

Susana Rodríguez Jurado Aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio y magnetita para incrementar compuestos bioactivos en cultivo de jitomate 2024	 Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería Aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio y magnetita para incrementar compuestos bioactivos en cultivo de jitomate Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas Presenta Susana Rodríguez Jurado Dirigido por: Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez Querétaro, 2024
---	--

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de
Querétaro Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de
Biosistemas

**Aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio y magnetita para incrementar
compuestos bioactivos en cultivo de jitomate**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de:
Maestra en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas

Presenta:

Susana Rodríguez Jurado

Dirigido por:

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez
Presidente

Dra. Karen Esquivel Escalante
Secretario

Dr. Humberto Aguirre Becerra
Vocal

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
Suplente

Dr. Juan Fernando García Trejo
Suplente

Centro Universitario,
Querétaro, Qro.
Mayo, 2024.

DEDICATORIAS

A mi hijo Anthony y mi esposo Martin, por siempre estar para mí, por su paciencia y apoyo, pero sobre todo por su amor incondicional.

A mi madre y a mi padre por sus consejos y siempre alentarme a seguir, por ser un apoyo para mí.

A mis hermanos por siempre estar para mí.

A mis maestros y compañeros por resolver mis dudas y apoyarme en el camino.

A la Universidad Autónoma de Querétaro.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por siempre estar a mi lado y dejarme volar libre para alcanzar mis sueños, por estar en los momentos más difíciles, porque sin ustedes no habría podido realizar este sueño.

A mis profesores, porque todos contribuyeron a mi formación dejando grandes enseñanzas en mi vida. Por su dedicación y entrega al enseñarme a amar mi carrera. Sus enseñanzas y consejos siempre serán parte de mi vida.

ÍNDICE

Página

DEDICATORIAS	II
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
I. ANTECEDENTES	14
1.1 Material vegetativo	14
1.2 Nanopartículas como bioestimulantes y elicitores en plantas	14
1.2.1 Nanopartículas de dióxido de silicio	15
1.2.2 Nanopartículas de magnetita	17
1.3 Revisión tecnológica	18
1.4 Monitoreo tecnológico.....	20
1.5 Fundamentación teórica.....	22
1.5.1 Nanopartículas en las plantas.....	22
1.5.2 Especies Reactivas de Oxígeno (ROS).....	23
1.5.3 Enzimas antioxidantes	25
1.5.4 Hórmesis en las plantas.....	27
1.5.5 Síntesis de <i>Novo</i>	28
1.5.6 Metabolitos secundarios en el cultivo de jitomate.....	28
1.6 Problemática	30
1.7 Justificación	31
II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	33
III. METODOLOGÍA	34

3.1	Síntesis y caracterización las nanopartículas de dióxido de silicio y magnetita para su aplicación en un cultivo de jitomate.	34
3.1.1	Síntesis y caracterización de NPs de dióxido de silicio.	34
3.1.2	Síntesis y caracterización de NPs de magnetita	35
3.2	Determinación del efecto hormético con NPs de Dióxido de silicio y Magnetita en variables fisiológicas y morfológicas.....	35
3.2.2	Medición de Variables fisiológicas y morfológicas.....	36
3.3	Determinación del efecto hormético con NPs de dióxido de silicio y magnetita aplicadas en el cultivo de jitomate sobre variables bioquímicas.....	39
3.3.1	Medición de variables bioquímicas	39
3.4	Diseño y arreglo experimental.....	41
3.5	Análisis de datos	42
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1	Caracterización de dióxido de silicio y magnetita.....	43
4.1.1	Caracterización de dióxido de silicio	43
4.1.2	Caracterización de Magnetita.....	44
4.2	Determinación el efecto de la aplicación de NPs de dióxido de silicio y magnetita mediante el análisis de variables fisiológicas y morfológicas en el proceso de germinación de semillas de jitomate para establecer su efecto hormético.....	46
4.2.1	Efecto hormético de NPs de dióxido de silicio sobre variables fisiológicas y morfológicas.	46
4.2.2	Efecto hormetico de NPs de magnetita sobre variables fisiológicas y morfológicas.	53
4.2.3	Efecto hormetico de la combinación de NPs de dióxido de silicio y magnetita sobre variables fisiológicas y morfológicas.....	59
4.3	Determinación del efecto de la aplicación de NPs de dióxido de silicio y magnetita mediante el análisis de variables bioquímicas durante el proceso de germinación de semillas de jitomate para establecer su efecto hormético.....	64
4.3.1	Efecto hormetico de NPs de dióxido de silicio sobre variables bioquímicas.	64
4.3.2	Efecto hormético de NPs de magnetita sobre variables bioquímicas.....	70
4.3.3	Efecto hormetico de la combinación de NPs de dióxido de silicio y magnetita sobre variables bioquímicas.....	75
V.	CONCLUSIONES	83
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS		101
	NPs de dióxido de silicio	101
	NPs de Magnetita	102

