 15 min a 30 °C y frecuencia de 40 kHz. Las muestras se centrifugaron a 10,000 x g durante 10 min a 4 °C (Thermo Scientific Mod. ST 16R, Alemania). Se mezcló el sobrenadante con 5 mL de antrona, se llevó a ebullición durante 10 min, luego se dejó enfriar a temperatura ambiente, y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (Mod. 6715 UV/Visible, Jenway, Techne Inc, USA) a 625 nm. Los resultados, se expresaron como miligramos de glucosa equivalente por gramo de peso seco (mg EG g⁻¹ PS).

Azúcares reductores. El contenido de azúcares reductores, se determinó por el método DNS (ácido 3,5 dinitrosalicílico) de acuerdo con Ávila et al. (2012). Una muestra conocida de la muestra se mezcló con 0.5 mL del reactivo DNS. Los tubos se colocaron en ebullición por 5 min, la reacción se detuvo con agua fría con hielo y se añadió 5 mL de agua destilada, los tubos se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se determinó la absorbancia en un espectrofotómetro a 540 nm.

El contenido de los azúcares no reductores, se obtuvo por diferencia entre azúcares totales y azúcares reductores. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de glucosa por gramo de peso seco (mg EG g⁻¹ PS).

2.5 Compuestos bioactivos y actividad antioxidante

Se utilizaron manzanas liofilizadas para evaluar los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante. Primero, se congelaron a -76 °C (congelador de temperatura ultra baja Thermo Scientific 303, EE. UU.), durante siete días, posteriormente, se liofilizaron a 133 x 10⁻³ mBar, -40 °C (Labconco, Mod. 79480, Kansas City, MO, EUA). Los frutos se molieron en un molino de cuchillas (RTSCH GM 200, Haan, Alemania) a 9000 rpm durante 1 min hasta obtener un polvo fino. Las muestras liofilizadas se colocaron en bolsas herméticas negras para protegerlas de la luz y se almacenaron a 5 °C hasta su utilización.

2.5.1 Contenido fenólico total, flavonoides

Las muestras se mezclaron con 10 mL de etanol, se colocaron en un baño ultrasónico (Ultrasonic Cleaner, Mod. 32V118A, Freeport, IL, EE. UU.), por 15 min, y se centrifugaron a 10,000 x g durante 10 minutos (centrífuga Thermo Scientific, Mod. ST 16R, Waltham, MA, EE. UU.). El sobrenadante se utilizó para la determinación del contenido fenólico total, flavonoides y actividad antioxidante por los ensayos ABTS y DPPH.

El contenido de fenoles totales, se determinó utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu Singleton et al. (1999). Se mezcló 1 mL del sobrenadante con el reactivo de Folin-Ciocalteu. Se añadió 1.5 mL de solución de carbonato de sodio al 2 % y se dejó reaccionar en completa oscuridad durante 1 hora. Después las absorbancias se determinaron en un espectrofotómetro (Genesys 150 UV/Visible, Daly City, CA, USA) a 725 nm. Los resultados fueron expresados en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (mg EAG g⁻¹ PS).

Se determinaron los flavonoides por el método descrito por Lahlou et al. (2014), con algunas modificaciones. Se mezcló 0,5 mL del sobrenadante con 2 mL de una solución de AlCl₃ al 2%, se dejó reaccionar durante 20 minutos; Posteriormente, se midió la absorbancia a 415 nm en un espectrofotómetro, cada tratamiento, se realizó por triplicado. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de quercetina por gramo de peso seco (mg QE g⁻¹ PS).

2.5.2 Contenido de vitamina C en frutos de manzana

Se cuantificó el ácido ascórbico en frutos de manzana según el método propuesto por Dürüst et al. (1997). Las muestras se mezclaron con 10 mL de solución de ácido metafosfórico al 3% (v/v) y se sonicaron en un baño ultrasónico (Mod. 32V118A, Freeport, IL, EUA) durante 15 min a una frecuencia de 40 kHz. Las muestras se centrifugaron a 10,000 x g durante 10 min. Se agregaron 2 mL de sobrenadante a 2 mL de tampón a pH 4 (ácido acético glacial: acetato de sodio al 5% (p / v), 1: 1), 3 mL de dicloroindofenol y 15 mL de xileno, se mezclaron vigorosamente. Se midieron las absorbancias en un espectrofotómetro (modelo 6715 UV/Vis, Jenway, Techne Inc., Staffordshire, Reino Unido) a 520 nm. Los

resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido ascórbico por gramo de peso seco (mg AA g⁻¹ PS).

2.5.3 Determinación de la actividad antioxidante

Se determinó la capacidad antioxidante por el método 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS), según Re et al. (1999). Primero, se preparó el radical ABTS^{•+} mezclando ABTS a 7 mM y persulfato de potasio a 2.45 mM, la solución se dejó en agitación constante y en completa oscuridad durante 16 horas. Después, se mezcló 0,1 mL de muestra con la solución ABTS^{•+} y se dejó reposar durante 6 min. Después del tiempo, se midió la absorbancia a 734 nm. Para la obtención de los resultados, se preparó una curva estándar de Trolox a una concentración de 0-50 mg/L. Los resultados se expresaron en micromolares equivalentes de Trolox por gramo de peso seco (μM TE g⁻¹ PS).

La actividad antioxidante por el método DPPH, se realizó según (Brand-Williams et al., 1995). Se preparó una solución etanólica a 6×10^{-5} M de DPPH, la cual se dejó revolviendo en completa oscuridad durante 2 horas. Posteriormente, se mezcló 0,5 mL de la muestra con el reactivo DPPH, se dejó reaccionar durante 1 h a 4 °C; luego, se midió la absorbancia a 517 nm. Los resultados se expresaron en micromolares equivalentes de Trolox por gramo de peso seco (μM TE g⁻¹ PS).

2.6 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento. Los datos se analizaron mediante el programa estadístico sistema SAS para Windows versión 9.4. Se compararon las medias mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey, a un nivel de significancia de $P < 0,05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Rendimiento de los cultivos

En la Figura 1, se presenta el rendimiento de los cultivos, el número de frutos por árbol y el peso de los frutos de manzana. Con respecto al rendimiento y número de frutos por árbol, se encontraron los valores más altos en los tratamientos SFE + NPZn, 150-50,80 + NPSe, 100-60-60 + NP0 y 100-60-60 + NPZn, que superaron al control (SFE + NP0) hasta

dos veces más. El mayor rendimiento y el mayor número de frutos por árbol fueron 58,17 kg árbol⁻¹ y 433 frutos, respectivamente, en el tratamiento SFE + NPZn. Los tratamientos 100-60-60 + NPSe y 150-50-80 + NPZn no presentaron diferencias significativas en el rendimiento y el número de frutos con respecto al control. En cuanto a los pesos de los frutos, los valores más altos fueron 145,45 g para el tratamiento 150-50-80 + NPSe, seguido de los tratamientos 100-60-60 + NPZn, SFE + NPZn y 100-60-60 + NP0, que presentaron mayores pesos en comparación con los frutos del tratamiento control. En general, observamos una mayor respuesta en el rendimiento del cultivo por efecto de la aplicación de las NPs de Zn solos. Las NPs de Se complementaron la dosis de fertilización del suelo de 150-50-80, este comportamiento es similar a lo reportado por Ghazi, (2018), quien observó un aumento en el rendimiento de berenjena cuando complementó la formulación convencional de NPK con una pulverización foliar de Se. De acuerdo a los resultados, la aplicación foliar con NPs de Zn y Se influyó en mayores rendimientos en la producción de manzanas. Algunos estudios han informado que la aplicación de NPs de ZnO tuvo un efecto positivo en los rendimientos de granada (Davarpanah et al., 2016), mango (Elsheery et al., 2020), aceituna (Genaidy et al., 2020), melón (Rivera-Gutiérrez et al., 2021), fresa (Saini et al., 2021) y uva (El-Hak El-Said et al., 2019). El Zn es un elemento esencial que actúa como activador enzimático para muchos procesos metabólicos. En NPs, es absorbido más rápidamente por las hojas y actúa regulando el metabolismo hormonal de las plantas, modificando los niveles de auxina a través de la síntesis de triptófano; por lo tanto, promueve la división celular y, por lo tanto, frutos de mayor tamaño (Elsheery et al., 2020; García-López et al., 2018; Rivera-Gutiérrez et al., 2021). De manera similar, las NPs de Se aumentan el rendimiento de la fruta porque estimulan la formación de órganos vegetales, como ocurre en el tomate y los cítricos (Hernández-Hernández et al., 2019; Zahedi, Abdelrahman, et al., 2019). La reducción de los parámetros en los tratamientos 150-50-80 + NP0 y 150-50-80 + NPZn pudo deberse a una reducción del P en la dosis de fertilización. Según Soto-Parra et al. (2016), cuando P y K se reducen en la fertilización del manzano, el rendimiento del cultivo generalmente se reduce. La nutrición mineral con N, P y K se puede complementar con NPs de Zn y Se para aumentar la asimilación de nutrientes que mejoren los rendimientos en los frutos de manzana.

3.2 Azúcares totales, reductores y no reductores en los frutos de manzana

El cuadro 1 presenta el contenido de azúcares totales (TS), azúcares reductores (RS) y azúcares no reductores (NRS). Se observaron mayores concentraciones en los contenidos de TS, RS y NRS en los tratamientos SFE + NPSe y SFE + NPZn, que consistieron en aplicaciones foliares con NPs de Se a 50 ppm y NPs de Zn a 250 ppm, respectivamente; estos tuvieron efectos benéficos con las aplicaciones foliares con NPs de Zn presentaron contenidos significativamente mayores de TS en el 92% y RS en el 35% con respecto al tratamiento control (SFE + NP0). En otros frutos, como en granada (Davarpanah et al., 2016), uvas (Abou El-Nasr et al., 2021) y naranja (Singh et al., 2018), la aplicación de NPs de ZnO también incrementó el contenido de azúcares. La aplicación foliar con NPs de Se aumentó el contenido de azúcares en fresa, granada y mandarina (Ikram et al., 2022; Zahedi, Abdelrahman, et al., 2019; Zahedi, Hosseini, et al., 2019). Esto sucede porque el Se aumenta la actividad de la enzima fructosa 1,6-bifosfatasa, que está relacionada con el metabolismo de los carbohidratos (Zahedi, Hosseini, et al., 2019). La determinación del contenido de azúcar en las frutas es un indicador importante para evaluar la calidad y el sabor de la fruta, el azúcar actúa como el sustrato principal que proporciona material estructural y energía para la respuesta de defensa de la planta, moléculas de señalización hormonal y la regulación del sistema inmunológico de la planta (Davarpanah et al., 2016; Ikram et al., 2022; Zhang et al., 2014). NPZn a 250 ppm y Se a 50 ppm son estimulantes potenciales y pueden aumentar el contenido total de azúcar en los frutos de manzana. Los tratamientos 100-60-60 + NP0 y 100-60-60 + NPSe también presentaron mayor contenido de azúcar en los frutos en comparación con el tratamiento control, lo que puede deberse a la mayor concentración de P en la dosis de fertilización. Para la variedad Golden Delicious, una mayor dosis de fertilización de fósforo aumentó la concentración de los azúcares totales en los manzanos (Soto-Parra et al., 2016).

Cuadro 1. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn, sobre el contenido de azúcares totales, reductores y no reductores, en frutos de manzana. Los datos mostrados son los promedios de los años de producción 2020 y 2021.

Tratamientos	Azúcares totales (mg EG g ⁻¹ PS)	Azúcares reductores (mg EG g ⁻¹ PS)	Azúcares no reductores (mg EG g ⁻¹ PS)
SFE + NP0	0.38 ± 0.03 ^{de}	0.292 ± 0.02 ^{cd}	0.10 ± 0.01 ^d
SFE + NPSe	0.63 ± 0.01 ^b	0.329 ± 0.03 ^b	0.30 ± 0.03 ^a
SFE + NPZn	0.73 ± 0.01 ^a	0.393 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.01 ^a
150-50-80 + NP0	0.34 ± 0.01 ^f	0.304 ± 0.03 ^{bc}	0.04 ± 0.02 ^e
150-50-80 + NPSe	0.38 ± 0.04 ^{ef}	0.302 ± 0.02 ^{bc}	0.08 ± 0.03 ^{de}
150-50-80 + NPZn	0.42 ± 0.04 ^{cd}	0.268 ± 0.02 ^{de}	0.15 ± 0.02 ^c
100-60-60 + NP0	0.45 ± 0.03 ^c	0.293 ± 0.01 ^{cd}	0.16 ± 0.03 ^c
100-60-60 + NPSe	0.46 ± 0.05 ^c	0.251 ± 0.01 ^e	0.21 ± 0.04 ^b
100-60-60 + NPZn	0.38 ± 0.03 ^{def}	0.291 ± 0.03 ^{cd}	0.09 ± 0.02 ^d

SFE: Sin Fertilización edáfica (00-00-00), NP: Fertilización foliar de nanopartículas; (NP0: Nanopartículas a 0 ppm; NPSe: Nanopartículas de selenio, 50 ppm, NPZn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). PS: peso seco. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa (p ≤ 0.05).

Los contenidos más bajos de TS y NRS se observaron en los frutos de los tratamientos 150-50-80 + NP0, 150-50-80 + NPZn y 100-60-60 + NPZn. Las dosis altas de N pueden reducir la calidad con respecto al contenido de azúcares en las manzanas (Ponce-García et al., 2021), lo que, en los tratamientos con Zn, puede deberse a una respuesta antagónica entre los nutrientes. El Zn actúa negativamente con el P, donde el Zn precipita como fosfato de Zn cuando se agrega P a las dosis de fertilización (Al Jabri et al., 2022).

