

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CIENCIAS Y ARTES
DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERIA

Subsede Villa Corzo

TESIS PROFESIONAL

**“Evaluación de diferentes heteroestructuras
de ZnO como nano fertilizante en plantas de café
(*Coffea arábica* L).”**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGROFORESTAL**



**PRESENTA
LUIS EDUARDO JIMENEZ LAGUNA**



ABRIL 2026

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CIENCIAS Y ARTES
DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERIA

Subsede Villa Corzo

TESIS PROFESIONAL

**“Evaluación de diferentes heteroestructuras
de ZnO como nano fertilizante en plantas de café
(*Coffea arábica* L).”**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGROFORESTAL**



**PRESENTA
LUIS EDUARDO JIMENEZ LAGUNA**

DIRECTOR

Dr. VICENTE PÉREZ MADRIGAL

CO-DIRECTOR

Dr. LUIS ALFREDO RODRIGUEZ LARRAMENDI



ABRIL 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA GENERAL

DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Villa Corzo, Chiapas
24 de Febrero del 2026

C. Luis Eduardo Jiménez Laguna

Pasante del Programa Educativo de:

Ingeniería Agroforestal

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

“Evaluación de diferentes heteroestructuras de ZnO como nano fertilizante en plantas de café (Coffea arábica L)”

En la modalidad de: **Tesis Profesional**

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi

Dr. Vicente Pérez Madrigal

Lic. Quim Ramón Ángel Medina Reyes

Firmas:

C.c.p. Expediente



**“Evaluación de diferentes heteroestructuras
de ZnO como nano fertilizante en plantas de café
(*Coffea arábica* L).”**

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
III. HIPÓTESIS.....	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	4
4.1 El cultivo de café en México	4
4.2 El cultivo de café en Chiapas	5
4.3 La nanotecnología en la agricultura	6
4.3.1 Nanofertilizantes	6
4.3.2 Óxido de zinc (ZnO) en la agricultura	7
4.3.3 Nanopartículas de óxido de Zinc (NPs-ZnO)	8
4.4 Heteroestructuras.....	8
4.5 Fertilizantes químicos y sus desventajas	9
V. MATERIALES Y METODOS.....	10
5.1 Localización	10
5.2 Material vegetal	10
5.3 Tratamientos	10
5.4 Variables y muestreos	11
5.4.1 Muestreos no destructivos	11
5.4.2 Concentración de clorofilas totales.....	12
5.4.3 Radiación PAR.....	12
5.5 Diseño experimental	12
5.6 Análisis estadísticos.....	12
VI. RESULTADOS.....	13
6.1 Respuesta del Área Foliar	13
6.2 Diámetro del tallo.....	14
6.3 Longitud del Tallo	15
6.4 Número de hojas.....	17

6.5 Dinámica del Contenido de Clorofila en Relación con el Ambiente	18
VII. CONCLUSIONES	22
VIII. LITERATURA CITADA	23

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mi madre, por su amor incondicional, su esfuerzo y sacrificio a lo largo de mi vida. Gracias por ser mi mejor ejemplo de fortaleza y por brindarme siempre tu apoyo en cada paso que doy. Este logro no solo es mío, también es tuyo, ya que sin ti no habría sido posible llegar hasta aquí. Gracias por nunca dejarme rendirme, por creer en mi incluso en los momentos más difíciles y por enseñarme el valor del esfuerzo y perseverancia. Todo lo que soy hoy es reflejo de tu dedicación y de los valores que me has enseñado.

Con todo mi amor, respeto y admiración, este logro es para ti.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi mas sincero agradecimiento a Dios por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesaria para culminar esta importante etapa académica.

A mis padres, por su apoyo incondicional, sus valores y la confianza que tuvieron hacia mí, siendo el principal motor para salir adelante.

A mi docente y director de tesis el Dr. Vicente Pérez Madrigal, por su orientación, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso.

Y de manera muy especial, a mi mascota Zeus, quien fue mi fiel compañero durante las largas noches de desvelo en la realización de esta tesis, brindándome compañía y motivación en todo momento.

Finalmente, a todas aquellas personas, tíos, familiares y amigos que me apoyaron y creyeron en mi en todo momento, les expreso mi más profundo agradecimiento.

I. INTRODUCCIÓN

En México, el consumo y cultivo del café (*Coffea arábica L.*) data de la última década del siglo XVIII. El grano del café es considerado uno de los cultivos de mayor importancia económica, sociocultural y ambiental. Ocupando una superficie de 664.794 ha, en donde de esta actividad dependen tres millones de personas y genera un valor en el mercado de aproximadamente 20 millones de pesos por año, con dos tipos de variedades cultivadas, el arábica y la robusta (Revista del Consumidor, 2025). México es uno de los principales países productor de café orgánico, siendo más del 80% de producción nacional que se obtiene en seis entidades, en México la distribución que presenta este cultivo es muy amplia, con altitudes que van desde los 300 hasta casi 2,000 msnm, contando México con una gran amplia diversidad de climas, suelos y vegetación, Chiapas es el líder en producción de café, además presenta un rendimiento por hectárea superior al promedio mundial, ya que sus condiciones son similares a países como Vietnam y China. Siendo Chiapas uno de ellos con el mayor número de producción y exportación a nivel nacional (Espinoza & Sánchez, 2024).

Las áreas con mayor producción cafetalera son aquellas ricas y diversas en flora y fauna, en donde se produce mayormente en las vertientes de cadenas montañosas del centro y sur del país, con un sistema manejado bajo árboles o café bajo sombra, en donde generalmente los productores son de comunidades indígenas o mestizas (Revista del Consumidor, 2025). Por lo tanto, el café es un cultivo que es la principal fuente para la exportación agrícola y una de las grandes fuentes de ingreso de economía, y presenta grandes perspectivas de crecimiento en el mercado internacional (ITC, 2022).

La fertilización del cultivo de café ha cambiado significativamente con el paso del tiempo, ya que los caficultores han modificado sus estrategias de manejo. Actualmente, son pocas las zonas cafetaleras que continúan produciendo café orgánico, debido al uso intensivo de fertilizantes químicos, el cual ha incrementado

año con año (Mejía Quintana & Palma Echerrez, 2023). Ante esta situación, esta práctica ha desplazado por completo el concepto de café orgánico y ha promovido el uso excesivo de agroquímicos, ante esta situación, se han impulsado nuevas estrategias para la producción de café, fomentando el uso de fertilizantes orgánicos y la aplicación de microorganismos como alternativas sostenibles para mejorar la fertilización y reducir el uso de agroquímicos en el cultivo (Hernández *et al.*, 2020).

Actualmente las nanopartículas son una nueva alternativa que son utilizadas para mejorar la eficiencia en la liberación de nutrientes, estimulación del crecimiento y ser utilizadas como un nano fertilizante y se prevé que la nanotecnología proporciona soluciones sostenibles para reemplazar los fertilizantes tradicionales a granel (Achari & Kowshik, 2018; Rodríguez, 2024). Además, se destaca que las nanopartículas de Óxido de Zinc "(ZnO)" no solo promueven un crecimiento más vigoroso de las plantas, sino que también mejoran la calidad de los frutos, contribuyendo a un incremento significativo en la producción agrícola, permitiendo un desarrollo más eficiente de los cultivos y una cosecha de mayor valor nutricional y comercial (Méndez *et al.*, 2016). El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad del crecimiento y desarrollo de plántulas de café (*Coffea arabica* L.) mediante la implementación de diversas heteroestructuras de óxido de zinc (ZnO) como nano fertilizante.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad del crecimiento y desarrollo de plántulas de café (*Coffea arabica* L.) mediante la implementación de diversas heteroestructuras de óxido de zinc (ZnO) como nano fertilizante.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el efecto de las heteroestructuras de ZnO en los indicadores de crecimiento de las plantas de café, considerando altura, diámetro de tallo, número de hojas y área foliar.
- Evaluar las respuestas fisiológicas de las plantas de café tratadas con heteroestructuras de ZnO, mediante la concentración de clorofilas totales.