NPs de dióxido de silicio + Magnetita	104
Productos Obtenidos durante la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables morfológicas en germinación de semillas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio.....	47
Tabla 2. Longitud de plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio.....	50
Tabla 3. Peso fresco y seco de plántula de jitomate tratada con NPs de SiO ₂	53
Tabla 4. Variables morfológicas en germinación de semillas de jitomate tratadas con NPs de magnetita.....	54
Tabla 5. Longitud de plántula de jitomate tratada con NPs de magnetita.....	56
Tabla 6. Peso fresco y seco de plántula de jitomate tratada con NPs de magnetita.	59
Tabla 7. Variables morfológicas en germinación de semillas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio y Magnetita.	60
Tabla 8. Longitud de plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio + magnetita.....	62
Tabla 9. Peso fresco y seco de plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio + magnetita.	64
Tabla 10. Actividad enzimática antioxidante en plántulas tratadas con NPs de dióxido de silicio.....	67
Tabla 11. Capacidad Antioxidante en plántula tratada con NPs de dióxido de silicio.....	70
Tabla 12. Actividad enzimática antioxidante en plántulas de jitomate tratadas con NPs de magnetita.....	72
Tabla 13. Capacidad Antioxidante en plántula tratada con NPs de Magnetita.	75
Tabla 14. Actividad enzimática antioxidante en plántulas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio + magnetita.	77
Tabla 15. Capacidad Antioxidante en plántula tratada con NPs de dióxido de silicio + Magnetita.	80
Tabla 16. Índice de vigor de plántula (IVP) y proteína total en tratamientos de NPs de dióxido de silicio	101
Tabla 17. Fenoles y flavonoides en plántula de semilla tratada con NPs de dióxido de silicio.....	101
Tabla 18. Modelación matemática de IVP al aplicar con NPs dióxido de silicio.....	102
Tabla 19. Índice de vigor de plántula (IVP) y proteína total en tratamientos de NPs de Magnetita.....	102
Tabla 20. Fenoles y flavonoides en plántula de semilla tratada con NPs de Magnetita.	103
Tabla 21. Modelación matemática de IVP al aplicar con NPs de Magnetita.....	103
Tabla 22. Índice de vigor de plántula (IVP) y proteína total en tratamientos de NPs de dióxido de silicio + Magnetita.....	104
Tabla 23. Fenoles y flavonoides en plántula de semilla tratada con NPs de dióxido de silicio + Magnetita.....	104
Tabla 24. Modelación matemática de IVP al aplicar con NPs de dióxido de silicio + Magnetita.....	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Vía de señalización de iones metálicos y mecanismo de respuesta específico.	25
Ilustración 2. Esquema de etapas en la investigación	34
Ilustración 3 Brote de radícula en proceso de germinación	37
Ilustración 4. Tratamientos utilizados por NP.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Difracción de rayos x de NPs de dióxido de silicio.....	43
Figura 2. Caracterización TEM y SEM de Nanopartículas de SiO ₂	44
Figura 3. Difracción de rayos x de NPs de magnetita.....	45
Figura 4. Caracterización TEM y SEM de Nanopartículas de magnetita.	46
Figura 5. Tiempo medio de germinación (T50) obtenido al aplicar NPs de SiO ₂ en semillas de jitomate.	48
Figura 6. Índice de Vigor de Plántula (IVP) obtenido con la aplicación de NPs de SiO ₂ . a) Gráfica de barras, comparación de medias, b) modelación matemática de la variable con las concentraciones de 0 a 100 ppm, c) modelación matemática con las concentraciones de 100 a 1600 ppm.	52
Figura 7. Tiempo medio de germinación (T50) obtenido al aplicar NPs de magnetita en semillas de jitomate.....	55
Figura 8. Índice de Vigor de Plántula (IVP) obtenido con la aplicación de NPs de magnetita. a) gráfica de barras, comparación de medias, b) modelación matemática de la variable con las concentraciones de 0 a 100 ppm, c) modelación matemática con las concentraciones de 100 a 1600 ppm).	58
Figura 9. Tiempo medio de germinación (T50) obtenido al aplicar NPs de dióxido de silicio+ magnetita en semillas de jitomate.	61
Figura 10. Índice de Vigor de Plántula (IVP) obtenido con la aplicación de NPs de dióxido de silicio + magnetita. a) Gráfica de barras, comparación de medias, b) modelación matemática de la variable con las concentraciones de 0 a 100 ppm, c) modelación matemática con las concentraciones de 100 a 1600 ppm).	63
Figura 11. Proteína Total en plántulas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio.	65
Figura 12. Fenoles totales en plántula de jitomate procedente de semillas tratadas con NPs de dióxido de silicio.....	68
Figura 13. Flavonoides Totales en plántula de jitomate tratada con NPs de SiO ₂	69
Figura 14. Proteína Total en plántulas de jitomate tratadas con NPs de magnetita.	71
Figura 15. Fenoles totales en plántula de jitomate procedente de semillas tratadas con NPs de magnetita.....	73
Figura 16. Flavonoides Totales en plántula de jitomate tratada con NPs de Magnetita.	74
Figura 17. Proteína Total en plántulas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio + Magnetita.	76
Figura 18. Fenoles totales en plántula de jitomate procedente de semillas tratadas con NPs de dióxido de silicio + magnetita.	78
Figura 19. Flavonoides Totales en plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio + magnetita	79

RESUMEN

En los últimos años la producción agrícola ha enfrentado una serie de desafíos que han generado estrés en las plantas impactando negativamente en los rendimientos y calidad de los cultivos. La nanotecnología ha surgido como una alternativa viable para utilizarse en la agricultura que busca mantener o incrementar la producción de alimentos para una población en constante crecimiento que demanda cantidad y calidad de alimentos, en consecuencia, es necesario determinar el efecto de la aplicación de diversos nanomateriales con potencial en la agricultura en la búsqueda de mejorar las técnicas de producción existente. De acuerdo a lo anteriormente señalado, se pretende evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) y magnetita ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) con el objetivo de preparar a las plántulas de jitomate mediante la activación de su sistema inmune para que una vez en campo su respuesta bajo estrés por factores abióticos se active rápidamente disminuyendo los daños por estrés en el cultivo. Se evaluaron diez concentraciones entre las 5 y 1600 ppm de cada NP y la combinación de ambas aplicadas en semillas y sus efectos en el proceso de germinación. Al utilizar nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) la dosis de 100 ppm fue la que mejores resultados arrojó en la variable de índice de vigor de plántula, mientras que para magnetita la mejor dosis fue 1600 ppm. Al aplicar la mezcla (SiO_2 + magnetita) el tratamiento testigo obtuvo un valor superior pero estadísticamente igual a lo obtenido cuando se aplicaron 200 ppm; en variables bioquímicas se pudo apreciar el efecto de la aplicación de las nanopartículas al incrementar el contenido de fenoles y flavonoides en la mayoría de tratamientos aplicados para cada nanopartícula utilizada. Por lo anterior, se demostró que en cualquiera de los casos el uso de nanopartículas genera un efecto elicitor y/o bioestimulante en las dosis evaluadas.

