



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Efecto del acondicionamiento osmótico con
soluciones de Cu/ZnO nanométrico en los
parámetros morfométricos del cultivo de la
calabaza**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

P R E S E N T A:

IRVING AGUILAR HERNÁNDEZ

ASESOR: Dr. JESÚS ABRAHAM MÉNDEZ ALBORES

COASESOR: Dr. GUSTAVO MERCADO MANCERA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de: **Tesis**

Efecto del acondicionamiento osmótico con soluciones de Cu/ZnO nanométrico en los parámetros morfométricos del cultivo de la calabaza

Que presenta el pasante: **Irving Aguilar Hernández**
Con número de cuenta: **418063806** para obtener el Título de: **Ingeniero Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de mayo de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

| | NOMBRE | FIRMA |
|----------------------|--|-------|
| PRESIDENTE | M.C. Vicente Silva Carrillo | |
| VOCAL | Dr. Jesús Abraham Méndez Albores | |
| SECRETARIO | Ing. Priscila Anaid Rivera Cruz | |
| 1er. SUPLENTE | Ing. Fernando Ortiz Salgado | |
| 2do. SUPLENTE | Ing. Jonathan Alfredo Fernández Mendiola | |

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

MCVB/ntm*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por darme la oportunidad de formarme como profesional. La experiencia académica ha sido enriquecedora y ha permitido mi desarrollo como estudiante y como persona. ¡Gracias UNAM!

A la carrera de Ingeniería Agrícola por su apoyo y formación durante mi etapa como estudiante. En especial, quiero agradecer a mis profesores por su dedicación y conocimientos, y a mis compañeros de clase por su colaboración y apoyo en todo momento.

Al Dr. Jesús Abraham Méndez Albores por su invaluable apoyo en mi trabajo de tesis. Agradezco su generosidad al compartir su conocimiento y experiencia, así como su disposición para guiarme en cada paso del proceso.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Gustavo Mercado Mancera, quien no solo fue mi asesor de tesis y de servicio social, sino también un gran amigo y guía en mi formación académica y personal. Su disponibilidad, enseñanzas, apoyo y paciencia han sido fundamentales para la culminación de este proyecto. Su compromiso con sus alumnos y con la universidad es digno de admiración. Gracias por todo lo que ha hecho por mí, sin su ayuda y orientación, no estaría en donde estoy hoy en día.

*Trabajo de tesis realizado con apoyo del Programa UNAM-PAPIIT
IA101523*

DEDICATORIA

A mis padres, quienes han sido una fuente constante de apoyo y aliento en cada paso que he dado en mi vida académica. Agradezco profundamente su dedicación y esfuerzo para salir adelante, y por siempre estar al pendiente de mí, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí, por su amor incondicional y por ser mi inspiración constante. Este logro es también de ustedes.

A mis amigos: Zaira, David, Adri, Enrique, Jess, Jon, Diana que hicieron que el paso por la carrera fuera una etapa muy divertida en donde pude encontrar grandes amistades y que pude aprender grandes cosas de ellos.

A Aridaí, por todo el apoyo y cariño brindado en esta etapa de mi vida personal y académica. Cuando dudaba de mis propias habilidades y no veía la luz al final del túnel, tú estuviste ahí para animarme a seguir adelante, y por eso siempre estaré agradecido.

CONTENIDO

| | Página |
|--|------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | <i>i</i> |
| ÍNDICE DE TABLAS | <i>ii</i> |
| RESUMEN | <i>iii</i> |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 2 |
| 1.1.1. Objetivos particulares | 2 |
| 1.2. Hipótesis | 2 |
| II. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1. Importancia económica del cultivo de calabaza | 3 |
| 2.2. Fenología de la calabaza | 5 |
| 2.2.1. Fases y etapas fenológicas | 5 |
| 2.2.2. Componentes del rendimiento | 6 |
| 2.3. ¿Qué es la nanotecnología? | 7 |
| 2.3.1. Aplicación de nanopartículas en la agricultura | 7 |
| 2.3.2. Nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre | 9 |
| 2.4. Descripción del área de estudio | 10 |
| 2.4.1. Localización geográfica | 10 |
| 2.4.2. Características edafoclimáticas | 11 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| 3.1. Metodología | 12 |
| 3.1.1. Análisis estadístico | 16 |
| 3.2. Materiales | 16 |

| | Página |
|--|-----------|
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 18 |
| 4.1. Condiciones climáticas | 18 |
| 4.2. Fenología del cultivo | 20 |
| 4.3. Caracterización de nanopartículas de ZnO+Cu | 22 |
| 4.4. Componentes del rendimiento | 25 |
| 4.5. Grupos funcionales | 27 |
| 4.6. Color | 30 |
| 4.7. Pruebas de germinación | 34 |
| V. CONCLUSIONES | 36 |
| VI. RECOMENDACIONES | 37 |
| VII. LITERATURA CITADA | 38 |
| ANEXOS | 42 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Superficie sembrada y cosechada de calabaza en el año 2021 (SIACON, 2021). | 3 |
| Figura 2. Producción de calabaza en el año 2021 (SIACON, 2021). | 4 |
| Figura 3. Rendimiento de calabaza por hectárea en el año 2021 (SIACON, 2021). | 5 |
| Figura 4. Fenología del cultivo de calabaza (Elaboración propia con datos de Dreamstime, 2022). | 6 |
| Figura 5. Localización geográfica del Municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Infoabe, 2022). | 10 |
| Figura 6. Parcela 14 del Centro de Enseñanza Agropecuaria (Google Earth, 2022). | 11 |
| Figura 7. Temperatura ambiental diaria. Ciclo P-V 2022. Estación meteorológica Almaraz. | 18 |
| Figura 8. Precipitación y evaporación diaria. Ciclo P-V 2022. Estación meteorológica Almaraz. | 19 |
| Figura 9. Fases fenológicas y longitud de la guía del cultivo de calabaza por tratamiento aplicado. Ciclo P-V 2022. Estación meteorológica Almaraz. | 21 |
| Figura 10. Espectro representativo de absorción UV-Vis de las nanopartículas de ZnO+Cu. | 22 |
| Figura 11. Espectro de reflectancia difusa transformado con la función de Kubelka-Munk para determinar la energía de la banda prohibida las nanopartículas de ZnO-Cu. | 23 |
| Figura 12. Imagen ilustrativa de la microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de ZnO+Cu. | 23 |
| Figura 13. Distribución de tamaño y concentración de partículas de ZnO+Cu determinados con la técnica de análisis de seguimiento de nanopartículas. | 24 |
| Figura 14. Espectros de infrarrojo del grupo testigo (a), 100 mg ZnO+Cu L ⁻¹ (b) y 200 mg ZnO+Cu L ⁻¹ (c). | 27 |
| Figura 15. Sistemas de coordenadas de la escala “a” y “b” de la escala de color (Konica, 2006). | 31 |
| Figura 16. Grado de saturación (Xrite, 2002). | 32 |
| Figura 17. Niveles de matiz (Xrite, 2002a). | 33 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | Página |
|-----------------|---|--------|
| Tabla 1. | Comportamiento fenológico del cultivo de calabaza. Ciclo P-V 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx. | 20 |
| Tabla 2. | Componentes del rendimiento del cultivo de calabaza. Ciclo P-V 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx. | 25 |
| Tabla 3. | Asignaciones de las bandas principales presentes en los espectros FTIR-ATR de la pulpa de calabaza. | 28 |
| Tabla 4. | Áreas de las principales bandas FTIR-ATR de la pulpa de calabaza. | 29 |
| Tabla 5. | Parámetros de color de la cáscara de calabaza. | 30 |
| Tabla 6. | Parámetros de las pruebas de germinación de las semillas de calabaza (F2). | 34 |

RESUMEN

En este estudio se llevó a cabo una evaluación de las nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre (NPs ZnO+Cu) y su impacto en la mejora de los parámetros morfométricos y los componentes de rendimiento de la calabaza. Los resultados indicaron que, aunque la longitud de las guías no presentó diferencias entre los tratamientos, la aplicación de 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ mostró tener una longitud significativamente mayor en comparación con el tratamiento testigo, con una diferencia total de 34 cm. En los tratamientos con 100 y 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ se obtuvieron los valores más altos en cuanto a peso de fruto y, diámetros ecuatoriales y polares. Además, el tratamiento con 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ logró el rendimiento más alto, con un valor de 9.6 t ha⁻¹. Los resultados obtenidos mediante espectroscopia de infrarrojo (FTIR-ATR) en la pulpa de los frutos tratados con NPs de ZnO+Cu confirmaron una mayor cantidad de grupos funcionales (carbohidratos, proteínas y lípidos) y de moléculas estructurales (celulosa, hemicelulosa y polisacáridos). Las pruebas de color mostraron una diferencia positiva entre el tratamiento con 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ y el tratamiento testigo, en términos de los parámetros de la coordenada en a*, el ΔE y el croma. Además, las NPs de ZnO+Cu mejoraron significativamente algunas características de las plántulas de calabaza de la F2, como la longitud de raíz, la longitud del tallo, el número de raíces secundarias y el porcentaje de germinación, siendo este último de 76 y 88% para los tratamientos con 100 y 200 mg ZnO+Cu L⁻¹, respectivamente. En comparación, el tratamiento testigo solo obtuvo un 40% de germinación. Se concluye que el uso de NPs de ZnO+Cu tiene un impacto positivo en los parámetros morfométricos y los componentes de rendimiento de la calabaza, lo que indica que estas nanopartículas podrían ser una alternativa prometedora para mejorar la producción de cultivos en el futuro.

I. INTRODUCCIÓN

La calabaza es un cultivo importante en todo el mundo, tanto por su valor nutricional como por su amplia aplicación en la industria alimentaria, pero su práctica puede generar impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana. El uso excesivo de productos químicos en el cultivo, como agroquímicos y fertilizantes, puede contaminar el suelo y el agua, además de afectar la calidad de los productos. En busca de alternativas más seguras y sostenibles, la investigación en nanotecnología aplicada a la agricultura ha surgido como un campo prometedor.

En este sentido, una herramienta potencial de la nanotecnología es la aplicación de nanopartículas, las cuales son importantes por su uso potencial en resolver problemas que con productos a escala normal son muy costosos y no siempre se solucionan eficientemente, y por las implicaciones o efectos que el uso de estas tiene en procesos o fenómenos. Respecto a la producción agrícola, la premisa básica es reducir al mínimo las pérdidas y disminuir los efectos adversos en el ambiente por el uso excesivo de insumos agrícolas (Carrillo y González, 2009).

En particular, las nanopartículas de óxido de zinc son un material que ha despertado un gran interés en la investigación científica debido a su potencial para mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos. En los últimos años, se ha estudiado su aplicación en diferentes cultivos con el objetivo de mejorar la germinación, crecimiento y producción de las plantas. Estas nanopartículas presentan propiedades antimicrobianas y antioxidantes, lo que les permite proteger las semillas y las plantas de diferentes enfermedades y estrés oxidativo. Además, su tamaño nanométrico permite una mejor absorción de nutrientes y agua por parte de las raíces (Lira, 2016).

Un método utilizado para la modificación de las nanopartículas es el dopaje, el cual tiene como objetivo mejorar las propiedades físicas, químicas, eléctricas, ópticas y biológicas de las mismas (Rekha *et al.*, 2010). Actualmente se propone al cobre como un metal de interés para dopar el óxido de zinc (Liza, 2019). Este metal por su parte también ha reportado buenos resultados con respecto a la germinación y el aumento de vigor en plántulas de algunos cultivos como lechuga, tomate y chile (Ruiz, 2016). En este sentido, la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre en el cultivo podría ser una estrategia efectiva para mejorar la absorción de nutrientes y potenciar las características de los frutos.

A pesar de los beneficios potenciales de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc+cobre en la agricultura, es necesario realizar más investigaciones para entender su efecto en diferentes tipos de cultivos, así como analizar los beneficios que tiene el dopaje de dichas nanopartículas. En particular, es importante conocer cómo se comportan estas nanopartículas en la calabaza, así como su influencia en su crecimiento y desarrollo. Por lo anterior es que se plantearon los siguientes objetivos.

1.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto del acondicionamiento osmótico con soluciones de nanopartículas de óxido de zinc+cobre (NPs de ZnO+Cu) en los parámetros morfométricos del cultivo de calabaza (*Cucurbita argyrosperma*).

1.1.1. Objetivos particulares

- Acondicionar semillas de calabaza (*Cucurbita argyrosperma*) con soluciones de NPs de ZnO+Cu nanométrico a dos diferentes concentraciones.
- Evaluar los parámetros morfométricos del cultivo de calabaza en condiciones de temporal, en Cuautitlán Izcalli, Méx.
- Analizar el efecto de la aplicación de las NPs de ZnO+Cu en los componentes del rendimiento del cultivo de calabaza.

1.2. Hipótesis

- El acondicionamiento osmótico de las semillas con soluciones de NPs de ZnO+Cu tiene un efecto positivo sobre los parámetros morfométricos y componentes del rendimiento del cultivo de la calabaza en el campo.

II. ANTECEDENTES

2.1. Importancia del cultivo de calabaza

La calabaza es un cultivo de gran importancia, debido a su adaptabilidad a diversos climas y terrenos, se puede cultivar tanto a nivel del mar como en valles altos, esto permite que esta hortaliza se siembre en todo el país (SIAP, 2019).

La siembra de calabaza a nivel nacional se realiza en alrededor de 1,114.6 ha de temporal, con rendimiento desde 6.3 Ton ha⁻¹ en temporales irregulares hasta 26.6 Ton ha⁻¹ en buenos temporales (SIACON, 2021). En 2018 este cultivo colocó a México en el sexto lugar de producción a nivel mundial con un volumen de 615,000 Ton, lo que representó el 2.6% de aportación al volumen mundial de la hortaliza y un 3.7% de la participación nacional en producción de hortalizas (SIAP, 2019). La calabaza se encuentra entre los productos agroalimentarios que más se exportan, ya que cada año se incrementa la cantidad que México oferta al exterior, en el año 2018 el 85% de la cosecha del campo mexicano se comercializó en el mercado internacional (SIAP, 2019).

