



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS**



MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA PROTEGIDA

**PRODUCCIÓN DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.) CON APLICACIÓN
FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE HIERRO BAJO CONDICIONES
DE AGRICULTURA PROTEGIDA**

TESIS
QUE PRESENTA

JOSÉ EDUARDO CERDA TORRES

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

DIRECTOR DE TESIS
DR. NOÉ ARMANDO ÁVILA RAMÍREZ

CODIRECTOR
DR. PATRICIO APÁEZ BARRIOS

ASESOR
DR. ABIMEL LÓPEZ LÓPEZ

Apatzingán, Michoacán, México. noviembre 2025



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**PRODUCCIÓN DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.) CON APLICACIÓN
FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE HIERRO BAJO CONDICIONES DE
AGRICULTURA PROTEGIDA**

TESIS QUE PRESENTA
JOSÉ EDUARDO CERDA TORRES

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como
requisito parcial, para obtener el grado de:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

COMITÉ PARTICULAR

Director

Dr. Noé Armando Ávila Ramírez

Codirector

Dr. Patricio Apáez Barrios

Asesor

Dr. Abimael López López

Apatzingán, Michoacán, México. Septiembre 2025

DEDICATORIAS

Dedico a mi Dios esta tesis, por permitirme cumplir mis más grandes metas y sueños anhelados.

Quiero dedicar el resultado de todo mi esfuerzo y dedicación de este trabajo a mis Padres queridos, por todos los sacrificios, su apoyo y comprensión forjando principios y mis valores para ser más perseverante hasta lograr el resultado de la persona, así como también quiero dedicar este gran logro a mis seres queridos que hoy no están conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por permitirme poder lograr mis más deseadas metas con mi formación profesional, Gracias a mi Madre por darme esa fortaleza y sus consejos para el logro de mis metas más deseadas, y dar gracias a mi Padre por mostrarme el buen camino del profesionalismo con todas las enseñanzas y consejos posibles para lograr la carrera profesional que siempre anhele.

Agradezco ampliamente a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por la beca otorgada que hizo posible el poder culminar con esta etapa académica en mi proyecto de vida.

Quiero agradecer especialmente a mi entrañable amigo el **Ing. Rogelio Nuñez Ambriz** por su amistad, su apoyo incondicional y sin olvidar las constantes risas durante todo este proceso, no me quedas más que decir que este logro también es tuyo.

Agradezco por la ayuda, los consejos, enseñanzas, el aprendizaje que me han brindado mis profesores a lo largo de mi emprendimiento hacia el camino de mi proyectos profesionales y trayecto laboral.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo General.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Distribución e importancia económica social.....	4
Importancia internacional	4
Importancia nacional	4
Propiedades nutricionales	5
Taxonomía.....	6
Descripción botánica.....	7
Raíz.....	7
Tallo.....	8
Zarcillos.....	8
Hoja.....	8
Flor.....	8
Fruto.....	8
Semilla.....	9
Centro de origen y variedades.....	9
Requerimientos climáticos.....	9
Temperatura.....	9
Luminosidad.....	10
pH.....	10
Humedad.....	10
La nanotecnología en la agricultura.....	10
Vías de absorción y translocación de las nanopartículas.....	12
El hierro, su absorción y su disponibilidad.....	14
Disponibilidad del hierro en función del pH en el suelo.....	15
Importancia del hierro en las plantas.....	17
Nanopartículas de óxido de hierro.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
Descripción del área y estudio.....	21
Localización del sitio experimental.....	21

Clima.....	21
Metodología.....	22
Preparación del terreno y acondicionamiento del sitio experimental.....	22
Genotipo experimental.....	23
Producción de plántula.....	23
Trasplante.....	24
Riegos.....	25
Fertilización.....	25
Plagas.....	26
Enfermedades.....	26
Tratamientos y diseño experimental.....	27
Cosecha.....	30
Variables morfológicas.....	30
Variables de rendimiento.....	31
Variables de calidad.....	32
Análisis estadístico.....	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
Condiciones ambientales durante el cultivo.....	34
Variables morfológicas.....	35
Longitud de tallo.....	35
Diámetro de la planta.....	38
Numero de hojas por planta.....	39
Área foliar por planta.....	40
Variables de rendimiento.....	42
Rendimiento de frutos por planta.....	42
Número de frutos por planta.....	43
Longitud de frutos.....	45
Diámetro de frutos.....	46
Materia seca.....	47
Clorofila total de hojas.....	49
Variables de calidad.....	50
Sólidos solubles.....	50
Firmeza de frutos.....	51
pH.....	52
Acidez titulable.....	53
CONCLUSIONES.....	55
LITERATURA CITADA.....	56

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.		Pág.
2.1	Clasificación taxonómica del pepino.....	6
3.1	Concentración de la solución nutritiva por etapa fenológica.....	26
3.2	Tratamientos evaluados.....	27
3.3	Diseño experimental.....	29
4.1	Diámetro de la planta (mm)	38
4.2	Número de hojas por planta.....	39
4.3	Matera seca.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.		Pág.
2.1	Las cinco principales entidades líderes en la producción de pepino.....	5
2.2	Morfología de la planta de pepino.....	7
2.3	Diagrama esquemático de los sitios de captación y translocación de nanopartículas en plantas.....	13
2.4	Estados de oxidación del hierro.....	15
2.5	Disponibilidad de los elementos con base al pH.....	16
2.6	Funciones del Fe en la planta.....	18
3.1	Localización del sitio experimental.....	21
3.2	Preparación de camas de siembra.....	22
3.3	Instalación de sistema de riego con cintilla y colocación de acolchado plástico a cada una de las camas de siembra.....	23
3.4	Material genético utilizado.....	23
3.5	Plántulas germinadas en charolas con sustrato peat moss.....	24
3.6	Trasplante de plántulas de pepino.....	24
3.7	Aplicación de enraizador y fungicida vía drench.....	25
3.8	Sistema de riego por goteo.....	25
3.9	Balanza analítica y preparación de las nanopartículas.....	28
3.10	Modo de aspersiones de los tratamientos.....	28
3.11	Registro de las variables de respuesta.....	30
3.12	Registro de variables de rendimiento y componentes	32
4.1	Climograma obtenido durante el cultivo.....	35
4.2	Longitud de tallo.....	36
4.3	Área foliar por planta.....	41

4.4	Rendimiento de frutos por planta.....	42
4.5	Número de frutos por planta.....	44
4.6	Longitud de frutos.....	45
4.7	Diámetro de frutos.....	46
4.8	Clorofila total de hojas.....	49
4.9	Sólidos solubles.....	50
4.10	Firmeza de frutos.....	52
4.11	pH.....	53
4.12	Acidez titulable.....	54

RESUMEN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza importante por su valor nutritivo. Uno de los principales micronutrientes necesarios para obtener buenos rendimientos y calidad de los frutos es el hierro (Fe). No obstante, existe baja disponibilidad de este elemento en suelos alcalinos, y los fertilizantes convencionales no aportan este elemento de forma eficiente, y por la alta demanda de la población mundial es necesario buscar alternativas sustentables que mejoren la absorción de nutrientes e incrementen los rendimientos; ante ello, el uso de micronutrientes en tamaño nano (< 100 nm), es una alternativa viable. Por lo anterior el objetivo de este estudio fue determinar el efecto del número de aplicaciones foliares (dos y cuatro) de distintas dosis de nanopartículas de Fe (20, 40, 60 y 80 mg L⁻¹), en el crecimiento, el rendimiento y la calidad de frutos de pepino híbrido Centauro, cultivado en casa sombra. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los resultados indicaron que la mayor área foliar se obtuvo con cuatro aplicaciones de 80 mg L⁻¹. En el rendimiento, las dosis de 60 y 80 mg L⁻¹ aplicada a cuatro veces generaron los mejores resultados (5.55 kg / planta), el número de frutos, la longitud y el diámetro de los frutos fueron más sobresalientes con cuatro aplicaciones de 80 mg L⁻¹ (6.67, frutos / planta, 29.60 cm y 43.53 mm, respectivamente). La producción de materia seca de las hojas, los tallos y el total por planta se incrementó significativamente cuando se aplicó de 80 mg L⁻¹ de nanopartículas de Fe en cuatro aplicaciones. En la calidad de los frutos solo se observaron cambios significativos en la firmeza; los valores sobresalientes en este parámetro se generaron con cuatro aplicaciones de 60 y 80 mg L⁻¹ (6.78 y 6.83 kg cm⁻²) y con dos aplicaciones de 80 mg L⁻¹ (6.73 kg cm⁻²) En cambio, la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas, la clorofila de las hojas, los sólidos solubles, el pH y la acidez titulable de los frutos no mostraron cambios significativos por la aplicación de los tratamientos. En este estudio se observó que la dosis de 80 mg L⁻¹ aplicada cuatro veces durante el ciclo del cultivo del pepino fue la más apropiada para incrementar el crecimiento, el rendimiento y la calidad de los frutos bajo condiciones protegidas.

Palabras clave: Centauro F1, nutrición foliar, nanopartículas metálicas, micronutrientes, casa sombra.

ABSTRACT

Cucumber (*Cucumis sativus* L.) is an important vegetable for its nutritional value. One of the main micronutrients necessary to obtain good yields and quality of fruits is iron (Fe). However, there is low availability of this element in alkaline soils, and conventional fertilizers do not provide this element efficiently, and due to the high demand of the world population, it is necessary to look for sustainable alternatives that improve nutrient absorption and increase yields; Given this, the use of nano-sized micronutrients (< 100 nm) is a viable alternative. Therefore, the objective of this study was to determine the effect of the number of foliar applications (two and four) of different doses of Fe nanoparticles (20, 40, 60 and 80 mg L⁻¹), on the growth, yield and quality of Centauro hybrid cucumber fruits, grown in shade-grown houses. The treatments were distributed in a randomized full block design with four replications. The results indicated that the largest leaf area was obtained with four applications of 80 mg L⁻¹. In performance, doses of 60 and 80 mg L⁻¹ applied to four times generated the best results (5.55 kg/plant), fruit number, length and diameter of fruits were most outstanding with four applications of 80 mg L⁻¹ (6.67, fruits/plant, 29.60 cm and 43.53 mm, respectively). Dry matter production of leaves, stems, and total per plant was significantly increased when 80 mg L⁻¹ of Fe nanoparticles were applied in four applications. In the quality of the fruits, only significant changes in firmness were observed; the outstanding values in this parameter were generated with four applications of 60 and 80 mg L⁻¹ (6.78 and 6.83 kg cm⁻²) and with two applications of 80 mg L⁻¹ (6.73 kg cm⁻²). On the other hand, the height of the plant, the diameter of the stem, the number of leaves, the chlorophyll of the leaves, soluble solids, pH and titratable acidity of the fruits did not show significant changes due to the application of the treatments. In this study, it was observed that the dose of 80 mg L⁻¹ applied four times during the cucumber crop cycle was the most appropriate to increase growth, yield and fruit quality under protected conditions.

Keywords: Centaur F1, foliar nutrition, metal nanoparticles, micronutrients, shade house.

INTRODUCCIÓN

El pepino es una planta monoica, junto con la sandía (*Citrullus lanatus* Thumb), el melón (*Cucumis melo* L.), el chayote (*Sechium edule*), la calabaza (*Cucurbita ficifolia*) y el chilacayote (*Cucurbita ficifolia*); siendo el pepino la hortaliza más importante por su riqueza en agua, vitamina E y aceites naturales. Constituye uno de los mejores remedios para el cuidado externo de la piel. El pepino se caracteriza por su bajo aporte en calorías, debido a su reducido contenido en hidratos de carbono, en comparación con otras hortalizas (SIAP, 2017). El pepino es originario de las regiones tropicales del sur de Asia, siendo cultivado en la India desde hace más de 3,000 años. El cultivo de pepino se extendió a Grecia y posteriormente a Roma y por ultimo este cultivo se introdujo en China. Es por ello que este cultivo fue introducido por los romanos en algunas otras partes de del continente europeo; puesto que surgen en algunos registros de este cultivo donde existe el avistamiento del mismo cultivo en Francia, en Inglaterra y en Norteamérica a mediados de los siglos (IX, XIV y XVI). Y con ello el primer híbrido de este cultivo surge a mediados del año 1872 (Nuñez y Grijalva *et al.*, 2013).

En México, el 60 % de la producción se concentra en tres entidades que son: Sinaloa, Sonora y Michoacán. Cabe destacar que su mayor disponibilidad de este cultivo es entre los meses de enero a mayo. Sin embargo, de las entidades que cosechan pepino son seis (Sinaloa, Sonora, Morelos, Baja california, Coahuila, San Luis Potosí) las cuales tienen condiciones aptas para la cosecha a lo largo del año y Sinaloa sólo entre enero y mayo (SADER, 2022).

Para la población mundial en constante aumento, se requiere una oferta cada vez mayor de más y más alimentos, con ello para hacer frente a esta situación, puede ser mediante la gestión de nutrientes vegetales óptimos para la producción de cultivos sostenibles con alternativas sustentables tales como los avances en el área de la nutrición vegetal y la nanonutrición que es una de las áreas de investigación más eficientes para la producción agrícola sostenible

La nanotecnología, representa una tecnología que tiene un gran potencial para solucionar la problemática actual en el sector agrícola y a su vez generar nuevas

oportunidades de innovación para el crecimiento del sector. Puesto que este tipo de nuevas oportunidades de desarrollo facilitan el poder sustituir tipos de nutrición actuales bajo la aplicación de materiales de dimensiones muy por debajo de las mismas, con dimensiones que van desde 1 a 100 nm (Dubey y Mailapalli, 2016).

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial para las plantas superiores porque es un cofactor en más de 130 enzimas que catalizan reacciones bioquímicas e interviene en procesos importantes como la fotosíntesis, la respiración y la reducción del nitrato y sulfato (Steven *et al.*, 2019). No obstante, existe baja disponibilidad de este elemento en suelos alcalinos y en esta zona de estudio (Valle de Apatzingán, Michoacán) más del 65 % de los suelos tienen un pH que fluctúa entre 6.8 a 8.7, lo que limita el aprovechamiento de Fe para los cultivos hortícolas en esta zona (Álvarez *et al.*, 2009) y la aplicación de fertilizantes a base Fe convencionales no se aprovecha de forma eficiente por lo que es necesario aplicar cantidades excesiva que provocan la contaminación ambiental. En este sentido resalta la importancia de aplicar este micronutrimiento en forma de nanopartículas, ya que por el tamaño nanométrico (<100 nm) del compuesto, lo hace más eficiente y de fácil disponibilidad, además de minimizar las pérdidas al aplicar el producto y reduce impacto ambiental negativo (Guillén *et al.*, 2022).

En la actualidad la nanotecnología ha generado gran interés en el desarrollo de productos de uso agrícola, ya que representa una excelente oportunidad para reducir el uso de agroquímicos sintéticos, con la posibilidad de minimizar el impacto ambiental que se ha venido dando en las últimas décadas (Ruiz y García *et al.*, 2016).

Objetivos generales

Determinar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de Fe a distintas dosis y número de aplicaciones en la producción de pepino bajo condiciones protegidas en el valle de Apatzingán Michoacán.

Objetivos específicos

Determinar el efecto de la aplicación de nanopartículas sobre el crecimiento de la planta.

Determinar el efecto de aplicación de nanopartículas sobre las características de físicas y en la producción de pepino.

Conocer la dosis y número de aplicaciones más efectivas en la producción de pepino.

Hipótesis

La aplicación foliar de nanopartículas Fe incrementan el crecimiento y el rendimiento productivo del cultivo de pepino bajo condiciones de malla sobra en Apatzingán.

La aplicación foliar de nanopartículas Fe no generan una respuesta significativa en los tratamientos aplicados en crecimiento y el rendimiento productivo del cultivo de pepino bajo condiciones de malla sobra en Apatzingán.

REVISIÓN DE LITERATURA

Distribución e importancia económica social

Importancia internacional

El papel que desempeña el cultivo del pepino en el país es importante, esto debido a su gran demanda por los consumidores por sus múltiples cualidades (Rebollar-Rebollar *et al.*, 2022). Esto genera una gran demanda al mercado internacional con una producción anual de 1,160 mil toneladas. Puesto que México se sitúa en el 2° lugar como exportador de pepino a nivel mundial, en el cual el principal mercado de destino del fruto es estados unidos en donde alrededor del 72.3 % de la producción nacional se destina a este país y un 3.7 % de la producción a Canadá. Con ello los estados unidos importaron un aproximado de 838 mil toneladas y Canadá con una cifra de 42 mil toneladas exportadas. El resto de la producción de pepino en México tiene como destino el mercado nacional (SIAP, 2024).

Importancia nacional

El pepino representa en nuestro país una gran importancia en producción, puesto que esta hortaliza se cultiva en al redor de 29 entidades del país, además se reporta un consumo per cápita de 1.2 kg per cápita y forma parte una importante vocación exportadora.

En los últimos diez años, (2013-2022) la producción nacional promedio alcanzó la cifra de 993 mil t de frutos fresco. A partir del año 2015 los volúmenes de producción superaron el millón de t. Así en año 2022, se logró producir 1 millón 29 mil t (SIAP, 2024).

A nivel nacional, las principales entidades productoras de pepino son Sinaloa, Sonora, Michoacán, Guanajuato y Morelos (Figura 2.1).