III. HIPÓTESIS

Las heteroestructuras de ZnO, al ser utilizadas como nano fertilizantes en plantas de café (*Coffea arabica* L.), mejoran el crecimiento, desarrollo de las plantas y la concentración de clorofilas totales.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 El cultivo de café en México

El café es uno de los cultivos tropicales más importante en México, en donde esta fue introducida desde 1795, es un cultivo de una gran transcendencia no solo por lo económico y social, sino por cultural y lo ecológico, siendo el principal producto agrícola de exportación. México ocupa el octavo lugar en el mundo por su producción, con cerca de 232,000 toneladas anuales, lo que representa aproximadamente el 2% de la producción global, el noveno lugar por sus superficies de cosecha y el duodécimo por su rendimiento (ICO, 2024). Además, es uno de los cultivos de mayor importancia económica, sociocultural y ambiental, en donde es producida generalmente bajo sombra en áreas montañosas con mayor diversidad biológica del país, permitiendo la conservación de biodiversidad, sobre todo en los sistemas de cultivo de montaña y policultivo tradicional (González *et al.*, 2024).

Por otro lado, el café ocupa una superficie de 664.794 ha, que están distribuidas entre 481.084 caficultores, que conforma 58 regiones productoras en 12 estados, con un total de 404 municipios y 4572 comunidades en todo el país de México. Siendo 6 estados los principales productores Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero y Hidalgo. Además, esta actividad de caficultura es considerada una actividad estratégica fundamental en el país, debido a que permite la integración de cadenas productivas, la mayor generación de oportunidad de empleos, el modo de subsistencia de muchos pequeños productores y alrededor de 30 grupos indígenas, en donde dependen económicamente de esta actividad del café (Espinoza & Sánchez, 2024). Además, México es un país que produce y comercializa el café orgánico contando con certificaciones, de esta manera el café mexicano se ha diferenciado e incursionado en mercados muy especializados en donde se produce fundamental por cooperativas de familias campesinas e indígenas. Desde el punto de vista cultural este cultivo es sumamente importante para las comunidades, ya que se destaca que a través de este cultivo existe una gran riqueza y diversidad de valores, creencias y una gran cantidad de conocimientos.

4.2 El cultivo de café en Chiapas

El estado de Chiapas ocupa un honoroso primer lugar nacional de productor de cultivo de café, en donde la variedad más producida en este estado y en México es la denominada arábica (*Coffea arabica* L), la cual es cultivada en pendientes escarpadas, bajo árboles de sombra y con un uso moderado y limitado de productos agrícolas o agroquímicos, en el cual esta es caracterizada como un cultivo ambientalmente verde. En el estado de Chiapas normalmente los productores son ejidatarios en el cual muchos de ellos pertenecen a etnias indígenas o grupos de comunidades locales. Chiapas es también el principal productor nacional de café orgánico, en lo cual posiciona a México como uno de los países productores de café totalmente orgánico (ICO, 2024).

Las zonas cafetaleras del estado de Chiapas se distinguen por presentar contrastes ambientales, técnicos, económicos y socioculturales, los cuales inciden en la producción de café, en donde el estado posee una superficie sembrada de aproximadamente 260,129.43 ha, con alrededor de 180,856 productores cafetaleros, lo que evidencia la importancia socioeconómica del cultivo en la región (Henderson, 2019). Desde una perspectiva agroecológica, Chiapas cuenta con áreas aptas para el cultivo del café, en donde este cultivo es de gran relevancia económica y social. La actividad cafetalera no solo genera miles de empleos directos e indirectos vinculados al cultivo, procesamiento y comercialización del grano, sino que aporta beneficios ambientales, desempeñando un papel importante en la conservación del suelo, la flora y fauna, además funcionando como un pulmón ambiental, contribuyendo a la producción de oxígeno y la fijación de carbono. La importancia del café no solo es un recurso económico, sino también un componente clave para la sostenibilidad ambiental en la región. (Medina *et al.*, 2016).

4.3 La nanotecnología en la agricultura

4.3.1 Nanofertilizantes

La nanotecnología ha avanzado significativamente en la agricultura en los últimos años, los nanosensores y los sistemas de suministro inteligentes basados en nano productos son algunas de las aplicaciones de la nanotecnología que ya se emplean en el sector agrícola (Lira Saldívar *et al.*, 2018). Estas tecnologías ayudan a combatir los patógenos en los cultivos, minimizar las pérdidas de nutrientes durante la fertilización y mejorar la productividad mediante la optimización del uso de agua y nutrientes. Además, las nanopartículas son utilizadas para el mejoramiento de la eficiencia de los plaguicidas al aplicar en el campo menores dosis, debido a eso están explorando la nano y bio tecnología para hacerlos más eficientes en el manejo agronómico de los cultivos, así como para la transformación genética de las plantas (transgénicos), así mismo creando diferentes variedades tolerantes y resistentes a factores bióticos y abióticos (Lira Saldívar *et al.*, 2018).

El uso excesivo de fertilizantes químicos ha deteriorado la fertilidad del suelo, lo que genera la necesidad de desarrollar alternativas más sostenibles en la agricultura. Los nanofertilizantes (NF) surgen como una opción ecológica y eficiente, representando una de las aplicaciones más relevantes de la nanotecnología en el sector agrícola. Estos nanomateriales, con dimensiones entre 1 y 100 nm, actúan como portadores de nutrientes, optimizando su disponibilidad y reduciendo los impactos negativos sobre el medio ambiente (Gade *et al.*, 2023). Los nanofertilizantes (NF) pueden producirse mediante distintas técnicas, como la reducción de fertilizantes convencionales a escala nanométrica, la encapsulación de nutrientes en nanomateriales y la síntesis directa de nanopartículas mediante métodos físicos, como la precipitación controlada y el proceso sol-gel (Aquino *et al.*, 2018 y Mahmood *et al.*, 2022). A menor dimensión de estos nanomateriales, mayor rapidez de activación y liberación, esto debido gracias a su elevada relación de tamaño /volumen, las nanopartículas incrementan su reactividad conforme disminuye su tamaño, en donde permite la liberación inmediata y eficiente de los

nutrientes, favoreciendo a que los cultivos dispongan rápidamente de los elementos esenciales para su desarrollo (Gade *et al.*, 2023). Por otro lado, varios estudios destacan que los nanofertilizantes contienen el potencial correcto, ya que aumentan el rendimiento de los cultivos al proporcionar un mejor empleo del nanomaterial, es por ello que se está impulsando el desarrollo de estos nanofertilizantes a agricultores para la reducción de riesgos, costos y, por ende, a la población en general. Además, pueden ser una mejor opción ecológica para los cultivos, fomentando así una agricultura sostenible y cultivos de mejor calidad en general (Mejía *et al.*, 2021).

Investigaciones recientes indican que las nanopartículas podrían ser una herramienta eficaz para el control de plagas en plantas, incluyendo insectos, hongos y malezas. Además, se ha propuesto que estas partículas pueden mejorar la eficiencia en la entrega de nutrientes, lo que optimizaría el crecimiento de los cultivos y aumentaría significativamente su productividad. Esta combinación de control de plagas y mejora en la nutrición vegetal presenta un gran potencial para transformar la agricultura (Gade *et al.*, 2023).

4.3.2 Óxido de zinc (ZnO) en la agricultura

El óxido de zinc (ZnO) en su tamaño convencional es un polvo blanco en donde es insoluble en agua, lo que limita la liberación del zinc (Zn) y dificulta su absorción por las plantas. Al nano particular el ZnO, su superficie reactiva aumenta liberándose con mayor rapidez. Es un material versátil que se utiliza en diversas aplicaciones, incluyendo la fabricación de productos farmacéuticos, cosméticos, y recubrimientos protectores. En la agricultura, se utiliza como un micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, ya que desempeña un papel importante en procesos metabólicos y en la síntesis de proteínas. Además, el óxido de zinc tiene propiedades antibacterianas y se emplea en la producción de neumáticos, cerámicas y materiales electrónicos (Gándara Martínez, 2015).

4.3.3 Nanopartículas de óxido de Zinc (NPs-ZnO)

Las nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) destacan por sus propiedades optoelectrónicas, físicas y antimicrobianas, lo que les confiere efectos beneficiosos en las plantas. Varios estudios indican que las NPs-ZnO pueden estimular el crecimiento en diversas especies vegetales. En particular, se ha observado que la aplicación de NPs-ZnO en bajas concentraciones favorece la germinación de semillas. Sin embargo, en concentraciones elevadas, se produce un efecto negativo en el proceso de germinación (Galindo-Guzmán *et al.*, 2022).