Palabras clave: SiO_2 ; Magnetita; Bioestimulante; Elicitor; Hormesis

ABSTRACT

In recent years, agricultural production has faced a series of challenges that have generated stress in plants, this stress negatively impacting crop yields and quality. Nanotechnology has emerged as a viable alternative to be used in agriculture that seeks to preserve or increase food production for a constantly growing population that demands food quantity and quality. There surges the need to determinate the effect of the application of several nanomaterials with potential in the search for improving existing production technics in agriculture. Therefore, it is intended to evaluate the effect of the application of silicon dioxide nanoparticles (SiO_2) and magnetite nanoparticles ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) with the objective of preparing tomato seedlings by activating their immune system so that once in the field their response under stress by abiotic factors is activated quickly decreasing stress damage in the crop. Ten concentrations between 5 and 1600 ppm of each nanoparticle and the combination of both were applied on seeds and their effects on germination process were evaluated. When using silicon dioxide nanoparticles (SiO_2) the dose of 100 ppm was the one that gave the best results in the variable of seedling vigor index, while for magnetite nanoparticles the best dose was 1600 ppm. When applying the mixture (SiO_2 + magnetite), the control treatment obtained a higher value but statistically equal to that obtained when 200 ppm was applied; In biochemical variables, the effect of the application of nanoparticles could be seen by increasing the content of phenols and flavonoids in most of the treatments applied for each nanoparticle used. From the above, it is demonstrated that in any of the cases the use of nanoparticles generates an elicitor and/or biostimulant effect at the doses evaluated

Keywords: SiO_2 ; Magnetite; Biostimulant; Elicitor; Hormesis.

INTRODUCCIÓN

Se espera que la población mundial aumente de los 6.700 millones a más de 10.000 millones de personas para el año 2050. Este aumento del 45% en la población mundial generará una mayor demanda de alimentos y otras materias primas (Bharadwaj, 2016), lo anterior implica mejorar las técnicas de producción agrícola que actualmente existen, punto en el que la nanotecnología (NT) juega un papel sumamente importante, ya que es un área prometedora de investigación interdisciplinaria que abre caminos en diversas áreas entre las que destacan la medicina, la farmacéutica, la electrónica y la agricultura (Rastogi et al., 2019). En el contexto de la agricultura moderna no convencional, el uso de la NT para formular nano insumos ofrece la posibilidad de mejorar el uso y eficiencia de los productos empleados, además de reducir la cantidad aplicada de agroquímicos promoviendo así una agricultura sustentable y de bajo impacto ambiental (Lira-Saldivar et al., 2018).

Por otro lado, en el 2020 se reportó una producción mundial de jitomate de 251.6 millones de toneladas utilizando una superficie de cultivo de 6.1 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2022). El jitomate también es considerado como una fuente importante de antioxidantes “nutricionales” (vitaminas A, C y E) y antioxidantes “fitoquímicos no nutritivos” (licopeno, flavonoides, flavonas y compuestos fenólicos totales), cuyo consumo está relacionado con su potencial antimutagénico y propiedades anticancerígenas (Luna-Guevara y Delgado-Alvarado, 2014).

Sin embargo, a pesar de que el uso de nanopartículas (NPs) puede ser positivo para las plantas, el efecto varía con las concentraciones aplicadas, propiedades fisicoquímicas de las NPs y especies vegetales (Aqeel et al., 2022). No obstante, el impacto en el metabolismo secundario de las plantas aún es desconocido (Marslin et al., 2017). En este sentido, se requiere evaluar el efecto de NPs como el dióxido de silicio y magnetita en el proceso de germinación y la activación del sistema inmunológico y enzimático antioxidante de las plantas.

I. ANTECEDENTES

1.1 Material vegetativo

El origen de la especie *Solanum lycopersicum* L. conocida comúnmente como jitomate, se sitúa en la región Andina, desde el sur de Colombia hasta el norte de Chile. Posiblemente desde allí fue trasladada a América Central y México, donde se domesticó (Monardes, 2009). El tomate pertenece a la familia Solanaceae (CONABIO, 2009). Es una planta dicotiledónea (Bai *et al.*, 2012) y herbácea perenne, que se cultiva en forma anual para el consumo de sus frutos (CONABIO, 2009).

El jitomate es uno de los vegetales más consumidos en todo el mundo (Martí *et al.*, 2018) además, es una de las hortalizas de mayor importancia en el mundo por su área sembrada (Jaramillo *et al.*, 2006; FAOSTAT, 2022); su producción y consumo mundial, así como el consumo promedio per cápita, registran tendencia al alza durante la reciente década. China es el más importante productor y consumidor mundial, mientras que México es el principal exportador de esta hortaliza (FIRA, 2017; FAOSTAT, 2022). En el 2020, México produjo 4.1 millones de toneladas de tomate y se posicionó en la novena posición como productor a nivel mundial (FAOSTAT, 2022).

1.2 Nanopartículas como bioestimulantes y elicitores en plantas

La aplicación de NPs en plantas ha mostrado múltiples efectos, por ejemplo, en un cultivo de jitomate se aplicaron NPs de cobre (Cu) y los resultados sugieren que las NPs de Cu pueden ser usadas como fuente de micronutrientes y también como fungicida, dicha multifuncionalidad en términos de sustentabilidad posiciona a esta NP con un gran potencial para impactar positivamente el ambiente (López-Lima *et al.*, 2021). Además, también en cultivo de jitomate, se aplicaron NPs de dióxido de titanio (TiO_2), selenio (Se) y plata (Ag), mostrando reducción en la severidad de *Alternaria alternata* al aplicar por separado las tres NPs evaluadas, pero mostrando una reducción superior al aplicar las NPs de TiO_2 por lo que

podrían ser utilizados como nano fungicidas para el control biológico del tizón de la hoja del tomate (El-Gazzar y Ismail, 2020).

1.2.1 Nanopartículas de dióxido de silicio

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante presente en el suelo. Las plantas absorben el Si en forma de ácido monosilícico, que juega un papel importante en la mejora de diferentes estreses ambientales. La deposición de silicio en la pared celular de las plantas proporciona resistencia y actúa como barrera mecánica contra diferentes agentes bióticos como la penetración de hongos, herbívoros e insectos. Además, la aplicación de Si en las paredes celulares puede mejorar el estado osmótico de las plantas bajo estrés al minimizar la pérdida de agua (Cabezas-Gutiérrez *et al.*, 2022). El silicio protege a las plantas de diferentes estreses abióticos modulando diferentes parámetros fisiológicos, bioquímicos y moleculares. La aplicación de Si anula la toxicidad impartida por la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) estimulando las actividades de las enzimas antioxidantes (Sarkar *et al.*, 2022).