En todos los estados de México es común que se siembre calabaza; sin embargo, para el año 2021, el estado de Sonora lideró la producción nacional, seguido por los estados de Guerrero, Sinaloa, y Puebla. La superficie total sembrada y cosechada fue de 9,185 y 9,046 ha, respectivamente (Figura 1) (SIACON, 2021).

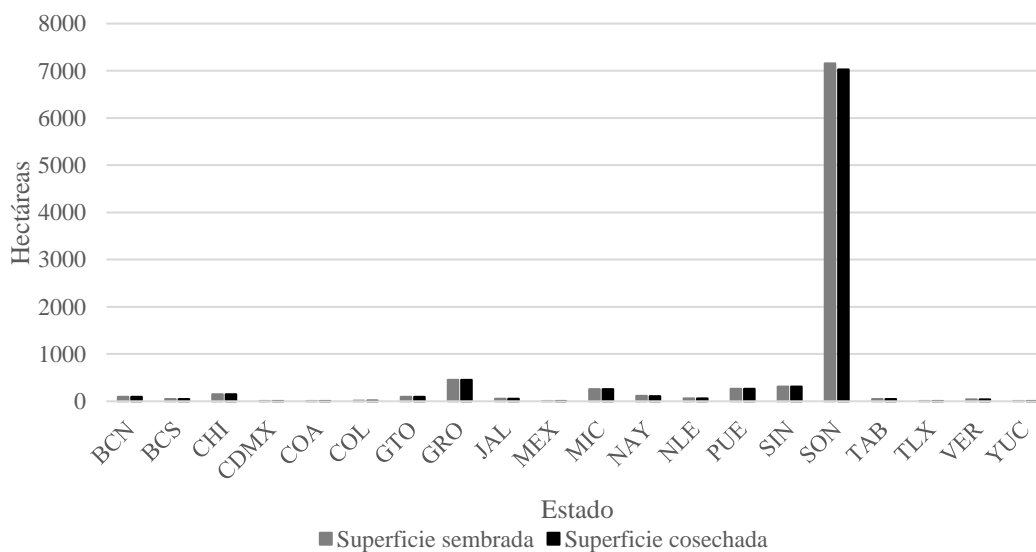


Figura 1. Superficie sembrada y cosechada de Calabaza en el año 2021 (SIACON, 2021).

En la Figura 2 se muestra la producción total obtenida por estado, correspondiente al año 2021.

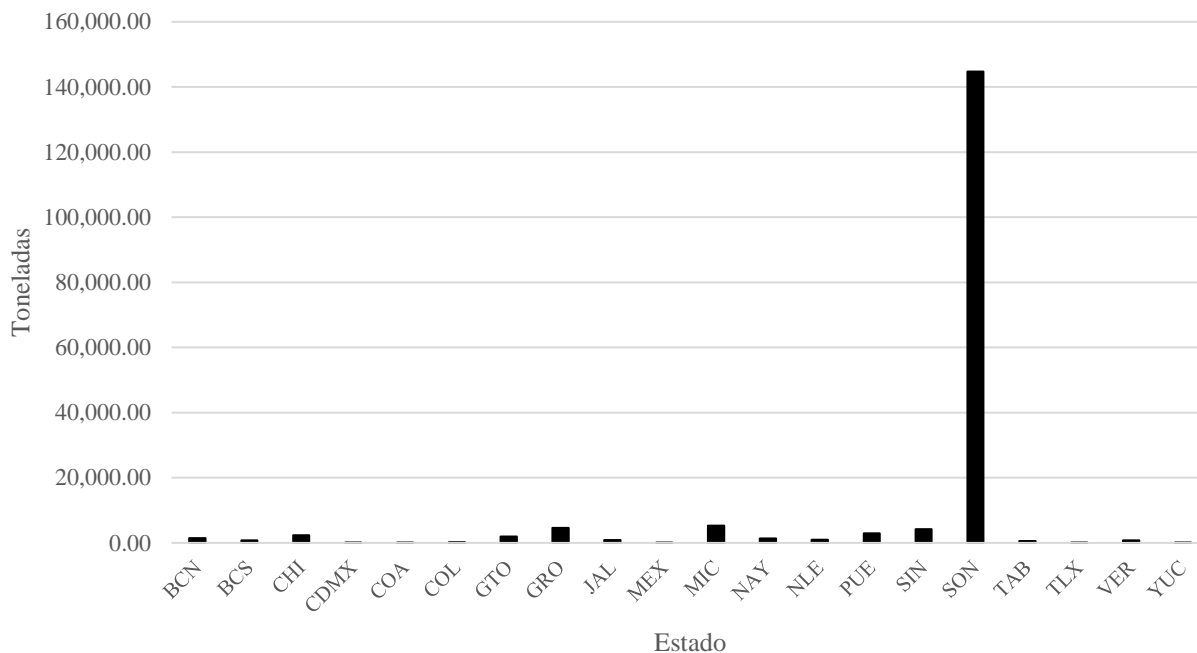


Figura 2. Producción de calabaza en el año 2021 (SIACON, 2021).

De acuerdo con el SIACON (2021), sobresale el estado de Sonora con una producción de 144,755 Ton, seguido de Michoacán, Guerrero y Sinaloa con 5,337, 4,562 y 4,247 Ton, respectivamente. Sin embargo, el rendimiento por hectárea más significativo fue en los estados de Veracruz, Michoacán, Guanajuato y Sonora, con 20.99, 20.82, 20.64 y 20.6 Ton ha⁻¹, respectivamente (Figura 3).

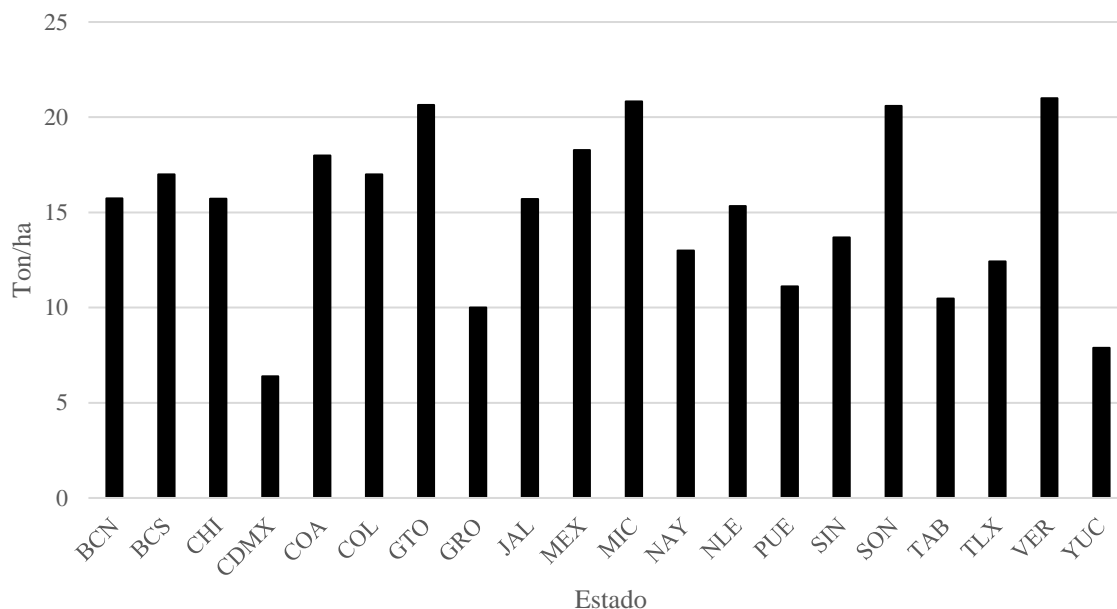


Figura 3. Rendimiento de calabaza por hectárea en el año 2021 (SIACON, 2021).

2.2. Fenología de la calabaza

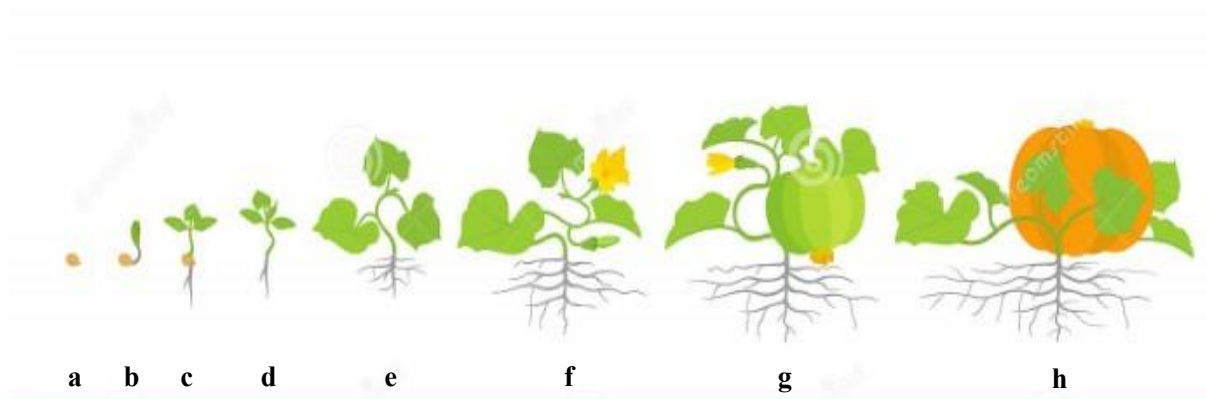
Debido a que esta especie se maneja en sistemas agrícolas tradicionales tanto temporales como de riego, es normal que presente diversas variantes en tiempo para la aparición de las flores y los frutos. En México, generalmente, se siembra al inicio de la época de lluvias (mayo-junio), floreciendo en julio-septiembre y fructificando en septiembre-diciembre. También se cultiva en algunas regiones del país durante la época de sequía, principalmente en terrenos húmedos o con la ayuda de riego, proporcionando así una fructificación durante todo el año (CONABIO, 2017).

2.2.1. Fases y etapas fenológicas

En la calabaza, las etapas fenológicas son siembra, etapa vegetativa, etapa reproductiva con la presencia de yemas florales, amarre de fruto, inicio de desarrollo del fruto y terminación de desarrollo de fruto, finaliza con la cosecha de acuerdo con la madurez comercial o fisiológica requerida (Pech, 2019).

Para *C. argyrosperma* la germinación debe ocurrir en un plazo de 14 días después de la siembra (dds), la aparición de hojas a los 24 dds, presencia de yemas a los 60 dds, amarre de fruto a los 75

dds, inicio de desarrollo de fruto a los 90 dds y término a los 120 dds, siendo la cosecha a los 150 dds para semilla (CONABIO, 2017) (Figura 4).



Donde: a) semilla. b) emergencia. c) primer par de hojas. d) segundo par de hojas.
e) emisión de guía. f) floración. g) fructificación. h) maduración -cosecha.

Figura 4. Fenología del cultivo de calabaza (Elaboración propia con datos de Dreamstime, 2022).

2.2.2. Componentes del rendimiento

Los componentes del rendimiento se definen en diferentes estados fenológicos. Las condiciones ambientales, variables a lo largo del ciclo del cultivo afectan el rendimiento a través de distintos componentes. Además, el efecto de un mismo factor ambiental puede afectar a un componente con diferente intensidad que a otros. Puede también existir compensación entre diferentes componentes del rendimiento, por ejemplo, en el cultivo del girasol, una reducción del número de capítulos por unidad de superficie puede no ocasionar una reducción del rendimiento debido a un incremento del número de frutos por planta y/o del peso individual de los frutos (Aguirrezábal *et al.*, 1996).

Los componentes varían en función del cultivo ya que cada uno presenta características particulares propias de su especie, así como de la parte de interés que se quiere aprovechar, ya sea fruto, semilla, tallo, entre otras. Por ejemplo, en el cultivo de haba, Pérez (2016) señaló que los componentes de rendimiento son: espesor de la vaina, peso de la vaina por planta, longitud, diámetro y espesor de la semilla, así como el rendimiento de la vaina. En el cultivo del algodón, Palomo (2003) señaló que los componentes de rendimiento son: el peso del capullo, el contenido de fibra, el peso de 100 semillas por planta, la longitud de la fibra, la resistencia de la fibra y la finura de la fibra.

Para el caso de calabaza, los componentes de rendimiento son: el número de frutos por planta, el peso promedio de frutos, la longitud y el diámetro de los frutos (Apáez *et al.*, 2019).

Conocer el momento en que se definen los distintos componentes del rendimiento y el efecto de los factores ambientales sobre los mismos, puede ayudar a detectar los puntos críticos en la definición del rendimiento. Esto puede servir para adecuar el manejo del cultivo con miras a evitar o minimizar las situaciones de estrés por efecto ambiental durante dichos períodos. A través de la correcta aplicación de prácticas agronómicas (fecha de siembra, densidad de siembra, ciclo del cultivar, entre otros), es posible adecuar el impacto de los factores ambientales que pueden limitar principalmente el rendimiento de los cultivos (radiación solar, temperatura, agua y nutrientes minerales) a los momentos de mayor demanda de éstos (Aguirrezábal *et al.*, 1996).

2.3. ¿Qué es la nanotecnología?

La nanotecnología es considerada como una tecnología emergente, se orienta a la elaboración, caracterización y aplicación de materiales de dimensiones muy pequeñas, en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm), es decir de 1 a 100 billonésimas de metro, por lo que se ubica dentro de la escala atómica y molecular. La nanotecnología es un extenso campo de la investigación interdisciplinaria, ya que con ella se abre un amplio abanico de oportunidades en diversas áreas como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura (Lira *et al.*, 2016).