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) ha demostrado efectos positivos en los parámetros nutricionales y fisiológicos de varios cultivos, así como un aumento en el contenido de nutrientes en las partes comestibles de las plantas. Sin embargo, estos cambios pueden inducir estrés y toxicidad, lo que a su vez estimula los sistemas antioxidantes de las plantas. Las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) aplicadas de forma foliar reducen la necesidad de fertilizantes y aumentan la eficiencia y disponibilidad de nutrientes en las plantas. Además, sus efectos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas son superiores en comparación con las formas tradicionales de zinc (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

4.4 Heteroestructuras

En la agricultura, las heteroestructuras son materiales compuestos por capas o combinaciones de distintas fases a una escala nanométrica, estas son empleadas para mejorar la liberación de nutrientes más controlada o moderada, además, aumenta la eficiencia de los agroquímicos y esta ayuda a potenciar la resistencia de los cultivos frente a estrés biótico y abiótico. Entre estos nanomateriales, las NPsZnO han despertado un gran interés por su capacidad para actuar como una alternativa o fuente de micronutrientes esenciales y como un agente antimicrobiano (Gándara Martínez, 2015). Las propiedades de estas nanopartículas varían dependiendo de su tamaño las de 30 nm ofrecen mayor área superficial y

reactividad, en donde favorecen una absorción más rápida por las plantas al momento de su implementación, las de 60 nm hacen equilibrar la liberación y la persistencia, siendo útiles en aplicaciones de liberación gradual, mientras que las de 80 nm presentan menor reactividad inicial, lo que permite una acción más prolongada (Vargas *et al.*, 2023).

4.5 Fertilizantes químicos y sus desventajas

Los fertilizantes contienen nutrientes en formas solubles que pueden perderse fácilmente por lavado o lixiviación, lo que reduce su eficiencia y obliga a realizar más aplicaciones de estos químicos para que las plantas mantengan la nutrición adecuada. Aunque la producción mundial de alimentos ha aumentado, existen regiones donde la oferta de verduras no es suficiente para cubrir la demanda poblacional, lo que hace necesario el uso extensivo de estos agroquímicos. Los fertilizantes de nitrógeno (N) y fósforo (P) son los principales culpables de la eutrofización global. Además, el uso prolongado de fertilizantes convencionales provoca graves repercusiones ambientales, como la contaminación de aguas subterráneas y la degradación del suelo, y reduce la eficiencia de uso de nutrientes (NUE) en los cultivos (Gade *et al.*, 2023).

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 Localización

El trabajo se realizó en las instalaciones del Vivero Oro Verde localizado en el municipio Villa Corzo, Chiapas, ubicado en las coordenadas $16^{\circ}12'30.90\text{N}$ y Longitud: $93^{\circ}15'49.70''$.



Figura 1: Ubicación de vivero donde se llevó a cabo el experimento (Google Earth, obtenido en 2024).

5.2 Material vegetal

Se utilizaron semillas certificadas de la variedad Marsellesa y las actividades culturales se realizaron según los procedimientos que rigen en el vivero Oro Verde. La siembra se realizó en el mes de diciembre de 2024.

5.3 Tratamientos

Se establecieron cinco tratamientos consistentes en un testigo absoluto sin fertilización, un testigo relativo, con el esquema de fertilización utilizado en el vivero y tres tratamientos que además de recibir la fertilización edáfica utilizada en el vivero, recibieron cada uno NPsZnO de tamaño promedios del cristalino de (36.14, 57.24 y 87.96 nm).

A los 80 días después de la siembra (dds) y cada 20 días, se aplicaron 30 mL por planta, de una mezcla acuosa de fertilizantes comerciales (PUSH, ROOTEX, NITRABOR; Tabla 1) a todos los tratamientos excepto al testigo absoluto. Desde los 93 dds hasta los 178 dds, se asperjaron vía foliar y semanalmente 1 mL planta⁻¹ de dispersiones acuosas.

Tabla 1. Nutrientes aportados por fertilización edáfica (por planta).

N	P	K	Ca	Mn	Fe	Zn	B
[g/planta]	[g/planta]	[g/planta]	[g/planta]	[mg/planta]	[mg/planta]	[mg/planta]	[mg/planta]
0.430	1.340	0.250	0.171	9.00	7.50	9.00	15.00

5.4 Variables y muestreos

Los muestreos se iniciaron cuando las plantas obtuvieron sus tres pares de hojas verdaderas.

5.4.1 Muestreos no destructivos

Se realizaron 4 muestreos a los 96; 108, 124 y 138 dds, y en 20 plantas seleccionadas al azar se midió la longitud del tallo (cm) con una regla milimétrica desde la base del tallo hasta el ápice del mismo, diámetro del tallo (mm), con un pie de Rey, a tres milímetros desde la base del tallo. De igual forma se contaron todas las hojas de las plantas.

El área foliar por planta se determinó a partir de longitud y ancho de las hojas y multiplicándola por un coeficiente de área foliar (0.65) según Rodríguez y Pérez, (1995). Se realizaron tres muestreos, a los 130; 145 y 159 dds.

5.4.2 Concentración de clorofilas totales

Se realizaron dos muestreos el primero a los 130 días después de la siembra (dds), y el segundo a los 145 dds. Se tomaron lecturas con un medidor portátil de clorofilas MC-100. y se tomaron dos lecturas de la parte media de cada planta, evitando las nervaduras para lograr mayor precisión en las mediciones.

5.4.3 Radiación PAR

La radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) se registró con un medidor Quantum Flux MQ-500 (Apogee Instruments). Las mediciones se realizaron a intervalos de 15 minutos desde las 7 a 10 horas, luego cada 30 minutos desde las 10 hasta las 14 horas, y a partir de las 14 horas se realizaron cada 15 minutos hasta las 16 horas.

5.5 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con cinco tratamientos y 30 repeticiones, considerando como unidad experimental a una planta.

5.6 Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza de una vía (One Way Anova), previa comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. La comparación de las medias se realizó a través de la prueba de Mínima diferencia significativa, para una probabilidad de error del 5 %.

VI. RESULTADOS

6.1 Respuesta del Área Foliar

El área foliar es un indicador fundamental del crecimiento de las plantas, en donde se refleja la superficie disponible para la captación de luz y su capacidad fotosintética (Jin, X et al., 2021). El análisis de varianza demostró que a los 130 dds no hubo diferencias significativas entre tratamientos para $p \leq 0,05$ (Figura 2), todo lo cual indica que en esta etapa temprana del desarrollo de las plantas, los efectos del déficit de nutrientes en el testigo absoluto aún no se manifestaban, sin embargo las diferencias aparecieron a partir de los 145 dds, y fueron mucho más marcadas a los 159 dds, aspecto justificado por la estrategia de crecimiento diferenciado que asume la planta hacia las raíces, en condiciones de baja fertilidad (Poorter *et al.*, 2012). Antes estas condiciones las plantas priorizan el crecimiento del sistema radicular para maximizar la exploración del suelo en busca de los escasos nutrientes, a expensas de la inversión de carbono en la parte aérea y Marschner, 2012).

Teniendo en cuenta que tanto el testigo relativo como los tratamientos que recibieron nanopartículas tuvieron la fertilización edáfica, aunque no hubo diferencias estadísticas entre estos, se estima que las nanopartículas de ZnO contribuyeron con un mejor estatus fisiológico a través de mejorar la nutrición con zinc, elemento que interviene como cofactor en la actividad de la enzima anhidrasa carbónica la cual facilita la difusión de CO_2 a la RuBisCO, mejorando la fotosíntesis y por consiguiente los mecanismos de división celular (Cakmak, 2000). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rossi *et al.*, (2019), dichos autores encontraron incremento de la masa aérea con respecto al control, cuando asperjaron nanopartículas de ZnO a plantas de café de año.