El Si puede actuar como una capa protectora, tiene la habilidad de reducir el daño en membranas celulares como la estructura de cloroplastos y tilacoides por ROS, además de actuar en la defensa de las plantas bajo condiciones de estrés y bajo la influencia de Si, micro y macro nutrientes regulan el proceso de fotosíntesis (Rastogi *et al.*, 2019).

Las NPs de Si son inertes, biodegradables, presentan una buena bio-distribución, son fácilmente sintetizables, se pueden obtener de distinta morfología y tamaño, tienen un elevado potencial para albergar diferentes moléculas huéspedes y elevada superficie específica además de su particular geometría y su baja toxicidad (Llinàs y Sánchez-García, 2013). Regularmente sus tamaños oscilan entre 10 y 20 nm (Osorio-Anaya *et al.*, 2018).

El nano silicio (N-Si) se ha utilizado para mejorar la germinación de semillas, el crecimiento de plantas y la mejora de la cantidad fotosintética bajo estrés

ambiental (Almutairi, 2016), además se sabe que tiene propiedades ópticas, eléctricas y catalizadoras apropiadas que generan un incremento en la actividad antioxidante, inducción, producción y acumulación de compuestos (Nourozi *et al.*, 2019).

De igual forma, se encontró que el N-Si provocan efectos beneficiosos sobre el crecimiento y el rendimiento del limoncillo (*Cymbopogon flexuosus*) mediante la inducción de diversas respuestas fisiológicas y bioquímicas (Mukarram *et al.*, 2021) mientras que, en un cultivo de jitomate sometido a estrés salino, se encontró que la germinación de la semilla y el crecimiento de las plántulas se vieron significativamente inhibidos, pero esta inhibición fue mitigada por la exposición a N-Si dando como resultado aumento en el porcentaje y la tasa de germinación de las semillas de jitomate además de la longitud de la raíz y el peso fresco de las plantas después de la exposición a N-Si bajo estrés de NaCl (Almutairi, 2016).

Por otro lado, la aplicación de NPs de dióxido de silicio (SiO_2) en semilla de jitomate aumenta significativamente las variables de germinación, además del peso fresco y seco de la plántula lo que sugiere el uso de esta NP para eficientar el crecimiento y rendimiento del cultivo (Siddiqui y Al-Whaibi, 2014). El uso de NPs de SiO_2 no solamente beneficia procesos relacionados en la germinación, además está comprobado que en cultivo de jitomate con exposición a arsénico se aumenta la absorción de macronutrientes en raíces y hojas (González-Moscoso *et al.*, 2021).

Pero los beneficios de aplicar NPs de dióxido de silicio en las plantas no se limita a efectos en su proceso de germinación y crecimiento, sino que además, se puede incrementar la producción de metabolitos secundarios, así lo sugiere lo encontrado al estimular las raíces peludas de *Dracocephalum kotschy* con NPs de dióxido de silicio donde se obtuvo un aumento en la inducción y producción de importantes compuestos farmacéuticos como el ácido rosmarínico y el xantomicrool (Nourozi *et al.*, 2019).

1.2.2 Nanopartículas de magnetita

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial para las plantas, debido al papel fundamental que desempeña en procesos como la síntesis de ADN, la respiración y la fotosíntesis. El Fe es componente de enzimas vitales como los citocromos de la cadena de transporte de electrones y, por lo tanto, se requiere para una amplia gama de funciones biológicas en las plantas. Así mismo, el Fe participa en la síntesis de clorofila y es esencial para el mantenimiento de la estructura y función de los cloroplastos (Rout y Sahoo, 2015). Dicho elemento podría aplicarse a las plantas como nanopartículas de óxido de hierro, típicamente conocido como magnetita ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) ya que son biocompatibles y fácilmente biodegradables (Llinàs y Sánchez-García, 2013).

Dentro del extenso rango de nanopartículas magnéticas, la magnetita ha emergido como un candidato prometedor debido a su biocompatibilidad y sus excelentes propiedades magnéticas (Alvear *et al.*, 2017), presentando diámetros que van de entre 17 y 30 nm (Picasso *et al.*, 2012). Sin embargo, es importante mencionar que, dada la sensibilidad magnética de las NPs de magnetita, el tamaño y la estructura, los efectos adversos dentro de un ser vivo deben ser considerados, además de evaluar y establecer protocolos para controlar su alcance en su importante número de aplicaciones (Vargas-Ortíz *et al.*, 2021).

En la agricultura, las NPs de magnetita han sido utilizadas en diversos cultivos y en diferentes etapas de su desarrollo. Las NPs de magnetita aplicadas en semillas de frijol, penetran la estructura de la semilla y modifican el desarrollo de las plántulas (Duran *et al.*, 2018). Además, la aplicación de NPs de magnetita en plántula de jitomate incrementa el crecimiento y diámetro de tallo además de favorecer la floración (Moreno-León, 2017), igualmente, en plantas de trigo se determinó que aumentan la actividad enzimática antioxidante y por consiguiente ayuda a prevenir el daño por oxidación celular (Iannone *et al.*, 2016). También se sabe que en trigo cultivado en suelo contaminado con cadmio (Cd), la aplicación

de NPs de magnetita disminuye la acumulación de Cd y aumenta la concentración de Fe en el grano, lo que sugiere su uso como biofortificante (Hussain *et al.*, 2019).

Adicional a lo anterior, en plantas de tabaco se encontró que las NPs de magnetita no solo participan en la regulación del crecimiento a través de la nutrición, sino que, además, desencadena la inmunidad en las plantas, activando las ROS que incrementan significativamente la actividad enzimática de peroxidasa (POD) y catalasa (CAT) además de regular el alza de genes de resistencia y participa en la síntesis de hormonas (Cai *et al.*, 2020).