La nanotecnología se presenta como un área de investigación en el estudio de los materiales donde convergen diversas ramas del conocimiento que permiten estudiar fenómenos inéditos que ocurren a nivel atómico y molecular. La importancia de la nanotecnología radica en que en el mundo nanométrico los materiales pueden adquirir o realzar propiedades diferentes a las que tienen a escala macroscópica (Mendoza y Rodríguez, 2007).

2.3.1. Aplicación de nanopartículas en la agricultura

La nanotecnología ha surgido como un avance tecnológico que puede transformar sectores de la agricultura, proporcionando herramientas para la detección rápida de enfermedades en los cultivos, así como mejorar la capacidad de las plantas para absorber los nutrientes y crecer con mayor

velocidad abriendo así un amplio abanico de oportunidades en la agricultura para producir agroproductos como nanofertilizantes, nanoplaguicidas, nanoherbicidas y nanosensores, que permitirán incrementar el rendimiento de los alimentos de manera sustentable. La aplicación de la nanotecnología en el sector agroalimentario es uno de los campos de más rápido crecimiento en la nano-investigación (Lira, 2018). La agricultura es considerada como la segunda área de aplicación nanotecnológica, después del área energética (Carrillo y González, 2009).

Los materiales a escala nanométrica más utilizados son las nanopartículas (NPs) metálicas y las derivadas del carbón (Lira *et al.*, 2016). Las NPs pueden ser usadas como una tecnología para mejorar la germinación de las semillas y los parámetros fisiológicos relacionados, para optimizar la capacidad de absorción, degradación de reservas y división celular (Chinnamuthu y Boopathi, 2009).

Los efectos benéficos de las NPs podrían atribuirse a una mayor producción de enzimas responsables de las reacciones metabólicas. Por otra parte, podrían incrementar los niveles de ácido indolacético (AIA) en las raíces o brotes, que a su vez pueden incrementar el vigor de las semillas y por ende el crecimiento de las plántulas (Ruiz *et al.*, 2016).

Mahmoodzadeh *et al.* (2013) evidenciaron los efectos del titanio a nanoescala con partículas de TiO_2 en semillas de canola (*Brasica napus*), reportaron una promoción de la germinación del 75% con la aplicación de NPs (20 nm de tamaño de partícula a 2000 mg L^{-1} de concentración). Por otra parte, Krishna y Natarajan (2014) indicaron que las NPs de óxido de Zinc (ZnO), plata (Ag) y dióxido de titanio (TiO_2) mejoraron la velocidad de germinación en semillas de cacahuate potenciándola hasta un 75% en comparación con el testigo el cual solo alcanzó el 55%.

El empleo de NPs para estimular la germinación y el vigor de las semillas, mejora el rendimiento de los cultivos aproximadamente en un 16% con una dosis adecuada; sin embargo, el nivel de respuesta depende del tipo de nanomaterial, su aplicación potencial y el genotipo (Buu *et al.*, 2014). Estos nanomateriales están aún investigándose; sin embargo, su aplicación ha ido en aumento, y se prevé que siga creciendo en el futuro (Lira *et al.*, 2016).

2.3.2. Nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre

Las nanopartículas de óxido de zinc, cobre y fierro ya sean puras o mezcladas, están siendo estudiadas por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, fertilizantes y antimicrobiales (Méndez *et al.*, 2016).

El efecto de las nanopartículas de zinc (Zn) se ha estudiado en muchas plantas; Pudake *et al.* (2019) mencionaron algunos estudios en los cuales registran efectos positivos, en unos de estos señalan que la aplicación de 2 mg L⁻¹ de NPs de ZnO mejoró el alargamiento de la raíz de las semillas de rábano y de colza. Sin embargo, los efectos tóxicos también se registraron a altas concentraciones de nanopartículas; debido a que la mayoría de las plantas requieren solo 0.05 mg L⁻¹ de Zn en la solución del suelo para un crecimiento normal, la aplicación de niveles más altos de Zn puede provocar fitotoxicidad. Por su parte, Lira (2016) mencionó que en pruebas de germinación las NPs de ZnO en dosis de 250 a 2000 mg L⁻¹, promovieron incrementos significativos de clorofila y proteína en plántulas de trigo. Concentraciones bajas (10 y 20 mg L⁻¹) de estas mismas NPs mejoraron la germinación de las semillas de cebolla. También en plantas de goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) una concentración de 10 mg L⁻¹ de NPs de ZnO aplicada de forma foliar promovió mayor producción de biomasa, contenido de clorofila, longitud y área radicular, así como la síntesis de proteína. Por último, en plantas de soya la dosis de 1.0 g L⁻¹ de NPs de ZnO promovió efectos significativos en la germinación y el crecimiento.

El dopaje es un método utilizado para la modificación de nanopartículas con el fin de mejorar sus propiedades físicas, químicas, eléctricas, ópticas y biológicas (Rekha *et al.*, 2010). Actualmente se propone al cobre (Cu) como un metal de interés para dopar el ZnO, éste pertenece al grupo de la plata (IB) y ambos son usados en la catálisis de reacciones químicas (Liza, 2019). El cobre también ha sido investigado y se ha encontrado que en plántulas de lechuga la aplicación de nanopartículas de este elemento incrementó la relación brote-raíz (Pudake *et al.*, 2019). En otro experimento realizado en semillas de tomate se obtuvo que las NPs de Cu a 5 y 10 ppm promovieron el vigor de germinación de las semillas, superando estadísticamente ambos tratamientos al testigo. Por otra parte, el tratamiento con 10 ppm incrementó la longitud del tallo y el tratamiento con 5 ppm la longitud de la radícula, en ambas variables los resultados mostraron diferencias estadísticas con respecto al testigo. Estas variables son indicadores del vigor de las plántulas, mostrando que las NPs de Cu a concentraciones bajas tienen la capacidad de promover el crecimiento, lo cual se puede

deber a una mayor división y/o elongación celular. En un estudio similar llevado a cabo en semillas de chile ancho, se observó resultados similares a los obtenidos en semillas de tomate, ya que el tratamiento correspondiente a 5 ppm de NPs de Cu, presentó mayor vigor de germinación y longitud de radícula, que el resto de los tratamientos, superando al testigo en 45.8% en vigor de germinación (Ruiz, 2016).

2.4. Descripción del área de estudio

A continuación, se describen las condiciones del área de estudio.

2.4.1. Localización geográfica

Se encuentra en el Municipio de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México, en la longitud Oeste $99^{\circ}11'42''$ y en la latitud norte $19^{\circ}41'35''$ a 2,256 msnm (Figura 5). La parcela experimental se ubicó en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FES-C), en la parcela 14 del Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA), durante el ciclo primavera-verano (P-V) 2022 (Figura 6).

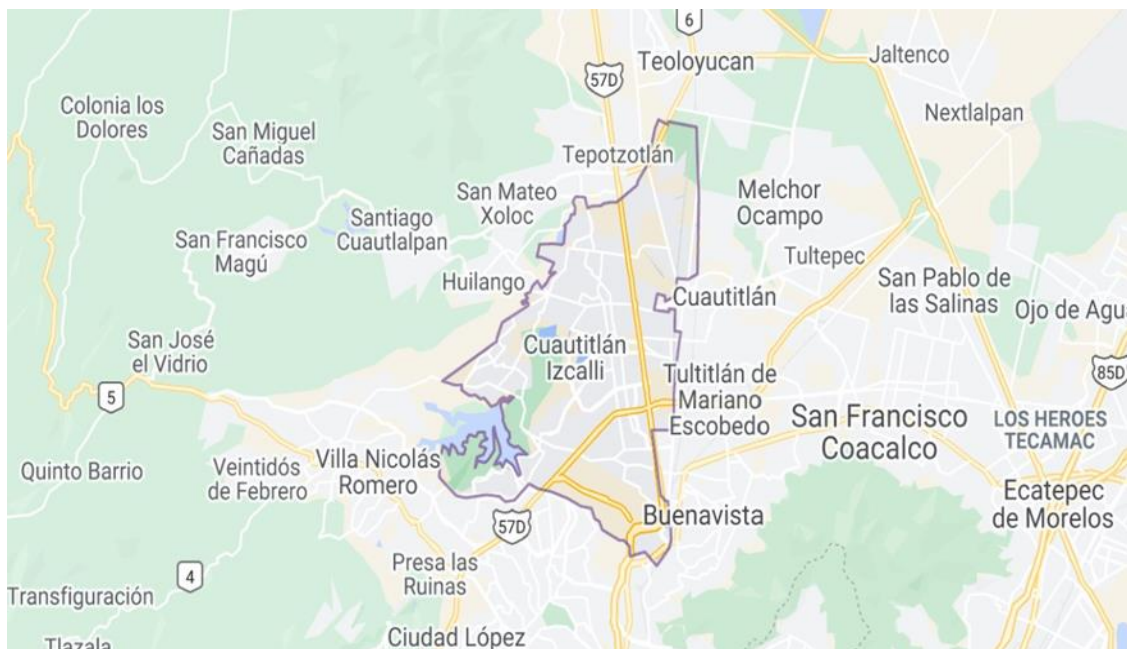


Figura 5. Localización geográfica del Municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Infoabe, 2022).



Figura 6. Parcela 14 del Centro de Enseñanza Agropecuaria (Google Earth, 2023).

2.4.2. Características edafoclimáticas

La zona se caracteriza por tener un clima templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con lluvias de verano, una temperatura promedio de 15.4 °C; una precipitación promedio anual de 652.1 mm y la presencia de heladas principalmente en la época de invierno (Angeles, 2022).

El suelo es de textura arcillosa, con un porcentaje de materia orgánica de 3.7%; pH de 6.9; conductividad eléctrica de 0.619 dS m⁻¹; y fertilidad media a alta (Mercado *et al.*, 2015).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Metodología

El trabajo experimental constó de tres etapas:

a) La primera en el laboratorio, donde fueron acondicionadas las semillas de calabaza (*C. argyrosperma*) antes de su siembra en el campo con las nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre (NPs de ZnO+Cu) (Anexo 1).

➤ Síntesis de las NPs de ZnO+Cu. El método mediante el cual se sintetizaron las NPs de ZnO+Cu fue el de co-precipitación. Se preparó una disolución de nitrato de zinc $[Zn(NO_3)_2]$ (0.5 M) y se disolvió con etanol, posterior a eso se adicionó una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) a una velocidad de 1 mL min^{-1} ; la temperatura a la que se mantuvo la reacción fue de $70\text{ }^\circ\text{C}$. Para las NPs de Cu se utilizó el mismo procedimiento, con la diferencia de que se usó el nitrato de cobre $Cu(NO_3)_2$ como precursor.

Las muestras obtenidas se dejaron reposar por 20 horas a temperatura ambiente, posteriormente fueron lavadas por triplicado con ciclos de centrifugado (7,500 rpm) y resuspensión en agua desionizada, en el último ciclo las muestras fueron lavadas con etanol al 70%. Después se secaron a una temperatura de $170\text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas, y posteriormente se llevaron a un calcinado final por dos horas a una temperatura de $500\text{ }^\circ\text{C}$. Por último, se homogeneizaron las muestras con un mortero de ágata y se almacenaron en recipientes herméticos.

A partir de esta etapa se definieron los tratamientos a evaluar:

- Tratamiento 1 (Testigo): semillas sin la aplicación de nanopartículas de ZnO+Cu, embebidas sólo con agua.

- Tratamiento 2: Aplicación a la semilla de nanopartículas de ZnO+Cu a una concentración de $100\text{ mg ZnO+Cu L}^{-1}$.

- Tratamiento 3: Aplicación a la semilla de nanopartículas de ZnO+Cu a una concentración de $200\text{ mg ZnO+Cu L}^{-1}$.

➤ Caracterización de las NPs de ZnO+Cu

La caracterización de las NPs de ZnO+Cu se hizo con base en las metodologías descritas por Estrada *et al.* (2018), las cuales se describen a continuación.

- *Espectroscopia UV-Vis.* Se realizó un análisis espectral mediante el uso de un espectrofotómetro Cary 8454 UV-Vis Diode Array System (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA.). Los espectros en el rango de 200 a 1,000 nm fueron obtenidos a temperatura ambiente en una celda de cuarzo de 1 cm de paso óptico.

- *Propiedades de absorción óptica.* Se llevó a cabo la técnica de reflectancia difusa mediante un espectrofotómetro Lambda 365 UV-Vis (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA.) equipado con una esfera de integración. Para la referencia se usó sulfato de bario (BaSO₄). Los espectros se registraron en el rango de longitud de onda de 300 a 700 nm en modo de reflectancia y luego se transformaron en coeficientes de absorbancia utilizando la función de Kubelka-Munk.

- *Microscopía electrónica de transmisión.* La morfología de las NPs de ZnO+Cu se examinó utilizando un microscopio electrónico de transmisión JEM-1010 (TEM; JEOL, Peabody, MA, USA.) operado a un voltaje de aceleración de 80 kV. El TEM de alto contraste está equipado con una cámara CCD AMT de 2k × 2k para la adquisición de imágenes digitales. Las rejillas TEM se prepararon colocando una gota (10 µL) de la suspensión de ZnO+Cu en rejillas de cobre recubiertas de carbono, las cuales fueron secadas a temperatura ambiente.

- *Análisis de seguimiento de nanopartículas.* Para determinar el tamaño de partícula y la concentración de partículas, se empleó un NanoSight NS300 (Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido) equipado con un módulo de láser verde de 532 nm. Se utilizó el software NanoSight NTA versión 3.2.16 (Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido) para la adquisición y el análisis de datos; los cuales se registraron con un objetivo de 20× y un videoclip de 60 s. Se utilizó la ecuación de Stokes-Einstein para calcular el diámetro hidrodinámico medio. Se grabaron tres videos de 60 s para proporcionar los valores medios y modales de las NPs de ZnO+Cu. Las muestras se prepararon a una dilución adecuada (0.016 mg mL⁻¹), lo que llevó a una concentración entre 10⁶ y 10⁹ partículas, y se inyectaron en la cámara de muestra, que tiene un volumen de 0.3 mL. Los parámetros de configuración de captura utilizados fueron los siguientes: tipo de cámara: de semiconductores de óxido metálico complementario de muy alta sensibilidad;

nivel de cámara: 9; obturador deslizante: 607; ganancia del control deslizante: 15; número de fotogramas: 1,498; temperatura: 21.1 °C; y viscosidad: (agua) 1.0 cP.