3.3 Contenido de fenoles totales, flavonoides y ácido ascórbico

El cuadro 2 presenta el contenido de fenoles y flavonoides totales. De acuerdo con los resultados, los frutos del tratamiento SFE + NPZn, que consistió solo en la aplicación foliar de NPs de Zn registraron contenidos significativamente mayores de fenoles y flavonoides totales, seguido del tratamiento 150-50-80 + NPSe, mientras que encontramos las concentraciones más bajas de fenoles totales y flavonoides en los frutos de los tratamientos 150-50-80 + NP0, 100-60-60 + NP0 y control, que no incluyeron ninguna aplicación de NPs. Esto puede deberse al tamaño reducido de las NPs, que pueden atravesar la epidermis de la hoja de la planta a través de los estomas y luego moverse a través de las

vías del apoplasto y el simplasto, seguido por el transporte a las células del mesófilo, donde se distribuyen a diferentes partes de las plantas a través del xilema y el floema (Hong et al., 2021; Zhu et al., 2020). Las NPs dentro de los orgánulos subcelulares pueden inducir cascadas de señalización de estrés oxidativo en las células; sin embargo, para contrarrestar el aumento de los niveles de especies reactivas de oxígeno, los organismos activan los mecanismos de defensa antioxidante, incluida la síntesis de compuestos fenólicos (Du et al., 2018; Hezaveh et al., 2020). En otros estudios, los autores informaron aumentos en los fenoles y flavonoides totales en árboles frutales por efecto de las NPs de Zn y B, como en granada (Davarpanah et al., 2016), en melón, los autores informaron aumentos en estos compuestos, con aplicaciones foliares con NPs de Zn a 50 mg L^{-1} (Rivera-Gutiérrez et al., 2021). Con NPs de Se a una concentración de 75 mg L^{-1} aumentaron los fenoles y flavonoides hasta en un 54,23 y 46,99%, respectivamente, en frutos de mandarina (Ikram et al., 2022). Otros investigadores reportaron mayores proporciones de flavonoides que fenoles totales (Feng et al., 2021). El aumento de estos compuestos fenólicos es importante porque determinan la calidad de las frutas de manzana, como el color, el sabor y el aroma (Chang-Zheng et al., 2015). Además, tienen efectos biológicos positivos sobre la salud humana (Davarpanah et al., 2016; Zahedi, Hosseini, et al., 2019). Las NPs de Se y Zn tienen efectos positivos en el aumento de los compuestos fenólicos en los frutos de manzana.

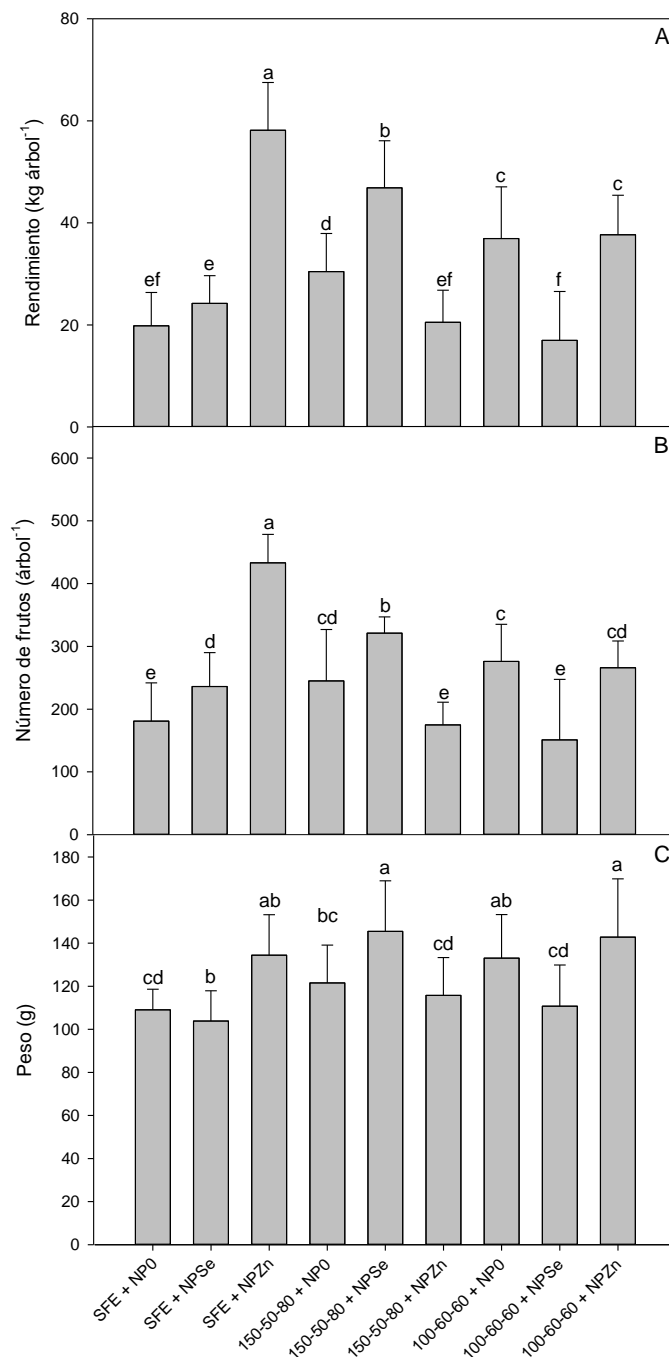


Figura 1. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn, sobre el rendimiento (A), de frutos de manzana, número de frutos por árbol (B) y peso de frutos (C). Los datos mostrados son promedio de los años de producción, 2020 y 2021. SFE: Sin Fertilización edáfica (00-00-00), NP: Fertilización foliar de nanopartículas; (NP0: Nanopartículas a 0 ppm; NPSe: Nanopartículas de selenio, 50 ppm, NPZn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). Los valores son la media \pm desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

Cuadro 2. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn, sobre el contenido de fenoles totales, flavonoides, ácido ascórbico y actividad antioxidante (ABTS y DPPH), en frutos de manzana. Los datos mostrados son promedio de los años de producción, 2020 y 2021.

Tratamientos	Fenoles (mg EAG g ⁻¹ PS)	Flavonoides (mg EQ g ⁻¹ PS)	Ácido ascórbico (mg AA g ⁻¹ PS)	DPPH (μM ET g ⁻¹ PS)	ABTS (μM ET g ⁻¹ PS)
SFE + NP0	4.79 ± 0.26 ^{cd}	8.02 ± 1.71 ^{de}	1.03 ± 0.09 ^d	14.95 ± 1.72 ^{de}	21.77 ± 2.01 ^d
SFE + NPSe	5.86 ± 0.45 ^{bc}	11.24 ± 1.52 ^{cde}	1.43 ± 0.07 ^{bc}	18.50 ± 0.46 ^b	26.83 ± 0.12 ^b
SFE + NPZn	7.64 ± 0.73 ^a	15.82 ± 1.69 ^a	1.51 ± 0.05 ^{ab}	23.23 ± 0.47 ^a	34.05 ± 0.99 ^a
150-50-80 + NP0	4.35 ± 0.75 ^d	8.72 ± 1.60 ^{cde}	1.25 ± 0.10 ^c	13.86 ± 0.93 ^e	20.56 ± 1.75 ^d
150-50-80 + NPSe	6.62 ± 0.46 ^b	16.86 ± 1.84 ^a	1.54 ± 0.17 ^{ab}	17.65 ± 0.49 ^b	25.62 ± 0.14 ^b
150-50-80 + NPZn	5.50 ± 0.58 ^{bcd}	12.26 ± 1.73 ^{bc}	1.62 ± 0.18 ^{ab}	16.42 ± 0.40 ^{bc}	25.72 ± 0.79 ^b
100-60-60 + NP0	4.34 ± 0.78 ^d	7.75 ± 1.72 ^e	1.36 ± 0.07 ^c	14.68 ± 1.68 ^{de}	22.60 ± 2.13 ^d
100-60-60 + NPSe	6.06 ± 0.72 ^{bc}	11.46 ± 1.59 ^{cd}	1.49 ± 0.11 ^{ab}	17.40 ± 0.77 ^{bc}	25.36 ± 0.86 ^{bc}
100-60-60 + NPZn	4.96 ± 0.75 ^{cd}	10.32 ± 2.23 ^{cde}	1.78 ± 0.24 ^a	15.27 ± 0.26 ^{cd}	22.83 ± 0.31 ^c

SFE: Sin Fertilización edáfica (00-00-00), NP: Fertilización foliar de nanopartículas; (NP0: Nanopartículas a 0 ppm; NPSe: Nanopartículas de selenio, 50 ppm, NPZn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). DPPH: 2,2- difenil-1-picrilhidrazilo, ABTS: 2,2'azinobis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico), PS: peso seco. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

Con respecto al contenido de ácido ascórbico, se observa que los frutos de los tratamientos que incluyeron aplicaciones foliares con NPs de Zn y Se presentaron mayor contenido de ácido ascórbico (Cuadro 2), seguidos de los frutos de los tratamientos con fertilizaciones edáficas (150-50-80 + NP0 y 100-60-60 + NP0), donde observamos que las NPs influyeron positivamente en el aumento del ácido ascórbico, superando los frutos del tratamiento control (SFE + NP0). Según Soto-Parra et al. (2016), N y K tienen una influencia preponderante en el contenido de ácidos orgánicos en los frutos de manzana Golden Delicious. El potasio contribuyó al contenido de jugo y vitamina C en las frutas (Soliman et al., 2018), y su aplicación ayudó a aumentar el ácido ascórbico en las manzanas. De acuerdo con lo anterior, la fertilización edáfica con NPK contribuye al contenido de ácido ascórbico en un grado considerable. Por lo tanto, los resultados en este estudio son consistentes con los reportados por Chang-Zheng et al. (2015), quienes informaron un aumento en el ácido ascórbico en las frutas de manzana cuando la fertilización del suelo se combinó con aplicaciones foliares de NPs Zn a 250 ppm. Además, los valores encontrados en este estudio son más altos que los reportados por otros autores para Golden Delicious y otras variedades de manzanas comerciales (Feng et al., 2021).

Cuadro 3. Análisis de correlación de Pearson entre variables de actividad antioxidante en los frutos de manzana tratados con fertilización edáfica y aplicación foliar de nanopartículas de Se y Zn. Los datos mostrados son promedio de los años de producción, 2020 y 2021.

Variables	FT	FL	DPPH	ABTS	AAS
FT	1.00	0.903 (p=8.65E-031)	0.906 (p=3.70E-031)	0.881 (p=2.10E-027)	0.261 (p= 0.0184)
FL		1.00	0.756 (p=3.23E-016)	0.749 (p=8.67E-017)	0.373 (p= 0.00060)
DPPH			1.00	0.973 (p=4.55E-052)	0.185 (p=0.0991)
ABTS				1.00	0.261 (p= 0.0187)
AAS					1.00

FT: Fenoles totales; FL: Flavonoides; AAS: Ácido ascórbico. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3).

3.4 Capacidad antioxidante

Se determinó la capacidad antioxidante en los frutos de manzana en los diferentes tratamientos mediante los ensayos DPPH y ABTS. Como se observa en la Cuadro 2, los frutos de manzana de los tratamientos SFE + NPZn y SFE + NPSe presentaron valores

significativamente mayores según las pruebas DPPH y ABTS, con los valores más bajos correspondientes a los tratamientos 150-50-80 + NP0, 100-60-60 + NP0, y control, que mostraron que la aplicación foliar con los NPs Se y Zn aumentó la actividad antioxidante. Además, el comportamiento de la actividad antioxidante concuerda con los resultados de fenoles y flavonoides totales, que son responsables de conferir esta actividad a las manzanas, según el análisis de correlación de Pearson (Cuadro 3). Además, el ácido ascórbico tuvo menos influencia en la actividad antioxidante de los frutos, lo que podría deberse a una menor concentración de ácido ascórbico en los frutos de manzana en relación con las concentraciones de fenoles y flavonoides totales, que mostraron la correlación más alta con la actividad antioxidante (Cuadro 3). Este comportamiento está de acuerdo con lo reportado por Kschonsek et al. (2018), para quince variedades diferentes de manzana. Los principales compuestos fenólicos que influyeron en la actividad antioxidante en estas variedades fueron los ácidos fenólicos y los glucósidos de quercetina. Los valores de actividad antioxidante que encontramos en este estudio son más altos que los reportados en la literatura. Oszmiański et al. (2018) informaron los valores de actividad antioxidante para 22 variedades de manzana; el valor más alto fue 0.7214 $\mu\text{mol Trolox/g PS}$, que es mucho más bajo que lo que encontramos en este estudio y puede deberse a la edad de los cultivares, ya que los cultivares de mayor edad producen más compuestos antioxidantes (Kschonsek et al., 2018), y a la aplicación de NPs, que influyeron en el incremento de más compuestos bioactivos

4. CONCLUSIONES

Las aplicaciones de fertilización al suelo con dosis de 150-50-80 y 100-60-60 y aplicaciones foliares con nanopartículas de Se y Zn mejoraron el rendimiento, el número y el peso, y aumentaron el contenido de azúcares y ácido ascórbico en los frutos de manzanas. En este estudio, la aplicación foliar de nanopartículas de Se a 50 ppm y Zn a 250 ppm aumentó el contenido de fenoles y flavonoides totales, y estos compuestos bioactivos influyeron principalmente en la actividad antioxidante de los frutos. Se recomienda la aplicación foliar de NPs Se y Zn como práctica para complementar las dosis de fertilización edáfica con N, P y K y mejorar la producción y la calidad nutracéutica de los frutos de manzana.

5. REFERENCIAS

- Abou El-Nasr, M., El-Hennawy, H. M., Samaan, M. S. F., Salaheldin, T. A., Abou El-Yaziel, A., & El-Kereamy, A. (2021). Using Zinc Oxide Nanoparticles to Improve the Color and Berry Quality of Table Grapes Cv. Crimson Seedless. *Plants*, 10(1285), 1–14.
- Agustí, M. (2010). *Fruticultura* (Mundi-Pren, pp. 97–106).
- Akanbi-Gada, M. A., Ogunkunle, C. O., Vishwakarma, V., Viswanathan, K., & Fatoba, P. O. (2019). Phytotoxicity of nano-zinc oxide to tomato plant (*Solanum lycopersicum* L.): Zn uptake, stress enzymes response and influence on non-enzymatic antioxidants in fruits. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 1–11.
- Al Jabri, H., Saleem, M. H., Rizwan, M., Hussain, I., Usman, K., & Alsafran, M. (2022). Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biosynthesis : Overview. *Life*, 12(594), 1–28.
- Alberti, A., Zielinski, A. A. F., Couto, M., Judacewski, P., Mafra, L. I., & Nogueira, A. (2017). Distribution of phenolic compounds and antioxidant capacity in apples tissues during ripening. *J Food Sci Technol*, 54(6), 1511–1518. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2582>
- Attia, T. M. S., & Elsheery, N. I. (2020). *Nanomaterials : Scope , Applications , and Challenges in Agriculture and Soil Reclamation*.
- Ávila, N. R., Rivas, P. B., & Hernández, M. R. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129–135.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brunetto, G., Melo, G. W. bastos, Toselli, M., Quartieri, M., & Tagliavini, M. (2015). The Role of Mineral Nutrition on Yields and Fruit Quality in Grapevine, Pear and Apple. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(4), 1089–1104. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-103/15>
- Chang-Zheng, S., Mei-Ying, L., Jiang-Fei, M., Ming, C., Zhu-Mei, X., & Zhen-Wen, Z. (2015). Promoting Effect of Foliage Sprayed Zinc Sulfate on Accumulation of Sugar and Phenolics in Berries of *Vitis vinifera* cv. Merlot Growing on Zinc Deficient Soil. *Molecules*, 20, 2536–2554. <https://doi.org/10.3390/molecules20022536>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>
- Du, J., Tang, J., Xu, S., Ge, J., Dong, Y., Li, H., & Jin, M. (2018). ZnO nanoparticles: recent advances in ecotoxicity and risk assessment. *Drug and Chemical Toxicology*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1508218>
- Dürüst, N., Sümengen, D., & Dürüst, Y. (1997). Ascorbic Acid and Element Contents of Foods of Trabzon (Turkey). *J. Agric. Food Chem.*, 45(6), 2085–2087.