Como queda evidenciado, la aplicación de NPs puede tener o no efectos en la agricultura, por lo que se propone determinar el efecto de la aplicación de nanopartículas de $Fe^{2+,3+}_2O_4$ y SiO_2 en el cultivo de jitomate.

1.3 Revisión tecnológica

Se llevó a cabo una búsqueda de patentes relacionadas con NPs de dióxido de silicio y magnetita y sus aplicaciones en plantas y/o semillas de jitomate sin encontrar registros, por lo que se indago sobre patentes relacionadas con estas NPs y su aplicación en plantas y/o en la agricultura, sin embargo, no se encontraron patentes relacionadas directamente con las utilizadas en esta investigación. Por lo anterior, se realizó una nueva búsqueda de NPs con aplicaciones en plantas y/o en la agricultura y se encontraron las que se enlistan a continuación.

- (a) La patente número US10196319B2 publicada en Estados Unidos de América reporta NPs metálicas recubiertas de al menos un nutriente vegetal o un precursor del mismo y métodos para su preparación y uso, algunas incluyen métodos para tratar deficiencias de nutrientes en plantas como la deficiencia del boro y proporcionan un kit para fabricar la nanopartícula recubierta (Nilanjan, 2019). Así mismo, la patente número CN109068654B publicada en China, proporciona la metodología para preparar nanopartículas de lignina que comprenden un agente activo hidrofóbico que no es liberado a menos que haya presencia de lacasa. Además, se describió que dichas nanopartículas de lignina pueden ser inyectadas en el tallo de una planta

donde el agente activo queda aislado en las nanopartículas en ausencia de un activador y solo es liberado en presencia de enfermedades fúngicas o bacterianas entonces las nanopartículas se degradan enzimáticamente y liberan el fármaco (Wurm et al., 2022).

- (b) En Japón se registró la patente JP6513127B2 que contiene métodos para administrar de forma no invasiva nucleasas específicas de secuencia en células vegetales con paredes celulares también usando nanopartículas (Jayakumar et al., 2019). Asimismo, en Japón se publicó la patente JP6891215B2 que incluye métodos que usan nanopartículas para administrar de forma no invasiva una molécula de casete de ácido nucleico lineal funcionalizada a una célula vegetal con una pared celular intacta. Algunos de los métodos aquí descritos pueden usarse para producir plantas fértiles modificadas genéticamente transformadas de forma estable, además, será posible que la secuencia genética particular de interés se administre sin secuencias de ácido nucleico no deseado (Yau *et al.*, 2021).
- (c) La patente US20200245626A1 publicada en los Estados Unidos de América incluye la formulación de una nanopartícula con un compuesto de triazol asociado a un polímero polielectrólito y un dispersante o agente humectante. También se describen varias formulaciones y otros agentes de formulación que se pueden incluir, además de su aplicación a diversas plantas y hongos y las ventajas de utilizar las mismas (Fugang *et al.*, 2020).
- (d) La patente CN110621822B registrada en China, incluye la descripción de nanomateriales de celulosa hechos o derivados del tabaco y métodos para su producción. Los nanomateriales celulósicos derivados del tabaco se pueden utilizar en diversas aplicaciones industriales, como aplicaciones de formación de películas y técnicas de espesamiento de soluciones. En particular, la descripción se refiere a métodos para fabricar nanomateriales celulósicos derivados del tabaco usando menos ciclos de fibrilación que los ciclos de fibrilación de la producción de pulpa de madera (Sebastian *et al.*, 2022).

- (e) La patente CN112913838B registrada en China, proporciona un método para preparar un gel compuesto de nanopartículas de cobre, se preparan in situ a base de un biopolisacárido, tiene una alta modificabilidad, exhibe buena estabilidad de dispersión y propiedades antibacterianas, es adecuado para su uso en equipos de pulverización y dispersión además de tener un alto valor de aplicación en resistencia a enfermedades agrícolas y superficie antibacteriana (Xiaozhou *et al.*, 2022).
- (f) En Estados Unidos de América se registró la patente US20190202750A1 para el desarrollo de fertilizantes mejorados para agricultura sostenible y de precisión. La patente contempla la metodología de síntesis de un nanocompuesto de NPK eficiente para la nutrición vegetal en un solo paso además de otra formulación con la adición de ZnO, TiO_2 y otras nanopartículas al nanocompuesto NPK, incluye el desarrollo de una técnica de aplicación foliar basada en aerosol para la entrega precisa de las nanopartículas a las plantas (Biswas *et al.*, 2019). La patente WO2009140694A3 otorgada en virtud del tratado de Cooperación Internacional en Materia de Patentes, está relacionada con métodos de fabricación y uso y composiciones de nanopartículas metálicas formadas por técnicas sintéticas de química verde (realizadas a partir de soluciones de extractos de plantas) y posteriormente usadas para eliminar contaminantes del suelo, aguas subterráneas y otros sitios contaminados (Hoag *et al.*, 2009).

1.4 Monitoreo tecnológico

En los últimos años, la producción agrícola ha estado influenciada por el uso de grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas en la búsqueda de aumentar la producción agrícola y controlar plagas y enfermedades, sin embargo, a través del tiempo se ha visto que su uso excesivo ha afectado a los ecosistemas además de incrementar los costos económicos de producción. En este sentido, el uso de NPs han surgido como una alternativa que promete contribuir a la eficiencia de los procesos de producción convencionales y han generado popularidad entre la

comunidad científica debido a que exhiben propiedades únicas cuando son utilizadas como fertilizantes y/o plaguicidas pues incrementan la eficiencia, reducen costos, contaminación en muchos de los casos además de contribuir a la seguridad ambiental, en cambio, a pesar del potencial que muestran, es necesario continuar investigando para poder utilizar esta tecnología emergente a gran escala (Rehmanullah *et al.*, 2020).