➤ Suspensión con las NPs de ZnO+Cu. Para la preparación de los tratamientos con aplicación de NPs se pesaron 7.5 y 15 mg de NPs de ZnO+Cu y se suspendieron en 30 mL de agua desionizada, posterior a eso, se sonicaron durante 20 minutos a 25 kHz. Las suspensiones resultantes se llevaron a un volumen final de 75 mL donde se colocaron 50 semillas por tratamiento.

➤ Acondicionamiento de las semillas. Las semillas de calabaza se lavaron y se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 1% durante un minuto y después se enjuagaron con agua destilada. Posteriormente, las semillas se sumergieron en las suspensiones previamente preparadas con las NPs de ZnO+Cu y se agitaron durante 24 horas, para los tratamientos considerados. Una vez transcurrido el tiempo, las semillas se sacaron de la suspensión y se transportaron al campo experimental para su siembra.

b) La segunda etapa se desarrolló en campo. La siembra fue el 10 de junio del 2022 de forma manual, se utilizaron semillas de *C. argyrosperma*, a una distancia entre plantas de 4 m; las actividades de campo se presentan en el Anexo 2.

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones. Las observaciones se realizaron en nueve unidades experimentales (UE), cada UE constó de un surco con una separación de 0.8 m, y de 20 m de largo. Entre hileras de plantas se dejaron dos surcos sin sembrar. En total fue una superficie de 400 m². Fueron 5 plantas por unidad experimental, en total 15 por tratamiento, a una densidad de población de 1,125 plantas por hectárea.

El deshierbe se realizó de forma manual. Se aplicó lombricomposta como biofertilizante a una dosis de 8.69 t ha⁻¹, con un volumen de 2 L por mata, a los 35 días después de la siembra (dds). El cultivo se condujo en condiciones de temporal.

Se evaluaron las siguientes variables:

1. Condiciones climáticas: Se registraron los datos diarios de temperatura ambiental, humedad ambiental, y precipitación en la estación meteorológica de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, durante todo el ciclo del cultivo.

2. Fenología: Se registró la aparición de las distintas fases fenológicas, así como la duración de las etapas fenológicas y se determinó el requerimiento térmico con el valor de la temperatura base de 10 °C (Anexo 3).

3. Longitud de la guía: Se registró la primera lectura a los 15 días después de la emergencia (dde), y posteriormente cada 15 días, hasta el inicio de la etapa de senescencia. La lectura se realizó en las cinco plantas de cada UE.

4. Componentes del rendimiento: La cosecha fue el día 26 de octubre de 2022, a los 138 dds, y se determinó lo siguiente:

- Número de frutos por planta.
- Diámetro ecuatorial y polar del fruto.
- Peso del fruto.
- Rendimiento: Se consideró el peso total obtenido en la UE. Este valor se extrapoló a $t \text{ ha}^{-1}$.

c) La tercera etapa se llevó a cabo nuevamente en el laboratorio, para evaluar los siguientes atributos (Anexo 4).

- *Grupos funcionales*. Para poder identificar los grupos funcionales fue necesario extraer la pulpa de tres frutos representativos de cada tratamiento, secarla por 24 horas a 40 °C y después homogeneizar el tamaño de partícula. Posteriormente, se realizó la espectroscopia FTIR-ATR en el rango de 400-4,000 cm^{-1} . Las áreas de las principales bandas del espectro IR fueron calculadas mediante el software Spectrum.

- *Color*. Para los parámetros de color se seleccionaron tres frutos representativos de cada tratamiento; de cada uno de ellos se recortaron tres secciones de la cáscara las cuales sirvieron como superficie de análisis, posterior a eso se tomó la lectura correspondiente con un colorímetro Konica Minolta modelo CR-410 (Konica Minolta, Tokio, Japón), calibrado con una placa de porcelana blanca ($L = 98.36$, $a = 0.08$, $b = 1.24$).

- *Pruebas y porcentaje de germinación (F2)*. Para las pruebas de germinación se realizaron cinco repeticiones de 10 semillas por tratamiento. Las semillas se colocaron sobre toallas de papel, se hidrataron y fueron guardadas en bolsas plásticas y colocadas en una charola dentro de una

cámara de germinación a 27 °C durante 7 días. Para el porcentaje de germinación se contó el número de semillas que presentaron la emergencia de la radícula.

- *Longitud y diámetro de la plántula.* El recuento final de las plántulas se realizó a los siete días. Para la longitud del tallo se tomó como base el inicio del hipocótilo y como fin la base de los cotiledones, los resultados se reportaron en centímetros. El diámetro de la plántula se tomó con la ayuda de un vernier digital. La medición se realizó a la mitad del hipocótilo y los resultados se reportaron en milímetros.

- *Longitud y diámetro de la raíz principal y número de raíces secundarias.* Se midió la longitud y el diámetro de la raíz principal de las plántulas, se considero desde el inicio de la base del hipocótilo hasta el ápice de ésta, los datos se reportaron en centímetros. Así también se cuantificó el número de raíces secundarias y los resultados se reportan como el número promedio.

3.1.1. Análisis estadístico

El experimento se condujo como un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. La separación de medias se realizó con el método de Tukey considerando un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$. El análisis estadístico se realizó con el software Statgraphics® (Statgraphics Inc., USA).

3.2. Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos.

- Para la síntesis de las NPs de ZnO+Cu, se empleó como precursor el nitrato de zinc hexahidratado.
- Nitrato de cobre.
- Etanol.
- Hidróxido de sodio.
- Semilla de calabaza (*C. angyrosperma*).
- Bolsas de plástico.
- Toallas de papel.

- Cámara fotográfica.
- Vernier.
- Lombricomposta.
- Regla.
- Libreta de campo.
- Cinta métrica.
- Báscula granataria.
- Balanza analítica.
- Plancha de agitación magnética con calentamiento.
- Estufa.
- Espectrofotómetro Cary 8454.
- Espectrofotómetro Lambda 365.
- Microscopio electrónico de transmisión JEM-1010.
- NanoSight NS300.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Condiciones climáticas

En la Figura 7 se presentan los valores de temperatura máxima, mínima y media diaria, registradas durante el ciclo del cultivo en campo.

La temperatura media promedio de todo el ciclo fue de 17.7 °C, manteniéndose en un rango desde los 13.8 hasta los 21.2 °C, presentándose una leve disminución general de la temperatura media a finales del ciclo, exactamente a finales de la fase de fructificación. La primera mitad del ciclo se caracterizó por tener temperaturas máximas por arriba de 25 °C, desde la emergencia hasta principios de la floración femenina. Por el contrario, las temperaturas mínimas se presentaron hacia finales de la segunda mitad del ciclo, destacando principalmente dos fechas, el 2 y 14 de octubre las cuales registraron valores de 3.4 y 5.2 °C respectivamente.

CONABIO (2017) estableció un rango óptimo de temperatura para la calabaza entre los 13–30°C, los datos presentados muestran que este elemento climático no fue un limitante para el crecimiento y desarrollo de la planta.

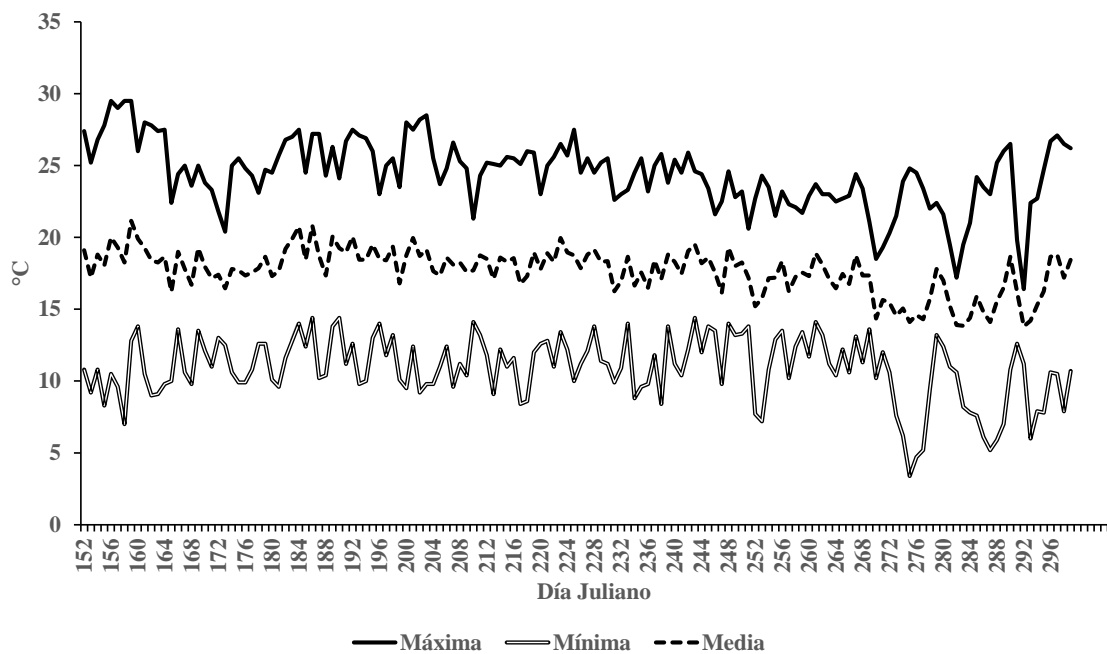


Figura 7. Temperatura ambiental diaria. Ciclo P-V 2022. Estación meteorológica Almaraz.

En la Figura 8 se presenta la distribución diaria de la precipitación y de la evaporación durante el ciclo de cultivo, los valores totales del ciclo fueron de 462.3 y 594.54 mm respectivamente; se observa que existieron condiciones de estrés hídrico para el cultivo, sobre todo en la etapa vegetativa, lo que motivó a que se aplicará dos riegos localizados en cada una de las plantas para que no se deshidrataran.

Se observó que la distribución de las lluvias fue irregular, esto es, ocurrió un evento de precipitación y dejaba de hacerlo durante una semana al menos, y con temperaturas máximas mayores de 25 °C, la tasa de evaporación fue mayor. Desafortunadamente así se presentó en todo el ciclo del cultivo. Destacan tres eventos de precipitación los cuales superaron los 20 mm, los días 16 y 27 de agosto con valores de 27.8 y 21.8 mm respectivamente, y el día 4 de octubre donde la precipitación fue la más alta de todo el ciclo con 49.6 mm. Cabe destacar que los eventos descritos se presentaron en las fases de floración, específicamente en el inicio de floración femenina, en la etapa de fructificación. y en la etapa de maduración del cultivo.

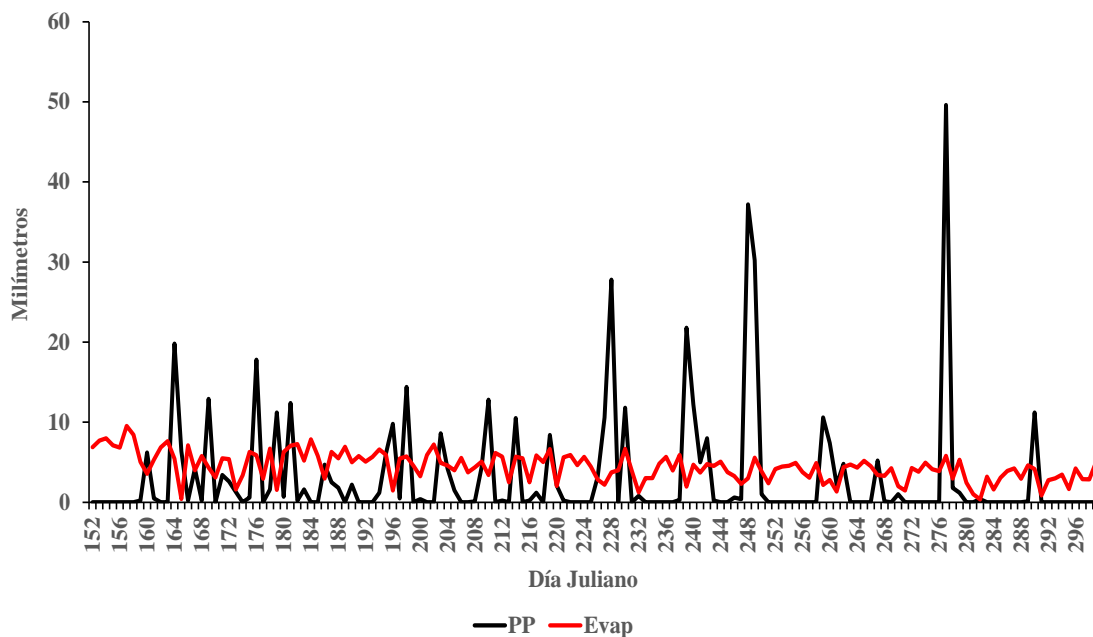


Figura 8. Precipitación y evaporación diaria. Ciclo P-V 2022. Estación meteorológica Almaraz.

4.2. Fenología del cultivo

Las imágenes de la fenología de la calabaza se presentan en el Anexo 3.

En la Tabla 1 se describe la fenología registrada en el ciclo P-V 2022 del cultivo de calabaza, así como la acumulación de calor en cada etapa fenológica.