- El-Hak El-Said, R., El-Aty El- Shazly, S. A., El-Gazzar, A. A. E.-F., El-Azeez Shaaban, E. A., & Saleh, M. M. S. (2019). Efficiency of Nano-Zinc Foliar Spray on Growth, Yield and Fruit Quality of Flame Seedless Grape. *Journal of Applied Sciences*, 19(6), 612–617. <https://doi.org/10.3923/jas.2019.612.617>
- Elsheery, N. I., Helaly, M. N., El-Hoseiny, H. M., & Alam-Eldein, S. M. (2020). Zinc oxide and silicone nanoparticles to improve the resistance mechanism and annual productivity of salt-stressed mango trees. *Agronomy*, 10(4), 558. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040558>
- Elsheery, N. I., Sunoj, V. S. J., Wen, Y., Zhu, J. J., Muralidharan, G., & Cao, K. F. (2020). Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and photoprotection in sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>
- Feng, S., Yi, J., Li, X., Wu, X., Zhao, Y., Ma, Y., & Bi, J. (2021). Systematic Review of Phenolic Compounds in Apple Fruits : Compositions , Distribution , Absorption , Metabolism , and Processing Stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69, 7–27. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05481>
- García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinas, P. A., & Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, 8(254), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants8080254>
- García-López, J. I., Zavala-García, F., Olivares-Saénz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Ruiz-Torres, N. A., Ramos-Cortez, E., Vázquez-Alvarado, R., & Niño-Medina, G. (2018). Zinc Oxide nanoparticles boosts phenolic compounds and antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. during germination. *Agronomy*, 8(215), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100215>
- Garza-Alonso, C. A., González-García, Y., Cadenas-Pliego, G., Olivares-Sáenz, E., Trejo-Téllez, L. I., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Seed priming with ZnO nanoparticles promotes early growth and bioactive compounds of *Moringa oleifera*. *Not Bot Horti Agrobo*, 49(4), 1–20. <https://doi.org/10.15835/nbha49412546>
- Genaidy, E. A. E., Abd-Alhamid, N., Hassan, H. S. A., Hassan, A. M., & Hagagg, L. F. (2020). Effect of foliar application of boron trioxide and zinc oxide nanoparticles on leaves chemical composition, yield and fruit quality of *Olea europaea* L. cv. Picual. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(106), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00335-7>
- Ghazi, D. A. (2018). Effect of Iron and Selenium on Growth, Yield and Quality of Eggplant under Different Mineral Fertilization Levels. *J. Soil Sci. and Agric. Eng.*, 9(10), 525–532. <https://doi.org/10.21608/jssae.2018.36456>
- González-García, Y., Cárdenas-álvarez, C., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Cabrera-De-la-fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Effect of three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress. *Plants*, 10(217), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants10020217>

- Helaly, M. N., El-Metwally, M. A., El-Hoseiny, H., Omar, S. A., & El-Sheery, N. I. (2014). Effect of nanoparticles on biological contamination of *in vitro* cultures and organogenic regeneration of banana. *AJCS*, 8(4), 612–624.
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>
- Hezaveh, T. A., Rahmani, F., Alipour, H., & Pourakbar, L. (2020). Effects of Foliar Application of ZnO Nanoparticles on Secondary Metabolite and Micro-elements of Camelina (*Camelina sativa* L.) Under Salinity Stress. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(4), 54–69.
- Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). Foliar application of nanoparticles: Mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, 8(5), 1196–1210. <https://doi.org/10.1039/d0en01129k>
- Ikram, M., Raja, N. I., Mashwani, Z. U. R., Omar, A. A., Mohamed, A. H., Satti, S. H., & Zohra, E. (2022). Phytogetic Selenium Nanoparticles Elicited the Physiological, Biochemical, and Antioxidant Defense System Amelioration of Huanglongbing-Infected ‘Kinnow’ Mandarin Plants. *Nanomaterials*, 12(356), 1–24. <https://doi.org/10.3390/nano12030356>
- Iordănescu, O. A., Băla, M., Iuga, A. C., Pane, D. G., Dascălu, I., Bujancă, G. S., David, I., Hădărugă, N. G., & Hădărugă, D. I. (2021). Antioxidant activity and discrimination of organic apples (*Malus domestica* Borkh.) cultivated in the western region of romania: A DPPH ·kinetics–pca approach. *Plants*, 10(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/plants10091957>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Valdés-Reyna, J., Pinedo-Espinoza, J. M., López-Palestina, C. U., & Hernández-Fuentes, A. D. (2018). Foliar Application of Cu Nanoparticles Modified the Content of Bioactive Compounds in *Moringa oleifera* Lam. *Agronomy*, 8(167), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090167>
- Kschonsek, J., Wolfram, T., Stöckl, A., & Böhm, V. (2018). Polyphenolic compounds analysis of old and new apple cultivars and contribution of polyphenolic profile to the *in vitro* antioxidant capacity. *Antioxidants*, 7(20), 1–14. <https://doi.org/10.3390/antiox7010020>
- Lahlou, F. A., Hmimid, F., Loutfi, M., & Bourhim, N. (2014). Antioxidant activity and determination of total phenolic compounds content of *Euphorbia regis-jubae* (webb and berth) from methanol and aqueous extracts. *Int. J. Pure App. Biosci*, 2(3), 112–117.
- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. de A., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar Application of Copper Nanoparticles Increases the Fruit Quality and the Content of Bioactive Compounds in Tomatoes. *Appl. Sci.*, 8(1020), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Musacchi, S., & Serra, S. (2018). Apple fruit quality: Overview on pre-harvest factors. *Scientia Horticulturae*, 234, 409–430. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.057>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). FAOSTAT.

- Oszmiański, J., Lachowicz, S., Gławdel, E., Cebulak, T., & Ochmian, I. (2018). Determination of phytochemical composition and antioxidant capacity of 22 old apple cultivars grown in Poland. *European Food Research and Technology*, 244(4), 647–662. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2989-9>
- Patocka, J., Bhardwaj, K., Klimova, B., Nepovimova, E., Wu, Q., Landi, M., Kuca, K., Valis, M., & Wu, W. (2020). *Malus domestica*: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value. *Plants*, 9(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/plants9111408>
- Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2017). Cu nanoparticles in hydrogels of chitosan-PVA affects the characteristics of post-harvest and bioactive compounds of jalapeño pepper. *Molecules*, 22(926), 1–14. <https://doi.org/10.3390/molecules22060926>
- Ponce-García, O. C., Soto-Parra, J. M., Noperi-Mosqueda, L. C., Alvarez-Holguín, A., Ochoa-Rivero, J. M., & Holguín-Gutiérrez, F. (2021). Production and quality of apple golden delicious by fertilization with macronutrients. *Ciencia e Innovación*, 3(2), 573–581.
- Ranjbar, S., Rahemi, M., & Ramezani, A. (2018). Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious. *Scientia Horticulturae*, 240, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.035>
- Re, R., Pellegrine, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26(98), 1231–1237.
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Presiado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 12(5), 791–803.
- Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X., & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>
- Saini, S., Kumar, P., Sharma, N. C., Sharma, N., & Balachandar, D. (2021). Nano-enabled Zn fertilization against conventional Zn analogues in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae*, 282(October 2020), 110016. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110016>
- Sayah, Z. N., & Jameel, D. A. (2020). Effect of nano NPK balanced fertilizer (20-20-20) on some vegetative and fruiting growth of *Cucurbita pepo* L. *Journal of BioSciences*, 14, 6627–6633.
- Seleiman, M. F., Almutairi, K. F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B. A., & Battaglia, M. L. (2021). Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from its use? *Plants*, 10(2), 1–27. <https://doi.org/10.3390/plants10010002>
- Singh, Y., Bhatnagar, P., Kumar Meena, N., & Chandra Gurjar, S. (2018). The effect of foliar spray of Zn, Cu and B on physico-chemical parameters of sweet orange (*Citrus sinensis* L.) cv. Mosambi. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 1606–1610.

- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in Enzymology*, 299(1974), 152–178.
- Soliman, S. S., Alebidi, A. I., Al-Obeed, R. S., & Al-Saif, A. M. (2018). Effect of potassium fertilizer on fruit quality and mineral composition of fig (*Ficus carica* L. cv. brown turkey). *Pakistan Journal of Botany*, 50(5), 1753–1758.
- Soto-Parra, J. M., Piña-Ramírez, F. J., Sánchez-Chávez, E., Pérez-Leal, R., & Basurto-Sotelo, M. (2016). Fertiligation with macronutrients in apple “Golden Delicious”: Impact on yield and quality of fruit. *Electronica Nova Scientia*, 18(1), 162–180.
- Treviño-López, E. A., Sandoval-Rangel, A., Benavides Mendoza, A., Ortega Ortiz, H., Cadenas Pliego, G., & Cabrera de la Fuente, M. (2021). Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 26, 159–169. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2946>
- Zahedi, S. M., Abdelrahman, M., Hosseini, M. S., Hoveizeh, N. F., & Tran, L.-S. P. (2019). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environmental Pollution*, 253, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078>
- Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Daneshvar Hakimi Meybodi, N., & Teixeira da Silva, J. A. (2019). Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany*, 124, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>
- Zahedi, S. M., Karimi, M., & Teixeira da Silva, J. A. (2020). The use of nanotechnology to increase quality and yield of fruit crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 25–31. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10004>
- Zhang, Y., Fu, C., Yan, Y., Fan, X., Li, M., & Wang, Y. (2014). Foliar application of sugar alcohol zinc increases sugar content in apple fruit and promotes activity of metabolic enzymes. *HortScience*, 49(8), 1067–1070. <https://doi.org/10.21273/hortsci.49.8.1067>
- Zhu, J., Li, J., Shen, Y., Liu, S., Zeng, N., Zhan, X., White, J. C., Gardea-Torresdey, J., & Xing, B. (2020). Mechanism of zinc oxide nanoparticle entry into wheat seedling leaves. *Environmental Science: Nano*, 7(12), 1–42. <https://doi.org/10.1039/d0en00658k>

CAPÍTULO III

COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTIOXIDANTE EN FRUTOS DE PERA POR LA APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE Se, Cu, Fe Y Zn

RESUMEN

Los frutos de pera son una fuente importante para la nutrición humana ya que ofrecen nutrimentos biológicamente activos benéficos para la salud, los cuales se pueden incrementar aún más mediante la aplicación de diferentes minerales necesarios para la nutrición de los perales en forma de nanopartículas que debido a su tamaño pueden exhibir mejores respuestas en la calidad intrínseca de los frutos. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la aplicación foliar con nanopartículas (NPs) de selenio (NPs Se-50 ppm), cobre (NPs Cu-250 ppm), hierro (NPs Fe-250 ppm), zinc (NPs Zn-250 ppm) y sin nanopartículas como control (SNPs 0), en el comportamiento del sistema antioxidante, enzimático y no enzimático en frutos de pera. El experimento se llevó a cabo en un huerto comercial de peral (*Pyrus communis*, Bartlett), bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares con NPs Se y NPs Zn, pueden aumentar el contenido de azúcares totales en los frutos (+42-55%, respecto al tratamiento control), mientras que los frutos de los tratamientos NPs Se y NPs Cu exhibieron un mayor contenido de fenoles totales (4.92-5.02 mg EAG g⁻¹ PS), flavonoides (13.33-11.89 mg EQ g⁻¹ PS), ácido ascórbico (1.35 mg EAA g⁻¹ PS) y capacidad antioxidante (25.32-25.05 μM ETrolox g⁻¹ PS) mejorando el sistema antioxidante no enzimático de los frutos. Por otro lado, la actividad antioxidante enzimática, se vio favorecida de manera significativa con la aplicación de NPs de Fe y Cu, pues se mejoró la actividad de la superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa y peroxidasa, además este tratamiento con NPs de Fe redujo la actividad de la polifenoloxidasas, así como un menor índice de daño oxidativo a través de una menor acumulación de malondialdehído, respecto a los otros

tratamientos con NPs. Los resultados obtenidos en el presente estudio, muestran que la aplicación foliar de nanopartículas de selenio, hierro, zinc y cobre principalmente, pueden mejorar el sistema antioxidante enzimático y no enzimático en frutos de pera, bajo condiciones de temporal.

Palabras clave: Enzimas antioxidantes; estrés oxidativo; nanotecnología agrícola; nutrición vegetal; *Pyrus communis* L.; superfoods.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año mueren 17 millones de personas en todo el mundo por alguna enfermedad crónica degenerativa (OMS, 2023). Estas enfermedades están representadas principalmente por obesidad, enfermedades cardiovasculares, diabetes, enfermedad crónica renal, enfermedad inflamatoria del intestino, osteoporosis, artritis reumatoide y muchos tipos de cáncer, entre otras (Proestos, 2018), las estadísticas se pronostican alarmantes en los próximos años, y es que las proyecciones epidemiológicas informan, que para el año 2030 llegarán al 80% de todas las enfermedades en el mundo. Las principales causas asociadas a estos padecimientos son, mala nutrición, ingesta reducida de frutas y verduras, elevado índice de masa muscular y una baja actividad física (Di Renzo et al., 2021).

Por otra parte, en los últimos años un gran número de estudios científicos han evidenciado una nueva generación de alimentos no procesados y cuya composición nutrimental es idónea para fortalecer el buen funcionamiento del cuerpo humano (Proestos, 2018). Estos alimentos son los llamados “superfoods” y se trata de productos alimenticios con concentraciones elevadas de nutrientes e ingredientes bioactivos como las vitaminas, minerales, antioxidantes, aminoácidos esenciales, enzimas, los cuales contribuyen al buen funcionamiento del organismo, gracias a una mayor biodisponibilidad (Fernández-Ríos et al., 2022). Estos superfoods se han vuelto populares, debido a su impacto positivo en la salud, estimulando el sistema inmunológico y el buen funcionamiento de órganos del cuerpo humano (Fernández-Ríos et al., 2022). El consumo de estos alimentos, con altas concentraciones de nutrimentos, podrían reducir los índices de muerte provocados por enfermedades crónicas degenerativas, al prevenir o contrarrestar los daños por estrés oxidativo (Kolniak-Ostek et al., 2020).