Las NPs de silicio ingresan fácilmente a las plantas y afectan su metabolismo, se ha encontrado que su aplicación confiere tolerancia a las plantas para enfrentar diversas situaciones de estrés biótico o abiótico, además de ayudar en la liberación prolongada de nutrientes favoreciendo de esta manera la creciente demanda en la producción de alimentos (Bansal *et al.*, 2022). Las NPs de SiO₂ al ser aplicadas en plantas han mostrado efectos positivos sobre el crecimiento y germinación de semillas con la *Eruca sativa*, lo que impacta positivamente en la mejora de la producción vegetal y al mismo tiempo fortalece la agricultura sostenible.

Las NPs de SiO₂ poseen propiedades antifúngicas contra hongos Fitopatógenos como el *Fusarium oxysporum* y *Aspergillus niger* (Goswami y Mathur, 2022). Las NPs de magnetita han mostrado antifúngicas, bioestimulantes, además de proporcionar tolerancia para enfrentar estrés de tipo biótico y abiótico en plantas de jitomate (Ashraf *et al.*, 2022). Asimismo, se ha encontrado que contribuyen a mejorar la absorción radicular y la regulación de nutrientes, además de reducir la clorosis en las plantas al comportarse como una fuente sostenible de Fe, lo anterior puede ser utilizado como una base teórica para guiar la aplicación de nanomateriales en la agricultura, ya que fortalecer la comprensión de su funcionamiento e interacción con las plantas es fundamental para poder escalar su uso en campo en beneficio de la agricultura (Sun *et al.*, 2023).

El paradigma de la NT implica no únicamente dotar a la agricultura de nuevas herramientas que ayuden a incrementar la producción sostenible de alimentos para una población en constante crecimiento, sino el estar conscientes de que aunque existan numerosos beneficios para la agricultura, la descarga insegura de NPs en

el medio ambiente puede llegar a convertirse en un grave problema ya que, en algún momento si la exposición a NPs no es regulada correctamente, el suelo y el crecimiento de las plantas se verán afectados a tal punto que el contenido de NPs se acumule en los tejidos comestibles y en consecuencia la exposición de los seres humanos se vuelva inevitable, por lo que es necesario continuar investigando los mecanismos de absorción en las plantas para determinar y comprender sus efectos, es por ello que es necesario evaluar de forma precisa sus efectos en los ecosistemas, el medio ambiente y su acumulación en las plantas además de su impacto en la salud humana (Rajput *et al.*, 2020).

1.5 Fundamentación teórica

En los últimos años se ha demostrado que las NPs desencadenan una variedad de efectos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, el efecto final puede ser neutral, positivo o negativo, y depende de diversos factores (Ahmad *et al.*, 2022).

1.5.1 Nanopartículas en las plantas

Las nanopartículas (NPs) son materiales, cuyo tamaño oscila entre 1 y 100 nm, algunas de sus características son: tienen área reactiva y potencial para atravesar células y barreras de tejido, además, algunas han mostrado considerables propiedades antioxidantes, antimicrobianas y anticancerígenas (Ganguly *et al.*, 2019).

En las plantas, las NPs entran en contacto con las células vegetales, son captadas por vías plasmodesmáticas o endocitosis y translocadas por vías apoplásticas y/o simplásicas. Si las NPs son beneficiosas aumentan la tasa fotosintética, la medida de biomasa, el contenido de clorofila, el nivel de azúcar, la acumulación de osmolitos y antioxidantes e incluso mejoran el metabolismo del nitrógeno, mejora la clorofila, el contenido de proteína y regulan el alza de la expresión de genes relacionados con el estrés biótico y abiótico (Singh *et al.*, 2021). Por lo que diversas NPs pueden ser consideradas como bioestimulantes. Un bioestimulante, es cualquier sustancia o microorganismo aplicado a las plantas que mejora la

eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o los rasgos de calidad, independientemente del contenido de nutrientes del cultivo (Du Jardin, 2015).

La exposición a las NPs tiene el potencial de alterar el metabolismo secundario de la planta (Marslin *et al.*, 2017). La acumulación de metabolitos secundarios a menudo se produce en plantas sometidas a estrés, causado por elicitores o moléculas señalizadoras (García-Mier *et al.*, 2015). Los elicitores son sustancias químicas, factores bióticos o abióticos (Gulzar *et al.*, 2020) que pueden inducir efectos fisiológicos y cambios como la activación de respuestas defensivas y la acumulación de fitoalexinas en el organismo al cual son aplicados (García-Enciso *et al.*, 2018). Las fitoalexinas son metabolitos secundarios de naturaleza química diversa, principalmente flavonoides, de bajo peso molecular, cuya síntesis se puede disparar por la acción de factores como elicitores o inductores, tanto exógenos, producidos por patógenos, agentes químicos, daños mecánicos; como endógenos, producidos por las plantas en respuesta a determinadas situaciones de estrés (García-Mateos y Pérez-Leal, 2003).

Las NPs desencadenan la generación de ROS que puede estar asociada con la amplificación de la señal de estrés que puede activar el sistema de defensa de la planta. Las NPs imitan al Ca^{2+} o a las moléculas de señalización en el citosol, detectadas por las proteínas de unión a Ca^{2+} u otras proteínas específicas. Las moléculas de señalización elevan la expresión génica lo que concluye en mayor tolerancia al estrés (Khan *et al.*, 2017).

1.5.2 Especies Reactivas de Oxígeno (ROS)

Las ROS son moléculas de señalización que contienen oxígeno con una mayor reactividad química que el O_2 (Waszczak *et al.*, 2018). Las ROS pueden ser o no, radicales libres (Carvajal, 2019), un radical libre es un átomo o molécula que contiene un electrón desapareado en su orbital exterior (Maldonado *et al.*, 2010). En las plantas, las principales formas de ROS son: el oxígeno singlete (1O_2), el anión superóxido ($O_2 \cdot -$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) (Foyer y

Hanke, 2022) y el radical hidroxilo ($\cdot OH$) (Waszczak, *et al.*, 2018). Las ROS, son producidas principalmente en los cloroplastos, que son orgánulos fotosintéticos que fijan el dióxido de carbono de la atmósfera en azúcares, lo hacen utilizando la energía de la luz solar, mientras liberan oxígeno como subproducto (Foyer y Hanke, 2022).