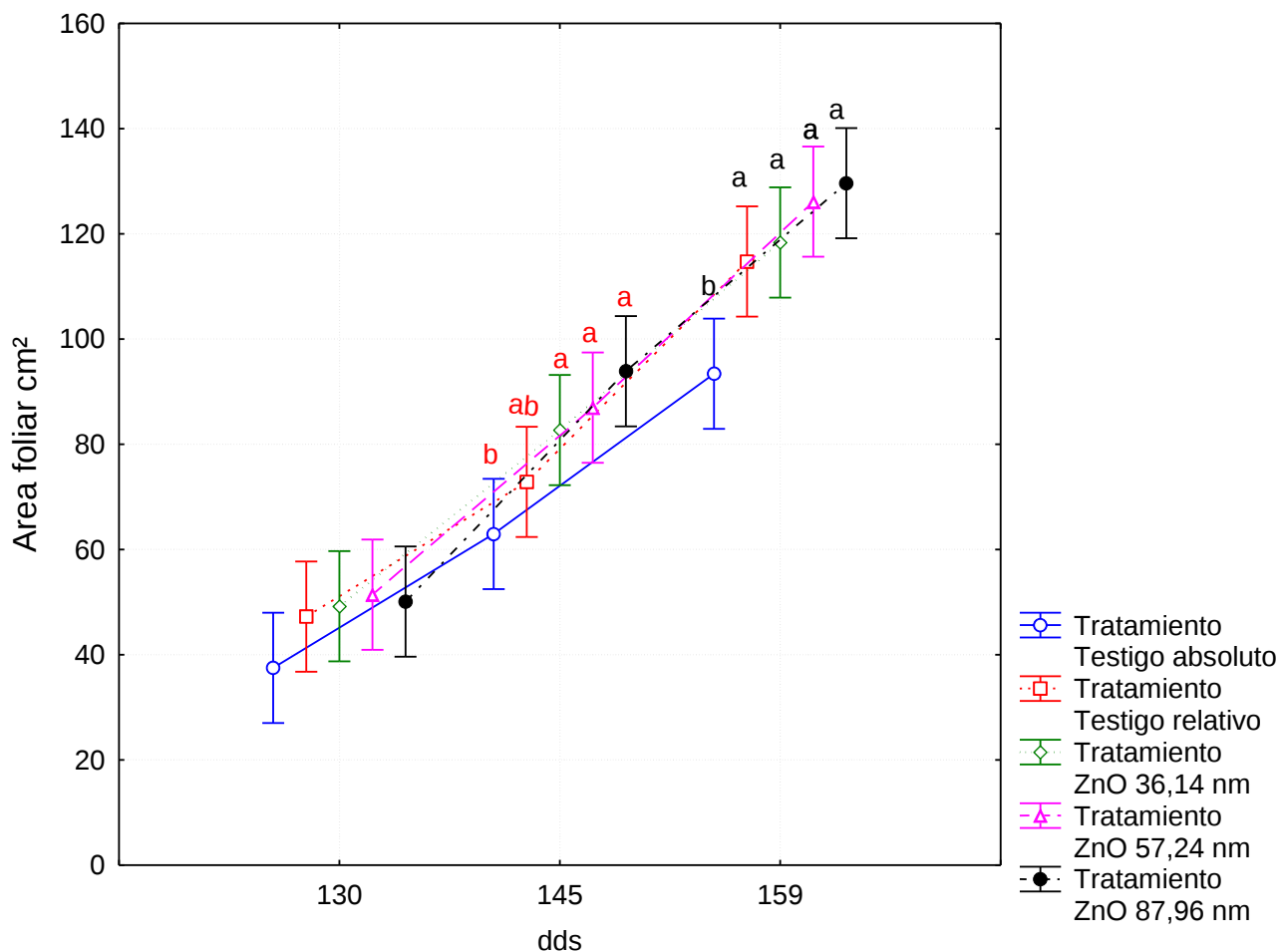


Figura 2. Efecto del tamaño de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en el área foliar en cafetos a los 130; 145 y 159 dds.

6.2 Diámetro del tallo

El análisis de varianza mostró que solo hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$) a los 108 dds (Figura 3), los mayores valores los obtuvieron los tratamientos testigos, y quizás se pudieran deber al efecto de las nanopartículas de ZnO, debido a que para esa fecha los tratamientos con nanopartículas ya habían recibido, al menos dos aplicaciones foliares de las mismas, y quizás ya se estuvieran manifestando sus influencias, al priorizar el área foliar (Figura 2), en detrimento del engrosamiento del tallo, al respecto se ha encontrado que las

plantas, en su estrategia de crecimiento desvían preferentemente los foto asimilados hacia el desarrollo de nuevas hojas (por su importancia en la captación de carbono), en detrimento del crecimiento de órganos soportes como el tallo (Poorter *et al.*, 2012).

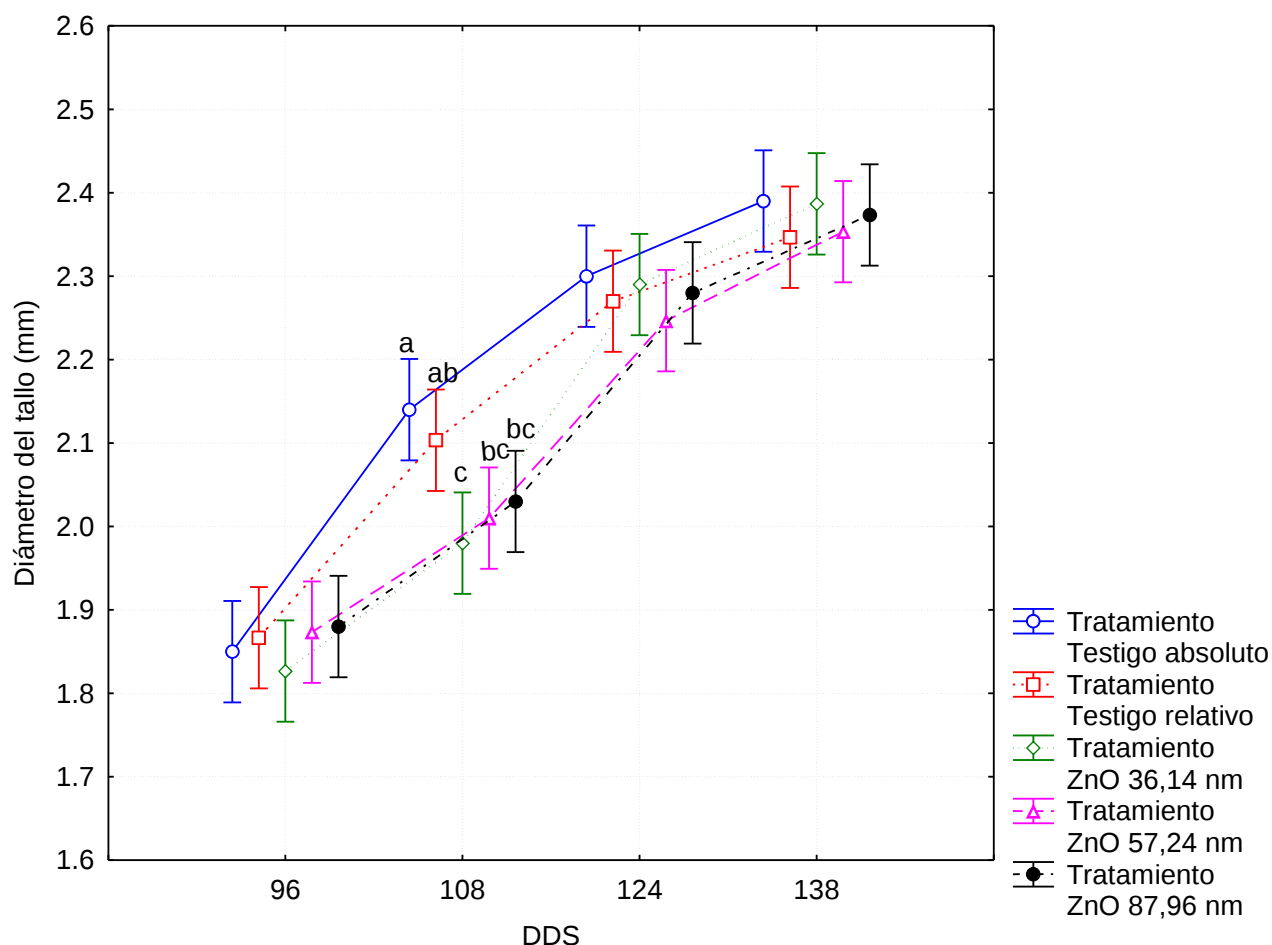


Figura 3. Efecto del tamaño de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en el diámetro del tallo en cafetos a los 96; 108; 124 y 138 dds.