Un mayor consumo de frutas, es deseable para mantener una alimentación saludable y para ayudar a reducir el riesgo de sufrir alguna enfermedad crónica. Los frutos de pera (*Pyrus communis* L.), es una importante opción debido a que es la quinta fruta que se consume a nivel mundial, después de los plátanos, naranjas, manzanas y uvas (Li et al., 2016), es de gran importancia debido a los beneficios que aporta a la salud, ya que es fuente de sustancias biológicamente activas, como fitoquímicos, azúcares solubles, aminoácidos, vitaminas y

minerales (Azzini et al., 2019; Erbil et al., 2018; Wang et al., 2021), los cuales les brindan a los frutos de pera características organolépticas aceptables para ser consumidas, además de mejorar el sabor y aumentar su calidad nutraceútica.

Por lo anterior, se buscan alternativas novedosas y de vanguardia, que permitan incrementar el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en los frutos de pera y puedan incluirse en los llamados superfoods, para obtener los beneficios que estos alimentos ofrecen. Una tecnología de vanguardia es la aplicación de micronutrientes esenciales en forma de nanopartículas para la nutrición de los cultivos (López-Vargas et al., 2018). Las nanopartículas, son agregados atómicos con un tamaño que oscila entre 1-100 nm al menos en una dimensión, debido a este pequeño tamaño exhiben propiedades fisicoquímicas diferentes como alta relación superficie-volumen, mayor reactividad, mayor poder de ionización, lo que les permite interactuar con estructuras intracelulares e inducir cambios en diferentes vías metabólicas, en comparación con la aplicación de micronutrientes en sus formas convencionales (Fortis-Hernández et al., 2022; García-López et al., 2019; Zahedi, Hosseini, et al., 2019). Particularmente las nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc, han mostrado efectos positivos en la morfología, fisiología y bioquímica de las plantas (Hernández-Hernández et al., 2019). Achari y Kowshik. (2018), en su estudio mencionan que las nanopartículas, también pueden ingresar al fruto, cuando se aplican foliarmente y pueden mejorar la calidad de los nutrientes. Estudios recientes demuestran que la aplicación foliar de nanopartículas de algunos micronutrientes como zinc, cobre, hierro y selenio, se logra incrementar el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, en algunos cultivos tales como; chile habanero (García-López et al., 2019), chile jalapeño (Pinedo-Guerrero et al., 2017), tomate (López-Vargas et al., 2018), moringa (Juárez-Maldonado et al., 2018), plantas de café (Rossi et al., 2019), pepino (Guillén-Enríquez et al., 2022), fresas (Zahedi, Abdelrahman, et al., 2019), melón (Fortis-Hernández et al., 2022; Rivera-Gutiérrez et al., 2021), entre otros. En árboles frutales Montaña-Herrera et al. (2022), mostraron que aplicaciones con N, P y K a través del suelo complementando con aplicaciones foliares con NPs de Se y Zn, se logra incrementar el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en frutos de manzana. Genaidy et al. (2020), revelaron que aplicaciones foliares en frutos de olivo a 20 ppm de NPs de trióxido de boro (B_2O_3) más 200 ppm de NPs óxido de zinc ZnO, se obtienen frutos con mejores características de defensa antioxidante no

enzimática. Elsheery et al. (2020), informaron que aplicaciones combinadas de nanopartículas de ZnO (100 mg L^{-1}) y silicio (150 mg L^{-1}), mejoró la absorción de nutrientes por lo que mejoró la calidad intrínseca en frutos de mango. En árboles de granada Davarpanah et al. (2016), informaron en su estudio que aplicaciones combinadas de nanopartículas de boro y zinc, se obtienen frutos con mayor contenido de fenoles totales, azúcares totales y ácido ascórbico. En frutos membrillo Rahemi et al. (2020), mostraron que aplicaciones foliares de NPs de quelato de hierro indujo una mayor actividad de la enzima catalasa y mayor contenido de fenoles totales.

Por lo anterior el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc sobre el sistema antioxidante, enzimático y no enzimático en frutos de pera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Reactivos

Antrona, ácido sulfúrico, ácido 3,5 dinitrosalicílico, tartrato de sodio y potasio, hidróxido de sodio, guayacol, ácido tricloroacético y etanol adquiridos de Química Meyer (Química Suastes S.A. de C.V. Tlahúac, México, D.F., México). Ácido tiobarbitúrico ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$), carbonato de sodio anhidro, tricloruro de aluminio, fosfato de sodio dibásico Na_2HPO_4 , fosfato de sodio monobásico NaH_2PO_4 , sulfato de cobre pentahidratado, tartrato de sodio y potasio tetrahidratado, peróxido de hidrogeno (H_2O_2), adquiridos de J.T. Baker S.A. de C.V. (Avantor Performance Materials, Center Valley, Pennsylvania, EUA), ácido gálico, EDTA· Na_2 , catecol, quercetina, 2,2'-difeníl-1-picrilhidrazilo (DPPH), 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (ABTS), L-metionina, Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,8-tetrametilcromano-2-carboxílico), yoduro de potasio, riboflavina y reactivo de Folin-Ciocaltea, adquiridos de Sigma-Aldrich. Cloruro de nitroblue tetrazolium (NBT), fue adquirido en Roche Diagnostics GmbbH (Mannheim, Alemania). Las nanopartículas de cobre, selenio, hierro y zinc fueron proporcionadas por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México.

2.2 Sitio experimental, material vegetal y tratamientos

Este estudio se llevó a cabo en un huerto comercial de peral (*Pyrus communis*, Bartlett), de 20 años de edad, plantados en marco real de 5 x 5 m, bajo condiciones de temporal, con fertilización edáfica 100-60-60 (N, P, K) localizado en Cuaunepantla, municipio de Acaxochitlán, Hidalgo, México (20°09'37.6"N and 98°13'46.7"W), a 2260 m.s.n.m., durante las temporadas 2020 y 2021. Para el desarrollo del experimento, se seleccionaron tres árboles por tratamiento con diámetro de tallo y copa similares, quedando distribuidos en un diseño de bloques completos al azar, con cinco tratamientos de fertilización foliar con nanopartículas (NPs), de selenio, cobre, hierro y zinc y tres repeticiones por tratamiento, organizados de la siguiente manera: T1, Control, sin aplicación foliar de NPs (SNPs 0), a base de agua destilada; T2, Aplicación foliar con NPs de selenio a 50 ppm (NPs Se); T3, Aplicación foliar con NPs de cobre a 250 ppm (NPs Cu); T4, Aplicación foliar con NPs de hierro a 250 ppm (NPs Fe) y T5, Aplicación foliar con NPs de zinc a 250 ppm (NPs Zn).

Las nanopartículas fueron aplicadas en plena floración (primera semana de abril), en el cuajado (primera semana de mayo) y durante el desarrollo del fruto (primera semana de junio). Se aplicaron 5 L por árbol, hasta la humectación completa del follaje. Los frutos de pera se cosecharon en madurez fisiológica sin daños mecánicos visibles y libres de enfermedades y plagas, en el mes de julio de 2020 y 2021.

Para evaluar las variables de estudio, se utilizaron frutos de pera liofilizados, para ello, se congelaron a -76 °C (congelador de ultra baja temperatura Thermo Scientific 303, EE. UU.), durante siete días, posteriormente fueron liofilizados a 133×10^{-3} mBar, -40 °C (Labconco, Modelo 79480, Kansas City, MO, EE. UU.). Los frutos fueron molidos en un molino de cuchillas (RTSCH GM 200, Haan, Alemania) a 9000 rpm durante 1 min hasta obtener un polvo fino. Las muestras liofilizadas se depositaron en bolsas herméticas negras para protegerlas de la luz y se almacenaron a 5 °C hasta su utilización.

2.3 Contenido de azúcares totales, azúcares reductores y no reductores

La cuantificación de azúcares totales se determinó por el reactivo de antrona, de acuerdo a lo descrito por Zahedi et al. (2019). Una cantidad de muestra conocida, se mezcló

con 10 mL de agua destilada, se sónica en un baño ultrasónico (Ultrasonic Cleaner, Mod. 32V118A, Freeport, IL, EE. UU.), durante 15 min a 30 °C y 40 kHz de frecuencia. Se centrifuga a 10,000 xg, por 10 min a 4 °C (Thermo Scientific Mod. ST 16R, Alemania). El sobrenadante, se mezcló con 5 mL de antrona, se llevó a ebullición por 10 min, posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (modelo 6715 UV/Visible, Jenway, Techne Inc, EUA) a 625 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de glucosa, por cada g de peso seco (mg EG g⁻¹ PS).

Los azúcares reductores, se determinaron de acuerdo a lo descrito por Ávila et al. (2012), muestras de pera liofilizada se mezclaron con 0.5 mL del reactivo DNS (ácido 3,5 dinitrosalicílico), los tubos se llevaron a ebullición por 5 min, para detener la reacción se dejaron en agua fría con hielo, se agregan 5 mL de agua destilada, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se lee su absorbancia en un espectrofotómetro a 540 nm, los resultados se expresaron en mg equivalentes de glucosa por cada g de peso seco (mg EG g⁻¹ PS).

Los azúcares no reductores se obtienen por diferencia entre los azúcares totales y los azúcares reductores. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de glucosa por cada gramo de peso seco (mg EG g⁻¹ PS).

2.4 Actividad antioxidante no enzimática

Para la extracción de los compuestos fenólicos y actividad antioxidante se utilizó etanol al 80%, mientras que para la extracción de ácido ascórbico se utilizó una solución de ácido metafosfórico al 3% (v/v). Las mezclas obtenidas se sometieron a baño ultrasónico por 20 min (Lab Safety Supply, Mod. 32V118A, Janesville, WI, EE. UU.), posteriormente se centrifugó a 10,000 xg durante 10 minutos (centrífuga Thermo Scientific, Mod. ST 16R, Waltham, MA, EE. UU.). Los sobrenadantes obtenidos se utilizaron para la determinación de los compuestos bioactivos y actividad antioxidante por los ensayos ABTS y DPPH.

2.4.1 Determinación de ácido ascórbico

El contenido de ácido ascórbico fue determinado de acuerdo a la metodología propuesta por Dürüst et al. (1997). Una muestra del sobrenadante se mezcló con 2 mL de solución tampón de ácido acético/acetato de sodio a pH 4, 3 mL de dicloroindofenol y 15 mL de xileno, la cual se mezcló vigorosamente. Posteriormente se leyó la absorbancia de las muestras en un espectrofotómetro (Genesys, 150 UV/Visible, Daly City, CA, EUA) a 520 nm. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido ascórbico por gramo de peso seco (mg AA g⁻¹ PS).

2.4.2 Determinación de fenoles totales y flavonoides

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

2.5 Determinación de la actividad antioxidante

La capacidad antioxidante por el método ABTS [2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)] se realizó de acuerdo a Re et al. (1999). El radical ABTS^{•+} se preparó de la siguiente manera: se mezcló con 7 mM de ABTS y 2.45 mM de persulfato de potasio (1:1). La solución se dejó en agitación constante y en completa oscuridad durante 16 horas. Pasado el tiempo una cantidad conocida de sobrenadante de las muestras fue mezclada con 3.0 mL de la solución de ABTS^{•+} se dejó reposar durante 6 min. Transcurrido el tiempo se midió la absorbancia de las muestras a 734 nm en un espectrofotómetro. La actividad antioxidante mediante el ensayo de DPPH, se realizó de acuerdo a lo descrito por Brand-

Williams et al. (1995). Se preparó el radical DPPH en una solución etanólica al 6×10^{-5} M de la cual se dejó en agitación durante 2 horas en completa oscuridad. Una muestra conocida del sobrenadante fue mezclada con 2.5 mL del radical DPPH el cual se dejó reposar en completa oscuridad durante 1 h a 4 °C, posteriormente se midió su absorbancia a 517 nm. Los resultados se expresaron en micromoles equivalentes de Trolox por gramo de peso seco ($\mu\text{M ETrolox g}^{-1}$ PS).

2.6 Actividad antioxidante enzimática

2.6.1 Actividad de la Superóxido dismutasa (SOD; EC 1.15.1.1)

La actividad de superóxido dismutasa, se evaluó de acuerdo al método propuesto por Balois-Morales et al. (2008). Se mezcló una muestra conocida de pera con 5 mL de una solución extractora de buffer de fosfatos, pH 7.8, 0.05 M, se centrifugó a 10,000 xg durante 15 minutos a 4 °C. La mezcla para la determinación de la SOD consistió en sobrenadante, buffer de fosfatos, pH 7.8, 0.05 M, EDTA 0.1 mM, L-metionina 12 mM, NBT 0.075 mM y riboflavina 0.002 mM. Esta mezcla se dejó reaccionar por 15 min con una lámpara con luz fluorescente de 20 watts, pasado el tiempo se procedió a leer las absorbancias a 560 nm. El contenido de proteínas se determinó mediante el método de Bradford (1976), utilizando albúmina de suero bovino (BSA) como estándar. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg^{-1} de proteína), donde 1 U es la cantidad de enzima necesaria para causar el 50% de la inhibición de la reducción de NBT.

2.6.2 Actividad de la catalasa (CAT; EC 1.11.1.6)

La actividad de la catalasa, se determinó de acuerdo al método descrito por Balois-Morales et al. (2008), con algunas modificaciones. A muestras de pera liofilizada, se añaden 5 mL de una solución tampón de fosfato de sodio 25 mM, pH 7.8, posteriormente fue centrifugado a 10,000 x g a 4 °C durante 15 minutos. La mezcla de reacción consistió de buffer de fosfatos 25 mM, pH 7.8, EDTA 0.8 mM, extracto enzimático (sobrenadante) y H_2O_2 a 20 mM. El cambio de absorbancia fue registrado durante 3 min a 240 nm. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg^{-1} de proteína).

2.6.2 Actividad del ascorbato peroxidasa (APx; EC 1.11.1.11)

Se determinó la actividad de la enzima ascorbato peroxidasa de acuerdo al método propuesto por Proietti et al. (2013), con ligeras modificaciones. Para la extracción de la enzima se utilizó buffer de potasio 50 mM, pH 7.0, el cual fue mezclado con una muestra conocida de pera liofilizada posteriormente fue centrifugada a 12,000 xg durante 20 minutos a 4 °C. Para la reacción se mezcló buffer de potasio, pH 7.0, 50 mM, ascorbato sódico 10 mM, extracto enzimático y H₂O₂ a 30 mM. Se evaluó el cambio de absorbancia a 290 nm, durante 2 min a 25 °C, en un espectrofotómetro. La actividad APx fue calculada en base al coeficiente de extinción molar del ascorbato (2.8 mM⁻¹ cm⁻¹). Los resultados se reportaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína).