En este sentido, las ROS son un subproducto del metabolismo celular normal en las plantas que, en condiciones de estrés, se altera el equilibrio entre su producción y eliminación. Por lo que las ROS inactivan rápidamente las enzimas, dañan orgánulos celulares vitales en las plantas y destruyen las membranas al inducir la degradación de pigmentos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos que, en última instancia, provocan la muerte celular (Karuppanapandian *et al.*, 2011).

Las ROS actúan como una señal difusible en las vías de transducción de señales y también como mensajeros secundarios en varias vías de desarrollo en las plantas que poseen sistemas de defensa antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Ilustración 1). Estos sistemas de defensa pueden proteger a las células del daño oxidativo y eliminar las ROS que se producen en exceso (Karuppanapandian *et al.*, 2011).

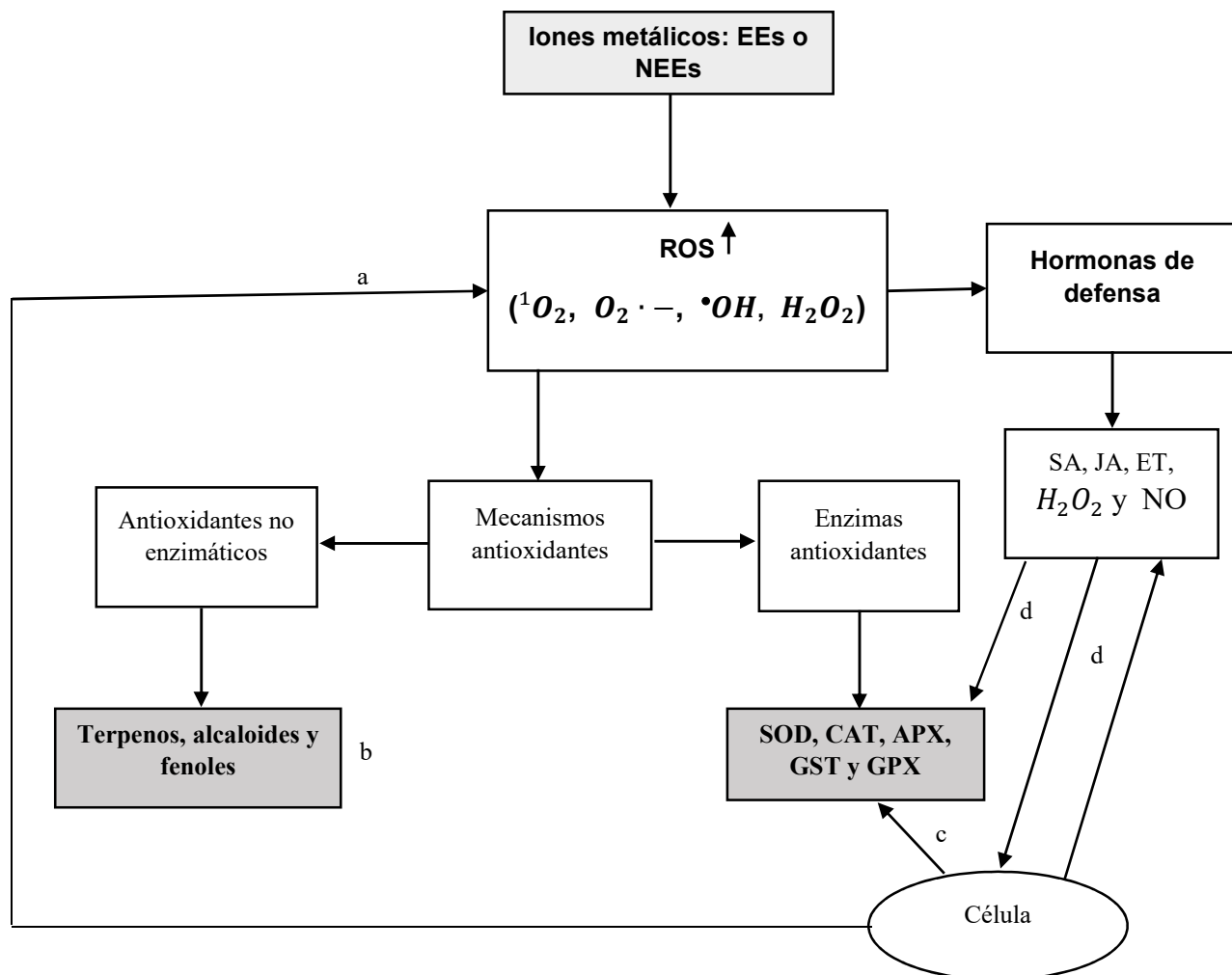


Ilustración 1. Vía de señalización de iones metálicos y mecanismo de respuesta específico.

a) aegración/acumulación; b) activación/activación de compuestos; c) la activación aumenta o disminuye; a) regulación de enzimas antioxidantes. EEs: elementos esenciales; NEEs: elementos no esenciales; ROS: especies reactivas de oxígeno; SOD: superóxido dismutasa; CAT: catalasa; APX: ascorbato peroxidasa; GST: glutatión S-transferasa; GPX: glutatión peroxidasa; SA: ácido salicílico; JA: ácido jasmonico; ET: etileno; H₂O₂: hidrogeno peróxido; NO: óxido nítrico (Ávila-Juárez et al., 2017).

1.5.3 Enzimas antioxidantes

En el organismo existe un sistema de protección formado por compuestos y enzimas antioxidantes que participan en las transformaciones de ROS (Céspedes et al., 1996) entre las principales enzimas están la superóxido dismutasa (SOD),

la catalasa (CAT), la ascorbato peroxidasa (APX), la peroxidasa (POD), la glutatión reductasa (GR) y la monodehidroascorbato reductasa (MDAR) (Apel y Hirt, 2004). Algunas de las cuales se presentan a continuación:

1.8.3.1 Catalasa (CAT, 1.11.1.6)

La catalasa es una enzima antioxidante presente en todos los organismos aeróbicos, se encuentra en todos los sitios principales de producción de H_2O_2 en el entorno celular (como los peroxisomas, las mitocondrias, el citosol y el cloroplasto) de las plantas superiores (Sharma y Ahmad, 2014). Participa en los procesos de señalización en situaciones fisiológicas y adversas. Mientras que los animales cuentan con un solo gen de catalasa, en las plantas esta enzima codifica por una familia multigénica que genera múltiples isoenzimas, que varían en cantidad según la especie, y su expresión está regulada según su distribución en tejidos, órganos y las condiciones ambientales. Esta enzima puede ser modulada por especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS/RNS), así como por sulfuro de hidrógeno (H_2S). (Palma *et al.*, 2020).