6.3 Longitud del Tallo

En cada muestreo la longitud del tallo se vio favorecida en los tratamientos con nanopartículas, en la Figura 4 cada curva representa la longitud del tallo para un momento en específico, y se puede observar que en la medida que fueron más pequeñas las nanopartículas mayores fueron los valores de la longitud del tallo pero

sin diferenciarse estadísticamente para $p \leq 0,05$, estos resultados pudieran ser debido a la comprobada diferencia de reactividad que tienen las nanopartículas, la cual es mayor entre menor tamaño tienen (Lin y Xing, 2007), en este caso la liberación de Zn^{2+} , catión de importancia crucial como cofactor de la biosíntesis de auxinas, hormonas responsables de regular el crecimiento apical (Marschner, 2012). Todo parece indicar que las nanopartículas de ZnO estimulan el crecimiento primario o crecimiento de alargamiento (longitud del tallo), antes que el secundario o crecimiento de engrosamiento (diámetro del tallo) tal como se observó en la Figura 3.

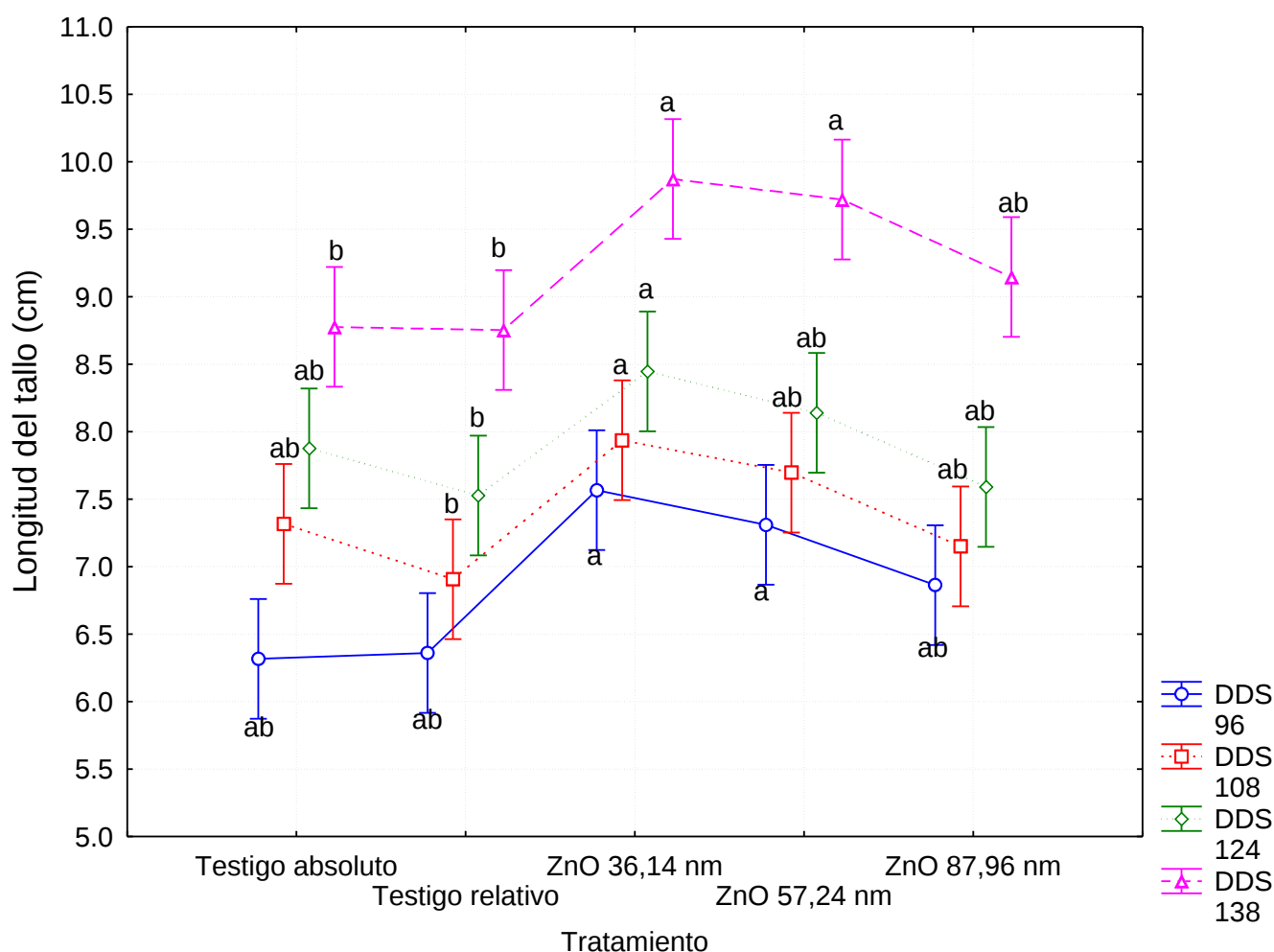


Figura 4. Efecto del tamaño de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en la longitud del tallo en cafetos a los 96; 108; 124 y 138 dds.

6.4 Número de hojas

En cuanto el número de hojas, solo hubo diferencias significativas para $p \leq 0,05$ entre tratamientos a los 124 y 138 dds (Figura 5), en los dos momentos los mayores valores los obtuvieron las nanopartículas de 87,96 nm, con respecto al Testigo absoluto. También sin diferencias estadísticas se manifestó una tendencia en cuanto a que a mayor tamaño de nanopartícula mayor número de hojas. La figura 5 muestra una dinámica de emisión de hojas favorables a los tratamientos con nanopartículas, donde también el tratamiento con mayor tamaño de nanopartículas mostró la mayor pendiente en su dinámica, Rossi *et al.* (2019) encontraron efecto positivo en el crecimiento foliar de planta de café con el uso de nanopartículas de ZnO. Independientemente al tratamiento las plantas emitieron la mayor cantidad de hojas entre los 108 y 124 dds, para luego mantener un estado de dormancia foliar hasta los 138 dds.

Estos resultados indican que la implementación de estas nanopartículas de ZnO en plantas de café, favorecen en su metabolismo, teniendo una mejor respuesta fisiológica (Número de hojas) en los tres tratamientos de ZnO a comparación de los tratamientos testigos, Vargas *et al.*, (2023) también obtuvieron resultados significativos en cuanto al número de hojas, implementando NPs-ZnO en plantas de tomate y Ali *et al.*, (2024), de igual manera presentaron resultados favorables con nanopartículas de óxido de zinc en trigo.