2.6.3 Actividad del guayacol Peroxidasa (POD; EC 1.11.1.7)

La cuantificación de la actividad de la guayacol peroxidasa (POD), se realizó por la oxidación del guayacol a tetraguayacol, de acuerdo al método descrito en Vanegas et al. (2020). La mezcla de reacción consistió en una mezcla de buffer de fosfatos 100 mM pH 5.0, guayacol 40 mM, H₂O₂ 40 mM y extracto enzimático. La formación de tetraguayacol, fue registrada cada 10 s durante 3 min a una longitud de onda de 470 nm. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína).

2.6.4 Actividad de la polifenoloxidasas (PPO; E.C. 1.14.18.1 y E.C. 1.10.3.1)

La determinación de la actividad polifenoloxidasas (PPO), se realizó de acuerdo al método propuestos por Vanegas et al. (2020). Para la reacción, se mezcló una muestra conocida del sobrenadante con 2.2 mL del catecol 100 mM en buffer de fosfatos de sodio pH 6.5 100 mM. La actividad de la PPO, se siguió por la oxidación del catecol a o-diquinona a una longitud de onda de 470 nm durante 3 min. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por miligramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína).

2.7 Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂)

La determinación del peróxido de hidrógeno, se realizó de acuerdo a Junglee et al. (2014). La solución extractora y de reacción fue la misma, la cual consistió en una mezcla conocida de polvo liofilizado con buffer de fosfatos de sodio 10 mM pH 7, ácido

tricloroacético 0.1%, y yoduro de potasio 1M, la cual fue sometida a un baño ultrasónico por 10 min a 40 kHz posteriormente se centrifugó a 10,000 xg durante 10 minutos. Las muestras se dejaron reaccionar por 20 min más a temperatura ambiente (20-22°C), pasado el tiempo se midieron las absorbancias a una longitud de onda de 390 nm. Los resultados se expresaron en nanomoles de H₂O₂ por gramo de peso seco (nmol g⁻¹ PS).

2.8 Peroxidación lipídica

La peroxidación de los lípidos se evaluó mediante la cuantificación de la concentración de Malondialdehído (MDA), siguiendo el método de Pasquariello et al. (2015), con algunas modificaciones. Muestras liofilizadas de pera, se mezclaron con ácido tricloroacético al 10% (p/v). La solución se llevó a calentar en un baño de agua en ebullición por 10 min, pasado el tiempo se bajó la temperatura de la muestra a temperatura ambiente y posteriormente fueron centrifugadas a 15,000 xg durante 10 minutos a 4°C. El sobrenadante se mezcló con una solución de ácido tricloroacético al 15%, que contenía 0.5% de ácido tiobarbitúrico (C₄H₄N₂O₂S). Se midió la absorbancia a 535 nm. La actividad de MDA fue calculada en base al coeficiente de extinción molar de 1.56 mM⁻¹ cm⁻¹. Los resultados se expresaron en milimoles de malondialdehído por gramo de peso seco (mM MDA g⁻¹ PS).

Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento. Los datos se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA), utilizando el programa estadístico sistema SAS para Windows versión 9.4. Las medias se compararon mediante la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) a un nivel de significancia de (P < 0.05).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Azúcares: totales, reductores y no reductores en frutos de pera

El cuadro 1 muestra el contenido de azúcares totales (AZT), azúcares reductores (AZR) y no reductores (ANR) en frutos de pera tratados con aspersiones foliares de NPs de Se, Cu, Fe y Zn. Se observa un incremento en el contenido de AZT, AZR y ANR en los frutos de pera de los tratamientos NPs Zn, NPs Se y NPs Cu, respecto a los frutos del control.

Aunando a lo anterior, el tratamiento que mayor efecto tuvo en los azúcares fue el de los frutos tratados con NPs Zn alcanzando concentraciones de hasta 118.18%, más que en los frutos control. En frutos de pera, la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, y Zn, indujeron cambios significativos en el contenido de azúcares, rescatando su importancia como componentes responsables del sabor y frescura, además de formar parte de los atributos de calidad y aceptación por parte del consumidor (Wojdyło et al., 2021). Los resultados obtenidos, mostraron que los tratamientos NPs Se y NPs Zn, exhibieron los mayores contenidos de AZT, AZR y AZNR. Datos similares reportaron Montaña-Herrera et al. (2022), quienes realizaron fertilización al suelo con NPK y aplicaciones foliares con nanopartículas de Se y Zn. Los autores mostraron, que aplicaciones foliares con nanopartículas de Zn a 250 ppm y Se a 50 ppm incrementan los azúcares en frutos de manzana Golden Delicious. En otros frutos como en mango (Elsheery et al., 2020), granada (Davarpanah et al., 2016), uvas (Abou El-Nasr et al., 2021), y naranja (Singh et al., 2018), también se incrementó el contenido de azúcares con aplicaciones foliares con nanopartículas de ZnO. Este efecto puede deberse a que el Zn es indispensable para que se lleve a cabo el metabolismo de los carbohidratos, tanto en la fotosíntesis, como en la conversión de azúcares en almidón, también a las diferentes enzimas involucradas en muchas rutas bioquímicas importantes y de las cuales el Zn forma parte estructural o cofactor (Chang-Zheng et al., 2015; Davarpanah et al., 2016). Las aplicaciones foliares con NPs de Se también aumentaron el contenido de azúcares en frutos como granada (Zahedi et al., 2021; Zahedi, Hosseini, et al., 2019), mandarina (Ikram et al., 2022), manzana (Montaña-Herrera et al., 2022; Ren et al., 2021) y fresa (Zahedi, Abdelrahman, et al., 2019). El aumento de la concentración de azúcares totales, después de la aplicación de Se, está relacionado con aumentos en la actividad de la enzima fructosa 1,6-bisfosfatasa clave en el metabolismo de los carbohidratos (Zahedi et al., 2021). El contenido de azúcares en los frutos de pera, es muy importante, ya que además de proveer sabor y calidad a los frutos, constituyen el sustrato principal que proporciona material estructural y energía para crear mecanismos de defensa de las plantas en varios factores de estrés abióticos y bióticos (Ikram et al., 2022). También proporcionan el esqueleto de carbono para la síntesis de compuestos de defensa, incluidos los metabolitos secundarios (Jeandet et al., 2022), por lo tanto, los tratamientos que incluyen nanopartículas

de Se y Zn, se podrían considerar como estimulantes potenciales para elevar el contenido de azúcares totales en los frutos de pera y por ende mejorar los atributos de sabor.

Por otra parte, la aplicación de NPs Fe a 250 ppm presentó un efecto contrario pues los frutos de este tratamiento presentaron contenidos más bajos de estos compuestos comparados con los frutos de SNPs 0. Este efecto se puede deber a una interacción antagónica del Fe con el fosfato aplicado al suelo como parte de la práctica cultural del peral, ocasionando que el floema no de las señales originadas en los brotes que interactúan con las hormonas para equilibrar la absorción de nutrientes del suelo (Schmidt et al., 2019).

Cuadro 1. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, sobre el contenido de azúcares totales, azúcares reductores y no reductores, en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.

Tratamientos	Azúcares totales (mg EG g ⁻¹ PS)	Azúcares reductores (mg EG g ⁻¹ PS)	Azúcares no reductores (mg EG g ⁻¹ PS)
SNPs 0	0.49 ± 0.10 d	0.27 ± 0.01 a	0.22 ± 0.10 d
NPs Se	0.70 ± 0.01 b	0.28 ± 0.01 a	0.43 ± 0.02 b
NPs Cu	0.60 ± 0.04 c	0.24 ± 0.01 b	0.36 ± 0.04 c
NPs Fe	0.37 ± 0.07 e	0.25 ± 0.01 b	0.12 ± 0.07 e
NPs Zn	0.76 ± 0.07 a	0.28 ± 0.03 a	0.48 ± 0.07 a

SNPs 0: Sin aplicación foliar de nanopartículas a 0 ppm; NPs Cu: Nanopartículas de cobre, 250 ppm; NPs Se: Nanopartículas de selenio, 50 ppm; NPs Fe: Nanopartículas de hierro, 250 ppm; NPs Zn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). PS: Peso seco. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa entre los tratamientos (p ≤ 0.05), según la Diferencia Mínima significativa.

3.2 Sistema de defensa no enzimáticos: fenoles totales (FT), flavonoides (FL) y ácido ascórbico (AcAs)

Los sistemas de defensa no enzimáticos (fenoles totales, flavonoides, ácido ascórbico), permiten una homeostasis en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), que son fuertes agentes oxidantes y dañinos para las células (Ikram et al., 2022). Este estudio mostró, que las NPs de Se y Cu indujeron los valores más altos de fenoles totales y flavonoides en los frutos de pera (Cuadro 2). Los resultados muestran incrementos significativos de estos compuestos en los frutos de los tratamientos NPs Se y NPs Cu, que consistieron en aplicaciones foliares con nanopartículas de Se a 50 ppm y aplicaciones foliares con nanopartículas de Cu a 250 ppm, respectivamente. En relación al contenido de FT, los frutos de pera del tratamiento con NPs Cu indujo los valores más altos, superando a

los frutos control (SNPs 0), en un 38.67%, sin embargo, comparado con el efecto del tratamiento NPs Se no muestra diferencia significativa. Caso contrario sucede en el contenido de los flavonoides, los frutos del tratamiento NPs Se indujo los valores más altos (45.36%), respecto a los frutos del tratamiento SNPs 0. Estos metabolitos, se acumulan en los tejidos vegetales y gracias a sus grupos hidroxilo, presentes en sus estructuras, pueden actuar como neutralizadores de los radicales libres y prevenir el estrés oxidativo, por lo que, la aplicación foliar de NPs de Se, a perales brindan la mayor acumulación de estos compuestos (Moradbeygi et al., 2020), lo cual es muy positivo para el sistema antioxidante.

El efecto se puede deber a una de las propiedades más importantes de las NPs que es su tamaño, gracias al cual, las NPs pueden cruzar la epidermis a través de los estomas, grietas o poros de las hojas, luego trasladarse a través de las vías apoplasto y simplasto, seguido de un transporte a las células del mesófilo, en donde gracias al xilema y floema se distribuyen a diferentes partes de la planta (Zhu et al., 2020). En otros cultivos como, en tomate (Hernández-Hernández et al., 2019), granada (Zahedi et al., 2021; Zahedi, Hosseini, et al., 2019), melón (Fortis-Hernández et al., 2022), lechuga (Gaucin-Delgado et al., 2022), pimiento morrón (González-García et al., 2021) y mandarina (Ikram et al., 2022), también incrementan los contenidos de fenoles totales y flavonoides con aplicaciones foliares con nanopartículas de selenio y cobre. La razón del aumento podría atribuirse a que las NPs de Se y Cu, estimularon eficientemente la expresión de genes implicados en la vía de los fenilpropanoides (Moradbeygi et al., 2020)

Por otro lado, en el Cuadro 2, se observa que las aplicaciones con NPs de Fe a 250 ppm y Zn a 250 ppm, indujeron los valores más bajos de fenoles totales y flavonoides, por debajo de los frutos control. Este efecto se pudo deber a la concentración que se utilizó, ya que de eso dependen los efectos tanto positivos como negativos de las nanopartículas, ya que dosis adecuadas, estimulan los sistemas de defensa antioxidante, mientras dosis altas, se interrumpe la homeostasis celular, ocasionando daño oxidativo a las proteínas, los lípidos, el DNA (López-Vargas et al., 2018). Guillén-Enríquez et al. (2022), informaron en su estudio que altas concentraciones de Fe reducen el contenido de compuestos no enzimáticos, lo cual coincide con el presente estudio.

En frutos de pera, el contenido de ácido ascórbico, también se presenta en el cuadro 2. Se observa que el mayor contenido de ácido ascórbico, se encontró en los frutos de perales tratados con 50 ppm de NPs de Se, incrementando significativamente su contenido en un 24%, respecto al tratamiento SNPs 0. De igual forma con el tratamiento NPs Fe, se observó un ligero incremento del ácido ascórbico del 2.7%, mientras que los tratamientos NPs Cu, NPs Zn y SNPs 0 indujeron los contenidos más bajos en los frutos.

El ácido ascórbico, se vio incrementado, en los frutos de los tratamientos que incluyen nanopartículas de Se a 50 ppm (Cuadro 2), este aumento podría deberse a que las NPs de Se estimularon eficientemente el aparato fotosintético, presente en los cloroplastos, el citosol, las vacuolas y el espacio apoplástico, organelos en los que el ácido ascórbico influye (Gaucin-Delgado et al., 2022). En frutos de granada Zahedi et al. (2021), reportaron aumento del ácido ascórbico con aplicación foliar con NPs de Se de diferentes tamaños. En frutos de tomate, se incrementó el contenido de ácido ascórbico con la aplicación combinada de NPs de Se y Cu (Quiterio-Gutiérrez et al., 2019). Sariñana-Navarrete et al. (2023), informaron en su estudio que aplicaciones con NPs de Se, a 45 mg L⁻¹, incrementó el contenido de ácido ascórbico en un 42.59%, en frutos de chile jalapeño. El ácido ascórbico, presenta muchas funciones celulares, por ello es considerado como el antioxidante más abundante de las plantas, se caracteriza por contener un alto poder para donar electrones en diversas funciones enzimáticas y no enzimáticas, asimismo su utilidad como cofactor de las enzimas redox (Zahedi et al., 2021). Es así como, las NPs de Se, pueden aliviar el estrés oxidativo y la síntesis de ácido ascórbico, en tal sentido mayor contenido de ácido ascórbico es favorecedor para la eliminación de las ROS al hacer la conversión a H₂O₂ y agua a través de la enzima ascorbato peroxidasa (APx) (Pérez-Labrada et al., 2019) y se obtienen frutos de pera con mejor calidad nutraceútica, lo cual influye positivamente en la salud humana.