Figura 2.1. Las cinco principales entidades líderes en la producción de pepino.

Se estima que la derrama económica derivado de la venta de pepino en 2022, fue del orden de 2,057 millones de pesos. México se ubica en el lugar 5° del ranking mundial en la producción de pepino. De tal forma, que los envíos al mercado mundial han permitido obtener ingresos superiores a 500 millones de dólares en 2022. El destino de exportación de la producción de este cultivo de pepino, se concentran, en su gran mayoría en los países como Estados Unidos y Canadá, siendo estos los países que conforman como los principales socios comerciales (SIAP, 2024).

Propiedades nutricionales

El pepino es una hortaliza considerada por los consumidores como saludable y de características agradables por su buen sabor y de su bajo aporte calórico debido a su reducido contenido en hidratos de carbono, en comparación con otras hortalizas, y a su elevado contenido de agua (SADER, 2022).

Los frutos de pepino tienen un buen aporte de fibra y así como contenidos pequeños de vitamina C, provitamina A y de vitamina E, y, en proporciones aún menores, presenta vitaminas del grupo B tales como folatos, B1, B2 y B3. Además, se ha descubierto que en su exocarpo tiene pequeñas cantidades de beta-caroteno.

Asimismo, este fruto es apreciable por los consumidores porque es muy rico en agua y también en minerales como potasio, fósforo y magnesio (Cortés *et al.*, 2011).

Es importante mencionar que este fruto tiene un sin número de formas de consumo, siendo así las más habituales en estado fresco, en ensaladas o fermentado (encurtidos). las semillas de este fruto poseen gran importancia ante los consumidores debido a su gran contenido de proteínas (36.8 %), grasas (45.4 %) y carbohidratos (10.4 %), (Mariod *et al.*, 2017).

Taxonomía

El pepino pertenece a la familia de las cucurbitáceas, al género *Cucumis* y a la especie es *sativus* (Cuadro 2.1) (Gálvez, 2004).

Cuadro 3.1 Clasificación taxonómica del pepino.

Reino	Vegetal
División	Embryophita siphogama (fanerógamas)
Subdivisión	Angiospermae
Clase	Dicotyledones
Orden	Cucurbitales
Familia	Cucurbitaceae
Género	<i>Cucumis</i>
Especie	<i>Sativus</i>
Nombre común	Pepino

La planta de pepino tiene por nombre científico *Cucumis sativus*, la cual pertenece a la familia de las cucurbitáceas, esta especie como tal tiene poco más de 850 especies existentes, la mayor parte de todas esas especies son herbáceas, trepadoras y en algunos casos suelen tener frutos grandes, como es el caso de los melones, las sandías, los calabacines y las calabazas (SADER, 2022).

Descripción botánica

A continuación, se presenta la descripción botánica de la planta de pepino.

Raíz

Este cultivo presenta un sistema radicular abundante, su raíz principal puede llegar a alcanzar hasta 1.10 m de profundidad, sin embargo, cabe mencionar que para el caso de las raíces secundarias y los pelos absorbentes son superficiales (Figura 2.2) (Gálvez, 2004).

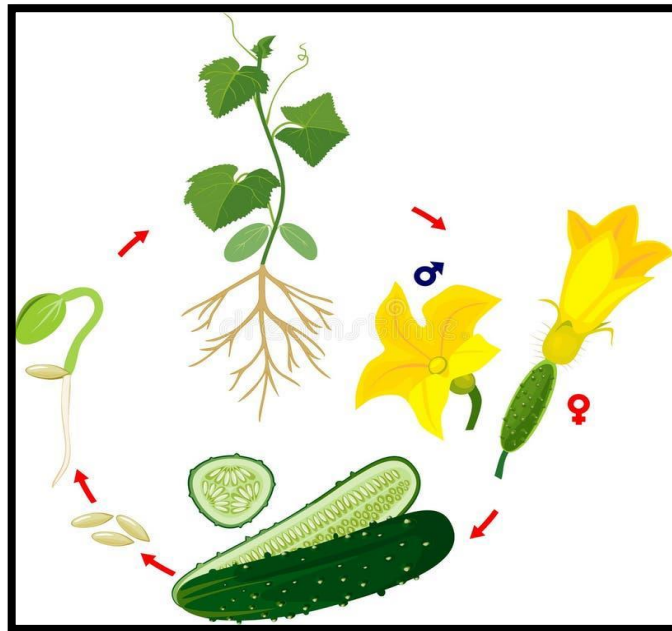


Figura 2.2. Morfología de la planta de pepino.

Tallo

El tallo es de forma poligonal y es herbáceo, de acuerdo con su crecimiento generalmente indeterminado, aunque esta característica puede ser diferente ya que esto lo determina la variedad (Valadez, 1998).

Zarcillos

En general los zarcillos que se forman en las plantas de pepino son de forma sencilla y en la mayoría de variedades cultivadas no presentan ramificaciones (Valadez, 1998).

Hoja

Presentan características simples, en su mayoría se presentan en formas acorazonadas, poseen una epidermis con cutícula delgada que minimiza la transpiración excesiva (López, 2003).

Flor

Este cultivo como tal presenta flores de ambos sexos en la misma planta, por lo que se considera monoica, de polinización cruzada, sin embargo, algunas de las variedades presentan flores hermafroditas. La planta de pepino en mayor parte del tiempo cuando inicia el proceso de floración se hacen presentes flores masculinas en la parte inferior de la planta, seguido de la parte centro de la planta se hace presente una proporción de flores masculinas y femeninas, posteriormente en la parte superior de la planta se hace presente predominancia de las flores femeninas. Las flores masculinas como las femeninas La planta de pepino tiene situadas sus flores tanto masculinas y femeninas en las axilas de las guías secundarias. Su polinización se efectúa principalmente por abejas o el aire. Cabe mencionar que una mayor productividad del cultivo dependerá en gran medida de la cantidad de flores femeninas que tenga, que estas a su vez formaran parte de un factor de conversión de flores a frutos (López, 2003).

Fruto

Su tamaño es variable acorde a las variedades existentes, es cilíndrico, la capa superior del fruto (epicarpio) presenta una serie de coloraciones variables, en la

mayoría de casos es de verde claro y presenta un color verde oscuro cuando son inmaduros, presenta en su epicarpio una textura lisa o áspera y de pulpa (mesocarpio) abundante, carnosa, de coloración blanca a verde claro cuando inmaduro, a amarillo-acuoso cuando madura, sabor de ligeramente dulce a dulce (Křístková *et al.*, 2018).

Algunos autores como Cardoso, (2002) han reportado que el número de frutos oscila entre 5 a 4 por planta, Sin embargo, este número puede ser variable acorde a la variedad cultivada, del uso de reguladores hormonales y de las condiciones ambientales.

Semilla

Las semillas son de forma plana de color blanco y miden de 8 a 10 mm, de largo con un grosor de 3.5 mm dependiendo de la variedad con la que se esté trabajando. (Valadez, 1998).

Centro de origen y variedades

El principal centro de diversificación de la especie se localiza en la zona sur y este del Himalaya. Este se difundió hacia Grecia e Italia y posteriormente a China, la cual se es considerada como el segundo centro de diversificación. El pepino se introdujo en Francia en el siglo IX, seguido de Inglaterra a mediados del siglo XIV y finalmente al Norte de América a mediados del siglo XVI (Bisognin, 2002).

En la actualidad en México, se cultivan pepino diferentes variedades de pepino, de las cuales son las de mayor demanda como es el caso de: americano, americano-chino, blanco, europeo, persa y pickle. (SADER, 2022).

Requerimientos climáticos

Temperatura

Los requerimientos de temperatura del pepino en comparación con algunas otras cucurbitáceas, presenta exigencias más bajas tomando en cuenta que la

temperatura mínima de germinación es cercana a los 12 °C y la óptima sobre los 30 °C. Cabe mencionar que temperaturas por encima de los 35 °C provocan que la germinación resulte poco probable. Con respecto a la temperatura ambiental, la óptima se encuentra alrededor de los 18 a 20 °C durante la noche y de 20 a 25 °C durante el día (Madrigal, 2006).

Luminosidad

La luminosidad en el cultivo de pepino es un factor muy importante en la planta, ya que será la que determine el momento que la planta opte por crecer, florecer y fructificar con normalidad, aunque es importante mencionar que es un cultivo que también soporta elevadas intensidades luminosas y a mayor cantidad de iluminación solar mayor es la producción al menos en esa etapa del cultivo (Madrigal, 2006). Sin embargo, algunos autores como Valadez, (1998) reportan que a fotoperiodo largo (mayor de 12 horas luz) y altas temperaturas producen más flores masculinas, y bajo condiciones de fotoperiodo corto resulta más flores femeninas.

pH

La planta puede soportar bien un pH de 6.0 a 6.8, también requiere contar con un buen contenido de materia orgánica en el suelo, lo que favorece el buen drenaje, ya que el pepino no tolera el exceso de agua (Cepeda, 1991).

Humedad

Para el cultivo del pepino la humedad es importante, la humedad relativa debe ser de 60 a 70 % durante el día, humedades del 70 al 90 % por la noche son excelente. Los excesos de humedad en el día pueden disminuir la producción (Madrigal, 2006).

La nanotecnología en la agricultura

El término nanotecnología se refiere a una amplia área de la actividad tecnológica enfocada en la ingeniería y la manipulación de objetos en la nanoescala, hasta 100 nm en tamaño, Es una actividad multidisciplinaria, que, como muchas tecnologías

emergentes, facilitan la creación de aplicaciones que a menudo tienen implicaciones legales, éticas y sociales; a pesar de las percepciones por parte de la sociedad, se estima que más de 1,000 productos de consumo final se encuentran en los mercados en Norteamérica, desde implementos deportivos, ropa que se auto limpia, productos cosméticos hasta alimentos (Castro, 2017).

La nanotecnología está revolucionando la producción, el procesamiento, el almacenamiento y el consumo de alimentos. Una amplia gama de estudios científicos ha indicado que la nanotecnología tiene el potencial de mejorar la estabilidad de los nutrientes, la solubilidad en agua y la absorción en el cuerpo humano (Kiran *et al.*, 2024).

Sin embargo, el constante aumento de la población promueve la intensificación de la agricultura, promoviendo un triplicado en el crecimiento de los suministros alimentarios. Diversos factores, entre los que se incluyen el mayor uso de fertilizantes, agua, pesticidas, fármacos, nuevas variedades de cultivo y de razas de animales, así como el desarrollo de prácticas agrícolas innovadoras, han contribuido al impulso de la producción de alimentos.

Aunque este progreso también ha tenido un alto coste para la sociedad y el medioambiente. En la actualidad, los océanos están sobreexplotados y muchos ríos, lagos y mares sufren contaminación por causa del vertido de químicos. Las tierras se han degradado y han perdido gran parte de su fertilidad. Los pesticidas están minando la salud de las personas y el medioambiente, mientras que los elevados niveles de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la agricultura intensiva agravan la amenaza del cambio climático. En resumen, nuestros sistemas agrícolas son el resultado de unas prácticas insostenibles que han mermado nuestros recursos naturales. Así pues, se ha demostrado que la creación de sistemas agrícolas y alimentarios más eficientes y equitativos y la inversión en el desarrollo rural puede acelerar la consecución de los objetivos y metas estipulados en la Agenda 2030 (FAO, 2019).

La nanotecnología, como una alternativa útil y funcional puede ser una opción redituable para sector agrícola. Ya que esta ha sido considerada como una nueva herramienta para la prevención y control de plagas.

Asimismo, en la agricultura se diseñan nuevas herramientas moleculares y celulares como la (nanotecnología) para la prevención y el tratamiento de las enfermedades en las plantas que incluyen:

- Detección y control de vectores y plagas.
- Monitoreo de enfermedades.
- Así como también sistemas inteligentes que permitan el tratamiento a nanoescala que transporte y suministre con precisión sustancias como antibióticos, fungicidas y viricidas (Castro, 2017).

Es importante tomar en cuenta todo lo se refiere o relacionado con la estabilidad general de los sistemas alimentarios, que abarca elementos como la fiabilidad y solidez de la producción, distribución y acceso a los alimentos, con el objetivo de garantizar una disponibilidad continua y segura de alimentos durante un período prolongado con tecnologías que van a la vanguardia con contribuir a los avances en la solución de las necesidades de alimentación de la población mundial. Es necesario que se implementen este tipo de nanomateriales para alimentos que sean sostenibles para garantizar la seguridad alimentaria y la nutrición de todas las comunidades sin comprometer las bases económicas, sociales y ambientales que garantizan la seguridad alimentaria y la nutrición de las generaciones futuras humano (Kiran *et al.*, 2024).

Vías de absorción y translocación de las nanopartículas

Cuando las nanopartículas entran en las células del mesófilo a través de la cutícula y las estomas, pasan por un transporte a las células del mesófilo, posteriormente se mueven por el xilema y el floema y se distribuyen a diferentes partes de la planta (Zhu *et al.*, 2020). Una vez que las nanopartículas se encuentran dentro de las células, pueden interactuar con estructuras intracelulares (Figura 2.3).

Algunos estudios han demostrado que las nanopartículas con un tamaño de partícula inferior a 50 nm se transportan generalmente en las plantas a través de la vía de los plastidos, mientras que la mayoría de las nanopartículas con un tamaño de partícula entre 50 y 200 nm se transportan a través de la vía de los apoplastos (Shahid *et al.*, 2021).

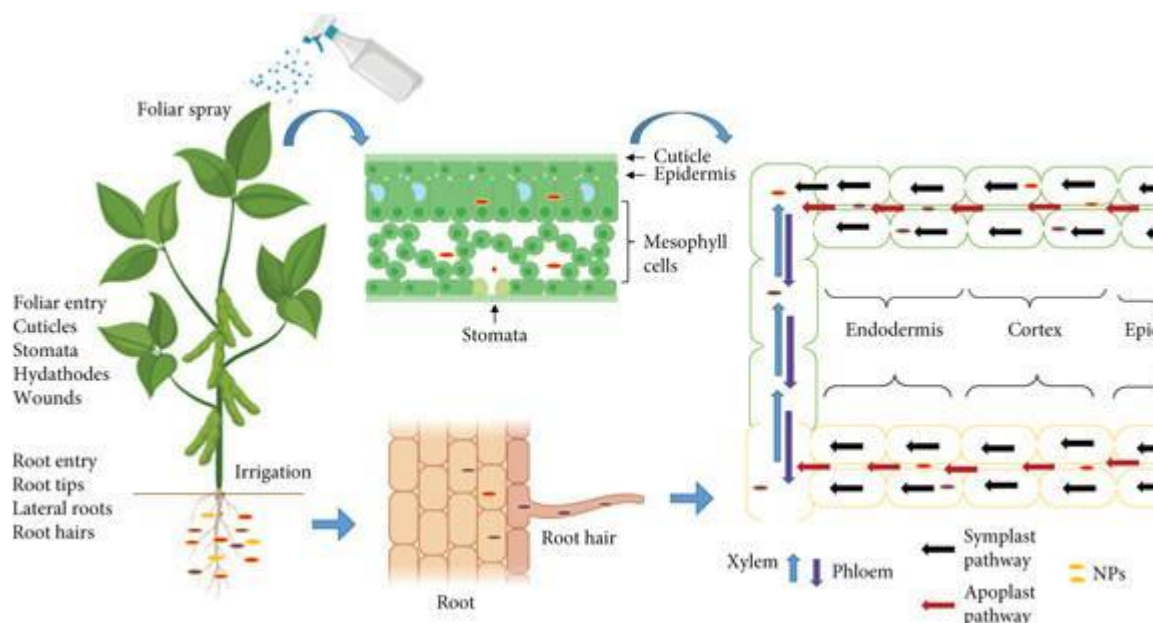


Figura 2.3. Diagrama esquemático de los sitios de captación y translocación de nanopartículas en plantas (Shahid *et al.*, 2021).

Cabe recalcar que estas vías simplásticas y apoplásticas en las que se transportan las nanopartículas se verá influenciada por aspectos como lo son las propiedades físicas de las nanopartículas, como el tamaño, la composición química, la carga superficial y la modificación de la superficie, determinan el proceso de absorción y transporte (Jitao *et al.*, 2019).

Estudios nos mencionan que una de las mejores alternativas de eficiencia de absorción de nanopartículas consta en que sean aplicadas vía foliar para que estas ingresen por medio cuticular de manera pasiva y posteriormente ingresen al sistema vascular, lo que permite que se transporten a altas velocidades. Sin

embargo, en la aplicación de las nanopartículas se debe tomar en cuenta aspectos que favorecerán la mejor asimilación por las plantas, como el suministro cuando existe la apertura estomática para que las nanopartículas puedan transportarse vía xilema y floema con velocidades de hasta 6 m en 24 horas aproximadamente (Fernández *et al.*, 2005), para lograr así promover el crecimiento y el rendimiento al transportarse a los diferentes órganos de las plantas como son; frutos hojas, raíces, tallos, frutos y granos (Siskani *et al.*, 2015).

El hierro, su absorción y su disponibilidad

El hierro (Fe) representa el cuarto elemento más abundante en la litosfera de la Tierra, después del oxígeno, el silicio y el aluminio. Sin embargo, la mayor parte del Fe se encuentra disponible en forma de silicatos de ferromagnesio (Chen *et al.*, 1982).