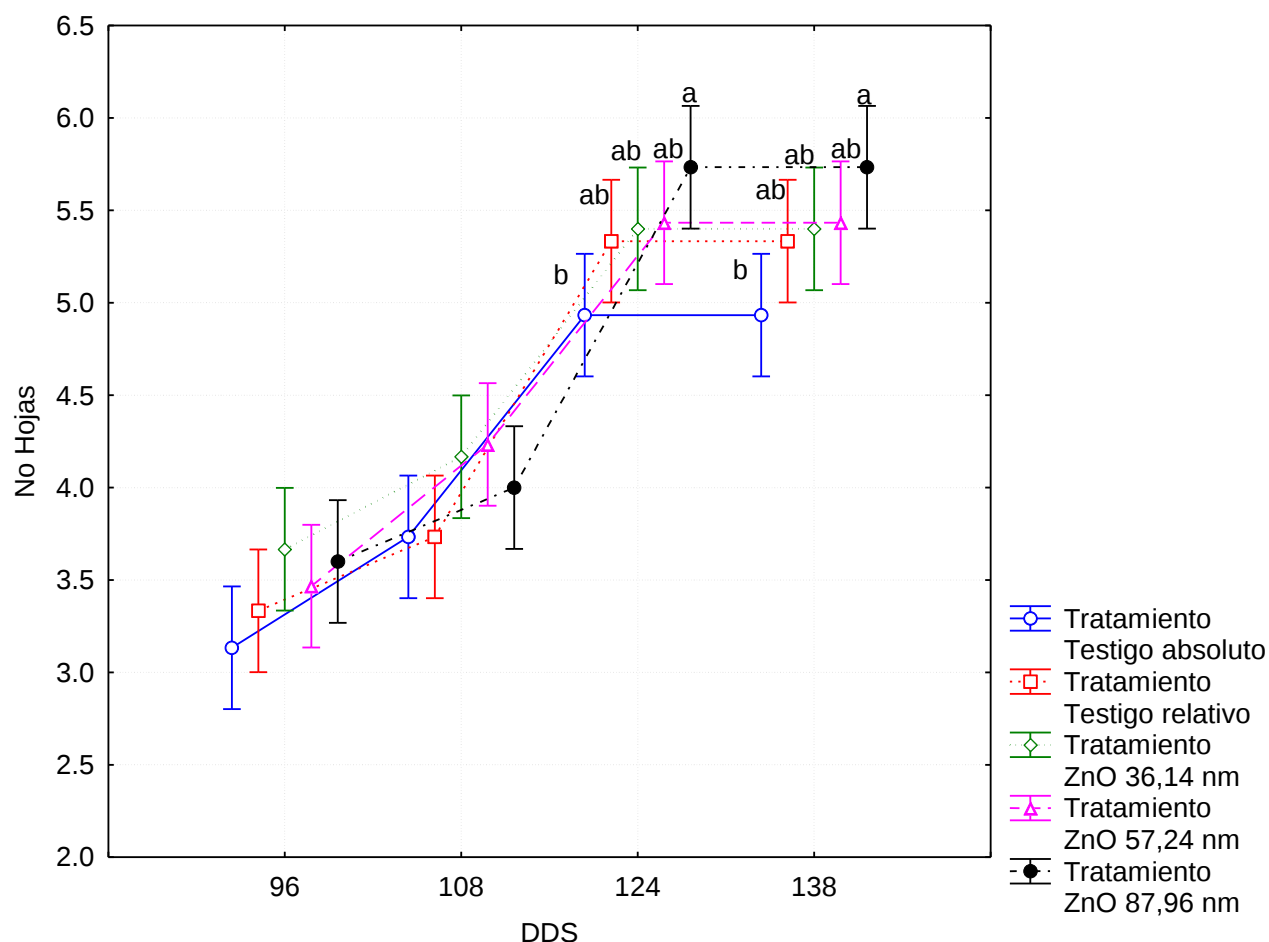


Figura 5. Efecto del tamaño de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en el número de hojas en cafetos a los 96; 108; 124 y 138 dds.

6.5 Dinámica del Contenido de Clorofila en Relación con el Ambiente

El contenido de clorofilas totales (Figura 6 A y B), mostro una significancia entre los horarios y tratamientos evaluados, con valores más altos de clorofila registrados entre las 12:00 pm y 02:00 pm en ambas fechas (A y B). Debido a esto la respuesta fisiológica de las plantas de café capturaron la mayor cantidad de luz y radiación PAR entre las 12:00 y 02:00 pm (Figura 8) en donde alcanzo su tendencia en esas horas, queriendo decir que si hubo relación con el ambiente y la cantidad de clorofilas obtenidas en las plantas. Aunque en cuanto las variables de Temperatura y Humedad Relativa (Figura 7 A y B) no tuvieron la misma similitud de resultados,

no afecto en nada la cantidad de clorofila en ese horario y de los tratamientos más altos y bajos obtenidos para ambas fechas (Figura 6 A y B). Siendo el tratamiento con ZnO 87.96 nm con el mayor resultado en ambas fechas de medición, seguido por el Testigo Relativo y el de ZnO 36.14 nm, en cuanto a los valores más bajos obtenidos el Testigo Absoluto fue el que menos concentración de clorofilas obtuvo para ambas fechas y horarios. Resultados similares fueron reportados por Liu *et al.*, (2020) quienes encontraron una relación entre la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la concentración de clorofilas.

Con estos resultados obtenidos evidenciamos que influye mucho el horario de mediciones que se toman de clorofilas y el tamaño de las nanopartículas de óxido de zinc suministradas en las plantas, además, tomando en cuenta que un testigo obtuvo resultados similares a los de ZnO 87.96 nm en este caso el Testigo Relativo, en donde consideramos que tuvo mucha influencia la fertilización que se le dio a ese tratamiento a pesar de no implementarle NPsZnO. De acuerdo con Ali *et al.*, (2024), al implementar nanopartículas aumenta la mayor concentración de clorofilas totales a comparación de los grupos control.

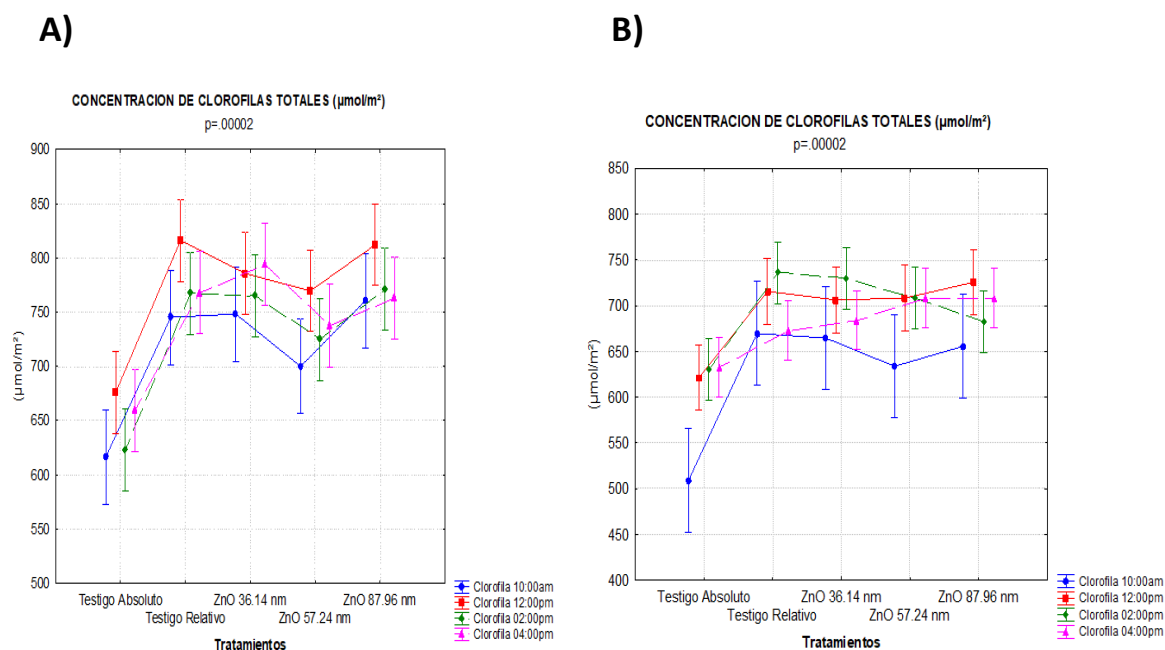
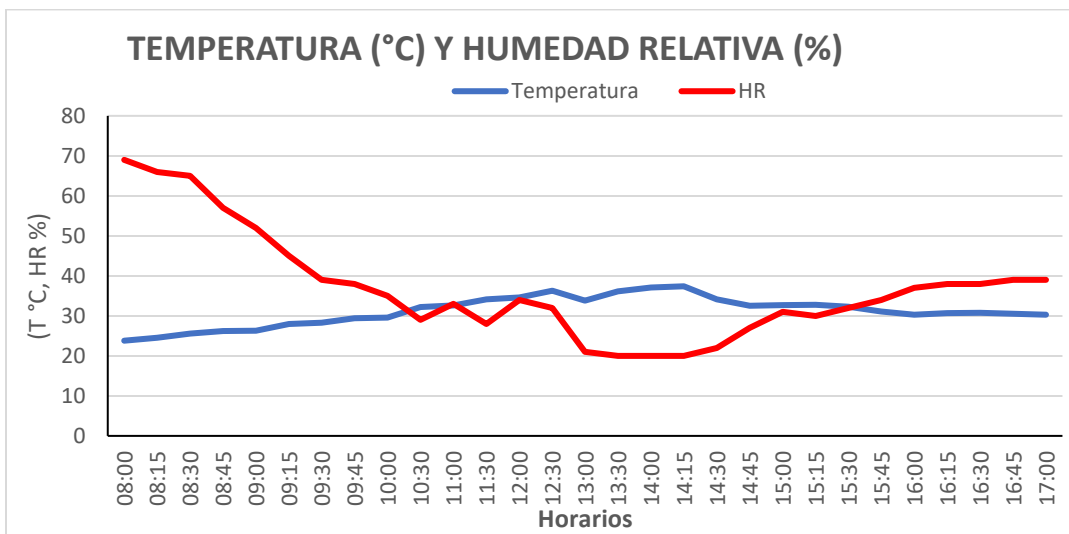


Figura 6. Concentración de clorofilas totales en plantas de café, con dos muestreos diferentes en distintas fechas 14/02/2025 (A) y 28/02/2025 (B).