3.3 Capacidad antioxidante en frutos de pera

El cuadro 2, muestra los datos de la capacidad antioxidante en los frutos de pera, por los ensayos 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico, ABTS) y 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH). Respecto al ensayo ABTS, los resultados muestran que los frutos de pera de los tratamientos NPs Se y NPs Cu, presentaron significativamente la mayor capacidad antioxidante superando a los frutos de pera del tratamiento control, en un 27 y 25%,

respectivamente. De manera similar los frutos de los tratamientos NPs Se, NPs Cu y adicional NPs Fe, presentaron mayor capacidad antioxidante por el ensayo DPPH superando a los frutos del tratamiento SNPs 0 en un 19.21, 20.44 y 18.35%, respectivamente. Mientras que los frutos de los tratamientos NPs Zn y SNPs 0 indujeron las actividades más bajas. Este comportamiento, también se correlaciona con el contenido de fenoles totales y flavonoides, los cuales son compuestos que les confieren a los frutos de pera esa capacidad antioxidante y de los cuales, se expresa más su contenido con los tratamientos que incluyen NPs de Se y Cu. A excepción del contenido de ácido ascórbico, que sólo se correlaciona en los frutos del tratamiento NPs Se. Los frutos de pera mostraron mayor capacidad antioxidante con las aplicaciones foliares con nanopartículas de micronutrientes que incluyen Se, Cu y Fe. Resultados similares se reportan en otros frutos como en chiles jalapeños con NPs Se a concentraciones de 30 y 45 mg L⁻¹ (Sariñana-Navarrete et al., 2023), en manzanas con NPs de Se y Zn a 50 y 250 ppm, respectivamente (Montaño-Herrera et al., 2022), en tomates con NPs de Cu a 50 y 125 mg L⁻¹ (López-Vargas et al., 2018), en melón se aplicaron NPs de Cu 3.6 mg L⁻¹ (Fortis-Hernández et al., 2022), con buenos resultados y en pepino con NPs de Fe a una concentración de 50 mg L⁻¹ (Guillén-Enríquez et al., 2022). El efecto de las nanopartículas sobre la actividad antioxidante de los frutos depende de la concentración, el tamaño de NPs, vía y etapa de aplicación (Guillén-Enríquez et al., 2022).

3.4 Antioxidantes enzimáticos y concentración de H₂O₂ en frutos de pera

Los resultados obtenidos (Cuadro 3), muestran la actividad del sistema antioxidante enzimático que comprende las enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APx) y peroxidasa (POD), el cual respondió positivamente a las aplicaciones foliares con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn en frutos de pera, ya que se observa una mayor actividad enzimática antioxidante en estos tratamientos, siendo los frutos control los que mostraron menor actividad del sistema antioxidante vía enzimática. Las aplicaciones foliares con NPs de Fe a 250 ppm indujeron a una mayor actividad enzimática. Respecto a la actividad de la enzima superóxido dismutasa (SOD), se observa que en los frutos de pera de los tratamientos NPs Se, NPs Fe y NPs Zn, presentaron las actividades más altas, siendo las aplicaciones foliares con NPs de Se las que más influyeron superando a los frutos de pera del control (SNPs 0) hasta un 79%, sin diferencia significativa con los

tratamientos NPs Fe y NPs Zn. La SOD es considerada, como la primera línea de defensa antioxidante en células vegetales, contra las especies reactivas de oxígeno. Involucrada en la dismutación de oxígeno tóxico, a H_2O_2 y oxígeno molecular (Gupta et al., 2022), en este sentido, las NPs actúan como moléculas de señalización, generando estrés en las plantas de manera controlada sin sobrepasar los límites, de tal forma que se estimule el sistema antioxidante enzimático. Esto también se confirma con una mayor concentración de peróxido de hidrogeno en los frutos de pera, provocado por aplicaciones foliares con NPs de Fe a 250 ppm (Cuadro 4), las cuales superan a los frutos control hasta en un 64.22%, lo que da idea, del efecto de las NPs de Fe para elevar la actividad catalítica de la SOD. Por otro lado, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generado por la SOD, es importante, ya que participa en los daños celulares oxidativos y en procesos de señalización (Junglee et al., 2014). A bajas concentraciones activas los mecanismos de defensa antioxidante (enzimáticos y no enzimáticos), mientras a concentraciones elevadas, este compuesto se convierte en poderosa especie reactiva de oxígeno, el radical OH^\cdot , el cual, si no es eliminada o disminuida, puede reaccionar con lípidos, proteínas, ácidos nucleicos y enzimas celulares, incluso causar la muerte celular, lo que al final afectaría gravemente a la planta (González-García et al., 2021).

La actividad de la catalasa, juega un papel muy importante en la descomposición del H_2O_2 , se activa cuando existen concentraciones elevadas de H_2O_2 (Moradbeygi et al., 2020), en los frutos de pera, se encontraron concentraciones elevadas de peróxido de hidrógeno con el tratamiento de NPs de Fe (Cuadro 4), por ello, se encontró que el mismo tratamiento incrementó la actividad de la catalasa en casi 4 veces más, respecto a los frutos del tratamiento SNPs 0. Esto también se correlaciona con una mayor actividad de la enzima APx en un 132.58% en comparación a los frutos del tratamiento control, esta enzima también juega un papel muy importante en la eliminación de peróxido de hidrógeno, utilizando el ascorbato como donador de electrones para reducir el H_2O_2 a agua y es extremadamente sensible a las concentraciones de ascorbato (Ceron-Garcia et al., 2011). Por otro lado, los frutos de pera de los tratamientos con NPs Cu y NPs Fe, incrementaron el contenido de la POD en casi 2 veces más, respecto a los frutos control. Las peroxidasas descomponen el H_2O_2 a través de sustratos oxidantes que incluyen compuestos fenólicos, ascorbato y glutatión (Moradbeygi et al., 2020), tal vez por ello se encontró menor cantidad de fenoles totales en los frutos de pera tratados con NPs de Fe a 250 ppm (Cuadro 2), ya que estos

compuestos fenólicos sirvieron como sustratos oxidativos y se agotaron. Los valores más bajos de la actividad de las enzimas antioxidantes se presentaron en el tratamiento SNPs 0. Esto sugiere que la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, activaron el mecanismo de defensa natural de las principales enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APx y POD), las cuales les dan a los frutos de pera protección contra el daño oxidativo durante el estrés oxidativo provocado por iones metálicos, por lo que inducen beneficios como, una mejora en el crecimiento y protección de las principales vías metabólicas en los frutos (Mubashir et al., 2023). Al respecto Rahemi et al. (2020), informaron en su estudio que aplicaciones foliares con quelato de nano-hierro inducen mayor actividad en las enzimas antioxidantes para la eliminación del exceso de ROS en árboles de membrillo. En frutos de pepino, la actividad de la SOD aumentó en un 49.1%, mientras que la actividad de la POD, aumentó en 25.01%, con aplicaciones nutritivas de nano hierro (Konate et al., 2018). En melón, 20 mg L⁻¹ de NPs de Se, fueron suficientes para mejorar la actividad de las principales enzimas antioxidantes CAT, SOD, POD y APx (Sheikhalipour et al., 2021) y en frutos de fresa Zahedi et al. (2019), mostraron que aplicaciones foliares con NPs de Se, mejoraron las actividades de las enzimas SOD y POD. Los resultados muestran que la aplicación de NPs de Se y Fe protegieron los frutos de pera del estrés oxidativo al aumentar la actividad de las enzimas antioxidantes.

Lo anterior muestra que las nanopartículas de micronutrientes, como son Se y Fe tienen propiedades importantes para inducir cambios en la mejora de la calidad intrínseca en frutos de pera ya que cuando el sistema no enzimático se debilita o es insuficiente, se activa el sistema enzimático y ayuda a eliminar las ROS, por lo que tanto, las NPs de Se, Cu y Fe, ofrecen a los frutos de pera concentraciones altas de compuestos no enzimáticos y enzimáticos que pueden hacer frente al estrés oxidativo (Moradbeygi et al., 2020).

Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, sobre el contenido de fenoles totales, flavonoides, ácido ascórbico y actividad antioxidante (ABTS y DPPH), en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.

Tratamientos	Fenoles (mg EAG g ⁻¹ PS)	Flavonoides (mg EQ g ⁻¹ PS)	Ácido ascórbico (mg EAA g ⁻¹ PS)	ABTS (μM ETrolox g ⁻¹ PS)	DPPH (μM ETrolox g ⁻¹ PS)
SNPs 0	3.62 ± 0.53 b	9.17 ± 0.95 b	1.09 ± 0.12 cb	20.05 ± 1.47 b	8.12 ± 0.04 c
NPs Se	4.92 ± 0.89 a	13.33 ± 1.51 a	1.35 ± 0.17 a	25.32 ± 1.50 a	9.68 ± 0.10 a
NPs Cu	5.02 ± 1.84 a	11.89 ± 4.54 a	0.99 ± 0.15 cb	25.05 ± 2.11 a	9.78 ± 0.15 a
NPs Fe	3.08 ± 0.64 cb	8.92 ± 2.58 b	1.12 ± 0.23 b	19.82 ± 1.90 b	9.61 ± 0.19 a
NPs Zn	2.42 ± 0.55 c	6.03 ± 1.11 c	0.94 ± 0.10 c	18.02 ± 3.45 b	9.00 ± 0.34 b

SNPs 0: Sin aplicación foliar de nanopartículas a 0 ppm; NPs Se: Nanopartículas de selenio, 50 ppm; NPs Cu: Nanopartículas de cobre, 250 ppm; NPs Fe: Nanopartículas de hierro, 250 ppm; NPs Zn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). PS: Peso seco. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa entre los tratamientos (p ≤ 0.05), según la Diferencia Mínima significativa.

Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Se, Cu, Fe y Zn, sobre el sistema antioxidante enzimático, en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.

Tratamientos	SOD (U mg ⁻¹ de proteína)	CAT (U mg ⁻¹ de proteína)	APx (U mg ⁻¹ de proteína)	POD (U mg ⁻¹ de proteína)
SNPs 0	5.62 ± 0.26 b	0.53 ± 0.28 c	35.57 ± 16.51 c	1090.94 ± 166.21 c
NPs Se	10.06 ± 0.09 a	1.64 ± 0.83 ba	63.68 ± 18.60 ba	1975.73 ± 147.41 b
NPs Cu	7.62 ± 0.40 ba	1.27 ± 0.79 bc	62.15 ± 15.77 b	2215.54 ± 265.07 a
NPs Fe	9.94 ± 0.51 a	2.09 ± 1.11 a	82.73 ± 24.24 a	2243.62 ± 324.48 a
NPs Zn	7.67 ± 0.12 a	1.02 ± 0.56 b	56.62 ± 21.62 b	2020.16 ± 223.58 ba

SNPs 0: Sin aplicación foliar de nanopartículas a 0 ppm; NPs Se: Nanopartículas de selenio, 50 ppm; NPs Cu: Nanopartículas de cobre, 250 ppm; NPs Fe: Nanopartículas de hierro, 250 ppm; NPs Zn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). PS: Peso seco. CAT: catalasa; APx: Ascorbato peroxidasa; POD: Guayacol peroxidasa; PPO: Polifenoloxidasas. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa entre los tratamientos (p ≤ 0.05), según la Diferencia Mínima significativa.

3.5 Peroxidación lipídica y actividad de PPO

La sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ROS), ocasionan daños a diferentes orgánulos de la célula, en la membrana origina peroxidación lipídica y uno de los principales medidores es a través de la cuantificación de malondialdehído (MDA). Los resultados de este marcador, se presentan en el Cuadro 4, en el que se observa un aumento significativo del contenido de MDA en frutos de pera con el tratamiento NPs Se, hasta 1.5 veces más respecto al tratamiento SNPs 0. Seguido del tratamiento NPs Zn, que también exhibió niveles altos de MDA hasta en un 29%, respecto al control. Mientras que los niveles más bajos del contenido de MDA, fueron provocados en los frutos de los tratamientos NPs Cu, NPs Fe y SNPs 0. Las NPs de selenio a 50 ppm y NPs de Zn a 250 ppm indujeron estrés oxidativo severo a la membrana celular, mientras que las aplicaciones foliares con NPs de Fe y Cu, la mantienen estable.

Los frutos de pera expuestos a los tratamientos NPs Se, NPs Cu y NPs Zn exhibieron una mayor actividad de la PPO (Cuadro 4). Cabe señalar que los frutos de pera del tratamiento NPs Se presentaron valores significativamente más altos hasta 3.5 veces más respecto al control (SNPs 0). La actividad más baja de la PPO se observa en los frutos de pera de los tratamientos NPs Fe y SNPs 0.

Las NPs de Fe presentaron un efecto benéfico en los frutos de pera ya que los resultados muestran los niveles más bajos de la actividad polifenoloxidasas y una menor peroxidación lipídica en frutos de pera (Cuadro 4), en un 2.5 y 1.5 veces menos, respectivamente en comparación con el tratamiento NPs Se, que indujo los valores más altos de PPO y una mayor formación de MDA. Lo anterior sugiere que las NPs de Fe conservan la integridad de las membranas de los plastidios de las células vegetales donde se encuentran confinadas las enzimas PPO y las cuales son liberadas al citoplasma una vez se ha producido daño mecánico en la estructura tisular y celular (Mejía Doria et al., 2014).

Cuadro 4. Efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de Cu, Se, Fe y Zn, en el contenido de la polifenoloxidasasa, malondialdehído y peróxido de hidrógeno, en frutos de pera. Los datos mostrados son la media de los años de producción 2020 y 2021.

Tratamientos	H ₂ O ₂ (nmol g ⁻¹ PS)	Peroxidación lipídica (mM MDA g ⁻¹ PS)	PPO (U mg ⁻¹ de proteína))
SNPs 0	134.05 ± 3.65 b	8.41 ± 1.08 c	0.39 ± 0.07 c
NPs Se	189.96 ± 13.36 ba	12.58 ± 1.58 a	1.31 ± 0.07 a
NPs Cu	154.10 ± 7.88 ba	8.65 ± 1.12 c	0.95 ± 0.09 b
NPs Fe	220.15 ± 14.49 a	8.53 ± 0.78 c	0.49 ± 0.29 c
NPs Zn	116.42 ± 20.19 ba	10.83 ± 1.66 b	1.13 ± 0.27 b

SNPs 0: Sin aplicación foliar de nanopartículas a 0 ppm; NPs Se: Nanopartículas de selenio, 50 ppm; NPs Cu: Nanopartículas de cobre, 250 ppm; NPs Fe: Nanopartículas de hierro, 250 ppm; NPs Zn: Nanopartículas de zinc, 250 ppm). PS: Peso seco. PPO: Polifenoloxidasasa; MDA: Malondialdehído; H₂O₂: Peróxido de Hidrógeno. Los valores son la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa entre los tratamientos (p ≤ 0.05), según la Diferencia Mínima significativa.

4. CONCLUSIONES

La aplicación foliar con nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc en los perales mostraron diferentes efectos en el sistema antioxidante de los frutos. Las nanopartículas de selenio y zinc, mejoraron el contenido de azúcares totales que influyen directamente en el sabor del fruto. Por otra parte, las nanopartículas de selenio y cobre mostraron un mayor efecto en el fortalecimiento del sistema antioxidante no enzimático de los frutos pues se incrementaron los compuestos bioactivos principalmente fenoles totales y flavonoides, mientras que las nanopartículas hierro y zinc presentaron un efecto contrario. Sin embargo, las nanopartículas de hierro influyeron positivamente en la activación del mecanismo de defensa antioxidante enzimático, así mismo se vio reflejado en un menor índice de estrés oxidativo, en conjunto con las nanopartículas de Cu. Los datos presentados en este estudio indican que las nanopartículas Cu a 250 ppm fueron las que mayor influencia tuvieron para mejorar el sistema antioxidante no enzimático y enzimático en los frutos de pera.