Tabla 1. Comportamiento fenológico del cultivo de calabaza. Ciclo P-V 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.

| Fase | Porcentaje de avance | Fecha | UC Acumuladas | |
|-----------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------|
| Siembra | | 10 de junio | 0 | 0 |
| Emergencia | Inicio | 18 de junio | | |
| | 80% | 21 de junio | 177.8 | 177.8 |
| Emisión de guía | | 26 de julio | 275.4 | 453.2 |
| Floración | | | | |
| | Inicio Floración Masculina | 1 de agosto | 72.0 | 525.2 |
| | Fin de Floración Masculina | 15 de septiembre | | |
| | Inicio de Floración Femenina | 15 de agosto | 117.8 | 643.0 |
| | Fin de Floración Femenina | 21 de septiembre | | |
| Fructificación | | | | |
| | Inicio | 15 de agosto | | |
| | Termino | 24 de septiembre | 305.7 | 948.7 |
| Cosecha | | 26 de octubre | 185.0 | 1,133.7 |

El cultivo de calabaza tuvo un ciclo de 138 días, transcurrieron 8 días de la siembra para el inicio de la emergencia, y el 80% de la germinación se alcanzó a los 11 dds; 35 dde inició la emisión de las primeras guías. La duración de la floración fue de 52 días y la aparición del primer fruto fue a los 20 días después del inicio de la emisión de guía.

En total se acumularon 1,133.7 unidades calor (UC), siendo la fase de fructificación, la de emisión de guías y la de cosecha, las que más acumularon con valores de 305.7, 275.4 y 185 UC respectivamente.

Asimismo, se monitoreo el crecimiento y desarrollo del cultivo, y se registraron los eventos fenológicos a partir de la fecha de siembra. En la Figura 9 se presentan la fenología del cultivo y los datos de la longitud de guía, la cual se registró cada 15 días después de la emisión de ésta en las plantas. El comportamiento entre tratamientos fue similar, sin embargo, el tratamiento testigo se mantuvo ligeramente por encima de los demás, sobre todo en la etapa de floración. Para la etapa de fructificación el tratamiento con 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ presentó un crecimiento mayor con respecto a los otros dos tratamientos. Para la cosecha, la longitud de guía del 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ superó al tratamiento con 100 mg ZnO+Cu L⁻¹ y al tratamiento testigo, con una diferencia de 40 y 33.9 cm respectivamente.

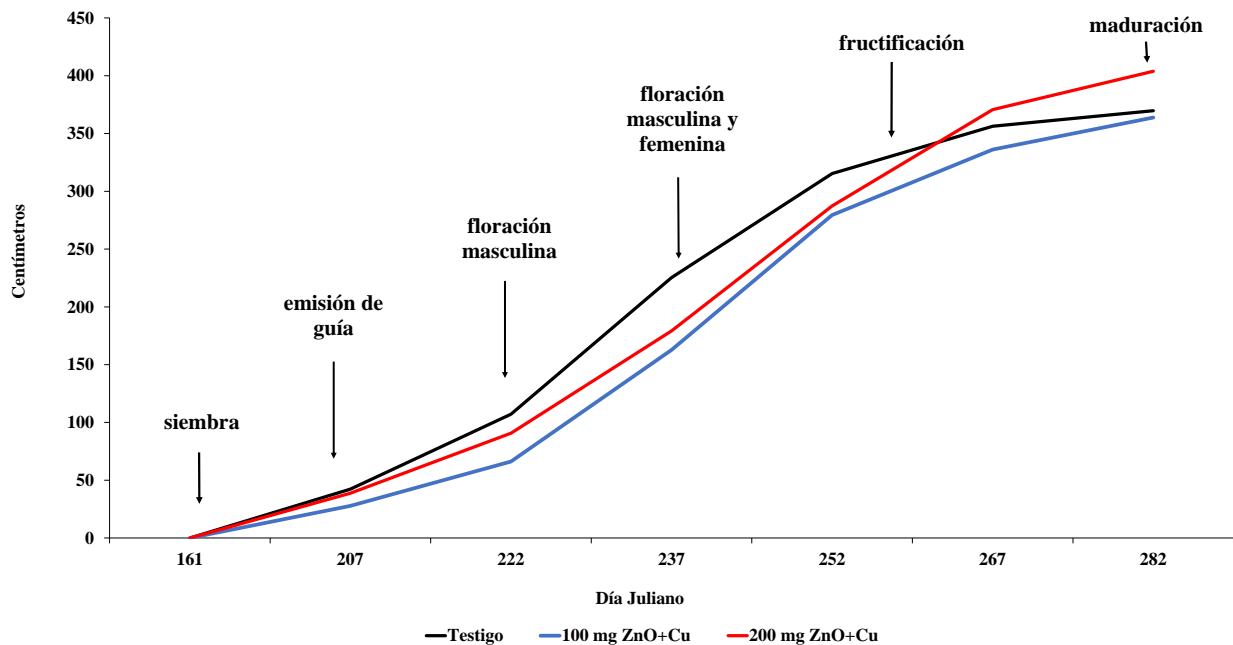


Figura 9. Fases fenológicas y longitud de la guía del cultivo de calabaza por tratamiento aplicado. Ciclo P-V 2022. Estación meteorológica Almaraz.

4.3. Caracterización de nanopartículas de ZnO+Cu

a) *Espectroscopia de absorción UV-Vis*. La espectroscopia de absorción UV-Vis se utiliza ampliamente como técnica para investigar las propiedades ópticas de los óxidos metálicos a nanoescala. En la Figura 10 se muestra el espectro de absorción UV-Vis obtenido de las nanopartículas sintetizadas. Se pudo observar que el máximo de absorción se produjo a los 366 nm, lo que es característico de las NPs de ZnO+Cu. Estos resultados son similares a los encontrados por Mittal *et al.* (2014), quienes informaron sobre un máximo de absorción a los 364 nm en NPs de ZnO+Cu.

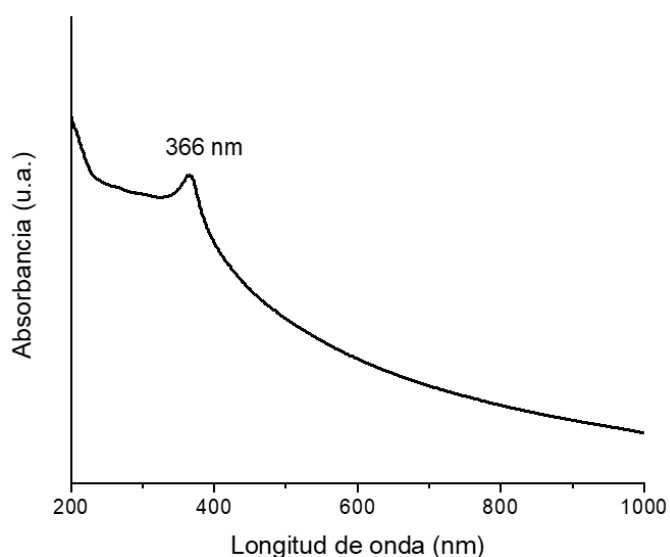


Figura 10. Espectro representativo de absorción UV-Vis de las nanopartículas de ZnO+Cu.

b) *Propiedades de reflectancia*. Para estimar la energía de la banda prohibida de las NPs, se obtuvo el espectro de UV-Vis de reflectancia difusa y éste se transformó con la función de Kubelka-Munk ($[F(R)h\nu]^2$) en relación con la energía del fotón ($h\nu$). Este análisis arrojó un valor estimado de 3.28 eV (Figura 11). Este resultado es similar al valor reportado por Estrada *et al.* (2018) para nanopartículas de ZnO, quienes encontraron un valor de banda prohibida de 3.21 eV.

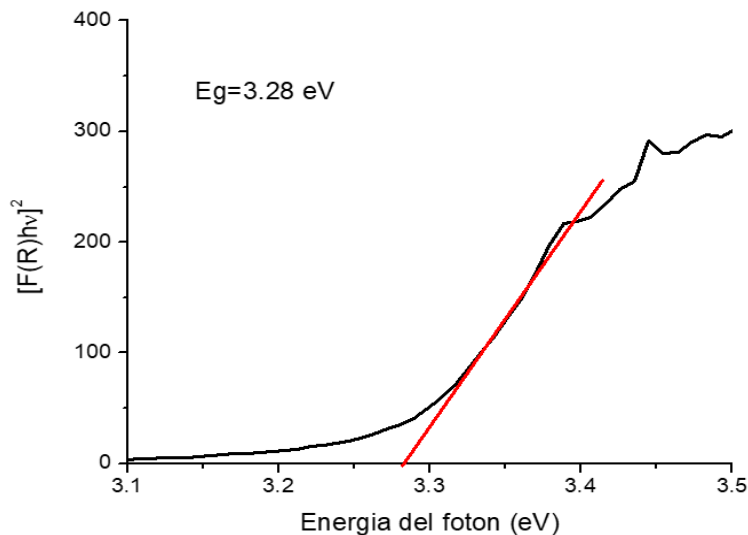


Figura 11. Espectro de reflectancia difusa transformado con la función de Kubelka-Munk para determinar la energía de la banda prohibida las nanopartículas de ZnO-Cu.

c) *Morfología de las NPs de ZnO+Cu.* La microscopía electrónica de transmisión (TEM) presentada en la Figura 12 muestra las NPs de ZnO+Cu sintetizadas, cuya forma mayoritaria resultó ser casi esférica, con diámetros que oscilaron entre los 34 y los 95 nm. Este rango amplio de tamaño de partículas podría deberse al proceso de nucleación y crecimiento de las nanopartículas, los cuales dependen del tiempo de síntesis. También se evidenció una cierta aglomeración, que puede atribuirse a la elevada superficie específica y energía superficial de las partículas.

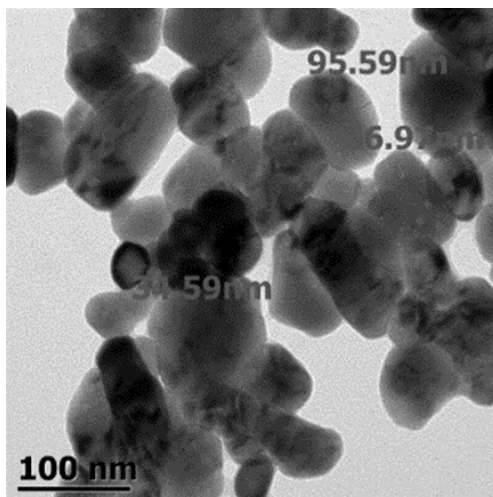


Figura 12. Imagen ilustrativa de la microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de ZnO+Cu.

d) *Tamaño de partículas y concentración de partículas usando NTA.* En la Figura 13 se presenta la distribución del tamaño de partículas de las NPs de ZnO+Cu sintetizadas. Los resultados obtenidos mediante la técnica TEM mostraron una distribución de tamaño bastante estrecha, entre 34 y 95 nm, mientras que con la técnica de análisis de seguimiento de nanopartículas (NTA) se obtuvo una distribución de tamaño relativamente amplia, entre 126 y 404 nm. La mayoría de las NPs de ZnO+Cu obtuvieron un diámetro de alrededor de 126.5 y 234 nm, y también se encontró otra población con un diámetro de 404 nm. Las partículas con mayor diámetro hidrodinámico podrían deberse a la formación de agregados a partir de partículas primarias presentes en la suspensión.

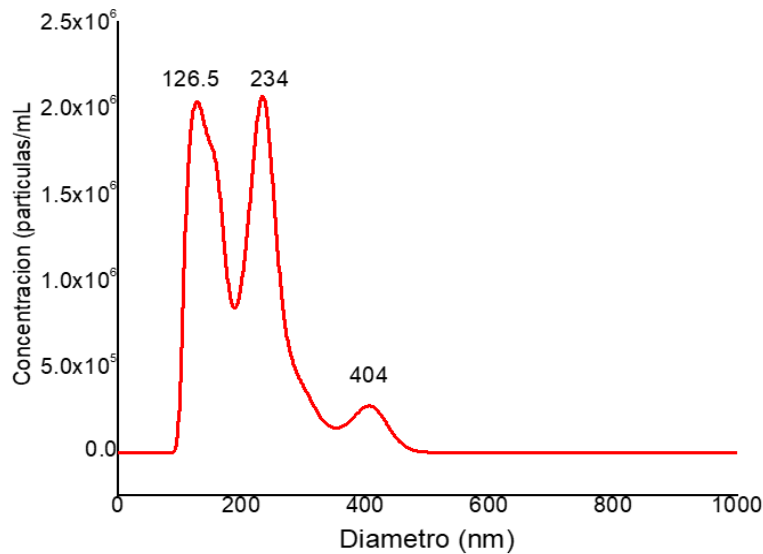


Figura 13. Distribución de tamaño y concentración de partículas de ZnO+Cu determinados con la técnica de análisis de seguimiento de nanopartículas.

4.4. Componentes del rendimiento

En la Tabla 2, se presentan los valores de los componentes del rendimiento evaluados, y los ANDEVAS correspondientes a las variables evaluadas se encuentran en los Anexos 5 al 8.

Tabla 2. Componentes del rendimiento del cultivo de calabaza. Ciclo P-V 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.

| Tratamiento | Numero de frutos por planta | Diámetro (cm) | | Peso Fruto (g) | Rendimiento (t ha ⁻¹) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------|
| | | Ecuatorial | Polar | | |
| Testigo | 2.4 ^a | 51.5 ^a | 46.9 ^a | 1,555.3 ^a | 9.2 ^a |
| 100 mg ZnO+Cu L ⁻¹ | 1.6 ^a | 54.0 ^a | 49.9 ^a | 1,714.8 ^a | 7.3 ^a |
| 200 mg ZnO+Cu L ⁻¹ | 2.1 ^a | 52.0 ^a | 49.2 ^a | 1,688.1 ^a | 9.6 ^a |

Medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, α 0.05).

El mayor número de frutos por planta lo obtuvo el tratamiento testigo con un total de 2.4 frutos seguido del tratamiento con 200 y 100 mg L⁻¹ con un total de 2.1 y 1.6 frutos respectivamente.