El Fe es uno de los nutrientes vegetales que presenta mayor dificultad de ser absorbido y asimilado presenta en la nutrición de los cultivos. De tal manera que principalmente se encuentra en forma de Fe^{3+} insoluble, especialmente en suelos aeróbicos y de pH alto, por lo tanto, estos suelos suelen ser deficientes en la forma disponible, Fe^{2+} (Juárez *et al.*, 2015).

El Fe está clasificado como un elemento con poca movilidad, es poco soluble y su disponibilidad en suelo-planta está determinado por el pH, cuando disminuye es absorbido de manera catiónica como Fe^{2+} (Megment *et al.*, 2016).

De los dos estados de oxidación en que se presenta el Fe en el suelo: férrico Fe (III) y ferroso Fe (II), está aceptado que la planta toma preferentemente el Fe (II), para ello que este proceso opta por reducir la forma de hierro en los suelos aerobios Fe (III).

El hierro es un elemento de transición que se caracteriza por su facilidad en la puede cambiar su estado de oxidación (Figura 2.4) (Juárez *et al.*, 2015).

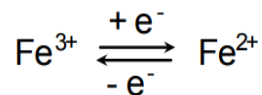


Figura 2.4. Estados de oxidación del hierro.

Disponibilidad del hierro en función del pH en el suelo

El pH en el suelo es la base fundamental sobre la disponibilidad de los elementos en las plantas.

También el pH es determinante de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que son aspectos determinantes de la disponibilidad de los nutrientes. Es por ello por lo que se debe tener en cuenta el pH para el cultivo de pepino, ya que este cultivo pueda expresar su máximo crecimiento a un pH dentro del rango de 5.5 a 6.8 (Liu y Hanlon, 2012).

Es importante mencionar que el valle de Apatzingán las características físicas y químicas del suelo no son tan apropiadas para la mayoría de los cultivos que se establecen en la zona. Al respecto el pH en el Valle de Apatzingán fluctúa entre 6.8 a 8.7, dicho parámetro forma parte del 65 % de del suelo existente, lo que limita el aprovechamiento de Fe para los cultivos en esta zona (Álvarez *et al.*, 2009).

Franco *et al.* (2018) menciona que la disponibilidad de nutrientes existentes en el suelo puede verse afectada por el pH, ya que puede ser un factor que provoque precipitación entre los elementos disponibles, o puede provocar la toxicidad de los elementos presentes en el suelo.

Cabe destacar que el incremento en la producción de los cultivos que se establecen en el Valle de Apatzingán ha generado la afectación de los suelos, debido a las malas prácticas agrícolas, como lo señalan Rodríguez *et al.* (2003), quienes indican que el incremento en el crecimiento urbano, así como también técnicas de

producción agrícola como la fertilización afecta directamente en el cuidado del suelo, aunque esta ha sido fundamentales la producción agrícola.

Con base a lo antes mencionado, en la mayoría de los cultivos que se establecen en el valle de Apatzingán tienen problemas con la disponibilidad del elemento Fe, lo que conlleva a una baja productividad, ya que dicho elemento forma parte de procesos fisiológicos importantes en las plantas.

En la Figura 2.5 se presenta la disponibilidad del hierro en función del pH, en donde se observa que las deficiencias o reducción en la disponibilidad para la planta comienzan a presentarse cuando la alcalinidad en el suelo es alta y existen valores mayores de 6.8 en el pH.

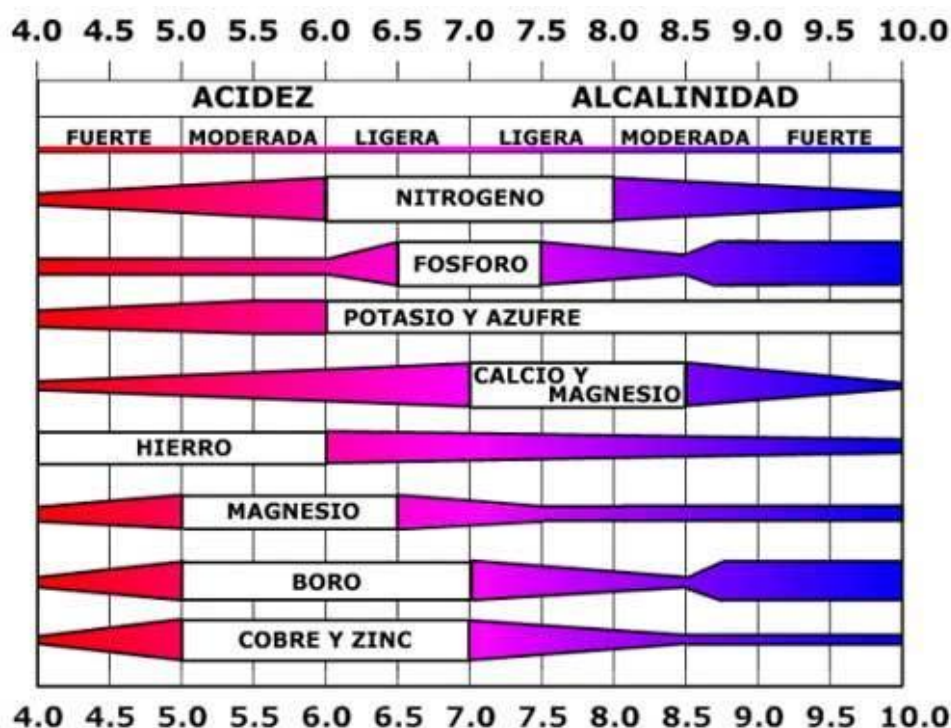


Figura 2.5. Disponibilidad de los elementos con base al pH (Ginés y Mariscal, 2002).

El elemento Fe es más afectado por el pH del suelo a medida que este incrementa, el cual por cada unidad de aumento en esta escala del pH su disponibilidad llega a reducirse hasta en 1000 veces (Franco *et al.*, 2018).

Importancia del hierro en las plantas

El requerimiento de microelementos en un cultivo para su desarrollo óptimo es crucial. Sin embargo, las condiciones ambientales pueden llegar a formar el impedimento de que el cultivo logre su desarrollo apropiado, tal es el caso de las características físicas y químicas de los suelos, que pueden provocar deficiencias nutricionales sobre todo por que dichos factores interfieren en la disponibilidad de asimilación de la planta.

La carencia de Fe, es un problema frecuente en suelos con alcalinidad, dicho factor provoca clorosis férrica que afecta de manera significativa al rendimiento de los cultivos. Por tanto, es necesario realizar aplicaciones de Fe, existen alternativas como es el caso de los quelatos a base de Fe, que son clasificados como métodos efectivos para la nutrición de cultivos. Sin embargo, en la mayoría de los casos su elevado costo y su limitada capacidad de degradación en el suelo provocan que el productor no los considere dentro de sus programas de nutrición por la difícil decisión en adquirirlos por ser no tan amigables con el medio ambiente, tomando en cuenta que al ser aplicados estamos satisfaciendo la demanda de los cultivos, pero a costo de dañar le suelo con este tipo de métodos. Esto hace necesario optar por alternativas sostenibles como es el caso de la aplicación de elementos por medio de las nanopartículas (Erro y Fernández, 2023).

El Fe es uno de los elementos que forma parte de numerosos sistemas enzimáticos que se pueden dividir en hemídicos y no hemídicos. Dentro de los sistemas enzimáticos hemídicos se encuentra en: citocromos, complejos proteicos hierro-porfirínicos, que son constituyentes de los sistemas redox de los cloroplastos, las mitocondrias y en la cadena redox del nitrato reductasa (Figura 2.6).

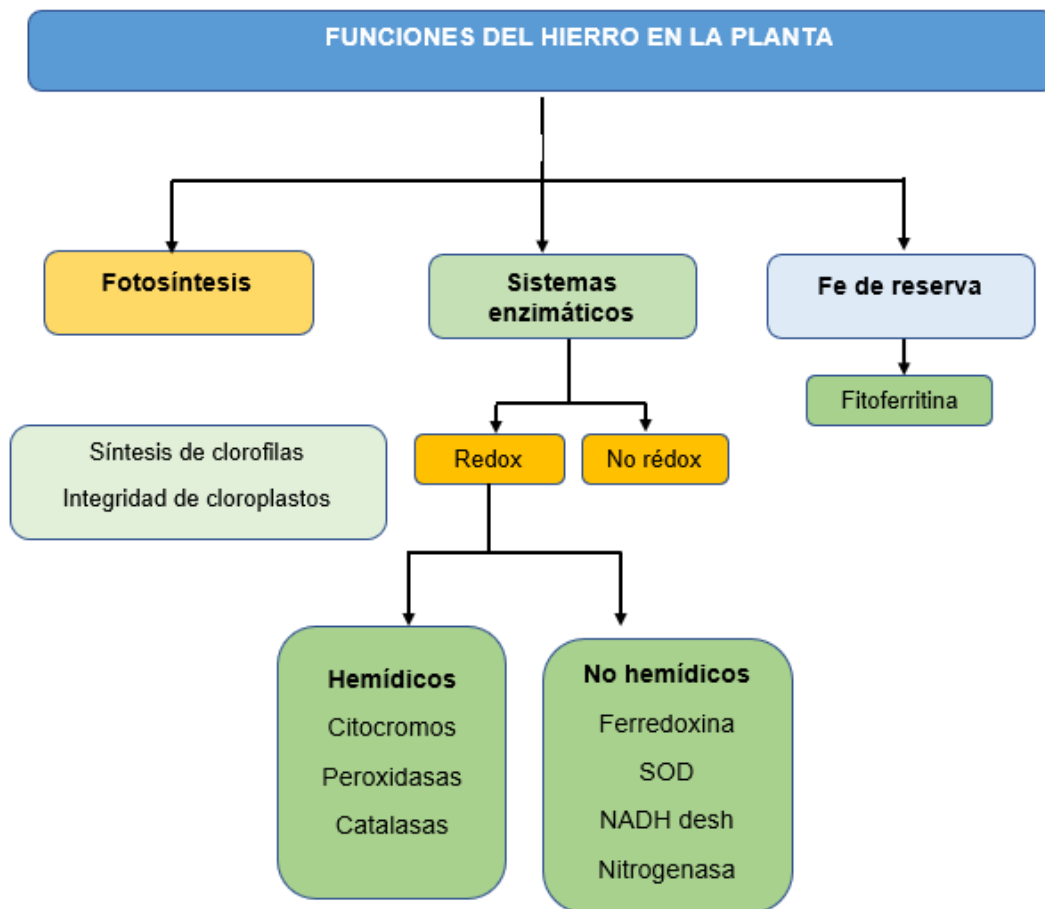


Figura. 2.6. Funciones del Fe en la planta (Juárez *et al.*, 2015).

Así también el Fe juega un papel muy importante en la fotosíntesis, no sólo por su acción en la síntesis de clorofilas si no también, por su influencia en la morfología de los cloroplastos (Juárez *et al.*, 2015).

Estudios recientes han demostrado la efectividad y la serie de beneficios que implica el usar nanopartículas, las cuales han demostrado una alta eficacia en comparación con materiales disponibles como es el caso de los fertilizantes convencionales.

Nanopartículas de óxido de hierro

Se ha comprobado a través de diversos estudios la efectividad de las nanopartículas de Fe_2O_3 como fertilizante para reemplazar o complementar a los fertilizantes tradicionales de Fe.

Se han obtenido resultados favorables por los efectos de las nanopartículas (NPs) de Fe_2O_3 en comparación a los resultados que se pueden obtener por la aplicación de fertilizantes a base de Fe quelatado. Estos resultados favorables se han observado sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo de cacahuete (*Arachis hypogaea*), cabe mencionar que este es un cultivo muy sensible a la deficiencia de Fe. Sin embargo, los resultados mostraron que las NP's de Fe_2O_3 aumentaron de forma significativa la longitud de la raíz, la altura de la planta, la biomasa y así como también el contenido de clorofila en hojas (SPAD) de las plantas de cacahuete. Las NP's de Fe promovieron la regulación del contenido de fitohormonas al igual que la actividad enzimática de antioxidantes. Los contenidos de Fe en las plantas con tratamientos de Fe_2O_3 NPs y EDTA-Fe fueron mayores que el grupo control (Rui *et al.*, 2016).

Resultados preliminares han mostrado que la aplicación vía foliares de NP's de Fe_2O_3 , influyen en el crecimiento de cultivos de cítricos. Donde la aplicación vía foliar con dosis de 100 mg L^{-1} promovió el crecimiento de forma significativa el crecimiento de *Citrus maxima* hasta en un 49 % con relación al tratamiento testigo (Hu *et al.*, 2017).

Zulfiqar *et al.* (2019), hace mención sobre la aplicación de nanopartículas Fe_2O_3 ; donde obtuvo resultados óptimos al utilizar una dosis de 50 mg L^{-1} de las cuales promovieron un estímulo en el crecimiento de plántulas de lechuga del 12 % al 54 % superior al tratamiento testigo.

El aplicar nanopartículas de Fe_2O_3 vía foliar han mostrado un aumento significativo en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en donde promovió el aumento de nitrógeno total de raíces, el número de brotes, el peso seco y el número de semillas esto mencionado por Medina *et al.* (2018).

La aplicación foliar de nanopartículas de Fe_2O_3 forma parte de una alternativa en innovación en la agricultura, ya que la aplicación de NP's de Fe_2O_3 incrementaron la producción agrícola a un bajo costo, Resultados obtenidos con la aplicación de Fe_2O_3 a dosis de 75 mg L^{-1} en el cultivo de pepino expresaron un mayor tamaño y calidad en frutos (Guillén *et al.*, 2022).

Con ello, la nanotecnología tiene una gran relevancia en un amplio rango de aplicaciones en distintas áreas, tales como tratamiento de plagas, tratamientos de aguas. La versatilidad y la manipulación sencilla que llegan a ofrecer estos materiales nos permite satisfacer todos aquellos requerimientos necesarios por los cultivos siendo así más efectivos a la demanda exigida por un sin número de cultivos existentes a nivel mundial (Yata *et al.*, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área y estudio

Localización del sitio experimental

El trabajo se realizó en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la ciudad de Apatzingán, Michoacán. La ubicación geográfica es de: $19^{\circ} 5' 19''$ LN y $102^{\circ} 21' 3''$ LO, a 325 m de altitud (Figura 3.1).



Figura 3.1. Localización del sitio experimental

Clima

El clima de la región es BS1 considerado como semiseco cálido con lluvias en verano, con temperaturas máximas de 40°C y mínimas de 20°C y precipitación anual de 765 mm (García, 2005).

En municipio de Apatzingán de la constitución limita al norte con el pico de Tancítaro, al este con Parácuaro y Múgica, al sur con Tumbiscatío y al oeste con

Aguililla y Buenavista. Posee una superficie de 1,656.67 km² y representa el 2.81 % de la superficie del estado. Su distancia a la capital del estado es de 200 km.

Metodología

Preparación del terreno y acondicionamiento del sitio experimental

La preparación de las camas de siembra se realizó de forma manual a un distanciamiento de 1 m entre camas (Figura 3.2).



Figura 3.2. Preparación de camas de siembra

Se instaló una cintilla con goteros de 30 cm de separación y un acolchado plástico bicolor (blanco/negro) de calibre 90 (Figura 3.3).



Figura 3.3. Instalación de sistema de riego con cintilla y colocación de acolchado plástico a cada una de las camas de siembra.

Genotipo experimental

Para el trabajo experimental se utilizó el híbrido de pepino Centauro que presenta las siguientes características: planta vigorosa, abierta, con hojas de color verde muy oscuro. El fruto presenta una coloración verde intenso que cuenta con una vida postcosecha prolongada, con adaptación a condiciones de calor y alta luminosidad (Figura 3.4).



Figura. 3.4. Material genético utilizado.

Producción de plántula

Las plántulas se produjeron en charolas germinadoras de 242 cavidades con sustrato peat moss (Figura 3.5). Después de la siembra de las charolas se cubrieron con plástico negro hasta el inicio de la emergencia. Las plántulas se regaron

diariamente por las mañanas y cada tercer día se le aplicó una solución de enraizador (Rootex®) a dosis de 4 g L⁻¹ de agua.



Figura 3.5. Plántulas germinadas en charolas con sustrato peat moss.

Trasplante

El trasplante se realizó a los diez días de la siembra, cuando inició la apertura de la primera hoja verdadera (Figura 3.6).



Figura 3.6 Trasplante de plántulas de pepino.

Se colocó una plántula a cada 35 cm entre cavidades, posteriormente se aplicó una solución de enraizador (Rootex®; a 4 g L⁻¹) y de manera preventiva se realizó una aplicación de un fungicida a base de fosetil + propamocarb (PreVicur® 2 mL L⁻¹) vía drench (Figura 3.7).



Figura. 3.7. Aplicación de enraizador y fungicida vía drench

Riegos

El agua se suministró mediante un sistema de riego por goteo, la cantidad e intervalos se determinaron de acuerdo con los requerimientos hídricos de las etapas fenológicas del cultivo (Figura 3.8).



Figura 3.8. Sistema de riego por goteo.