5. REFERENCIAS

- Abou El-Nasr, M., El-Hennawy, H. M., Samaan, M. S. F., Salaheldin, T. A., Abou El-Yaziel, A., & El-Kereamy, A. (2021). Using Zinc Oxide Nanoparticles to Improve the Color and Berry Quality of Table Grapes Cv. Crimson Seedless. *Plants*, 10(1285), 1–14.
- Achari, G. A., y Kowshik, M. (2018). Recent Developments on Nanotechnology in Agriculture: Plant Mineral Nutrition, Health, and Interactions with Soil Microflora [Review-article]. *J. Agric. Food Chem.*, 66(33), 8647–8661. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>
- Ávila, N. R., Rivas, P. B., & Hernández, M. R. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129–135.
- Azzini, E., Maiani, G., Durazzo, A., Foddai, M. S., Intorre, F., Venneria, E., Forte, V., Lucchetti, S., Ambra, R., Pastore, G., Silveri, D. D., Maiani, G., & Polito, A. (2019). S. Giovanni Varieties (*Pyrus communis* L.): Antioxidant properties and phytochemical characteristics. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/6714103>
- Balois-Morales, R., Colinas-León, M. T., Peña-Valdivia, C. B., Chávez-Franco, S. H., & Alia-Tejagal, I. (2008). Sistema enzimático antisenescencia, catalasa-superóxido dismutasa, de frutos de pitahaya (*Hylocereus undatus*) almacenados con frío. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(3), 295–299.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1), 248–254. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Ceron-Garcia, A., Gonzalez-Aguilar, G. A., Vargas-Arispuro, I., Islas-Osuna, M. A., & Martinez-Tellez, M. A. (2011). Oligoglucans as elicitors of an enzymatic antioxidant system in zucchini squash (*Cucurbita pepo* L.) seedlings at low temperature. *Am. J. Agri. & Biol. Sci.*, 6(1), 52–61. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2011.52.61>
- Chang-Zheng, S., Mei-Ying, L., Jiang-Fei, M., Ming, C., Zhu-Mei, X., & Zhen-Wen, Z. (2015). Promoting Effect of Foliage Sprayed Zinc Sulfate on Accumulation of Sugar and Phenolics in Berries of *Vitis vinifera* cv. Merlot Growing on Zinc Deficient Soil. *Molecules*, 20, 2536–2554. <https://doi.org/10.3390/molecules20022536>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>
- Di Renzo, L., Gualtieri, P., & De Lorenzo, A. (2021). Diet, nutrition and chronic degenerative diseases. *Nutrients*, 13(4), 13–15. <https://doi.org/10.3390/nu13041372>

- Dürüst, N., Sümengen, D., & Dürüst, Y. (1997). Ascorbic Acid and Element Contents of Foods of Trabzon (Turkey). *J. Agric. Food Chem.*, 45(6), 2085–2087.
- Elsheery, N. I., Helaly, M. N., El-Hoseiny, H. M., & Alam-Eldein, S. M. (2020). Zinc oxide and silicone nanoparticles to improve the resistance mechanism and annual productivity of salt-stressed mango trees. *Agronomy*, 10(4), 558.
- Erbil, N., Murathan, Z. T., Arslan, M., Ilcim, A., & Sayin, B. (2018). Antimicrobial, Antioxidant, and Antimutagenic Activities of Five Turkish Pear Cultivars. *Erwerbs-Obstbau*, 60(3), 203–209. <https://doi.org/10.1007/s10341-017-0359-1>
- Fernández-Ríos, A., Laso, J., Hoehn, D., Amo-Setién, F. J., Abajas-Bustillo, R., Ortego, C., Fullana-i-Palmer, P., Bala, A., Battle-Bayer, L., Balcells, M., Puig, R., Aldaco, R., & Margallo, M. (2022). A critical review of superfoods from a holistic nutritional and environmental approach. *Journal of Cleaner Production*, 379.
- Fortis-Hernández, M., Ortiz-Lopez, J., Preciado-Rangel, P., Trejo-Valencia, R., Lagunes-Fortiz, E., Andrade-Sifuentes, A., & Rueda-Puente, E. O. (2022). Biofortification with copper nanoparticles (Nps Cu) and its effect on the physical and nutraceutical quality of hydroponic melon fruits. *Not Bot Horti Agrobo*, 50(1), 1–13. <https://doi.org/10.15835/nbha50112568>
- García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinas, P. A., & Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, 8(254), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants8080254>
- Gaucin-Delgado, J. M., Ortiz-Campos, A., Hernandez-Montiel, L. G., Fortis-Hernandez, M., Reyes-Pérez, J. J., Gonzáles-Fuentes, J. A., & Preciado-Rangel, P. (2022). CuO-NPs Improve Biosynthesis of Bioactive Compounds in Lettuce. *Plants*, 11(7), 1–10. <https://doi.org/10.3390/plants11070912>
- Genaidy, E. A. E., Abd-Alhamid, N., Hassan, H. S. A., Hassan, A. M., & Hagagg, L. F. (2020). Effect of foliar application of boron trioxide and zinc oxide nanoparticles on leaves chemical composition, yield and fruit quality of *Olea europaea* L. cv. Picual. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(106), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00335-7>
- González-García, Y., Cárdenas-álvarez, C., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Cabrera-De-la-fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Effect of three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress. *Plants*, 10(217), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants10020217>
- Guillén-Enríquez, R. R., Zuñiga-Estrada, L., Ojeda-barrios, D. L., Rivas-garcia, T., Trejo-Valencia, R., & Preciado-Rangel, P. (2022). Effect of nano-biofortification with iron on yield and bioactive compounds in cucumber. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 28, 173–184. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3272>
- Gupta, N., Jain, S. K., Tomar, B. S., Anand, A., Singh, J., Sagar, V., Kumar, R., Singh, V., Chaubey, T., Abd-Elsalam, K. A., & Singh, A. K. (2022). Impact of Foliar Application of ZnO and Fe₃O₄ Nanoparticles on Seed Yield and Physio-Biochemical Parameters of

- Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Seed under Open Field and Protected Environment *vis a vis* during Seed Germination. *Plants*, 11(23), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants11233211>
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>
- Ikram, M., Raja, N. I., Mashwani, Z. U. R., Omar, A. A., Mohamed, A. H., Satti, S. H., & Zohra, E. (2022). Phytogenic Selenium Nanoparticles Elicited the Physiological, Biochemical, and Antioxidant Defense System Amelioration of Huanglongbing-Infected ‘Kinnow’ Mandarin Plants. *Nanomaterials*, 12(356), 1–24. <https://doi.org/10.3390/nano12030356>
- Jeandet, P., Formela-Luboińska, M., Labudda, M., & Morkunas, I. (2022). The Role of Sugars in Plant Responses to Stress and Their Regulatory Function during Development. *Int. J. Mol. Sci.*, 23(9), 1–6. <https://doi.org/10.3390/ijms23095161>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Valdés-Reyna, J., Pinedo-Espinoza, J. M., López-Palestina, C. U., & Hernández-Fuentes, A. D. (2018). Foliar Application of Cu Nanoparticles Modified the Content of Bioactive Compounds in *Moringa oleifera* Lam. *Agronomy*, 8(167), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090167>
- Junglee, S., Urban, L., Sallanon, H., & Lopez-Lauri, F. (2014). Optimized Assay for Hydrogen Peroxide Determination in Plant Tissue Using Potassium Iodide. *American Journal of Analytical Chemistry*, 05(11), 730–736. <https://doi.org/10.4236/ajac.2014.511081>
- Kolniak-Ostek, J., Kłopotowska, D., Rutkowski, K. P., Skorupinska, A., & Kruczynska, D. E. (2020). Bioactive compounds and health-promoting properties of pear (*Pyrus communis* L.) fruits. *Molecules*, 25(19), 1–18. <https://doi.org/10.3390/molecules25194444>
- Konate, A., Wang, Y., He, X., Adeel, M., Zhang, P., Ma, Y., Ding, Y., Zhang, J., Yang, J., Kizito, S., Rui, Y., & Zhang, Z. (2018). Comparative effects of nano and bulk-Fe₃O₄ on the growth of cucumber (*Cucumis sativus*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.053>
- Lahlou, F. A., Hmimid, F., Loutfi, M., & Bourhim, N. (2014). Antioxidant activity and determination of total phenolic compounds content of *Euphorbia regis-jubae* (*webb and berth*) from methanol and aqueous extracts. *Int. J. Pure App. Biosci*, 2(3), 112–117.
- Li, X., Li, X., Wang, T., & Gao, W. (2016). Nutritional Composition of Pear Cultivars (*Pyrus* spp.). In *Nutritional Composition of Fruit Cultivars*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00024-6>
- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. de A., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar Application of Copper Nanoparticles Increases the Fruit Quality and the Content of Bioactive Compounds in Tomatoes. *Appl. Sci.*, 8(1020), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Mejía Doria, C. M., Gaviria-Arias, D., Bru-Martínez, R., Rengifo-Ramos, L., Alegría-Soto, Á. H., & Aguilar-Fernández, E. (2014). Caracterización cinética de la enzima polifenol oxidasa en

- seis estadios de maduración en lulo (*Solanum quitoense* Lam.) var. Castilla. *Actual Biol*, 36(101), 107–117.
- Montaño-Herrera, A., Santiago-Saenz, Y. O., López-Palestina, C. U., Cadenas-Pliego, G., Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., & Pinedo-Espinoza, J. M. (2022). Effects of Edaphic Fertilization and Foliar Application of Se and Zn Nanoparticles on Yield and Bioactive Compounds in *Malus domestica* L. *Horticulturae*, 8(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060542>
- Moradbeygi, H., Jamei, R., Heidari, R., & Darvishzadeh, R. (2020). Investigating the enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense by applying iron oxide nanoparticles in *Dracocephalum moldavica* L. plant under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 272(June), 109537. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109537>
- Mubashir, A., Nisa, Z.-U., Shah, A. A., Kiran, M., Hussain, I., Ali, N., Zhang, L., Madnay, M. M. Y., Alsiary, W. A., Korany, S. M., Ashraf, M., Al-Mur, B. A., & AbdElgawad, H. (2023). Effect of foliar application of nano-nutrients solution on growth and biochemical attributes of tomato (*Solanum lycopersicum*) under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 13(January), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1066790>
- Pasquariello, M. S., Di Patre, D., Mastrobuoni, F., Zampella, L., Scortichini, M., & Petriccione, M. (2015). Influence of postharvest chitosan treatment on enzymatic browning and antioxidant enzyme activity in sweet cherry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 109, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.06.007>
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of Tomato Plants under Saline Stress to Foliar Application of Copper Nanoparticles. *Plants*, 8(6), 1–17.
- Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2017). Cu nanoparticles in hydrogels of chitosan-PVA affects the characteristics of post-harvest and bioactive compounds of jalapeño pepper. *Molecules*, 22(926), 1–14. <https://doi.org/10.3390/molecules22060926>
- Proestos, C. (2018). Superfoods: Recent Data on their Role in the Prevention of Diseases. *Curr. Res. Nutr Food Sci Jour.*, 06(3), 576–593.
- Proietti, P., Nasini, L., Del Buono, D., D'Amato, R., Tedeschini, E., & Businelli, D. (2013). Selenium protects olive (*Olea europaea* L.) from drought stress. *Scientia Horticulturae*, 164, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.034>
- Quiterio-Gutiérrez, T., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Hernández-Fuentes, A. D., Sandoval-Rangel, A., Benavides-Mendoza, A., Cabrera-De La Fuente, M., & Juárez-Maldonado, A. (2019). The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria Solani*. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ijms20081950>
- Rahemi, M., Gharechahi, S. R., & Sedaghat, S. (2020). The Application of Nano-Iron Chelate and Iron Chelate to Soil and as Foliar Application: Treatments against Chlorosis and Fruit Quality in Quince. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 300–313. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1628684>

- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26(98), 1231–1237.
- Ren, G., Ran, X., Zeng, R., Chen, J., Wang, Y., Mao, C., Wang, X., Feng, Y., & Yang, G. (2021). Effects of sodium selenite spray on apple production, quality, and sucrose metabolism-related enzyme activity. *Food Chemistry*, 339, 127883. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127883>
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Presiado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 12(5), 791–803.
- Sariñana-Navarrete, M. de los Á., Morelos-Moreno, Á., Sánchez, E., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Preciado-Rangel, P. (2023). Selenium Nanoparticles Improve Quality, Bioactive Compounds and Enzymatic Activity in Jalapeño Pepper Fruits. *Agronomy*, 13(3), 1–15.
- Schmidt, W., Buckhout, T. J., & Thomine, S. (2019). Editorial: Iron Nutrition and Interactions in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 10(1670), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01670>
- Sheikhalipour, M., Esmailpour, B., Behnamian, M., Gohari, G., Giglou, M. T., Vachova, P., Rastogi, A., Brestic, M., & Skalicky, M. (2021). Chitosan–selenium nanoparticle (Cs–se NP) foliar spray alleviates salt stress in bitter melon. *Nanomaterials*, 11(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/nano11030684>
- Singh, Y., Bhatnagar, P., Kumar Meena, N., & Chandra Gurjar, S. (2018). The effect of foliar spray of Zn, Cu and B on physico-chemical parameters of sweet orange (*Citrus sinensis* L.) cv. Mosambi. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 1606–1610.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in Enzymology*, 299(1974), 152–178.
- Vanegas, C. L. J., Martínez, P. S. T., Coy, B. E., & Ardila, B. H. D. (2020). Early responses at symplastic stem level associated with the salicylic acid pathway in the interaction carnation (*Dianthus caryophyllus*, caryophyllaceae)- Fod (*Fusarium oxysporum* f. Sp. *dianthi*). *Acta Biol Colomb*, 27(2), 153–163.
- Wang, Z., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). A comparative investigation on phenolic composition, characterization and antioxidant potentials of five different australian grown pear varieties. *Antioxidants*, 10(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/antiox10020151>
- Wojdyło, A., Nowicka, P., Turkiewicz, I. P., Tkacz, K., & Hernandez, F. (2021). Comparison of bioactive compounds and health promoting properties of fruits and leaves of apple, pear and quince. *Scientific Reports*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99293-x>
- World health organization, (WHO). (2023). World health organization.