En cuanto al diámetro ecuatorial, el tratamiento con 100 mg L⁻¹ presentó el valor más alto (54 cm), mientras que el tratamiento testigo obtuvo el valor más bajo (51.5 cm). Por otro lado, en relación con el diámetro polar, en el tratamiento con 100 mg L⁻¹ se obtuvo el valor más alto (49.9 cm), mientras que el tratamiento testigo fue el valor más bajo (46.9 cm).

En cuanto al peso promedio del fruto, el tratamiento con 100 mg L⁻¹ registró el valor más alto (1,714.8 g), mientras que el tratamiento testigo obtuvo el valor más bajo (1,555.3 g); sin embargo, es importante señalar que las diferencias fueron numéricas entre los tratamientos.

En el tratamiento con 200 mg L⁻¹ se obtuvo el valor más alto de rendimiento (9.6 t ha⁻¹), seguido del tratamiento testigo (9.2 t ha⁻¹) y el tratamiento con 100 mg L⁻¹ (7.3 t ha⁻¹), aunque no existieron diferencias estadísticas significativas.

El tratamiento con 100 mg L⁻¹ fue el más efectivo en términos de diámetro ecuatorial, diámetro polar y peso del fruto, sin embargo, el tratamiento con 200 mg L⁻¹ fue el mejor en términos de rendimiento. Es importante tener en cuenta que las diferencias numéricas entre los tratamientos no

son muy grandes, y estadísticamente no existió diferencia significativa entre los tratamientos, esto para todos los parámetros evaluados.

Aunque no se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos, se apreció el impacto positivo que tuvieron las nanopartículas en el cultivo; con relación al número de frutos por planta, se encontró que este no es un indicador directo del rendimiento, ya que, aunque se obtuvo un mayor número de frutos por planta en el tratamiento testigo, estos fueron más pequeños y de menor peso. Asimismo, el tratamiento con el rendimiento más alto no fue el que presentó un mayor valor en cuanto a los diámetros de los frutos. Es importante destacar que, a pesar de las condiciones de precipitación irregular, se obtuvieron resultados positivos en estos parámetros.

4.5. Grupos funcionales

Los espectros FTIR-ATR para la pulpa de calabaza se muestran en la Figura 14, y sus bandas correspondientes, así como sus asignaciones en la Tabla 3.

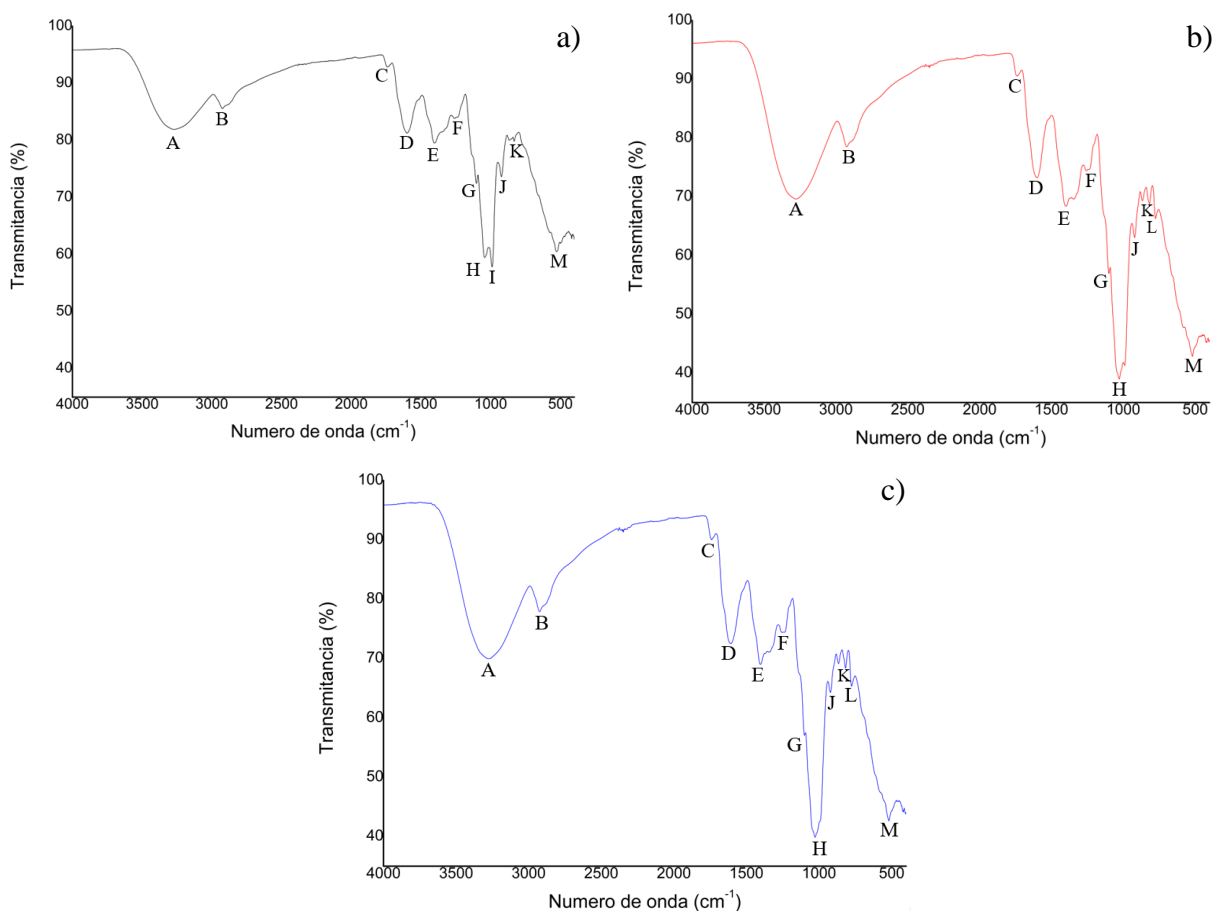


Figura 14. Espectros de infrarrojo del grupo testigo (a), 100 mg ZnO+Cu L⁻¹ (b) y 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ (c).

Se identificaron varias vibraciones en un rango de longitud de onda de 4000-400 cm⁻¹ incluyendo una vibración de estiramiento del enlace OH relacionado con el agua en el rango de 3,268-3,278 cm⁻¹ (banda A) y una vibración de estiramiento CH simétrico/asimétrico relacionada con los lípidos en 2,924 cm⁻¹ (banda B). También se encontró una vibración fuerte de estiramiento C=C de los aromáticos relacionados principalmente con las proteínas en el rango de 1,599-1,606 cm⁻¹ (banda D), una flexión simétrica del grupo CH correspondiente a los polisacáridos y la celulosa en la banda E en 1,396-1,404 cm⁻¹, y una deformación asimétrica COH perteneciente a la celulosa y la hemicelulosa en la banda F en 1,254-1,258 cm⁻¹. Se demostró un estiramiento/flexión de COH de

los carbohidratos en el rango de 1,026-1,044 cm^{-1} (banda H), y se encontraron vibraciones débiles relacionadas con los enlaces CO de los carbohidratos en las bandas I, J y K en el rango de 819-990 cm^{-1} . En la banda L en 777 cm^{-1} , se encontró un balanceo del enlace CH pero solo en los tratamientos con 100 mg ZnO+Cu L^{-1} y 200 mg ZnO+Cu L^{-1} . Por último, se encontró una flexión en CC=O correspondiente a los ácidos carboxílicos en la región de 519-526 cm^{-1} (banda M). Las bandas obtenidas concuerdan con lo reportado en la literatura para el análisis de pulpa de calabaza (Sosa, 2016.; Sosa *et al.*, 2017).

Tabla 3. Asignaciones de las bandas principales presentes en los espectros FTIR-ATR de la pulpa de calabaza.

| Banda | Numero de onda (cm^{-1}) | | | Grupo funcional |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| | Testigo | 100 mg ZnO+Cu L^{-1} | 200 mg ZnO+Cu L^{-1} | |
| A | 3,268 | 3,278 | 3,275 | O-H (Estiramiento) |
| B | 2,925 | 2,924 | 2,924 | Estiramiento simétrico/asimétrico de C-H (lípidos) |
| C | 1,739 | 1,738 | 1,741 | C=O (Estiramiento) |
| D | 1,599 | 1,600 | 1,606 | Estiramiento aromático C=C |
| E | 1,404 | 1,396 | 1,398 | Flexión C-H simétrica de CH_3/CH_2 (lípidos, polisacáridos y celulosa). |
| F | 1,258 | 1,254 | 1,254 | Deformación asimétrica C-O-H (hemicelulosa y celulosa) |
| G | 1,102 | 1,099 | 1,099 | C-O (Estiramiento) (carbohidratos) |
| H | 1,044 | 1,028 | 1,026 | Estiramiento C-O/flexión C-O de C-O-H (carbohidratos) |
| I | 990 | - | - | C-O (Estiramiento) |
| J | 921 | 921 | 921 | C-O (Estiramiento) |
| K | 830 | 815 | 819 | =CH ₂ |
| L | - | 777 | 777 | C-H (Balanceo) |
| M | 526 | 519 | 519 | O-H (Estiramiento) |

En la Tabla 4 se muestran las áreas de cada una de las bandas de los espectros FTIR-ATR. En general, se observaron diferencias estadísticas significativas en el área de las bandas de los tratamientos con 100 y 200 mg L^{-1} comparados con el tratamiento testigo, sin embargo, el comportamiento entre los tratamientos con 100 y 200 mg L^{-1} fue similar y no mostró diferencia estadística significativa. En las semillas tratadas con NPs de ZnO+Cu se observó un marcado incremento en casi todas las áreas de banda en los espectros, más notablemente en las bandas relacionadas con el agua, las proteínas, la hemicelulosa, la celulosa, los polisacáridos, los lípidos y

los carbohidratos. Estos resultados son de suma importancia ya que muestran que los frutos tratados con nanopartículas aumentaron la cantidad de grupos funcionales relacionados con los componentes principales del análisis químico proximal, lo cual a su vez cobra relevancia para la industria alimentaria.

Tabla 4. Áreas de las principales bandas FTIR-ATR de la pulpa de calabaza.

| Banda | Área de banda (unidades de área) | | |
|-------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Testigo | 100 mg ZnO+Cu L ⁻¹ | 200 mg ZnO+Cu L ⁻¹ |
| A | 2,147.45 ^a | 4,270.47 ^b | 4,215.01 ^b |
| B | 270.73 ^a | 513.39 ^b | 504.26 ^b |
| C | 36.63 ^a | 73.44 ^b | 75.49 ^b |
| D | 1,033.11 ^a | 1,551.31 ^b | 1,636.20 ^c |
| E | 567.76 ^a | 1,058.05 ^b | 1,037.96 ^b |
| F | 10.80 ^a | 18.82 ^b | 20.20 ^b |
| G | 31.98 ^a | 47.09 ^b | 45.77 ^b |
| H | 255.84 ^a | 306.13 ^b | 289.16 ^c |
| I | 216.47 | - | - |
| J | 120.27 ^a | 110.71 ^b | 78.63 ^c |
| K | 10.74 ^a | 57.20 ^b | 58.66 ^b |
| L | - | 71.29 | 83.44 |
| M | 36.38 ^a | 49.05 ^b | 46.20 ^b |

Medias con la misma letra en la misma fila no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, α 0.05).

La relevancia de la espectroscopia realizada reside en su capacidad para identificar los diferentes tipos de átomos y enlaces químicos presentes en las moléculas, y a su vez, permite establecer relaciones con macromoléculas como proteínas, lípidos, carbohidratos, entre otros. Sin embargo, más allá del tipo de enlace presente, lo realmente significativo es la cantidad de enlaces que se encuentran en las muestras analizadas, ya que si bien se encontraron los mismos tipos de enlaces en los tres tratamientos, no sucedió lo mismo en relación a la cantidad, siendo los tratamientos con 100 y 200 mg L⁻¹ los que obtuvieron una mayor cantidad en la mayoría de las bandas.

4.6. Color

Los resultados de las pruebas de color de la cáscara de calabaza se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de color de la cáscara de calabaza.

| | Testigo | 100 mg ZnO+Cu L⁻¹ | 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ |
|----------------|--------------------|---|---|
| a* | -7.68 ^a | -6.53 ^{ab} | -3.24 ^b |
| ΔE | 52.04 ^a | 56.09 ^{ab} | 67.44 ^b |
| Croma | 21.52 ^a | 17.26 ^{ab} | 9.24 ^b |
| Ángulo Hue (h) | 70.17 ^a | 68.14 ^a | 72.50 ^a |

Medias con la misma letra en la misma fila no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, α 0.05).

El valor de la coordenada a* en la escala de color representa la tendencia hacia el color verde o rojo. Una medición de color en la dirección +a* muestra un desplazamiento hacia el rojo y una medición en la dirección -a* muestra un desplazamiento hacia el color verde (Figura 15). El tratamiento testigo es el que se encontró con mayor desplazamiento negativo lo cual indicó que tiende más al verde, por el contrario, el tratamiento con 200 mg L⁻¹ contó con un valor menor lo cual significa que de igual manera se tuvo un desplazamiento hacia el color verde, pero éste fue menor en comparación con el tratamiento testigo y el tratamiento con 100 mg L⁻¹. Estadísticamente se encontró diferencia significativa entre el tratamiento testigo y el tratamiento con 200 mg L⁻¹, esto con un nivel de confianza del 95%. Por su parte, el tratamiento con 100 mg L⁻¹ y el tratamiento con 200 mg L⁻¹ no presentaron diferencia estadística significativa.

Los valores mostrados con relación a la coordenada a* no implican de manera independiente un efecto positivo o negativo de los tratamientos, ya que este parámetro simplemente indica que la tendencia del color de los frutos es al verde, descartando la presencia de otros colores como el amarillo o blanco.