Fertilización

Para la nutrición del cultivo se empleó la solución nutritiva de Steiner (1984), la cual se aplicó de la siguiente manera: 50 % al establecimiento, 75 % al inicio de la floración y 100 % en la etapa de fructificación (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Concentración de la solución nutritiva por etapa fenológica

Etapa fenológica	Meq L ⁻¹						% de la solución
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
Crecimiento vegetativo	6.0	0.5	3.5	4.5	2	3.5	50
Floración	9.0	0.75	5.25	6.75	3	5.25	75
Producción	12.0	1.0	7.0	9.0	4.0	7.0	100

Plagas

Conforme al desarrollo del cultivo en medida de prevención, se realizaron aplicaciones de insecticidas vía foliar a los tres días después de haberse efectuado el trasplante, se utilizó spinoteram (Palgus®), sulfoxaflor (Toreto®). En todas las aplicaciones de insecticidas se agregaron adherentes (Inex- A®) a dosis de 1 mL L⁻¹ para evitar la presencia y el ataque de insectos chupadores como el Trips (*Frankliniella occidentalis*) y la mosca blanca (*Bemisia tabaci*). Dichas aplicaciones de estos insecticidas se realizaron cada 14 días después del trasplante.

Enfermedades

A los 11 días después del trasplante se presentaron algunas enfermedades, las cuales se controlaron mediante la aplicación de Azoxistrobin (Amistar®) a dosis de 1 g L⁻¹ para el control de Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis*). En las siguientes aplicaciones se utilizó Metalaxil-M (Ridomil Gold®) a dosis de 3 mL L⁻¹ para el control de Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis*) y Trifloxystrobin (Tega®) a dosis de 0.5 mL L⁻¹ estas aplicaciones se realizaron de manera preventiva a intervalos de 9 días contra estas enfermedades causadas por patógenos. A las cuales en cada una de las aplicaciones se les agregó el adherente Inex- A® a la dosis de 1 mL L⁻¹.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron nueve tratamientos que consistieron en la aplicación foliar de nanopartículas de Fe, a distintas dosis y número de aplicaciones (Cuadro 3.1), a lo largo del desarrollo del cultivo, la generación de los tratamientos se presenta a continuación.

Cuadro 3.2. Tratamientos evaluados.

Tratamientos	Dosis (mg L ⁻¹)	No. Aplicaciones	Simbología
1	20	A2	D20 – A2
2	20	A4	D20 – A4
3	40	A2	D40 – A2
4	40	A4	D40 – A4
5	60	A2	D60 – A2
6	60	A4	D60 – A4
7	80	A2	D80 – A2
8	80	A4	D80 – A4
Testigo	0	D0	D0 – A0

Las dosis de nanopartículas utilizadas se pesaron en una balanza analítica y se disolvieron en agua bidestilada a la cual se le aplicó adicionalmente adherente a una dosis de 1 mL L⁻¹ Inex- A® (Figura 3.9).



Figura 3.9. Balanza analítica y preparación de las nanopartículas.

Las aspersiones de los tratamientos se iniciaron a los 10 días después de trasplante y se realizaron por la mañana hasta punto de goteo con un atomizador de un 1 L de capacidad. Con una cantidad de solución por planta de 50 mL^{-1} , las aplicaciones fueron realizadas a las primeras horas del día (Figura 3.10).



Figura 3.10. Modo de aspersiones de los tratamientos

Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con un arreglo de parcelas divididas, la parcela grande estuvo conformada por la dosis y la parcela chica por número de aplicaciones. Cada tratamiento, se repitió cuatro veces, por lo que se tuvieron 36 unidades experimentales (Cuadro 3.3). Cada unidad experimental estuvo formada por seis plantas. Como parcela útil se tomaron dos plantas de la parte central de cada unidad experimental.

Cuadro 3.3. Diseño experimental y distribución de los tratamientos.

I	II	III	IV
T3R1	T8R2	T5R3	T6R4
T4R1	T7R2	T6R3	T5R4
T9R1	T9R2	T7R3	T8R4
T1R1	T3R2	T8R3	T7R4
T2R1	T4R2	T3R3	T9R4
T7R1	T6R2	T4R3	T2R4
T8R1	T5R2	T9R3	T1R4
T5R1	T2R2	T1R3	T4R4
T6R1	T1R2	T2R3	T3R4

T1		T4		T7	
T2		T5		T8	
T3		T6		T9	

Cosecha

El cultivo se trabajó hasta los 60 días después del trasplante (ddt). Las cosechas iniciaron a los 36 días después del trasplante y a intervalos de cuatro días se estuvieron efectuando los cortes de frutos; en total se hicieron cuatro cortes.

Para el registro de las variables de respuesta se utilizaron dos plantas centrales de cada unidad experimental (Figura 3.11).



Figura. 3.11. Registro de variables de respuesta.

Variables morfológicas

Se tomaron datos para conocer el crecimiento de la planta de acuerdo con el tiempo y los tratamientos aplicados de manera periódica durante el desarrollo del cultivo hasta concluir su ciclo, las variables morfológicas que se midieron fueron las siguientes:

Longitud de la planta. Se midió con un flexómetro desde la base del tallo hasta la punta de la guía principal con una frecuencia de una semana después del trasplante.

Diámetro del tallo. Se midió la medición con un vernier (pie de rey) en el tallo a una altura de 2 cm del suelo con una frecuencia de una semana después del trasplante.

Número de hojas. Se contabilizaron de forma visual las hojas completamente desarrolladas.

Área foliar. Esta variable se determinó mediante un modelo de regresión lineal que correlacionó el área foliar de las hojas obtenido con papel milimétrico y el área foliar calculado mediante la fórmula: $AF = L \times A$. Donde a AF = área foliar, L = largo, A = ancho. La fórmula de regresión utilizada fue la siguiente: $AF = 0.8979 (L \times A) - 21.11$. Donde a AF = área foliar, L = largo de la hoja, A = ancho de la hoja. El modelo anterior correlacionó en 90 % ($R^2 = 0.9096$).

Variables de rendimiento

Peso de frutos. En una báscula se pesaron los frutos cosechados en cada corte y por medio de la sumatoria de todos los cortes se determinó el rendimiento de frutos por planta y por hectárea considerando la densidad de población.

Número de frutos. En cada corte de frutos se realizó la sumatoria del número de frutos cosechados.

Longitud de frutos. Con un flexómetro se determinó esta variable, para lo cual, en cada corte se tomó una muestra de tres frutos.

Diámetro de frutos. Con vernier se determinó esta variable, para lo cual, en cada corte se tomó una muestra de tres frutos.

Materia seca. Se tomaron dos plantas por cada unidad experimental y se separaron por órganos (tallos y hojas). Cada órgano fue secado en una estufa de aire circulante forzado a 70 °C hasta obtener un peso constante.

Clorofila en hojas. Para la determinación de clorofila se utilizó el método de espectrofotométrico, que consistió en la obtención de cinco hojas de la parte intermedia de la planta de la parcela útil de cada unidad experimental. Se lavaron y fueron congelados en un ultra congelador Marca Haier, modelo DW-86W100 a -32 °C, después se maceraron y se tomó 1 g de cada muestra, para posteriormente dejarse reposar en una solución de acetona de 10 mL al 80 % por 48 horas. Posteriormente se centrifugaron y finalmente se midieron en un espectrofotómetro

a la longitud de 645 y 663 mm. Se utilizó una muestra de acetona al 80 % como blanco.

Variables de calidad

Sólidos solubles. Al momento de cosecha se tomaron tres frutos por unidad experimental y con la ayuda de un refractómetro se cuantificó el contenido de sólidos solubles totales y se expresarán grados °Brix.

Firmeza del fruto. Se midió con penetrómetro manual con una punta de 11 mm de diámetro en la parte central del fruto.

pH y acidez titulable. El pH se midió con un potenciómetro marca Corning pH meter 445, previamente, se pesaron 10 g de pulpa y se licuaron con 50 mL de agua desionizada, se filtró el extracto obtenido y de este último se tomaron 20 mL para registrar la lectura. La acidez titulable se determinó en 10 mL del extracto anterior, mediante titulación con hidróxido de sodio 0.025 N, los resultados fueron reportados como porcentaje de ácido cítrico.

El registro de estas variables se puede apreciar a continuación (Figura 3.11).

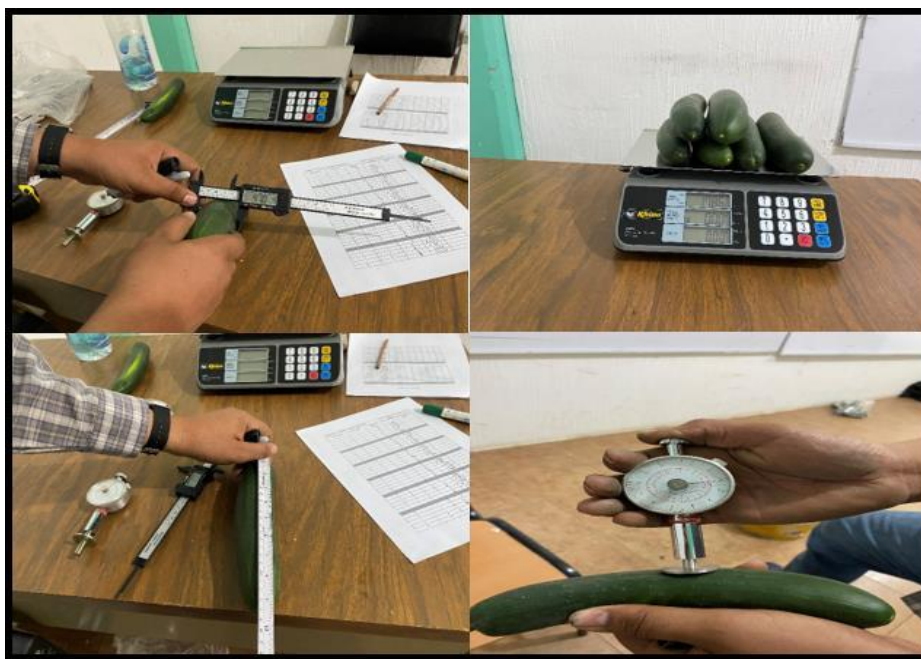


Figura 3.12. Registro de variables de rendimiento y componentes del mismo.

Análisis estadístico

Los datos de las variables se sometieron a un análisis de varianza y a una prueba de comparación de medias de Tukey al 5 % de probabilidad del error con el paquete estadístico de SAS versión 9.1 (SAS, 2007). A las variables de crecimiento se realizó un análisis de regresión simple con el paquete de Microsoft Excel (versión 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones ambientales durante el cultivo

Durante el desarrollo del cultivo de pepino, se registraron las temperaturas máximas y mínimas con las cuales se construyó un climograma en donde se clasificó por etapas fenológicas acorde a la fecha del cultivo (Figura 4). Durante la etapa de plántula los valores máximos de temperatura fueron de 38.6 °C y de humedad relativa de 87.3 %; los valores mínimos fueron de 17.4 °C y 21.0 %, respectivamente. En la etapa vegetativa los valores máximos de temperatura fueron de 39.5 °C y de humedad relativa de 76.3 %; los valores mínimos fueron de 19.3 °C y 23.3 % respectivamente. En la etapa de floración los valores máximos de temperatura fueron de 40.4 °C y de humedad relativa de 78.5 %; los valores mínimos fueron de 15.6 °C y 10.3 % respectivamente. Para la etapa de fructificación los valores máximos 44.5 °C y de humedad relativa de 67.4 %; los valores mínimos fueron de 13 °C y 12.5 % respectivamente. En base a estas temperaturas que se presentaron en el transcurso del desarrollo del cultivo, es importante mencionar que temperaturas mínimas de 20 °C y máximas de 32 °C son propicias para un buen desarrollo del cultivo de pepino (Marcelis *et al.*, 2006). Sin embargo, autores como Gálvez (2004), hace mención sobre que las temperaturas idóneas para el cultivo de pepino en invernadero deben ser las temperaturas mínimas sean de 19° C y las máximas de 30 °C, estas temperaturas apropiadas ayudan al cultivo sin impedimentos por estrés que afecten la fotosíntesis.

Cruz-Coronado y Monge-Pérez (2019), hacen mención que el cultivo dependerá de las temperaturas ideales para su desarrollo sin impedimentos, esto porque la temperatura es un cofactor que influencia en la tasa de crecimiento, desarrollo, respiración, absorción de nutrimentos y de agua. Sin embargo, lo antes mencionado por López (2003), la temperatura ideal al igual que la humedad relativa dependerá del medio en el cual el cultivo este establecido, además del tipo de genotipo utilizado, que serán las determinantes que generan el buen desarrollo del

cultivo. Debido a que el mismo es susceptible a daños en plantas por temperaturas que sobre pasen los 48 °C.

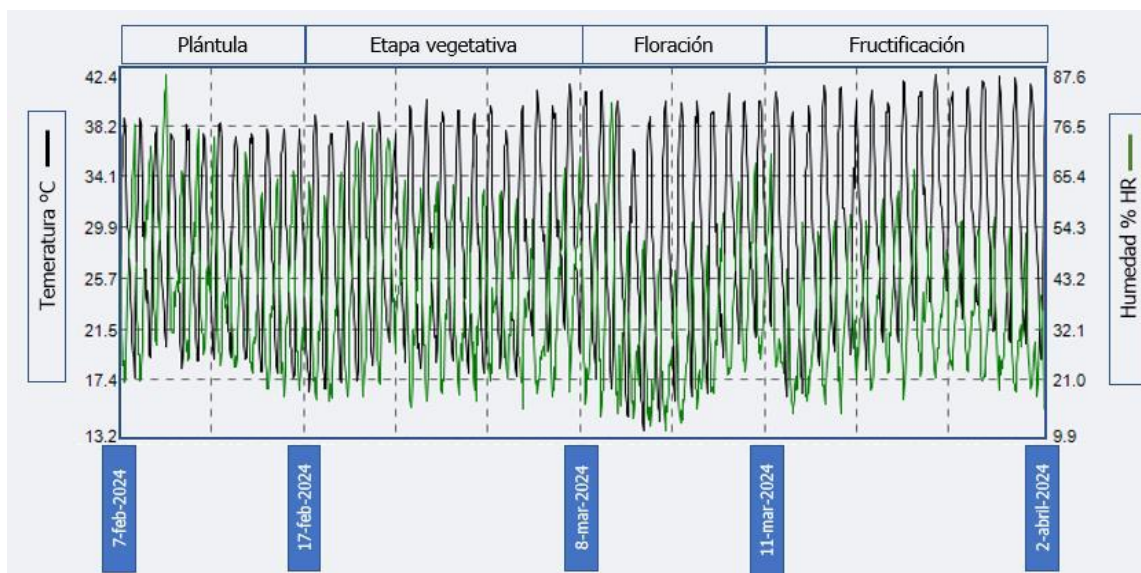


Figura 4.1. Climograma obtenido durante el desarrollo del cultivo

Variables morfológicas

Longitud de tallo

La longitud del tallo en plantas de pepino en función del tiempo se ajustó a modelos de regresión lineal simple (Figura 4.2).

Las plantas que mostraron la menor velocidad de crecimiento fueron a las que se les suministró la dosis más alta de Fe_2O_3 (80 mg L^{-1}) aplicada dos y cuatro veces, con un crecimiento de 3.6 y 3.5 cm diarios respectivamente, que fue incluso menor que el crecimiento de las plantas testigo (3.73 cm). En cambio, la aplicación de 40 mg L^{-1} de Fe_2O_3 favoreció el crecimiento de las plantas, con un aumento de 4.5 cm por día; superior al resto de los tratamientos (Figura 4.2).

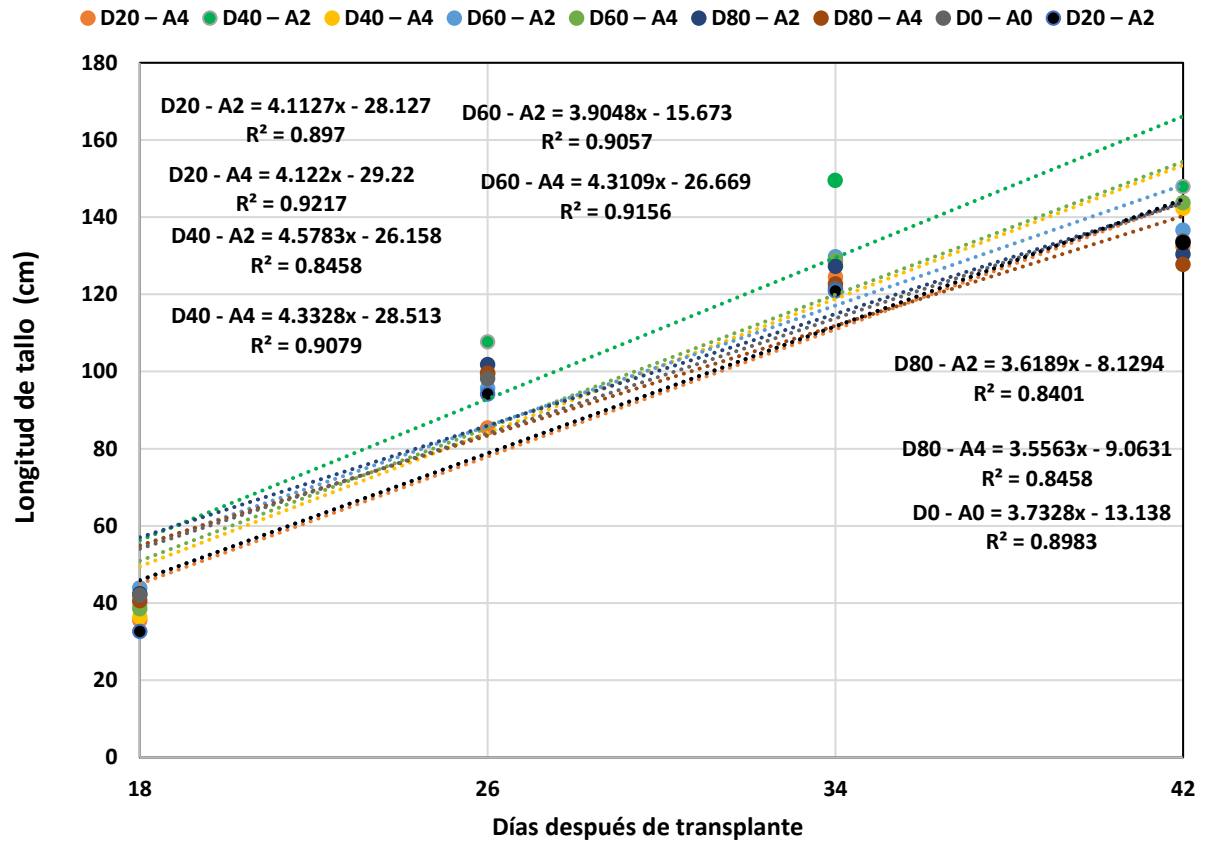


Figura 4.2. Longitud del tallo de las plantas de pepino cultivado en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Sin embargo, a los 42 ddt la longitud de las plantas evaluadas no mostraron diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos aplicados (Figura 4.2).