- Zahedi, S. M., Abdelrahman, M., Hosseini, M. S., Hoveizeh, N. F., & Tran, L.-S. P. (2019). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environmental Pollution*, 253, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078>
- Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Daneshvar Hakimi Meybodi, N., & Peijnenburg, W. (2021). Mitigation of the effect of drought on growth and yield of pomegranates by foliar spraying of different sizes of selenium nanoparticles. *J Sci Food Agric*, 101(12), 5202–5213. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11167>
- Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Daneshvar Hakimi Meybodi, N., & Teixeira da Silva, J. A. (2019). Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany*, 124, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>
- Zhu, J., Li, J., Shen, Y., Liu, S., Zeng, N., Zhan, X., White, J. C., Gardea-Torresdey, J., & Xing, B. (2020). Mechanism of zinc oxide nanoparticle entry into wheat seedling leaves. *Environmental Science: Nano*, 7(12), 1–42. <https://doi.org/10.1039/d0en00658k>

CONCLUSIONES GENERALES

- Las aplicaciones de fertilización al suelo con dosis de 150-50-80 y 100-60-60 y aplicaciones foliares con nanopartículas de Se y Zn mejoraron el rendimiento, el número y el peso, y aumentaron el contenido de azúcares y ácido ascórbico en los frutos de manzanas. En este estudio, la aplicación foliar de nanopartículas de Se a 50 ppm y Zn a 250 ppm aumentó el contenido de fenoles y flavonoides totales, y estos compuestos bioactivos influyeron principalmente en la actividad antioxidante de los frutos. Recomendamos la aplicación foliar de NPs Se y Zn como práctica para complementar las dosis de fertilización edáfica con N, P y K y mejorar la producción y la calidad nutracéutica de los frutos de manzana.
- La aplicación foliar con nanopartículas de selenio, cobre, hierro y zinc en los perales mostraron diferentes efectos en el sistema antioxidante de los frutos. Las nanopartículas de selenio y zinc, mejoraron el contenido de azúcares totales que influyen directamente en el sabor del fruto. Por otra parte, las nanopartículas de selenio y cobre mostraron un mayor efecto en el fortalecimiento del sistema antioxidante no enzimático de los frutos pues se incrementaron los compuestos bioactivos principalmente fenoles totales y flavonoides, mientras que las nanopartículas hierro y zinc presentaron un efecto contrario. Sin embargo, las nanopartículas de hierro influyeron positivamente en la activación del mecanismo de defensa antioxidante enzimático, así mismo se vio reflejado en un menor índice de estrés oxidativo, en conjunto con las nanopartículas de Cu. Los datos presentados en este estudio indican que las nanopartículas Cu a 250 ppm fueron las que mayor influencia tuvieron para mejorar el sistema antioxidante no enzimático y enzimático en los frutos de pera.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Achari, G. A., & Kowshik, M. (2018). Recent Developments on Nanotechnology in Agriculture: Plant Mineral Nutrition, Health, and Interactions with Soil Microflora [Review-article]. *J. Agric. Food Chem.*, 66(33), 8647–8661. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>
- Ahmed, Z. O., Momtaz, G. M., & Hafez, N. K. (2017). Effect of Nano-chitosan on Vegetative Growth, Fruiting and Resistance of Malformation of Mango. *Trends in Horticultural Research*, 7(1), 11–18. <https://doi.org/10.3923/thr.2017.11.18>
- Azzini, E., Maiani, G., Durazzo, A., Foddai, M. S., Intorre, F., Venneria, E., Forte, V., Lucchetti, S., Ambra, R., Pastore, G., Silveri, D. D., Maiani, G., & Polito, A. (2019). S. Giovanni Varieties (*Pyrus communis* L.): Antioxidant properties and phytochemical characteristics. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/6714103>
- Brunetto, G., Melo, G. W. bastos, Toselli, M., Quartieri, M., & Tagliavini, M. (2015). The Role of Mineral Nutrition on Yields and Fruit Quality in Grapevine, Pear and Apple. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(4), 1089–1104. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-103/15>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Aran, M., Abadía, J., & Khorassani, R. (2017). Effects of foliar nano-nitrogen and urea fertilizers on the physical and chemical properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. ardestani) fruits. *HortScience*, 52(2), 288–294. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11248-16>
- Di Renzo, L., Gualtieri, P., & De Lorenzo, A. (2021). Diet, nutrition and chronic degenerative diseases. *Nutrients*, 13(4), 13–15. <https://doi.org/10.3390/nu13041372>
- Elsheery, N. I., Helaly, M. N., El-Hoseiny, H. M., & Alam-Eldein, S. M. (2020). Zinc oxide and silicone nanoparticles to improve the resistance mechanism and annual productivity of salt-stressed mango trees. *Agronomy*, 10(4), 558. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040558>
- Fernández-Ríos, A., Laso, J., Hoehn, D., Amo-Setién, F. J., Abajas-Bustillo, R., Ortego, C., Fullana-i-Palmer, P., Bala, A., Batlle-Bayer, L., Balcells, M., Puig, R., Aldaco, R., & Margallo, M. (2022). A critical review of superfoods from a holistic nutritional and environmental approach. *Journal of Cleaner Production*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134491>
- Fortis-Hernández, M., Ortiz-Lopez, J., Preciado-Rangel, P., Trejo-Valencia, R., Lagunes-Fortiz, E., Andrade-Sifuentes, A., & Rueda-Puente, E. O. (2022). Biofortification with

- copper nanoparticles (Nps Cu) and its effect on the physical and nutraceutical quality of hydroponic melon fruits. *Not Bot Horti Agrobo*, 50(1), 1–13. <https://doi.org/10.15835/nbha50112568>
- García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinas, P. A., & Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, 8(254), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants8080254>
- Genaidy, E. A. E., Abd-Alhamid, N., Hassan, H. S. A., Hassan, A. M., & Hagagg, L. F. (2020). Effect of foliar application of boron trioxide and zinc oxide nanoparticles on leaves chemical composition, yield and fruit quality of *Olea europaea* L. cv. Picual. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(106), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00335-7>
- Guillén-Enríquez, R. R., Zuñiga-Estrada, L., Ojeda-barrios, D. L., Rivas-garcia, T., Trejo-Valencia, R., & Preciado-Rangel, P. (2022). Effect of nano-biofortification with iron on yield and bioactive compounds in cucumber. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 28, 173–184. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3272>
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Valdés-Reyna, J., Pinedo-Espinoza, J. M., López-Palestina, C. U., & Hernández-Fuentes, A. D. (2018). Foliar Application of Cu Nanoparticles Modified the Content of Bioactive Compounds in *Moringa oleifera* Lam. *Agronomy*, 8(167), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090167>
- Kamiab, F., & Zamanibahramabadi, E. (2016). The effect of foliar application of nano-chelate super plus ZFM on fruit set and some quantitative and qualitative traits of Almond commercial cultivars. *Journal of Nuts*, 7(01), 9–20.
- Kolniak-Ostek, J., Kłopotowska, D., Rutkowski, K. P., Skorupinska, A., & Kruczynska, D. E. (2020). Bioactive compounds and health-promoting properties of pear (*Pyrus communis* L.) fruits. *Molecules*, 25(19), 1–18. <https://doi.org/10.3390/molecules25194444>
- Kumar, P., Sethi, S., Sharma, R. R., Singh, S., Saha, S., Sharma, V. K., Verma, M. K., & Sharma, S. K. (2018). Nutritional characterization of apple as a function of genotype. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2729–2738. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3195-x>
- Lo'ay, A. A., EL-Ezz, S. F. A., & Awadeen, A. A. (2021). Effect of different foliar potassium fertilization forms on vegetative growth, yield, and fruit quality of kaki trees grown in sandy soil. *Scientia Horticulturae*, 288(110420).

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110420>

- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. de A., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar Application of Copper Nanoparticles Increases the Fruit Quality and the Content of Bioactive Compounds in Tomatoes. *Appl. Sci.*, 8(1020), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Montaño-Herrera, A., Santiago-Saenz, Y. O., López-Palestina, C. U., Cadenas-Pliego, G., Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., & Pinedo-Espinoza, J. M. (2022). Effects of Edaphic Fertilization and Foliar Application of Se and Zn Nanoparticles on Yield and Bioactive Compounds in *Malus domestica* L. *Horticulturae*, 8(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060542>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). FAOSTAT.
- Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2017). Cu nanoparticles in hydrogels of chitosan-PVA affects the characteristics of post-harvest and bioactive compounds of jalapeño pepper. *Molecules*, 22(926), 1–14.
- Proestos, C. (2018). Superfoods: Recent Data on their Role in the Prevention of Diseases. *Curr. Res. Nutr Food Sci Jour.*, 06(3), 576–593.
- Rahemi, M., Gharechahi, S. R., & Sedaghat, S. (2020). The Application of Nano-Iron Chelate and Iron Chelate to Soil and as Foliar Application: Treatments against Chlorosis and Fruit Quality in Quince. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 300–313. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1628684>
- Ranjbar, S., Rahemi, M., & Ramezani, A. (2018). Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious. *Scientia Horticulturae*, 240, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.035>
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Presiado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 12(5), 791–803.
- Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X., & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>
- Sayah, Z. N., & Jameel, D. A. (2020). Effect of nano NPK balanced fertilizer (20-20-20) on some vegetative and fruiting growth of *Cucurbita pepo* L . *Journal of BioSciences*, 14, 6627–6633.
- Seleiman, M. F., Almutairi, K. F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B. A., & Battaglia, M. L. (2021). Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from its use? *Plants*, 10(2), 1–27.

<https://doi.org/10.3390/plants10010002>

Wang, Z., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). A comparative investigation on phenolic composition, characterization and antioxidant potentials of five different australian grown pear varieties. *Antioxidants*, *10*(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/antiox10020151>

World health organization, (WHO). (2023). World health organization.

Zahedi, S. M., Abdelrahman, M., Hosseini, M. S., Hoveizeh, N. F., & Tran, L.-S. P. (2019). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environmental Pollution*, *253*, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078>

Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Daneshvar Hakimi Meybodi, N., & Teixeira da Silva, J. A. (2019). Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany*, *124*, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>

ANEXOS



horticulturae



Article

Effects of Edaphic Fertilization and Foliar Application of Se and Zn Nanoparticles on Yield and Bioactive Compounds in *Malus domestica* L.

Anay Montaña-Herrera ¹, Yair Olovaldo Santiago-Saenz ², César Uriel López-Palestina ¹, Gregorio Cadenas-Pliego ³, Zeus H. Pinedo-Guerrero ⁴, Alma Delia Hernández-Fuentes ^{1,*†} and José Manuel Pinedo-Espinoza ^{5,*†}

- ¹ Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Av. Universidad Km. 1, Rancho Universitario, Tulancingo 43600, Hidalgo, Mexico; anaymontanoherrera@gmail.com (A.M.-H.); cesar_lopez@uaeh.edu.mx (C.U.L.-P.)
- ² Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Circuito Ex Hacienda, La Concepción S/N, Carretera Pachuca Actopan, San Agustín Tlaxiaca 42160, Hidalgo, Mexico; yair_santiago@uaeh.edu.mx
- ³ Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo 25294, Coahuila, Mexico; gregorio.cadenas@ciqa.edu.mx
- ⁴ Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo 25315, Coahuila, Mexico; ing.zeuspinedo@gmail.com
- ⁵ Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas, Km. 15.5 Carretera Zacatecas-Guadalajara, Zacatecas 98170, Zacatecas, Mexico
- * Correspondence: almah@uaeh.edu.mx (A.D.H.-F.); pinedozac_uaa@uaz.edu.mx (J.M.P.-E.)
- † These authors contributed equally to this work.

Citation: Montaña-Herrera, A.; Santiago-Saenz, Y.O.; López-Palestina, C.U.; Cadenas-Pliego, G.; Pinedo-Guerrero, Z.H.; Hernández-Fuentes, A.D.; Pinedo-Espinoza, J.M. Effects of Edaphic Fertilization and Foliar Application of Se and Zn Nanoparticles on Yield and Bioactive Compounds in *Malus domestica* L. *Horticulturae* **2022**, *8*, 542. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060542>

Academic Editor: Robert Veberič

Received: 21 May 2022

Accepted: 14 June 2022

Published: 17 June 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: In this study, we evaluated the effects of edaphic fertilization with N, P, and K (150-50-80, 100-60-60, and without edaphic fertilization (SFE)) and foliar fertilization with nanoparticles (NPs) of Se and Zn (Se: 50 ppm, Zn: 250 ppm, and no nanoparticles (NP0)) on the yield and antioxidant compounds of apple fruits. We conducted this study in a 20-year-old commercial orchard. The experimental design was a randomized complete block design of nine treatments. The treatments with fertilization doses of 150-50-80 and 100-60-60, supplemented with Se and Zn NPs, generally increased the yield, sugar content, and ascorbic acid of the apple fruits. The SFE + NPZn treatment produced the highest increase (+193% compared with the control) in fruit yield. The SFE + NPSe and SFE + NPZn treatments led to higher contents of phenols and flavonoids, with maximum values of 7.6 mg GAE and 15.82 mg QE per gram of dry weight. These compounds presented a direct correlation with the antioxidant activity in the fruits. The foliar application of Se and Zn nanoparticles supplemented the soil fertilization with N, P, and K to improve the yield and bioactive-compound synthesis of the apple fruits.

Keywords: antioxidants; apple fruits; phenolic compounds; sugars; agricultural nanotechnology; plant nutrition

1. Introduction

Apple fruits (*Malus domestica* L.) are one of the most consumed fruits worldwide after citrus, grapes, and bananas [1]. Apple production for the year 2020 was 86,443,757 tons, and the primary producers in the world were China, the United States of America, and Turkey [1,2]. Apple fruits are important for the human diet because of their excellent taste, health benefits, biologically active substances—such as phenolic compounds, polysaccharides, and organic acids—and because of their high fiber content [3–5]. Generally, apples are consumed fresh, when the fruit is ripe, but they may also be found in processed foods, such as juices, ciders, wines, purees, jellies, marmalades, and others [5,6].



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ROQUE**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

**ANAY MONTAÑO HERRERA, CÉSAR URIEL LÓPEZ
PALESTINA, JOSÉ MANUEL PINEDO ESPINOZA Y ALMA
DELIA HERNÁNDEZ FUENTES**

POR SU VALIOSA PARTICIPACIÓN CON EL CARTEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN
EDÁFICA SOBRE FENOLES, FLAVONOIDES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE EN FRUTOS
DE PERA EN EL "IV CONGRESO NACIONAL Y 2º INTERNACIONAL DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS DEL TECN M", REALIZADO DEL 29 DE NOVIEMBRE AL 03 DE
DICIEMBRE DE 2021.

CELAYA, GTO., A 03 DE DICIEMBRE DE 2021.

MTR. MANUEL DE JESÚS QUIROZ SICAIOS

DIRECTOR



Instituto Tecnológico de
Roque