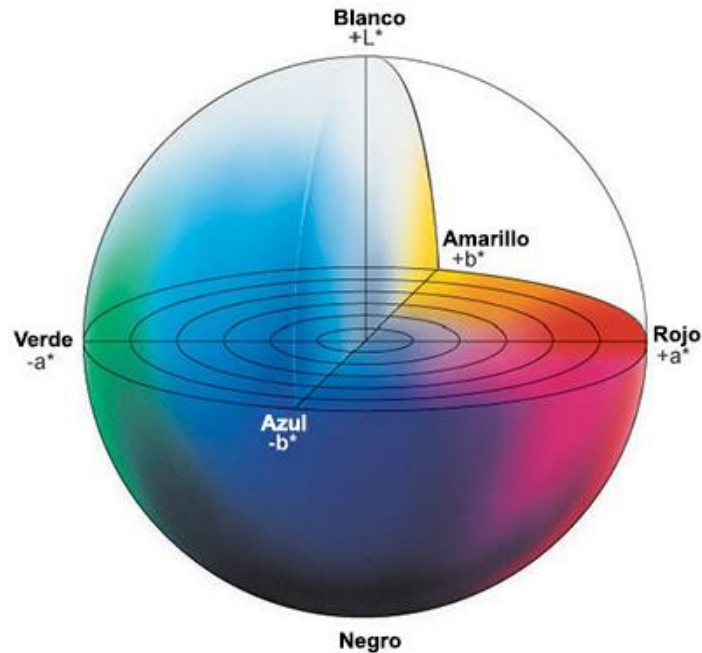


Figura 15. Sistemas de coordenadas “a” y “b” de la escala de color (Konica, 2006).

El croma describe el nivel de saturación de un color en particular, es decir, que tan cerca está el color ya sea del gris o del matiz puro. La Figura 16 muestra como entre más se acerca al centro los colores son más apagados o sucios y con tendencia al gris; sin embargo, al avanzar hacia la periferia los colores se vuelven más vivos o limpios. Para el caso de la cáscara de calabaza el tratamiento testigo presentó una cromaticidad mayor con un valor de 21.52, dicho valor mostró una diferencia estadística significativa con el tratamiento con 200 mg L^{-1} , esto a su vez coincide con el valor de la coordenada a^* ya que ahí también obtuvo un mayor valor negativo en comparación con el tratamiento con 200 mg L^{-1} . El tratamiento con 100 mg L^{-1} y el tratamiento con 200 mg L^{-1} obtuvieron un valor de croma de 17.26 y 9.24 respectivamente, dichos valores no presentaron diferencia estadística significativa. Todo lo anterior se traduce en que se tuvieron frutos más verdes y coloridos en el tratamiento testigo y frutos verdes pero un poco más oscuros en el tratamiento con 200 mg L^{-1} .

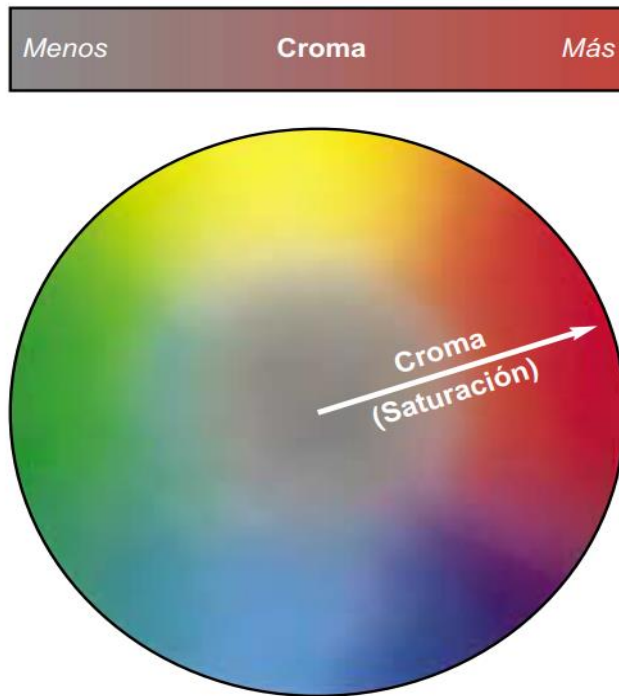


Figura 16. Grado de saturación (Xrite, 2002).

Cuando se quiere identificar un color lo primero que se hace es localizar el matiz, éste en esencia es el color de un objeto ya sea rojo, anaranjado, amarillo, azul, etc. Se determina a través del ángulo Hue (h) y se expresa en grados. El círculo de color de la Figura 17 muestra los distintos colores que se pueden presentar, así como sus mezclas y posibles combinaciones.

El valor del ángulo Hue de 72.50° indica que el tratamiento con 200 mg L^{-1} es más verde en su matiz que el tratamiento testigo (70.17°) y el tratamiento con 100 mg L^{-1} (68.14°). Sin embargo, no existe mucha diferencia numérica entre estos valores, la mayor desigualdad es de 4.26° y ésta se presenta entre el tratamiento con 200 mg L^{-1} (72.50°) y el tratamiento con 100 mg L^{-1} (68.14°). Lo anterior no indica que un tratamiento tenga frutos más verdes como tal, ya que influyen los factores antes mencionados como el valor de la coordenada a^* y el croma. Si bien se encontró una diferencia mínima numérica entre los tratamientos, no existió diferencia estadística significativa.

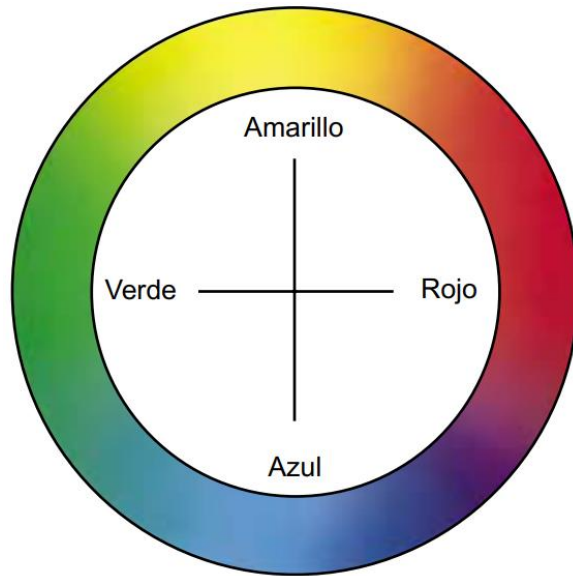


Figura 17. Niveles de Matiz (Xrite, 2002a).

Todos los frutos exhibieron un verde característico en términos de la coordenada a^* y el ángulo Hue, sin embargo, en cuanto al grado de saturación, se obtuvo que los tratamientos con nanopartículas mostraron un verde más oscuro, lo cual es más característico de la especie y, por ende, más atractivo.

Independientemente de su calidad nutricional, este color más oscuro representa una mayor calidad, lo cual se traduce en una mayor probabilidad de compra, desde un punto de vista económico.

4.7. Pruebas de germinación

Los valores obtenidos de los parámetros registrados en las pruebas de germinación de las semillas de calabaza se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de las pruebas de germinación de las semillas de calabaza (F2).

| | Testigo | 100 mg ZnO+Cu L⁻¹ | 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ |
|-------------------------------|--------------------|---|---|
| Porcentaje de germinación (%) | 40 ^a | 76 ^b | 88 ^b |
| Longitud de raíz (cm) | 10.85 ^a | 12.49 ^a | 12.96 ^a |
| Diámetro de raíz (mm) | 1.74 ^a | 1.31 ^b | 1.32 ^b |
| Longitud de tallo (cm) | 7.90 ^a | 14.86 ^b | 15.92 ^b |
| Diámetro del tallo (mm) | 2.79 ^a | 1.94 ^b | 2.04 ^b |
| Numero de raíces | 10.73 ^a | 11.62 ^a | 11.69 ^a |

Medias con la misma letra en la misma fila no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, α 0.05).

Las semillas tratadas con 200 mg L⁻¹ y con 100 mg L⁻¹ mostraron un porcentaje de germinación del 88 y 76%, en contraste con las semillas del tratamiento testigo cuyo valor fue del 40%. El análisis estadístico no arrojó una diferencia significativa entre los tratamientos con la aplicación de nanopartículas; sin embargo, si se encontró diferencia estadística significativa de los tratamientos ya mencionados contra el tratamiento testigo, habiendo una diferencia de porcentaje de 48 y 36%, respectivamente. Esto demostró que las nanopartículas tuvieron un impacto positivo en la germinación de las semillas de calabaza de la F2. En cuanto a la longitud de raíz, la mayor variación de longitudes se encontró entre el tratamiento testigo y el tratamiento con 200 mg L⁻¹ con una diferencia de 2.11 cm; sin embargo, esta diferencia numérica de valores no fue suficiente para que existiera diferencia estadística significativa entre ellos. De igual manera no existió diferencia significativa entre el tratamiento con 100 mg L⁻¹ y el tratamiento con 200 mg L⁻¹. Uno de los parámetros en el cual el tratamiento testigo obtuvo una diferencia estadística significativa en comparación con el tratamiento con 100 mg L⁻¹ y el tratamiento con 200 mg L⁻¹ fue en el diámetro de la raíz en el cual dicho tratamiento superó al tratamiento con 100 mg L⁻¹ y el tratamiento con 200 mg L⁻¹ con una diferencia de 0.43 y 0.42 mm respectivamente. Con respecto a la longitud del tallo se encontró una diferencia significativa entre el tratamiento con 100 mg L⁻¹ y el tratamiento con 200 mg L⁻¹ con respecto del tratamiento testigo; sin embargo, al comparar los tratamientos con nanopartículas no se encontró diferencia estadística significativa entre ellos. En cuanto al diámetro

del tallo se tuvo que con un valor de 2.79 mm el tratamiento testigo mostró una diferencia estadística significativa en comparación con el tratamiento con 100 mg L⁻¹ y el tratamiento con 200 mg L⁻¹ con una diferencia de 0.85 y 0.75 mm respectivamente. Al igual que el parámetro de longitud de tallo, no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos con nanopartículas. Por último, en cuanto al número de raíces no se encontró diferencia estadística significativa entre los tres tratamientos.

Se pudo observar una notable mejora positiva en la mayoría de los parámetros de germinación, en los tratamientos con nanopartículas; en particular, el porcentaje de germinación mostró que el tratamiento con 200 mg L⁻¹ superó más del doble al tratamiento control, lo cual indica una mejora significativa en la viabilidad de las semillas. Además, esta mejora se consolidó posteriormente al observar que el mismo tratamiento mostró una mayor longitud de la raíz, longitud del tallo y número de raíces en comparación con los otros tratamientos.

V. CONCLUSIONES

1. Se cumplieron los objetivos de este trabajo, se acepta la hipótesis de trabajo, a pesar de no existir diferencia estadística significativa en los componentes de rendimiento, si se observó una respuesta diferencial del cultivo a las aplicaciones con diferentes dosis de NPs de ZnO+Cu, con respecto a los parámetros morfométricos, como el número de frutos por planta, peso y diámetro polar-ecuatorial del fruto, longitud de la guía, entre otros.
2. La incorporación de las NPs de ZnO+Cu en el cultivo de calabaza en condiciones de temporal en Cuautitlán Izcalli, México, presenta una alternativa para mejorar la calidad de los frutos.
3. El comportamiento fenológico del cultivo de calabaza no estuvo influenciado por la aplicación de las NPs de ZnO+Cu y fue solamente el correspondiente al tipo de crecimiento de esta especie.
4. Los resultados obtenidos de los componentes de rendimiento evaluados estuvieron influenciados por la aplicación de las NPs de ZnO+Cu las cuales contribuyeron en el incremento del diámetro polar y ecuatorial del fruto, peso del fruto y rendimiento, con respecto al tratamiento testigo, aunque no existió significancia estadística.
5. La influencia de las NPs de ZnO+Cu empleadas fue estadísticamente significativa con respecto al tratamiento testigo, puesto que mejoraron las características de color, cantidad de grupos funcionales y en las pruebas de germinación.
6. La aplicación de NPs de ZnO+Cu no generó un incremento significativo en los componentes de rendimiento, pero se presenta como una alternativa para disminuir el uso de fertilizantes inorgánicos y con ello disminuir el potencial de contaminación del suelo y los acuíferos, debido a la lixiviación de esos elementos.

VI. RECOMENDACIONES

1. La variabilidad de la ocurrencia de precipitación en condiciones de temporal, disminuyeron la posibilidad de reconocer mayormente el impacto de la aplicación de NPs de ZnO+Cu en el crecimiento y desarrollo del cultivo de calabaza, por lo que se recomienda realizar estos ensayos en condiciones de riego, para así observar la expresión completa de estas nanopartículas.
2. Asimismo, continuar con más evaluaciones de la aplicación de las NPs de ZnO+Cu en los cultivos, por ejemplo, de manera foliar, o bien, fraccionar en varios momentos durante el ciclo de los cultivos.