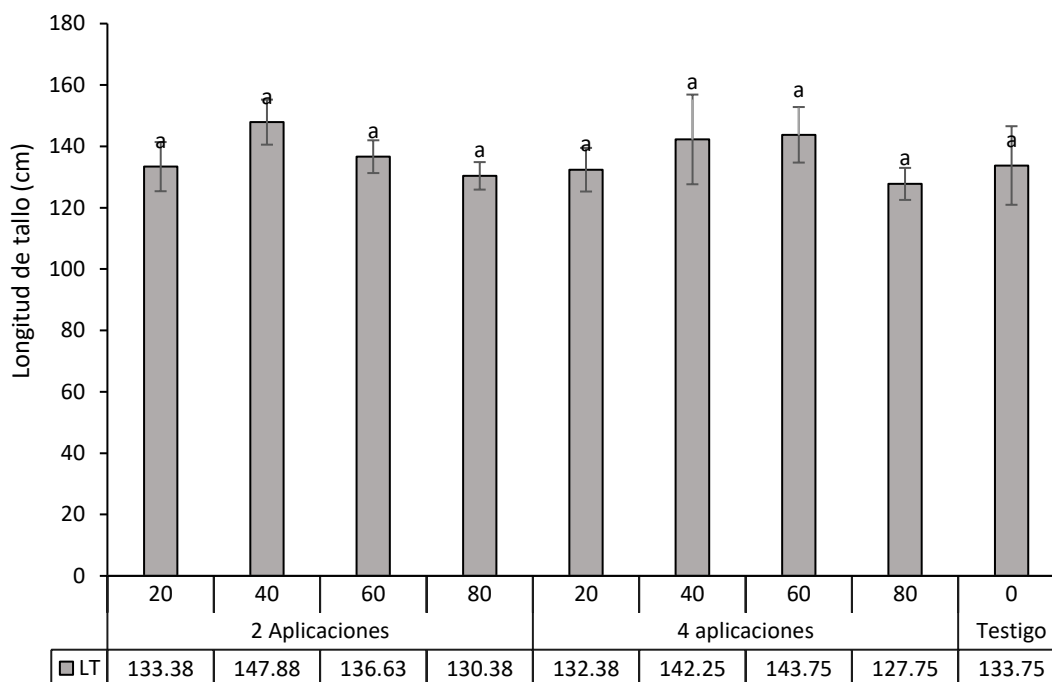


Figura 4.2. Longitud del tallo de las plantas de pepino a los 42 ddt en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Estos resultados difieren con los encontrados por Yuan *et al.* (2018), quienes mencionan que las aplicaciones NP's de hierro promovieron el incremento en la altura en plantas hasta en 38 % con relación con las plantas del testigo en el cultivo de cacahuate. Al igual que Shakor *et al.* (2022), quienes mencionan que el Fe mejora el crecimiento de las plantas, ya que desencadena procesos enzimáticos que son regulados por fitohormonas. Por lo que estos procesos enzimáticos promueven el crecimiento de las plantas.

Los resultados obtenidos en nuestro estudio nos muestran que a las dosis evaluadas e intervalos de aplicación de nanopartículas de Fe no se promovió el incremento en la longitud del tallo de las plantas de pepino, por la baja acumulación del elemento hierro por efecto de las dosis que pudieron ser bajas.

Algunos trabajos donde se evaluaron dosis mayores de NP's de Fe encontraron respuesta significativa, al respecto Dola *et al.* (2022) estudiaron la aplicación de este

elemento como NP's a las dosis de 100 y 200 mg L⁻¹ y obtuvieron un aumento significativo del 26.4 y 57 % en plantas de soya con respecto a las plantas testigo.

Diámetro de la planta

El diámetro de las plantas evaluadas no mostró diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos aplicados, ya que el análisis de varianza indicó similitud estadística entre los tratamientos evaluados (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Significancia estadística y prueba de comparación de medias del diámetro de la planta de pepino en función del número de aplicaciones y dosis de NP'S de hierro.

Tratamientos	Días después del trasplante			
	18	26	34	42
D20 – A2	6.6750 a [¶]	7.8000 a	8.3750 a	8.4500 a
D20 – A4	6.7250 a	7.5375 a	7.9875 a	8.2000 a
D40 – A2	6.8875 a	8.0000 a	8.4250 a	8.8375 a
D40 – A4	6.4500 a	8.7750 a	9.3875 a	9.5750 a
D60 – A2	7.0500 a	8.1750 a	8.5750 a	8.7125 a
D60 – A4	6.8875 a	8.2375 a	8.8125 a	9.1625 a
D80 – A2	7.0875 a	8.1875 a	9.0375 a	9.1500 a
D80 – A4	6.6125 a	7.7750 a	8.2875 a	8.5250 a
D0 – A0	6.9875a	7.6875 a	7.8375 a	7.7000 a
Media general	6.818056	8.019444	8.525000	8.701389
Probabilidad F	NS	NS	NS	NS
CV %	11.82634	14.40376	11.79924	11.11608

Medias con letras iguales dentro de la misma columna son no diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). NS = no significativo. CV = coeficiente de variación. D = dosis (mg L⁻¹). A= número de aplicaciones.

Estos resultados difieren con los reportados por Tawfik *et al.* (2021), quienes obtuvieron los mayores diámetros de plantas de *Moringa oleifera* tratadas con NP's de hierro aplicadas vía foliar a dosis de 60 mg L⁻¹, con aumento significativo de hasta en 73 % en comparación con las plantas del testigo sin aplicación.

Según lo descrito por Grégory *et al.* (2002), el hierro participa en la síntesis de hormonas vegetales como el etileno. Dicha hormona puede llegar a ser un determinante en el crecimiento como el aumento del diámetro en las plantas, sin

embargo, en nuestro estudio es posible que esta variable no responda al Fe y por ende lograr incrementar esta variable morfológica.

Número de hojas por planta

Para el caso del número de hojas por planta, solo se encontraron modificaciones estadísticas significativas a los 18 días después del trasplante, pero posteriormente se perdió el efecto, ya que en las subsiguientes fechas no se detectaron diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos aplicados (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Significancia estadística y prueba de comparación de medias del número de hojas de la planta de pepino en función del número de aplicaciones y dosis de NP'S de hierro.

Tratamientos	Días después del trasplante			
	18	26	34	42
D20 – A2	7.5b [¶]	12.375 a	16.125 a	18.125 a
D20 – A4	7.3 b	11.875 a	16.375 a	17.875 a
D40 – A2	9.1ab	13.625 a	17.375 a	20.500 a
D40 – A4	10.5 ab	13.125 a	15.500 a	18.375 a
D60 – A2	11.8 a	14.500 a	17.750 a	20.250 a
D60 – A4	10.3 ab	13.125 a	17.750 a	20.500 a
D80 – A2	9.0ab	12.875 a	16.250 a	18.000 a
D80 – A4	9.0ab	13.250 a	16.500 a	19.375 a
D0 – A0	9.7 ab	12.5 a	16.000 a	17.250 a
Media general	9.388889	13.02778	16.62500	18.91667
Probabilidad F	**	NS	NS	NS
CV %	14.99273	11.85240	10.50242	11.27157

[¶]Medias con letras iguales dentro de la misma columna son no diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). NS = no significativo. CV = coeficiente de variación. D = dosis (mg L⁻¹). A número de aplicaciones.

Los resultados encontrados en esta variable son diferentes con los resultados obtenidos por Tawfik *et al.* (2021), quienes realizaron la aplicación de NP's de Fe a la dosis de 60 mg L⁻¹ en plantas *Moringa oleifera*, promovió el aumento en número de hojas en las plantas hasta en un 37 % superior a las plantas testigo, lo que indica diferencias en respuesta entre especies de plantas.

Asimismo, Ahmad *et al.* (2024), obtuvieron resultados positivos con la aplicación de NP's de Fe en el cultivo de *Solanum lycopersicum*, suministrada vía foliar a la dosis de 100 mg L⁻¹, la cual promovió de manera significativa el aumento en el número de hojas en un 173 % superior a las plantas testigo. Al respecto, Ali *et al.* (2021), mencionan que la aplicación de NP's activan procesos biológicos que pueden promover la fotosíntesis en las plantas, esto da origen a un mayor aumento en crecimiento en las plantas. Sin embargo, dichos procesos dependerán del tamaño, concentración y método de aplicación de la NP's utilizadas. Siendo así que en el presente estudio pudieron estar influenciados estos resultados por las dosis que posiblemente fueron insuficientes para promover el incremento en el número de hojas en fechas posteriores a los 18 días después del trasplante.

Área foliar por planta

El área foliar de las plantas de pepino presentó diferencias altamente significativas a causa de los tratamientos evaluados. Los resultados indican que con la dosis de 60 y 80 mg L⁻¹ de NP's de Fe las plantas aumentaron su área foliar, pero fue el tratamiento con la dosis de 80 mg L⁻¹ aplicada cuatro veces el tratamiento con el que se lograron los mayores incrementos en el área foliar de las plantas, superior al testigo hasta en un 178 % respectivamente. Con las dosis de 20 y 40 mg L⁻¹ de Fe en dos y cuatro aplicaciones se registró estadísticamente similares áreas foliares a las plantas del tratamiento testigo (Figura 4.3).

Efecto positivo a la aplicación de NP's de Fe también lo reportaron Feng *et al.* (2022). Con la dosis de 150 mg L⁻¹ vía foliar en el cultivo de Trigo (*Triticum aestivum*) registraron aumentos significativos en el área foliar de hasta 35 % con relación a las plantas testigo, por lo que en este cultivo se requirieron dosis más elevadas para lograr incrementos, aunque en proporción, estos fueron menores a los logrados en nuestro estudio.

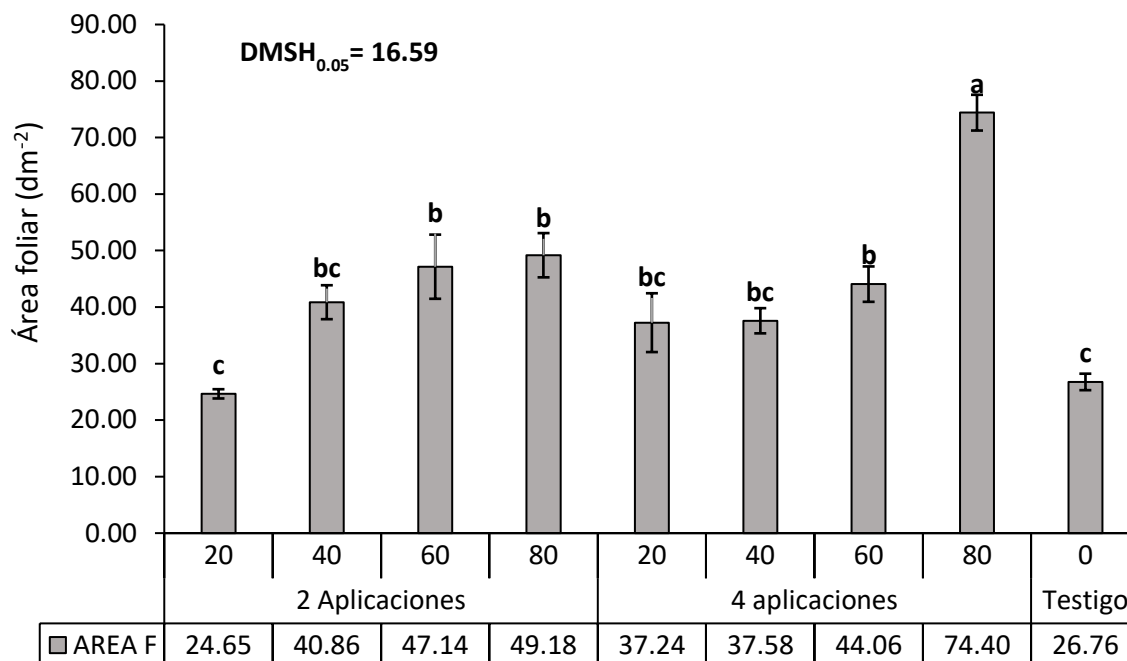


Figura 4.3. Área foliar del pepino cultivado en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

A pesar que el suministro de NP's de Fe no aumentaron el número de hojas, pero estas si incrementaron el tamaño, lo que puede ser atribuido a lo señalado por Yusefi-Tanha *et al.* (2020) quienes mencionan que la NP's de Fe promueven el aumento en la absorción de nutrientes como el nitrógeno y potasio, lo que pudo haber aumentado significativamente el área foliar de la planta.

Al respecto se indica que el Fe promueve procesos de señalización en las plantas, dicho elemento es un cofactor implicado en la homeostasis de los cloroplastos, por lo cual es de suma importancia este elemento para el buen funcionamiento de la fotosíntesis y por ende desencadenar una mayor expansión foliar en las plantas (Rai *et al.*, 2021). Esto concuerda con lo indicado por Khan *et al.* (2019), quienes señalan que las NP's suministradas vía foliar promueven una interacción con las plantas a nivel celular, esto una vez que se ha llevado a cabo su ingreso dentro de la planta, una vez que son translocadas promueven cambios morfológicos y fisiológicos, lo

que mejora el crecimiento de las plantas y de la maquinaria fotosintética representado por el área foliar.

Variables de rendimiento

Rendimiento de frutos por planta

El rendimiento de frutos presentó diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) por efecto de los tratamientos. Los tratamientos con los que se registró incrementos en el rendimiento de frutos fue con la dosis 80 suministrada dos veces y con 60 y 80 mg L⁻¹ aplicadas a cuatro veces, Estos últimos tratamientos fueron los que lograron el mayor rendimiento de fruto con 5.5 kg por planta y que duplicaron al rendimiento de las plantas del testigo, el resto de los tratamientos fueron estadísticamente similares al testigo (Figura 4.4).

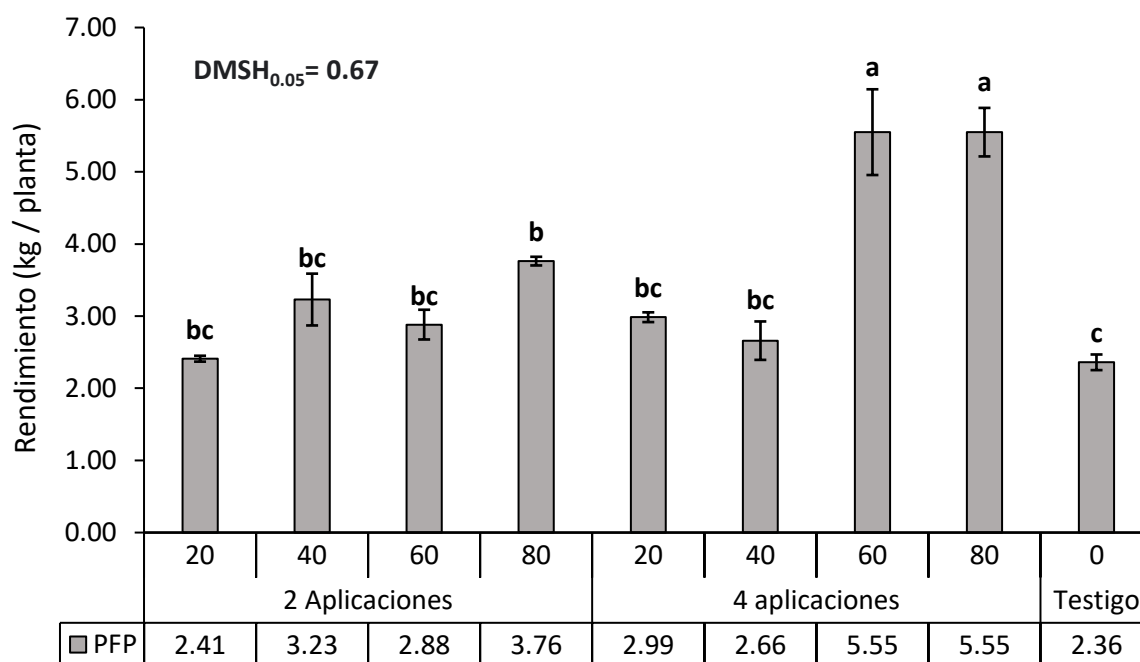


Figura 4.4. Rendimiento de pepino cultivado en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Estos resultados son similares con los publicados por Hu *et al.* (2017) ya que también encontraron que la aplicación vía foliar de nanopartículas de Fe incrementó

la producción y la calidad de los cultivos, y determinaron que las NP's son altamente efectivas para ser asperjados en las plantas.