A)



B)

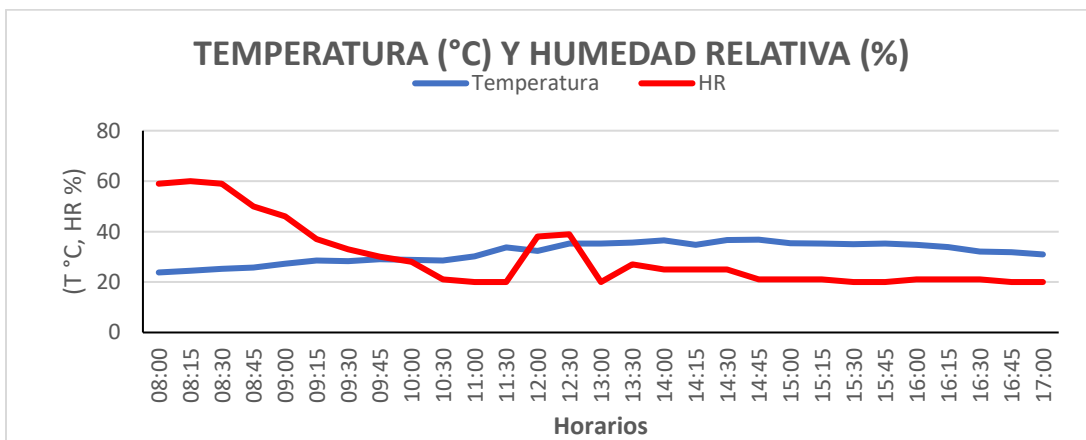


Figura 7. Temperatura y Humedad relativa con dos muestreos diferentes en distintas fechas 14/02/2025 (A) y 28/02/2025 (B).

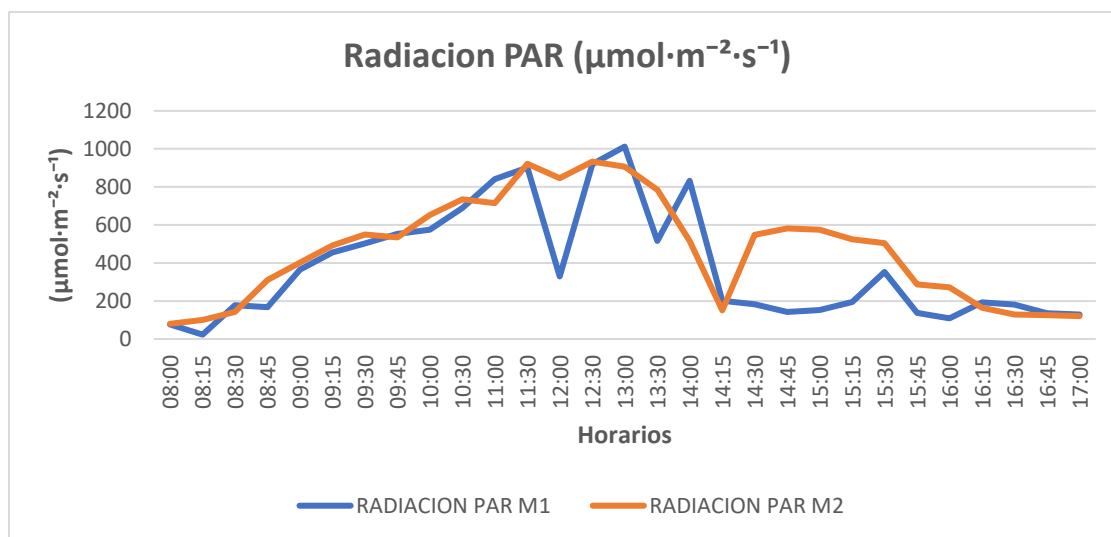


Figura 8. Radiación fotosintéticamente activa (PAR) con dos muestreos diferentes en distintas fechas 14/02/2025 (A) y 28/02/2025 (B).

VII. CONCLUSIONES

- La aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) influyen en el crecimiento y la arquitectura de las plántulas de café, y dependen del tamaño de las nanopartículas como del momento fisiológico de la planta.
- Las NPsZnO estimulan preferentemente el crecimiento primario (alargamiento del tallo) sobre el crecimiento secundario (engrosamiento).
- El tamaño de las nanopartículas influye en la dinámica del desarrollo foliar. a los 130 dds no se observaron diferencias significativas pero a los 145 y 159 dds todos los tratamientos con NPsZnO promovieron una mayor área foliar en comparación con el testigo absoluto.
- Las partículas de mayor tamaño (87.96 nm) mostraron una tendencia a generar un mayor número de hojas.
- La tasa de emisión de hojas en las plantas de café fue mayor entre los 108 y 124 dds, seguido de un período de dormancia foliar hasta los 138 dds. Los tratamientos con NPsZnO, de mayor tamaño, favorecieron esta dinámica, resultando en un mayor número de hojas al final del período evaluado en comparación con el testigo absoluto.
- Existe una correlación directa entre la dinámica diurna de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y las mediciones del contenido de clorofila. Los mayores valores de clorofila, registrados entre las 12:00 y las 14:00 h, coinciden con los picos de irradiancia.

VIII. LITERATURA CITADA

- Achari, G. A., & Kowshik, M. (2018). Desarrollos recientes sobre nanotecnología en la agricultura: nutrición mineral de las plantas, salud e interacciones con la microflora del suelo. *Revista de química agrícola y alimentaria*, 66(33), 8647-8661. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>
- Alfonse, Allou Allou, Trejo García, José Carlos, & Martínez García, Miguel Ángel. (2018). Opción climática para la producción de café en México. *Ensayos. Revista de economía*, 37(2), 135-154. <https://doi.org/10.29105/ensayos37.2-1>.
- Ali, R., Khan, N., Alharbi, B. M., Alqahtani, A. S., Alkahtani, J., Alzahrani, Y. M., Alghanem, S. M., & Ahmad, P. (2024). Application of zinc oxide nanoparticles improves morphophysiological and biochemical attributes of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 31(4), 102006. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63987-9>
- Aquino, P., Osorio, A. M., Ninán, E., & Torres, F. G. (2018). Characterization of ZnO nanoparticles synthesized by precipitation method and its evaluation in the incorporation in enamel paints. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(1), 5–17 Obtenido el 11 agosto de 2025 de <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1473>
- Barrera, J. F., & Parra, M. (2000). El café en Chiapas y la investigación en ECOSUR. *Ecofronteras*, 3-6. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 [Vista de El café en Chiapas y la investigación en ECOSUR](#)
- Blake Alexander J., Clegg William, Cole Jacqueline M. Evans John S.O. Main Peter, Parsons Simon, Watkin David J.(2009). *Crystal structure analysis: principles and practice*.Oxford University Press.
- Cakmak, I. (2000). Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(2), 185-205. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>.
- Cakmak, I. (2000). Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(2), 185-205. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>
- Camargo, I., & Rodríguez, N. (2006). New perspectives to study the biomass allocation and its relationship with the functioning of plants in neotropical ecosystems. *Acta Biológica Colombiana*, 11, 75-87
- Derner, J., & Briske, D. (1999). Does a tradeoff exist between morphological and physiological root plasticity? A comparison of grass growth forms. *Acta Oecologica*, 20(5), 519-526. doi:[10.1016/S1146-609X\(00\)86619-9](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(00)86619-9)
- Escamilla, E., Ruiz, O., Díaz, G., Landeros, C., Platas, D. E., Zamarripa, A., & González, V. A. (2005). El agroecosistema café orgánico en México. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6135>
- Espinoza-Moreno, J. L., & Sánchez-Ramírez, F. (2024). La producción de café por productores del Grupo Terruño Nayarita en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 28(53), 41-51. <https://ageconsearch.umn.edu/record/344558>