VI. LITERATURA CITADA

1. Ángeles, F.S.B. 2022. Determinación de la normal climática de 1987a 2022 de la Estación Meteorológica Almaraz. Tesis de licenciatura. Universidad nacional autónoma de México. En: <http://132.248.9.195/ptd2022/junio/0826117/Index.htm> Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
2. Apáez, B.P., Lara, C.M.B., Apáez, B.M., Raya, M.Y.A. 2019. Producción y rentabilidad de calabacita con aplicación de zeolita y fertilizante químico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 23: 211-221.
3. Aguirrezábal, L., Orioli, G., Hernández, L., Pereyra V., Miravé, J. 1996. Girasol Aspectos fisiológicos que determinan el rendimiento. En: <https://silo.tips/download/girasol-aspectos-fisiologicos-que-determinan-el-rendimiento-aguirrezabal-lan-ori>. Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
4. Buu, N.Q., Hien, D.T., Chau, N.H., Tin, T.X., Van, N.T. Duong, K.T., Ha, H.T. 2014. Effects of nano crystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (Vietnamese species DT-51). *Vietnam Academy of Science and Technology*, 5(1):1-7.
5. Carrillo, R., González, M. 2009. La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 2(2): 50-63.
6. Chinnamuthu, C.R., Boopathi, M. 2009. Nanotechnology and Agroecosystem. *Tamil Madras Agric. J.*, 96(1-6):17-31.
7. CONABIO. 2017. *Cushaw Cucurbita argyrosperma argyrosperma*. Sistema de información de organismos vivos modificados (SIOVM). En: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20832_especie.pdf. Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
8. Dreamstime. 2022. Fenología del cultivo de calabaza. En: <https://es.dreamstime.com/etapas-del-crecimiento-de-la-planta-calabaza-ilustraci%C3%B3n-vector-cucurbit%C3%A1ceos-cucurbita-ciclo-vida-calabaz-en-el-fondo-blanco-image141689147>. Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
9. Estrada, U.J., Cruz, A.A., Santander, G.M., Méndez, A.A., Vázquez, D.A. 2018. Nanoscale Zinc Oxide Particles for Improving the Physiological and Sanitary Quality of a Mexican Landrace of Red Maize. *Nanomaterials*, 8(4): 247.
10. Infoabe. 2022. Cuál es el origen de Cuautitlán Izcalli. En: <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/01/27/cual-es-el-origen-de-cuautitlan-izcalli/>. Fecha de consulta el 25 de febrero de 2023.

11. Konica. 2006. Sistemas de coordenadas “a” y “b”. En: <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>. Fecha de consulta el 25 de febrero de 2023.
12. Krishna, K., Natarajan, N. 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(9): 1376-1381.
13. Lira, R., Méndez, B., Vera, I., De los Santos, G. 2016. Potencial de la nanotecnología para el desarrollo de la agricultura sustentable. En: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/336/1/Potencial%20de%20la%20Nanotecnolog%C3%ADa%20Para%20el%20Desarrollo%20de%20la%20Agricultura%20Sustentable.pdf>. Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
14. Lira, R., Méndez, B., Vera, I., De los Santos, G. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2): 9-24.
15. Liza, D. 2019. Efecto del dopaje con cobalto o plata en las propiedades estructurales, ópticas y fotocatalíticas de nanopartículas de titanato de zinc y óxido de zinc. Tesis de licenciatura, universidad nacional de Trujillo. En: <https://dspace.unitri.edu.pe/bitstream/handle/UNITRI/13205/LIZA%20CASTILLO%2c%20Diana%20Carolina.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Fecha de consulta el 9 de enero de 2022.
16. Mahmoodzadeh, H., Nabavi, M., Kashefi, H. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brasica napus*). *Journal of Ornamental and Horticultural Plants*, 3(1): 25-32.
17. Méndez, A.B., Vera, R.I., Mendoza, M.E., García, C.L.A., Puente, U.B.A., Lira, S.R.H. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 8(2): 140-156.
18. Mendoza, G., Rodríguez, J. 2007. La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles latinoamericanos*, 29: 161-186.
19. Mercado, M.G., Granados, M., Reyes, L.D., López, A.H., Canales, T.L, Severiano, L.J.H., Valencia, I.C.E. 2015. Variabilidad espacial de parámetros químicos de un suelo vertisol, con manejo convencional y orgánico. *Memorias del XL Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. San Luis Potosí, S.L.P. México.
20. Mittal, M., Sharma, M., Pandey, O.P. 2014. UV–Visible light induced photocatalytic studies of Cu doped ZnO nanoparticles prepared by co-precipitation method. *Solar Energy*, 10: 386-397.
21. Pudake, R., Chauhan, N., Kole, C. 2019. *Nanoscience for sustainable agriculture*. Springer International Publishing.

22. Palomo, A., Gaytán, A., Godoy, S. 2003. Rendimiento, componentes del rendimiento y calidad de fibra del algodón en relación con la dosis de nitrógeno y la densidad poblacional. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(3): 167-171.
23. Pech, E. 2019. La diversidad de maíz, frijol y calabaza en la milpa maya de Xoy, Peto, Yucatán. Tesis de maestría, Centro de investigación científica de Yucatán, A.C. En: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1510/1/PCB_M_Tesis_2019_Elia_Mar%C3%ADa_Ku_Pech.pdf. Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
24. Pérez, D., González, A., Arriaga, M., Franco, O., Pascual, J., Padilla, A. 2015. Análisis de 35 cultivares de haba por su producción de vaina verde y otros componentes del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7): 1601-1613.
25. Rekha K., Nirmala M., Nair M., Anukaliani A. (2010). Structure, optical, photocatalytic and antibacterial activity of zinc oxide and manganese doped zinc oxide nanoparticles. *Physica B: Condensed Matter*, 405(15): 3180-3185. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2010.04.042>
26. Ruiz, N., García, J., Lira, R., Vera, I., Méndez, B. 2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. En: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/330/1/Efecto%20de%20Nanopart%20c3%adculas%20Met%20c3%a1licas%20y%20Derivadas%20del%20Carb%20c3%b3n%20en%20la%20Fisiolog%20c3%ada%20de%20Semillas.pdf> Fecha de consulta el 16 de diciembre de 2022.
27. SIACON (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta). 2021. Valores de producción *Cucurbita argyrosperma*. En: <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>. Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
28. SIAP. 2019. Panorama agroalimentario 2019. En: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2019/Atlas-Agroalimentario-2019 Fecha de consulta el 16 de agosto de 2022.
29. Sosa, A. 2016. Diseño y elaboración de harina integral de calabaza “*Cucurbita lundelliana*” para consumo humano. Tesis de maestría. Instituto tecnológico de Villahermosa. En: http://villahermosa.tecnm.mx/docs/departamentos/tesis/repositorio_de_tesis_2014-2020/Tesis%20Alicia%20Sosa%20Medina.pdf. Fecha de consulta el 23 de febrero de 2023.
30. Sosa, A., Hernández, R., Antonio, R., Arellano, S. 2017. Caracterización de la calabaza criolla “*Cucurbita lundelliana*” F-TIR y absorción atómica. *Revista de la Invención Técnica*, 1(4): 10-21.
31. Xrite. 2002. Figura del grado de saturación. En: https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper_pdfs/110-001_a_guide_to_understanding_color_communication/110-001_understand_color_es.pdf. Fecha de consulta el 5 de marzo de 2023.

32. Xrite. 2002a. Figura del nivel de matiz. En: https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper_pdfs/110-a_guide_to_understanding_color_communication/110-001_understand_color_es.pdf. Fecha de consulta el 5 de marzo de 2023.

ANEXOS

Anexo 1. Actividades realizadas en el laboratorio.

Desinfección de semillas antes de aplicar tratamientos



Preparación de suspensiones con las NPs de ZnO+Cu



Continuación Anexo 1.

Acondicionamiento de las semillas



Anexo 2. Actividades realizadas en campo.



Continuación Anexo 2.

Donde:

a: Siembra.

b: Aplicación de lombricomposta.

c, d: Aporque de planta.

e, f: Corte de flor masculina.

g: Etiquetado de frutos.

h: Determinación del peso de fruto.

i: Medición del diámetro ecuatorial de los frutos.

j: Medición del diámetro polar de los frutos.

Anexo 3. Fenología del cultivo de calabaza, ciclo P-V 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.



Continuación Anexo 3.



Donde:

a: Siembra.

b: Emergencia.

c, d, e: Etapa vegetativa.

f, g: Elongación de guía.

h, i: Floración.

j: Floración femenina.

k: Floración masculina.

l, m: Fructificación.

n: maduración.

o: cosecha.

Anexo 4. Actividades de laboratorio posterior a la cosecha.

Extracción de pulpa, secado y licuado para realizar pruebas de grupos funcionales



Pruebas de germinación



Mediciones en plántulas



Anexo 5. Análisis de varianza (ANDEVA) de los componentes de rendimiento

ANDEVA del número de frutos por planta.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|--------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 0.822 | 0.411 | 0.85987 | 5.14 ^{NS} | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 2.866 | 0.478 | | | |
| Total | 8 | 3.688 | | | | |

ANDEVA del diámetro ecuatorial de los frutos de calabaza.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|--------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 10.500 | 5.250 | 0.44254 | 5.14 ^{NS} | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 71.180 | 11.863 | | | |
| Total | 8 | 81.680 | | | | |

ANDEVA del diámetro polar de los frutos de calabaza.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|--------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 16.676 | 8.338 | 1.90941 | 5.14 ^{NS} | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 26.200 | 4.367 | | | |
| Total | 8 | 42.876 | | | | |

Continuación Anexo 5.

ANDEVA del peso promedio de los frutos de calabaza.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 43750.016 | 21875.008 | 0.54124 | 5.14 ^{NS} | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 242497.660 | 40416.277 | | | |
| Total | 8 | 286247.676 | | | | |

ANDEVA del rendimiento de calabaza.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 9.429 | 4.714 | 0.23675 | 5.14 ^{NS} | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 119.480 | 19.913 | | | |
| Total | 8 | 128.909 | | | | |

Anexo 6. ANDEVA de los parámetros de color en cáscara de calabaza.

ANDEVA del valor a*.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 31.860 | 15.930 | 8.54039 | 5.14* | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 11.192 | 1.865 | | | |
| Total | 8 | 43.052 | | | | |

ANDEVA de Delta E.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 382.158 | 191.079 | 5.31913 | 5.14* | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 215.538 | 35.923 | | | |
| Total | 8 | 597.696 | | | | |

ANDEVA del croma.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 233.291 | 116.646 | 6.60118 | 5.14* | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 106.023 | 17.670 | | | |
| Total | 8 | 339.314 | | | | |

Continuación Anexo 6.

ANDEVA del ángulo Hue (h).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|---------------------|
| Tratamientos | 2 | 28.560 | 14.280 | 2.46252 | 5.14 ^{NS} | 10.92 ^{NS} |
| Error | 6 | 34.793 | 5.799 | | | |
| Total | 8 | 63.353 | | | | |

Anexo 7. ANDEVA de las pruebas de germinación de la F2.

ANDEVA del porcentaje de germinación de semillas de calabaza (F2).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 6240 | 3120 | 12.48000 | 3.89* | 8.02** |
| Error | 12 | 3000 | 250 | | | |
| Total | 14 | 9240 | | | | |

ANDEVA de la longitud de raíz de la calabaza (F2).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| Tratamientos | 2 | 12.245 | 6.123 | 0.47427 | 3.89 ^{NS} | 8.02 ^{NS} |
| Error | 12 | 154.915 | 12.910 | | | |
| Total | 14 | 167.161 | | | | |

ANDEVA del diámetro de raíz de la calabaza (F2).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 0.591 | 0.296 | 18.93975 | 3.89* | 8.02** |
| Error | 12 | 0.187 | 0.016 | | | |
| Total | 14 | 0.779 | | | | |

Continuación Anexo 7.

ANDEVA de la longitud del tallo de la calabaza (F2).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|--------------------|
| Tratamientos | 2 | 189.449 | 94.724 | 5.58614 | 3.89* | 8.02 ^{NS} |
| Error | 12 | 203.485 | 16.957 | | | |
| Total | 14 | 392.934 | | | | |

ANDEVA del diámetro del tallo de la calabaza (F2).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 2.172 | 1.086 | 10.59505 | 3.89* | 6.93** |
| Error | 12 | 1.230 | 0.103 | | | |
| Total | 14 | 3.402 | | | | |

ANDEVA del número de raíces de la calabaza (F2).

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| Tratamientos | 2 | 2.837 | 1.419 | 0.127439 | 3.89 ^{NS} | 6.93 ^{NS} |
| Error | 12 | 133.591 | 11.133 | | | |
| Total | 14 | 136.429 | | | | |

Anexo 8. ANDEVA de las áreas de las principales bandas FTIR-ATR de la pulpa de calabaza.

ANDEVA del área de la banda A.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 8785108.609 | 4392554.304 | 217.54121 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 121150.960 | 20191.827 | | | |
| Total | 8 | 8906259.569 | | | | |

ANDEVA del área de la banda B.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 113503.493 | 56751.747 | 773.48138 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 440.231 | 73.372 | | | |
| Total | 8 | 113943.724 | | | | |

ANDEVA del área de la banda C.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 2869.278 | 1434.639 | 132.04509 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 65.189 | 10.865 | | | |
| Total | 8 | 2934.467 | | | | |

Continuación Anexo 8.**ANDEVA del área de la banda D.**

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 639444.736 | 319722.368 | 1415.49625 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 1355.238 | 225.873 | | | |
| Total | 8 | 640799.974 | | | | |

ANDEVA del área de la banda E.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 461879.335 | 230939.667 | 229.40036 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 6040.261 | 1006.710 | | | |
| Total | 8 | 467919.595 | | | | |

ANDEVA del área de la banda F.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 154.745 | 77.373 | 112.23365 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 4.136 | 0.689 | | | |
| Total | 8 | 158.882 | | | | |

Continuación Anexo 8.**ANDEVA del área de la banda G.**

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 420.052 | 210.026 | 12.35615 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 101.986 | 16.998 | | | |
| Total | 8 | 522.039 | | | | |

ANDEVA del área de la banda H.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 3927.287 | 1963.644 | 63.93700 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 184.273 | 30.712 | | | |
| Total | 8 | 4111.560 | | | | |

ANDEVA del área de la banda J.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 2854.560 | 1427.280 | 564.97097 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 15.158 | 2.526 | | | |
| Total | 8 | 2869.717 | | | | |

Continuación Anexo 8.**ANDEVA del área de la banda K.**

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 4456.690 | 2228.345 | 1302.16951 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 10.268 | 1.711 | | | |
| Total | 8 | 4466.957 | | | | |

ANDEVA del área de la banda M.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | Ft (0.05) | Ft (0.01) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Tratamientos | 2 | 265.291 | 132.645 | 85.26961 | 5.14* | 10.92** |
| Error | 6 | 9.334 | 1.556 | | | |
| Total | 8 | 274.624 | | | | |