En otros cultivos como el arroz (*Oryza sativa*) existen reportes de evidencias sobre los beneficios de la aplicación de NP's de Fe, para aumentar de manera significativa el rendimiento del cultivo hasta en un 78 % (Alidoust y Isoda, 2013).

La respuesta positiva de las dosis de 60 y 80 mg L⁻¹ de NP's de Fe se puede atribuir a que este elemento es crucial para la formación de las proteínas y por ende tener influencia en los procesos de fotosíntesis. El Fe, aunque es requerido en pequeñas cantidades por las plantas es de gran importancia para la misma, ya que participa en todos los procesos fundamentales de la creación de energía (fotosíntesis) y por lo tanto los cultivos con un aporte apropiado de este elemento presentan un mejor desempeño en el rendimiento (Tripathi *et al.*, 2018).

Número de frutos por planta

El número de frutos evaluados presentó diferencias altamente significativas por efecto de los tratamientos. Las plantas que produjeron mayor número de frutos fueron las que recibieron la dosis de 80 mg L⁻¹ aplicada cuatro veces, con incrementos del 105 % con respecto a las plantas del testigo. También se registraron aumentos significativos en el número de frutos por planta con 40 y 80 mg L⁻¹ en dos aplicaciones que fueron del 41 al 49 % respecto al testigo. El resto de los tratamientos fueron estadísticamente similares en esta variable al testigo con medias de entre 3 y 4 frutos por planta (Figura 4.5).

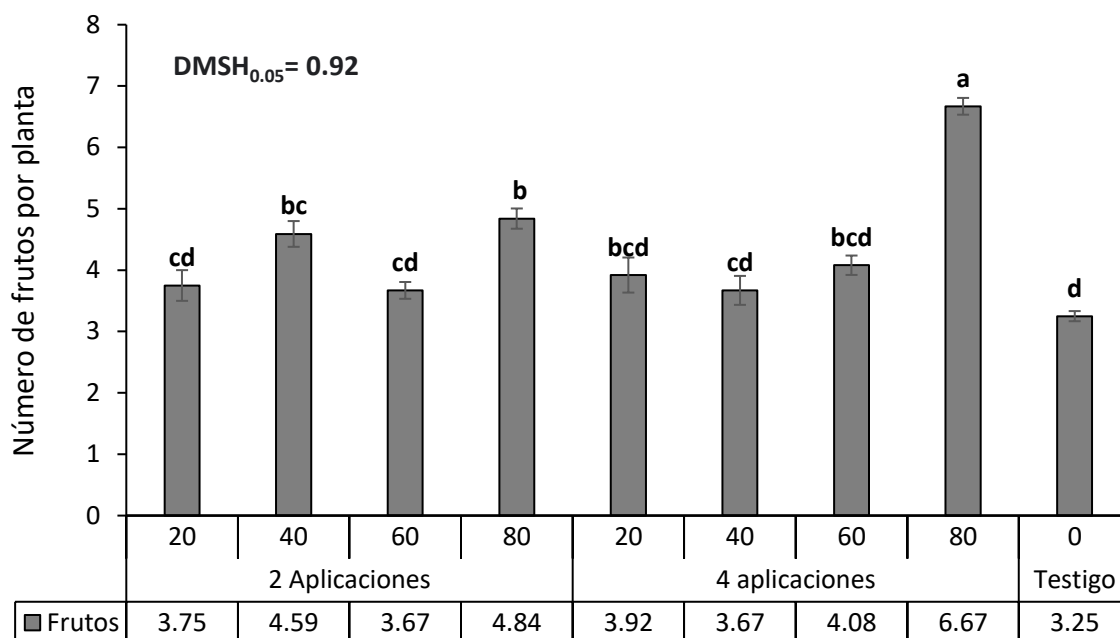


Figura 4.5. Número de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Al respecto, Ahmed *et al.* (2021) encontraron resultados similares a los del presente estudio, donde ellos con la aplicación de nanopartículas de hierro a concentraciones de 50 a 80 mg L⁻¹ suministradas de manera foliar en las plantas registraron mejoras en el número de frutos por planta.

Esta respuesta positiva coincide con lo reportado por Tripathi *et al.* (2018), ellos indican que las aplicaciones exógenas de Fe promueven el aumento en rendimiento en el cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.), aun encontrándose bajo condiciones de estrés. Condición de estrés que también se presentó en nuestro estudio donde las plantas se cultivaron en un suelo alcalino donde se presentan limitaciones en la disponibilidad de micronutrientes como el Fe.

Cabe recalcar que el Fe tiene participación en la mayoría de los procesos fisiológicos más importantes en las plantas, por ello está directamente influenciado en el rendimiento y calidad de los frutos (Mortvedt, 1991).

Longitud de frutos

La longitud de frutos evaluados presentó diferencias altamente significativas por efecto de los tratamientos evaluados, de acuerdo con la prueba complementaria de Tukey se observó que los mayores incrementos en longitud de frutos se registraron con la dosis de 80 mg L⁻¹ aplicada cuatro veces, con el cual se superó a la longitud de los frutos cosechados en las plantas testigo en 46.6% es decir, 9.42 cm. Otros tratamientos con los que las plantas mostraron mejoras en la longitud de los frutos fue con 80 mg L⁻¹ pero suministrada dos veces, al presentar 24.5 % más de longitud en sus frutos en comparación con los frutos de las plantas del testigo. Mientras que la menor longitud de frutos se presentó con la dosis de 20 mg L⁻¹ aplicada dos veces (Figura 4.6).

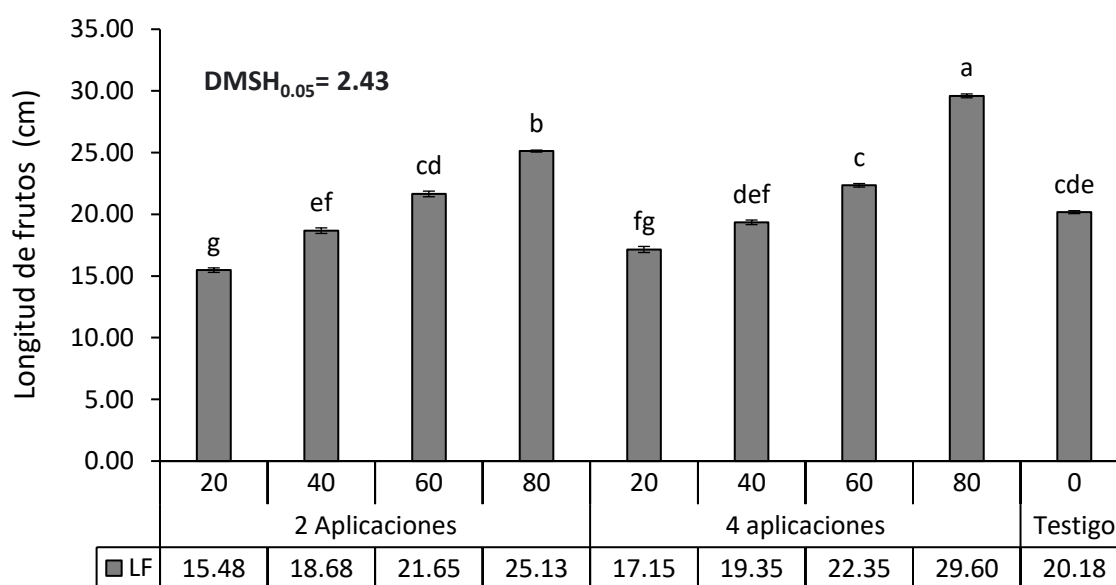


Figura 4.6. Longitud de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Al respecto, Wang *et al.* (2019) indican resultados similares a los encontrados en el presente estudio, ya que ellos con la aplicación de nanopartículas de Fe en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.), observaron incremento significativo en el crecimiento de frutos de melón.

Este crecimiento significativo de los frutos puede ser debido a que la dosis de 80 mg L⁻¹ suministrado cuatro veces fue más efectiva para desencadenar actividades enzimáticas (nitrogenasa) y originar un crecimiento y calidad en frutos superior (Shakoor *et al.*, 2022). Además, dicho elemento es un cofactor de proteínas, enzimas y orgánulos (cloroplastos, mitocondrias y vacuolas). Que son codependientes de este microelemento para su correcto funcionamiento (Singh *et al.*, 2024).

Diámetro de frutos

El diámetro de frutos presentó diferencias altamente significativas por efecto de los tratamientos evaluados, de acuerdo con la prueba completaría de Tukey se observó que con todas las dosis en cualquier número de aplicaciones aumentó de manera significativa el diámetro de frutos respecto al testigo, aunque el mayor incremento se registró con el suministro de la dosis 80 mg L⁻¹ aplicada cuatro veces que fue superior al diámetro de los frutos de las plantas del testigo sin aplicación en 37.7 % (Figura 4.7).

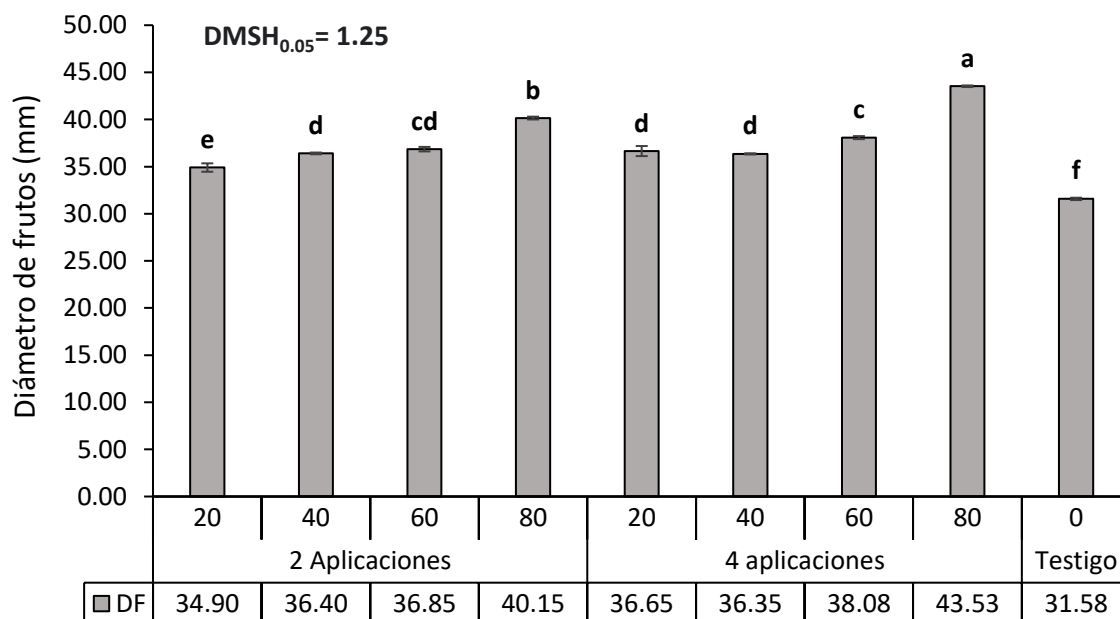


Figura 4.7. Diámetro de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

El efecto positivo de la aplicación de nanopartículas de Fe en el diámetro de frutos también se ha observado en otros cultivos como en tomate por Mady *et al.* (2021), ellos encontraron que la aplicación a las dosis de 80 a 100 mg L⁻¹ fueron las más efectivas para promover este componente del rendimiento, con aumentos de 70 % con relación al testigo. Asimismo, Rose *et al.* (2015), indican que los nanofertilizantes a base de hierro aplicados vía foliar suelen tener un papel crucial en la optimización en transporte y absorción de nutrientes para una mejor asimilación al igual que un incremento en su tasa de crecimiento en el diámetro de los frutos.

La aplicación de NP's de hierro pueden favorecer la activación de la biosíntesis del ácido salicílico, lo que promueve una acción estimulante y como consecuencia el aumento en el crecimiento de los frutos (Mahdavi *et al.*, 2013) como lo pudimos observar con los resultados obtenidos en nuestra investigación.

Materia seca

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas altamente significativas en la materia seca de tallo, hojas y total por efecto de los tratamientos aplicados.

La prueba complementaria indica que, en materia seca de tallo, los tratamientos con los que las plantas mejoraron esta variable fueron 60 mg L⁻¹ suministrada cuatro veces, así como 80 mg L⁻¹ aplicada dos y cuatro veces. Este último tratamiento fue superior al testigo en 101 %. Con el resto de los tratamientos se muestran similitudes estadísticas con el testigo. En la materia seca de hojas y materia seca total, se encontró que con todos los tratamientos de NP's de FeO aumentaron los valores respecto al testigo y de igual manera, fue el suministro de 80 mg L⁻¹ el tratamiento que generó los mayores incrementos en comparación con las plantas del testigo, estos aumentos fueron de 102 y 134 % para hojas y total respectivamente (Cuadro 4.3)

Cuadro 4.3. La significancia estadística de prueba de comparación de medias de la materia seca en plantas de pepino en función en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Tratamientos	Tallo	Hoja	Total
D20 – A2	17.62 cd [¶]	33.00 d	50.62 d
D20 – A4	18.37 bcd	33.00 de	50.37 d
D40 – A2	17.12 cd	31.12 de	48.25 d
D40 – A4	17.87 cd	29.12 e	47.00 d
D60 – A2	19.37 bcd	37.37 c	56.75 c
D60 – A4	22.12 ab	42.37 b	64.50 b
D80 – A2	20.62 abc	45.12 b	65.75 b
D80 – A4	24.37 a	53.37 a	77.75 a
D0 – A0	15.75 d	22.75 f	38.50 e
Media general	19.25	36.25	55.50
Probabilidad F	**	**	**
CV %	9.14	3.78	4.63

Medias con letras iguales dentro de la misma columna son no diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). NS = no significativo. CV = coeficiente de variación. D = dosis (mg L^{-1}). A= número de aplicaciones.

Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Rui *et al.* (2016) quienes al suministrar NP's de FeO a la dosis de 100 mg L^{-1} encontraron aumentos significativos en la producción de biomasa en plántulas de cacahuate (*Arachys hypogaea*). También en el cultivo de la soya Sheykhabglou *et al.* (2010), al evaluar la aplicación de nanopartículas de óxido de hierro obtuvo incremento en el crecimiento y acumulación de biomasa total de hasta 48 %.

Respuesta similar también mencionan Li *et al.* (2020), ya que con aplicaciones foliares de NP's de FeO promovieron el incremento significativo del 62 % en biomasa acumulada en hojas del cultivo de maíz. Al igual que Liu *et al.* (2005), quienes obtuvo mejoras significativas en producción de materia seca con la aplicación de NP's de FeO en plantas de cacahuate.

El efecto positivo del suministro de Fe en la producción de biomasa de las plantas de pepino se puede atribuir a que este elemento participa en el proceso de la fotosíntesis de manera eficiente, lo que promueve un crecimiento eficiente y

aumento en la acumulación de biomasa (Gui *et al.*, 2015). En el presente estudio este efecto se vio más favorecido con el suministro de 80 mg L⁻¹ en cuatro aplicaciones.

Clorofila total de hojas

Los resultados obtenidos para la variable no presentaron diferencias significativas por efecto de los tratamientos aplicados (Figura 4.8).