- Figuerola-Hernández, E., PÉREZ-SOTO, F., & Godínez Montoya, L. (2016). El mercado de café en México. *Handbook TI*, 33. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de [4.pdf \(ecorfan.org\)](#)
- Gade, A., Ingle, P., Rai, M., & Raut, R. (2023). Próxima generación de agroquímicos para un impacto a largo plazo en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. *Agroquímicos*, 2, 257–278. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020017>
- Galindo-Guzmán, A. P., Fortis-Hernández, M., La Rosa-Reta, D., Verónica, C., Zermeno-González, H., & Galindo-Guzmán, M. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(SPE28), 299-308. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284>
- Gándara Martínez, E. (2015). *Síntesis y caracterización de heteroestructuras de películas delgadas de ZnO: Al/ZnS* (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/11783>
- González, M. I., & Pérez, L. A. (2023). Fertilización foliar con nanopartículas de ZnO y su efecto en el crecimiento y rendimiento de *Capsicum annuum* L. *Terra Latinoamericana*, 41, e1585. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1585>
- González-Velázquez, M. A., Segura-Miranda, M. Á., & Santiago-Martínez, M. G. (2024). Rentabilidad económica de café orgánico en Amatepec y Temascaltepec, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(6), 1181-1197. <https://ageconsearch.umn.edu/record/349410>
- Hänsch, R., & Mendel, R. R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>
- Henderson, T. P. (2019). La roya y el futuro del café en Chiapas. *Revista mexicana de sociología*, 81(2), 389-416. Obtenido el 13 agosto de 2025 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-25032019000200389&lng=es&tlng=es
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Rivera-Fernández, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 613-628. Obtenido el 21 de julio de 2025, de <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>
- Hernández-Solabac, J. A. M., Nava-Tablada, M. E., Díaz-Cárdenas, S., Pérez-Portilla, E., & Escamilla-Prado, E. (2011). Migración internacional y manejo tecnológico del café en dos comunidades del centro de Veracruz. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3). Obtenido el 23 de Octubre de 2024 [v14n3a13.pdf \(scielo.org.mx\)](#)
- International Coffee Organization (ICO). (2024). Monthly Coffee Market Report. London, UK: International Coffee Organization (ICO).
- ITC, I. d. (2021). La Guía del Café. *El comercio mundial del café. Centro de Comercio Internacional*. La guía del café.
- Jin, X., Zarco-Tejada, P. J., Schmidhalter, U., Reynolds, M. P., Hawkesford, M. J., Varshney, R. K., & Yang, T. (2021). High-throughput estimation of crop traits: A review of ground and aerial phenotyping platforms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(1), 200-231. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.2998336>

- Lambers, H., Chapin III, F. S., & Pons, T. L. (2008). Plant physiological ecology (2nd ed.). Springer.
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. En *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* (F4.3.1-F4.3.8). John Wiley & Sons, Inc.
- Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villareal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28 (2), 9-24. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 www.scielo.org.mx.
- Liu, H., Mi, Z., Lin, L., Wang, Y., Zhang, Z., Zhang, F., Wang, H., Liu, L., Zhu, B., Cao, G., Zhao, X., Sanders, N. J., & He, J. S. (2020). Spatial variation of leaf chlorophyll in northern hemisphere grasslands. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1244. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01244>
- Mahmood, F. S., Hussein, H. Q., & Abdulwahhab, Z. T. (2022). Preparation and characterization of high surface area nanosilica from Iraqi sand via sol-gel technique. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 12(4), 104–117. Obtenido el 11 de agosto de 2025 de <https://jprs.gov.iq/index.php/jprs/article/view/645/483>
- Marschner, P. (Ed.). (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.
- Marschner, P. (Ed.). (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.
- Medina-Meléndez, J. A., Ruiz-Nájera, R. E., Gómez-Castañeda, J. C., Sánchez-Yáñez, J. M., Gómez-Alfaro, G., & Pinto-Molina, O. (2016). Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 10(2), 33-43. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 [2007-7858-cuat-10-02-00033.pdf \(sciELO.org.mx\)](https://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/10-02-00033.pdf)
- Mejía Cabello, A. C., & Pumaylle Chumpitaz, L. (2021). Nanofertilizantes en la producción de cereales, una visión sostenible: revisión sistemática. (Tesis de Licenciatura). Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 <https://hdl.handle.net/20.500.12692/84309>
- Mejía Quintana, L. A., & Palma Echerrez, C.E. (2023). *Fertilización química y orgánica de tres variedades de café (Coffea arabica)* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio de la UTC. Obtenido el 21 de julio de 2025, de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10107>
- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L.A., Puente-Urbina, B.A., & Lira-Saldivar, R.H.. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova scientia*, 8(17), 140-156. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052016000200140&lng=es&tlng=es.
- Osorio Anaya Ana María, Zegarra J.L, Blas Rodriguez, Manrique J. J., Fernández de Oliveira J U, Cornejo S. O y Ninan E. O. (2023) Determinación del tamaño de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas empleando la ecuación de Scherrer. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr.* vol 26 n° 51, 2023: e25344 <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25344>.
- Poorter, H., & Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27(12), 595-607. doi: 10.1071/PP99173_CO.

- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Revista del Consumidor. (junio de 2025). *Para saber: Café. Con aroma a México*. Revista del Consumidor, (580), p. 17-21. Profeco. https://revistadelconsumidor.profeco.gob.mx/media/revistas/sumario/sumario_para_saber_2025_6_Q3kvdgtqi.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Rivas Rojas, P. C. (2019). *Heteroestructuras basadas en nanopartículas magnéticas*. (Tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Argentina. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de [CONICET_Digital_Nro.cce969a1-c6b1-4bcc-bb7c-3e5fd301769c_A.pdf](https://conicet.digital.nro.cce969a1-c6b1-4bcc-bb7c-3e5fd301769c_A.pdf).
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. (2021). Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 791-803. Obtenido el 23 de Octubre de 2024 <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2987>
- Rodriguez, F. N. J. (2024). *Biosíntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de zinc a partir de gentianella tristicha para un potencial uso como nano fertilizante*. (Tesis Licenciatura). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de [content \(unmsm.edu.pe\)](https://content.unmsm.edu.pe).
- Rodríguez, L. L., & Pérez, A. O. (1995). Estimación indirecta del área y la biomasa foliar en plantas de cafeto al sol y bajo sombra. *Centro Agrícola*, 23(2), 23-28 <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>.
- Rossi, L., Faden, I. A., Sharifan, H., Ma, X., & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>
- SAGARPA (2022). Guía para la producción de plantas de café de alta calidad genética , fisiológica y fitosanitaria.
- Sánchez, M. A., & Rodríguez, J. A. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(17), 140-150. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v8n17/2007-0705-ns-8-17-00140.pdf>
- Tarafdar, J. C., Raliya, R., Mahawar, H. and Rathore, I., 2014. Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3(3), pp. 257-262. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0113-y>
- Toledo, V. M., & Moguel, P. (1996). El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias*, 43, 40-51. Obtenido el 19 de octubre de 2024, de [untitled \(prodeino.org\)](https://prodeino.org)
- Vargas-Martínez, G., Betancourt-Galindo, R., Juárez-Maldonado, A., Sánchez-Vega, M., Sandoval-Rangel, A., & Méndez-López, A. (2023). Impacto de NPs ZnO y microorganismos rizosféricos en el crecimiento y biomasa del tomate. *Trop. Subtrop Agroecosystems*, 26(1), 010. Obtenido el 08 agosto de 2025, de [http://doi.org/10.56369/tsaes.4332](https://doi.org/10.56369/tsaes.4332)

- Vichi, F. F. (2015). La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Espacio I+ D, innovación más desarrollo*, 4(7). Obtenido el 19 de octubre de 2024, de <https://doi.org/10.31644/IMASD.7.2015.a07>
- Villamizar, J., Rodríguez, N., y Fernández, W. (2012). Plasticidad fenotípica en plantas de *Lippia dulcis* (Verbenaceae) sometidas a déficit hídrico. *Acta Biológica Colombiana*, 17(2), 363-378. doi: [10.15446/abc](https://doi.org/10.15446/abc)
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J., Poorter, H., Valladares, F., & Marañón, T. (2004). Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: Valladares, F. (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente. EGRAF, S. A