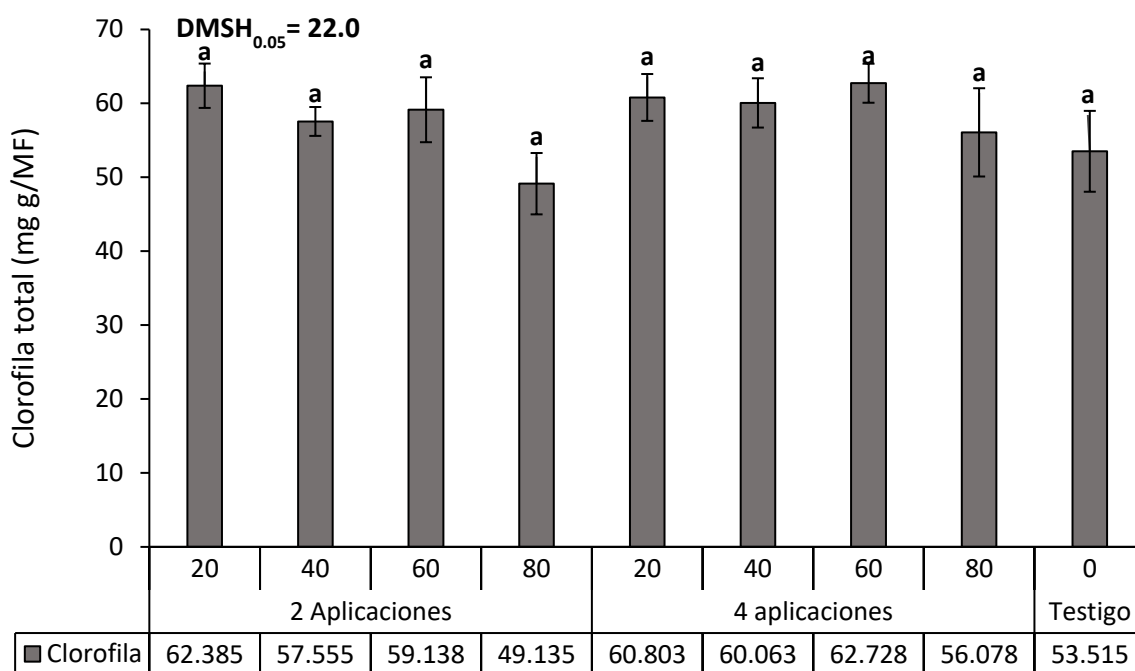


Figura 4.8. Clorofila total en hojas de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Nuestros resultados difieren con lo mencionado por Guillén *et al.* (2022) que con la dosis de 100 mg L⁻¹ lograron mejorar de manera significativa el contenido de clorofila en hojas del cultivo de pepino en 60.7 % en comparación con las plantas del tratamiento testigo. También contrastan con Ghafariyan *et al.* (2013), quienes mencionan que con aplicaciones de NP's de hierro se mejora el contenido de clorofila en hojas del cultivo de Soja (*Glycine max*). También Torres *et al.* (2022) con la dosis de 100 mg L⁻¹ registraron incrementos en el contenido de clorofila hasta en un 36 %. Debido a que el Fe tiene una gran importancia en las plantas, ya que

participa como un cofactor en procesos de como biosíntesis de clorofila. El incremento en el contenido de clorofila está influenciado por este elemento (Hamouda *et al.*, 2016). La falta de respuesta en nuestro estudio puede haber sido ocasionado por que las dosis suministradas fueron inferiores a las probadas por otros autores con respuesta positiva, por ejemplo, Rui *et al.* (2016) fue a la dosis de 100 mg L⁻¹ con la que lograron mejorar el contenido de clorofila.

Variables de calidad

Sólidos solubles

El análisis de varianza aplicado a la variable de sólidos solubles indica que no existieron diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos aplicados (Figura 4.9).

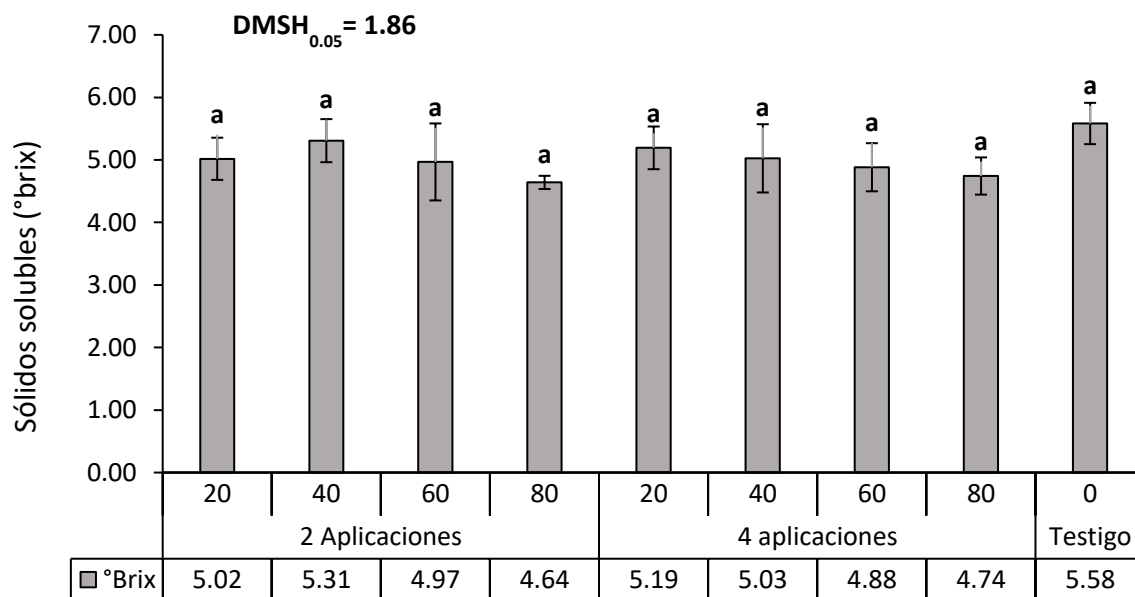


Figura 4.9. Sólidos solubles de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Cabe destacar que estos resultados, concuerdan con lo obtenido por Méndez *et al.* (2024), quienes mencionan que los sólidos solubles son un componente de calidad que no se ve afectado por la aplicación de NP's de Fe.

Aunque Rawat *et al.* (2017), mencionan que el contenido de sólidos solubles está influenciado por la aplicación de NP's de Fe a dosis menores de 25 mg L⁻¹, ya que este elemento influye en mejorar la eficiencia de en la autorregulación de la enzima Rubisco que afectado de manera significativa en el contenido de clorofila creando una acumulación de fotoasimilados en frutos, lo que mejora calidad de los mismos. Aunque es posible variación en respuesta en función del tipo de cultivo, como se pudo evidenciar en nuestro estudio en donde no se modificó está variable a pesar de haberse utilizado dosis de hasta 80 mg L⁻¹ de NP's de FeO.

Firmeza de Frutos (kg cm²)

La calidad física de los frutos mostró cambios altamente significativos ($P \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos aplicados (Figura 4.10). Los frutos que incrementaron su firmeza en comparación con los frutos de las plantas sin aplicación fueron aquellos cosechados de plantas a las cuales se les suministró NP's de FeO a las dosis de 80 y 60 mg L⁻¹ en cualquier número de aplicaciones, aunque los mayores incrementos se registraron con 60 mg L⁻¹ en dos aplicaciones y 80 mg L⁻¹ suministrada cuatro veces. Con estos tratamientos se lograron obtener valores en firmeza en el rango de 6.73 a 6.83 kg cm⁻², que son superiores al testigo en 25 y 27 % respectivamente.

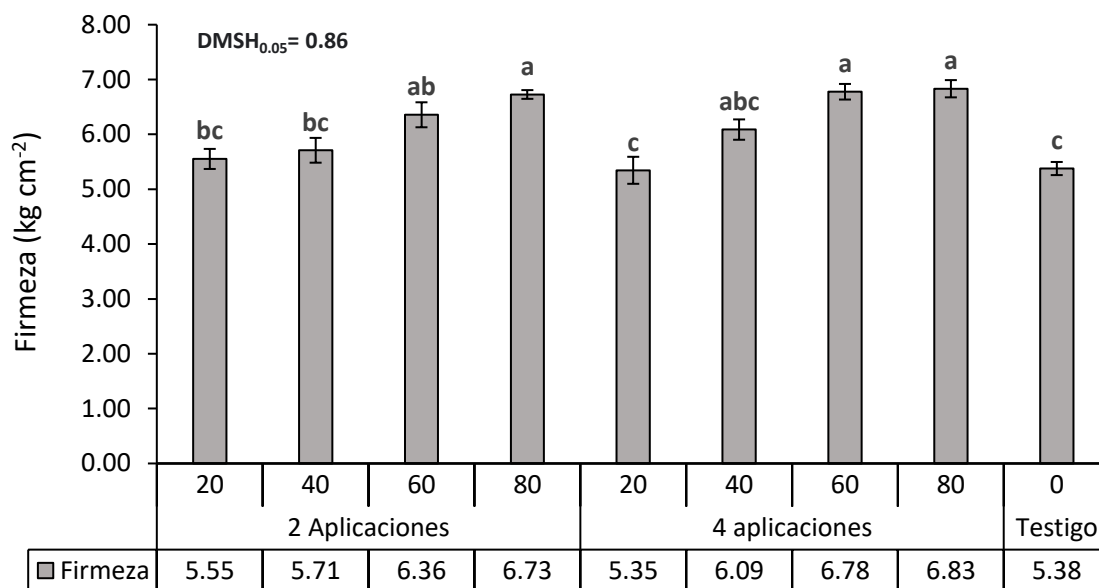


Figura 4.10. Firmeza de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Los resultados encontrados en el presente estudio son similares con los publicados por Guillén *et al.* (2022), quienes reportan que la aplicación de nanopartículas de Fe_2O_3 a dosis de 75 y 50 mg L^{-1} vía foliar incrementan de manera significativa el rendimiento y firmeza en frutos de pepino respecto al testigo en un 39 %.

Se ha demostrado que atributos de calidad en los frutos son afectados primordialmente por la disponibilidad de los nutrientes en el suelo para el óptimo desarrollo del cultivo (Li *et al.*, 2021). Es por ello, que métodos de nutrición como las NP's tienen una creciente importancia para los cultivos en la agricultura, ya que presentan mejoras en la solubilidad y disponibilidad de los nutrientes para las plantas, esto debido a su dimensión pequeña y a su sinergismo, que generan una disponibilidad más eficiente en las plantas (Rawat *et al.*, 2017).

pH

Los resultados del análisis de varianza aplicado a la variable pH en frutos, indican que no se presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos (Figura 4.11). De tal manera que los valores de pH se mantuvieron en

un rango 5.92 a 6.26 con todos los tratamientos, incluso en los frutos cosechados en las plantas sin aplicación.

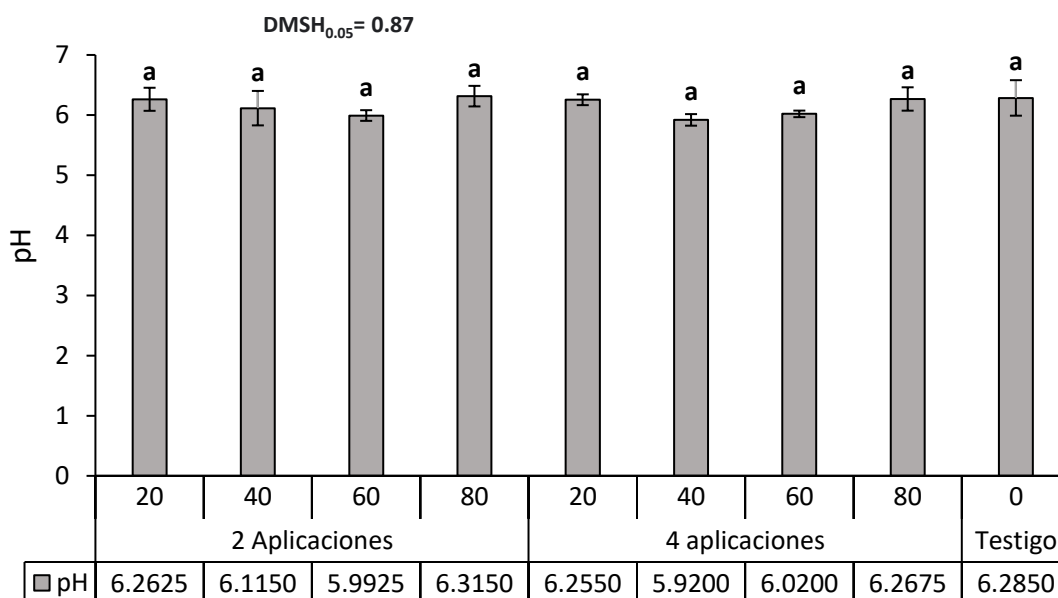


Figura 4.11. pH de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

El pH representa la concentración de H^+ , valores bajos de pH representan una mayor acumulación de iones H^+ y viceversa. De modo que puede llegar afectar la calidad de frutos en cuanto a textura y sabor (Velázquez *et al.*, 2013). A pesar que se menciona que el hierro es necesario para procesos metabólicos en las plantas, como el de los ácidos orgánicos en un fruto, lo que puede afectar los niveles de pH en los frutos (Moreno y Deaquiz, 2016), sin embargo, en nuestro estudio no se observó un efecto de los tratamientos de FeO en el pH.

Acidez titulable

Los resultados obtenidos para la variable acidez titulable de acuerdo con el ANOVA indican que no existieron diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos aplicados (Figura 4.12).

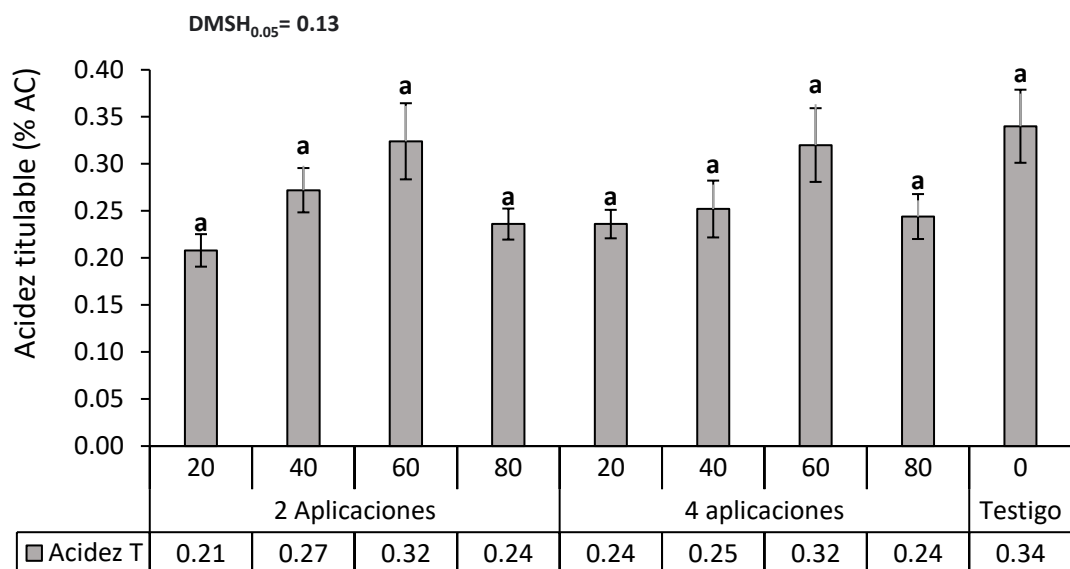


Figura 4.12. Acidez titulable de frutos de pepino cultivados en suelo en función de la vía de aplicación foliar y de las diferentes dosis de nanopartículas de hierro.

Estos resultados no tienen similitud con lo reportado por Méndez *et al.* (2024) quienes al aplicar NP's de hierro registraron diferencias significativas en la acidez titulable en los frutos de pepino por efectos de los tratamientos.

La falta de respuesta en la acidez titulable de nuestro estudio puede atribuirse a que fueron insuficientes las dosis de NP's de hierro aplicadas, así como a las condiciones ambientales en las que se estableció el cultivo como lo indican Kumar *et al.* (2021), quienes señalan la eficiencia y disponibilidad del Fe está en función de factores como la dosis y frecuencia en la que se aplican las NP's de Fe.

Finalmente, aunque la aplicación de NP's de FeO a distintas dosis y número de aplicaciones no modificó la altura de la planta, el diámetro del tallo ni el número de hojas, sin embargo, si aumentaron el área foliar con el suministro de 60 y 80 mg L⁻¹, con lo que se incrementó la producción de materia seca en hojas, tallos y total. Lo que contribuyó a mejorar el rendimiento de frutos, aunque fue la dosis de 80 mg L⁻¹ suministrada cuatro veces, el tratamiento que mayores incrementos produjo en el número de frutos por planta longitud y diámetros de frutos. Además, fue el tratamiento que también aumento en los frutos su firmeza.

CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de Fe_2O_3 , ($< 50 \text{ nm}$), no modificaron la longitud de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas ni el contenido de clorofilas; y en fruto, no afectaron el contenido de sólidos solubles, pH ni la acidez titulable.

La aplicación de nanopartículas de Fe a las dosis de 80 y 60 mg L^{-1} mejoraron la producción y calidad de la producción del cultivo de pepino en las condiciones de estudio.

El tratamiento que generó el mayor rendimiento de frutos fue 80 mg L^{-1} suministrado cuatro veces, que también fue el que produjo el mayor número de frutos, longitud, diámetro de frutos y firmeza de frutos, así como los valores más altos en área foliar y producción de materia seca. Por lo que es la dosis más apropiada para mejorar la producción y calidad de la producción de pepino bajo condiciones de agricultura protegida.

LITERATURA CITADA

- Ahmad, A., Javad, S., Iqbal, S., Shahid, T., Naz, S., Shah, A., Shaffique, S., and Gatasheh M., Ahmad, A., Javad, S. and Lobal, S. (2024). Efficacy of soil drench and foliar application of iron nanoparticles on the growth and physiology of *Solanum lycopersicum* L. exposed to cadmium stress. *Sci Rep.* 14. 279. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79270-w>
- Ali, S., Mehmood, A. and Khan, N. (2021). Uptake, Translocation, and Consequences of Nanomaterials on Plant Growth and Stress Adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 2: 1-17. Doi: 10.1155/2021/6677616.
- Alidoust, D. and Isoda, A. (2013). Phytotoxicity assessment of γ -Fe₂O₃ nanoparticles on root elongation and growth of rice plant. *Environmental Earth Sciences*, 71: 5173-5182. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2920-z>.
- Álvarez, H. J., Cortez, M. H. y. Y Ruiz, I. (2009). Exploración y caracterización de poblaciones silvestres de jitomate (Solanaceae) en tres regiones de Michoacán, México. *Polibotánica*, 28: 139–159. <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.48.4>
- Bisognin, D. A. (2002) Origin and evolution of cultivated cucurbits. *Rural Science. Santa Maria*, 32: 715-723. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000400028>.
- Castro, D. (2017). Nanotecnología en la agricultura. *Bionatura*, 2. 384-389. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.03.03.9>.
- Chen, Y. and Barak, P. (1982). Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Advances in Agronomy*, 35: 217-240. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60326-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60326-0).
- Cruz-Coronado, J. y Monge-Pérez, J. (2019). Producción de pepinillo (*Cucumis sativus*) en un ambiente protegido: evaluación de dos genotipos. *UNED Research Journal*. 11(3): 410-417. 10.22458/urj.v11i3.2720.

- Cortés, R. M., Martelo, Y. and Rodríguez, S. E. (2011). Evaluation of quality attributes in cucumber (*Cucumis sativus* L.) fortified with vitamin E. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9(1): 24-34.
- Dola, D., Mannan, M., Sarker, U., Al Mamun, M., Islam, T., Hamzah, S. M., Ali, B., and Pop, O. L. and Marc, R. (2022). Nano-iron oxide accelerates growth, yield, and quality of *Glycine max* seed in water deficits. *Frontiers in Plant Science*, 13: 992535 <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2022.992535>.
- Dubey, A. and Mailapalli, D. (2016). Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews*, Springer International Publishing. 16: 307-330. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_7
- FAO. (2019). Retos y oportunidades en un mundo globalizado. [En línea] <https://openknowledge.fao.org/items/045a8fac-2d4a-4d5c-80eb-9a27252df681> (consultado el día 29 de diciembre del 2024).
- Feng, Y., Kreslavskii, V., Shmarev, A., Ivanov, A., Zharmukhamedov, S., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S. and Shabala, S. (2022). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*) Plants. *Plants*, 11: 1894. <https://doi.org/10.3390/plants11141894>.
- Fernandez, V., Ebert, G. and Winkelmann, Gunther W. (2005). The use of microbial siderophores of foliar iron application studies. *Plant Soil*, 272: 244-252. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-5212-2>.
- Franco, F. A., Ramírez, E. M. y Cháirez, O. F. (2018). Corrección de la clorosis férrica con quelato EDDHA en cultivos sembrados en suelo alcalino y calcáreo. *Revista Terra Latinoamericana*, 36: 23-30. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.254>
- Gálvez, H., F. (2004). El cultivo de pepino en invernadero. PP. 282-293 En: J.Z Castellanos (Ed). Manual de Producción Hortícola en invernadero. 2a Ed. INTAGRI. México.

- García, E. (2005). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)-Instituto de Geografía. 4ta Edición. 217 p.
- Ghafariyan, M., Malakouti, M., Dadpour, M., Stroeve, P. and Mahmoudi, M. (2013). Effects of magnetite nanoparticles on Soybean chlorophyll. *Environmental science & technology*, 47(18). <http://dx.doi.org/10.1021/es402249b>.
- Ginés, I. y Mariscal-Sancho, I. (2022). Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. <https://oa.upm.es/3176/>
- Grégory, V., Natasha, G., Fabienne, D., Frédéric, G., Mary, L. G., Jean, F. Briat. and Catherine C. (2002). IRT1, an arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *The Plant Cell*, 14: 1223–1233. <https://doi.org/10.1105/tpc.001388>.
- Gui, X., Zhang, Z., Liu, S., Ma, Y., Zhang, P., He, X., Li, Y., Zhang, J., Li, H., Rui, Y., Liu, L. and Cao W. (2015). Fate and phytotoxicity of CeO₂ nanoparticles on lettuce cultured in the potting soil environment. *PLoS One*, 10(8): e0134261 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134261>
- Guillén, R., Zúñiga, L., Ojeda, D., Rivas, T., Trejo, R. y Preciado, P. (2022). Efecto de la nanobiofortificación con hierro en el rendimiento y compuestos bioactivos en pepino. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 13(28): 173–184. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3272>.
- Hamouda, H. A., Khalifa, R. M., El-Dahshouri, M. F. and Zahran, N. G. (2016). Yield, fruit quality and nutrients content of pomegranate leaves and fruit as influenced by iron, manganese and zinc foliar spray. *International Journal of Pharm Tech Research*, 9(3): 46-57.
- Hu, J., Guo, H., Li, J., Wang, Y., Xiao, L. and Xing, B. (2017). Interaction of γ -Fe₂O₃ nanoparticles with *Citrus maxima* leaves and the corresponding physiological effects foliar rout application. *Journal of Nanobiotechnology*, 15(1): 51. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0286-1>

- Jitao, L., Christie, P. and Zhang, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental Science Nano*, .6. 40-59. Doi: 10.1039/C8EN00645H.
- Juárez, M., Cerdán, M. y Sánchez, S. A. (2015). Hierro en el sistema suelo-planta. Depto. Agroquímica y Bioquímica. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. 2(1): 1-14.
- Khan, M. R., Adam, V., Rizvi, T. F., Zhang, B., Ahamad, F., Joško, I., Zhu, Y., Yang, M. and Mao, C. (2019). Nanoparticle–Plant Interactions: Two-Way Traffic. *Small*. 15(37). <http://dx.doi.org/10.1002/sml.201901794>.
- Kiran, V., Karthick, H., Thirumalai, A., Girigoswami, K. and Girigoswami, A. (2024). Nanotechnology's Role in Ensuring Food Safety and Security. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 58.103220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103220>.
- Křístková, E., Lebeda, A., Vinter, V. and Blahoušek, O. (2018). Genetic resources of the genus Cucumis and their morphological description (English-Czech version). *Horticultural Science*. 30: 14-42. 10.17221/3812-HORTSCI.
- Kumar, R., Kumar, R. and Kaur, G. (2021). New Frontiers of Nanomaterials in Environmental Science. 87: 1-54. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-9239-3>.
- Li, H.; Liu, H.; Gong, X.; Li, S.; Pang, J.; Chen, Z. and Sun, J. (2021). Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato. *Agricultural Water Management*. 245: 106570. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106570>.
- Li, P., Wang, A. Y Du W. (2020). Insight into the interaction between Fe-based nanomaterials and maize (*Zea mays*) plants at metabolic level. *Science of The Total Environment*. 738: 139795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139795>.

- Liu, G. and Hanlon, E. (2012). Rango de pH del suelo para una producción óptima de hortalizas comerciales. EDIS. 11. Doi: 10.32473/edis-hs1207-2012.
- Liu, X., Zhang, F., Feng, Z., Zhang, S., He, X., Wang, R. and Wang, Y. (2005). Effects of Nano-ferric oxide on the growth and nutrients absorption of peanut[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers.11(4): 551-555. Doi: 10.11674/zwyf.2005.0421
- López, Z. C. (2003). Guía técnica; cultivo del pepino. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.
- Marcelis, L. F. and Hofman-Eijer, L. (2006). Effect of temperature on growth of individual cucumber fruits. Physiologia Plantarum. 87(3): 321-328.
- Madrigal, A.A. (2006). Diseño de un manual de buenas prácticas agrícolas para ser utilizado en la producción de pepino en un invernadero de alta tecnología, en Zarcero, Alajuela. Instituto tecnológico de costa rica escuela de ingeniería agropecuaria administrativa, Cartago. Pp. 34-38.
- Mahdavi, M., Namvar, F., Ahmad, MB. and Mohamad, R. (2013). Green biosynthesis and characterization of magnetic iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles using seaweed (*Sargassum muticum*) aqueous extract. Molecules.18(5): 5954-64. Doi: 10.3390/molecules18055954.
- Mariod, A., Mirghani, M. and Hussein, I. (2017). Cucumis sativus Cucumber. Unconv. Oilseeds Oil Sources. 4: 89 – 94. Doi: 10.1016/B978-0-12-809435-8.00016-0.
- Medina, P., Fernández, L., Trejo, T., López, V. and Pampillón-González, L. (2018) Growth and development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Pinto Saltillo exposed to iron, titanium, and zinc oxide nanoparticles in an agricultural soil. Applied Ecology and Environmental Research. 16(2): 1883-1897. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1602_18831897.
- Méndez, A., García, J., González, L., Martínez, S., Leal, A. Y Sánchez, M. (2024). Impacto de nanofertilizantes en el rendimiento y calidad de pepino bajo condiciones de invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 15(4): 5-6. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v15i4.3343>.

- Moreno, B. Y Deaquiz, O. Y. (2016). Caracterización de parámetros fisicoquímicos en frutos de mora (*Rubus alpinus* Macfad). *Acta agronomica*. 65: 130-136.
- Mortvedt, J. J. (1991). Correcting iron deficiencies in annual and perennial plants: present technologies and future prospects. *Plant Soil*. 43: 300–315. Doi: 10.1007/BF00011883.
- Núñez, R. F., Grijalva, C. R., Robles, C. F., Francisco, M. M., Macías, D. R., Ceceña D. C., Ruiz, A. M., Fernando, L., Cervantes, D. L., Tolosa, A. M., Villalaz, P. C. Y Escoto, R. A. (2013). Rendimiento de tres cultivares de pepino de invernadero. *Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas*, 16: 745-749 https://www.researchgate.net/publication/269335256_rendimiento_de_tres_cultivares_de_pepino_de_invernadero.
- Rai, S., Singh, P., Mankotia, S., Swain, J. and Satbhai, S. (2021). Iron Homeostasis in Plants and its Crosstalk with Copper, Zinc, and Manganese. *Plant Stress*. 1(12): Doi: 100008. 10.1016/j.stress.2021.100008.
- Rawat, M., Nayan, R., Negi, B., Zaidi, M. and Arora S. (2017). Physio-biochemical basis of iron-sulfide nanoparticle induced growth and seed yield enhancement in *B. juncea*. *Plant Physiol Biochem*. 118: 274-284. Doi: 10.1016/j.plaphy.2017.06.021.
- Rebollar-Rebollar, S., Ramírez-Abarca, O., Y Hernández-Martínez, J. 2022. Competitividad y valor agregado del pepino persa (*Cucumis sativus* L.) en agricultura por contrato: estudio de caso. *Revista Terra Latinoamericana*. 40: 3-9. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.952>
- Rose, H., Benzon, L. Rubenecia., Ma, R., Rubenecia, U., Ultra, V. and Lee, S. C. (2015). Nano-fertilizer affects the growth, development, and chemical properties of rice.
- Rui, M. Ma, C. Hao, Y. Guo, J., Rui, Y.X. and, Sperotto R. A. 2016. Iron Oxide Nanoparticles as a Potential Iron Fertilizer for Peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers Plant Sci*. 7(9):1-10 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.00815/full> .

- Ruiz, Torres. N. Y García, L. J. (2016) Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas (investigación postdoctoral). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo Coah.
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/330/1/Efecto%20de%20Nanopart%C3%ADculas%20Met%C3%A1licas%20y%20Derivadas%20del%20Carb%C3%B3n%20en%20la%20Fisiolog%C3%ADa%20de%20Semillas.pdf>.
- SADER. (2022). Origen del pepino [En línea] <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/de-la-familia-de-las-cucurbitaceas-el-pepino-es-el-consentido?idiom=es#:~:text=El%20origen%20del%20pepino%20se,India%2C%20el%20Atharva%2Dveda>. (consultado el día 18 de junio del 2023).
- Shakoor. N., Adeel, M., Zain, M., Zhang, P., Ahmad, M. A., Farooq, T., Zhou, P., Azeem I., Rizwan, M., Guo, K., Jilani, G., Ahmar, S., Maqbool, S., Ming, X. and Rui, Y. (2022). Exposure of cherry radish (*Raphanus sativus* L. var. *Radculus Pers*) to iron-based nanoparticles enhances its nutritional quality by triggering the essential elements. *NanoImpact*. 25: 100388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.impact.2022.100388>.
- SIAP. (2017). Cultivo de pepino. [En línea]. <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-consentido-de-la-familia-cucurbitaceae-el-pepino?idiom=es#:~:text=El%20pepino%2C%20Cucumis%20sativus%2C%20es,tienen%20p%C3%A9talos%20de%20color%20amarillo>. (Consultado el día 18 de junio del 2023).
- SIAP. (2024). Exportación del pepino. [En línea]. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/articulos/el-pepino-y-su-vocacion-exportadora?idiom=es#:~:text=El%20destino%20de%20los%20vol%C3%BAmenes,pa%C3%ADs%20y%20en%20el%20mundo> (consultado el día 6 de octubre del 2025).

- SIAP. (2024). Distribución del pepino. [En línea]. <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/el-pepino-y-su-vocacion-exportadora?idiom=es> (consultado el día 20 de julio del 2024).
- Singh, A., Sharma, A., Singh, O., Rajput, V., Movsesyan, H., Minkina, T., Alexiou, A., Papadakis, M., Singh, R., Singh, S., Sousa, J., El-Ramady, H., Zulfikar, F., Kumar, R., Al-Ghamdi, A. and Ghazaryan, Karen. (2024). In-depth Exploration of Nanoparticles for Enhanced Nutrient Use Efficiency and Abiotic Stresses Management: Present Insights and Future Horizons. *Plant Stress*. 14: <http://dx.doi.org/10.1016/j.stress.2024.100576>.
- Siskani, A., Seghatoleslami, M., and Moosavi, G. (2015). Effect of deficit irrigation and nano fertilizers on yield and some morphological traits of cotton. *Biological Forum*. 7(1): 1710-1715.
- Statistical Analysis System (SAS Institute). (2007). SAS/STAT User's Guide Release 9.1 ed, Cary, NC, USA.
- Steven, J., Alcántara, C. J., Acero, G. J., Alcántara, C. J., David, J., Mora, S. and Mérida, R. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *NOVA*. 17: Doi: 10.25058/24629448.3639.
- Tawfik, M. M., Mohamed, M. H., Sadak, M. and Thalooth, A. (2021). Iron oxide nanoparticles effect on growth, physiological traits and nutritional contents of *Moringa oleifera* grown in saline environment. *Bulletin of the National Research Centre*. 45(1): Doi: 10.1186/s42269-021-00624-9.
- Torres, R., Diz, Virginia. and Lagorio, María. 2022. Improved photosynthetic performance induced by Fe₃O₄ nanoparticles. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 21(11). <http://dx.doi.org/10.1007/s43630-022-00269-1>.
- Tripathi, D., Singh, S., Gaur, S., Singh, S., Yadav, V., Liu, S., Singh, V., Sharma, S., Srivastava, P., Prasad, S., Dubey, N., Chauhan, D. and Sahi, S. (2018). Acquisition and Homeostasis of Iron in Higher Plants and Their Probable Role

- in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Environmental Science*. 5: doi: 10.3389/fenvs.2017.00086.
- Valadez, L. A. (1998). *Producción de Hortalizas*. 7ª Reimpresión. Editorial Limusa. México D. F.
- Velázquez, D., Romero, W., Lara, E., Martínez, A., Díaz, J. Y Barrios, B. (2013). Cambios fisicoquímicos postcosecha en tres cultivares de pepino con y sin película plástica. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 4: 909-920. Doi:10.29312/remexca. v4i6.1158.
- Wang, X., Xie, H., Wang, P. and Yin H. Nanoparticles in Plants: Uptake, Transport and Physiological Activity in Leaf and Root (2023). *Materials (Basel)*. 16: 3097. doi: 10.3390/ma16083097.
- Yata, V., Tiwari, B. and Ahmad, I. (2017). Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. *Environmental Chemistry Letters*. 16(11): <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-017-0666-7>.
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. and Munné-Bosch, Sergi. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289. 110270. 10.1016/j.plantsci.2019.110270.

José Eduardo Cerda Torres

PRODUCCIÓN DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.) CON APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE HIERRO BAJ...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:515974979

Fecha de entrega

21 oct 2025, 7:41 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

21 oct 2025, 7:47 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

PRODUCCIÓN DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.) CON APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS D....pdf

Tamaño del archivo

2.3 MB

76 páginas

16.627 palabras

85.113 caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 17%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida	
Título del trabajo	PRODUCCIÓN DE PEPINO (<i>Cucumis sativus</i> L.) CON APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE HIERRO BAJO CONDICIONES DE AGRICULTURA PROTEGIDA	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	José Eduardo Cerda Torres	1720961f@umich.mx
Director	Noé Armando Ávila Ramírez	armaa915@gmail.com
Codirector	Patricio Apáez Barrios	patricio.apaez@umich.mx
Coordinador del programa	Patricio Apáez Barrios	mae.agricultura.protegida@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Todas las fuentes utilizadas que se encontraban en el idioma inglés, fueron traducidas con el traductor de Google
Traducción a otra lengua	Sí	El resumen de la tesis se tradujo del español al inglés con el programa de Office Word
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 José Eduardo Cerda Torres
Lugar y fecha	Nueva Italia Michoacán Fecha: 20/10/2025