1.8.3. 2 Superóxido dismutasa (SOD, 1.15.1.1)

La SOD es una enzima antioxidante funcional en las estrategias de defensa fisiológica en animales y plantas contra las ROS generadas por el estrés biótico y abiótico (Stephenie *et al.*, 2020). La superóxido dismutasa estimula la eliminación del radical $O_2 \cdot -$ (subproducto del metabolismo oxidante). La enzima SOD estimula la conversión de superóxido en oxígeno molecular y peróxido de hidrógeno, este último se elimina con rapidez por la acción subsecuente de enzimas como la catalasa. La reacción catalizada por la superóxido dismutasa se efectúa en dos pasos, durante los que un átomo de cobre unido a la enzima se reduce y después se oxida (Horton *et al.*, 2008).

El cambio de actividad de SOD bajo estrés abiótico parece ser contradictorio ya que la actividad enzimática depende de numerosos factores, como la especie de planta, los órganos de la planta investigados, la concentraciones aplicadas o tiempo de exposición (Szöllősi, 2014).

La superóxido dismutasa y la catalasa son responsables de la rápida

descomposición de los metabolitos tóxicos de oxígeno, el anión superóxido y el peróxido de hidrógeno, respectivamente (Horton *et al.*, 2008).

1.5.4 Hórmesis en las plantas

La hórmesis es una respuesta bifásica al estrés (Erofeeva, 2022b), donde pequeñas dosis de estresores pueden causar efectos positivos en el rendimiento de la planta ("estrés positivo" o eustrés), mientras que por el contrario, las dosis altas provocan efectos negativos ("estrés negativo" o diestrés) (Vázquez-Hernández *et al.*, 2019). Por otra parte, en toxicología vegetal, la hormesis se considera como la respuesta adaptativa o no adaptativa a la exposición a concentraciones bajas de sustancias o condiciones adversas (Poschenrieder *et al.*, 2013). Las respuestas horméticas reflejan tanto la estimulación directa como la respuesta de sobrecompensación al daño inducido por dosis relativamente bajas de agentes químicos o físicos. La integración de la respuesta a la dosis hormética dentro de un marco alométrico proporciona una explicación tanto para la generalidad como para las características cuantitativas de la dosis respuesta hormética (Calabrese, 2013).

La dosis-respuesta hormética es típicamente representada en gráficos por una U invertida o una curva tipo J dependiendo del efecto evaluado (Pérez-Davison *et al.*, 2009).

Las respuestas para hacer frente al estrés se desencadenan después del reconocimiento de una serie de factores estresantes biológicos, químicos y físicos administrados como dosis de eustrés; un eustrésor podría estimular la respuesta de la planta de tal manera que la producción y la calidad de la misma sean mejorados (Vázquez-Hernández *et al.*, 2019) ya que la biosíntesis de los metabolitos secundarios puede verse alterada. Los metabolitos secundarios son productos naturales útiles que se sintetizan a través del metabolismo secundario en las plantas y desempeñan un papel importante en la adaptación de estas a diversas limitaciones ambientales. Varios metabolitos secundarios de las plantas poseen propiedades antioxidantes que actúan como primera línea de defensa

contra el daño oxidativo inducido por diferentes limitaciones ambientales (Bhattacharya, 2019). Pero para que esto suceda primero se desencadenan una serie de reacciones entre las que se encuentra la síntesis de Novo (Vargas-Hernandez *et al.*, 2017).

1.5.5 Síntesis de Novo

La síntesis de Novo de compuestos como fenoles y flavonoides están determinadas por la participación de enzimas clave como la fenilalanina amonio liasa (PAL) (Cheng y Breen, 1991).

1.5.5.1 Fenilalanina amonio liasa (PAL, 4.3.1.5)

La PAL es la enzima clave en la ruta de síntesis de fenoles (Cheng y Breen, 1991). Los compuestos fenólicos (CF) de las plantas son biosintetizados de diversas formas. En las plantas superiores los CF se originan en parte de la fenilalanina, que es un producto de la vía del ácido shikímico. Estos, provienen de la fenilalanina al eliminarse una molécula de amoniaco para dar paso a la formación de ácido cinámico. Esta reacción se cataliza por la fenilalanina amonio liasa (PAL) ubicada en un punto intermedio entre el metabolismo primario y secundario, por lo que la reacción que estimula es un paso regulador en la formación de CF. La actividad de PAL se incrementa por factores ambientales y el incremento de PAL promueve la síntesis de compuestos fenólicos (Taiz y Zeiger, 2010).

1.5.6 Metabolitos secundarios en el cultivo de jitomate.

Activar la síntesis de metabolitos secundarios es crucial cuando lo que se quiere es mejorar la tolerancia al estrés de un cultivo, tal es el caso del jitomate. La calidad del jitomate involucra procesos a nivel de la planta y la fruta, que dependen de las interacciones entre las prácticas culturales, los factores genéticos y ambientales (Bertin y Génard, 2018).

El jitomate es considerado como un alimento funcional, o bien, saludable, pues contiene una gran variedad de nutrientes y otros fitoquímicos como las vitaminas, fibra, minerales, glucosidosesteroideos, carotenoides y polifenoles con una amplia gama de potenciales efectos beneficiosos (Navarro-González y Periago, 2016).

Algunos de los cuales se describen a continuación:

1.5.6.1 Compuestos fenólicos (CF)

Los CF son fitoquímicos de distribución ubicua que se encuentran en la mayoría de los tejidos vegetales, incluidas las frutas y las verduras. Son metabolitos secundarios sintetizados a través de las vías del ácido shikímico y fenilpropanoide. Los compuestos fenólicos poseen numerosas propiedades bioactivas (De la Rosa *et al.*, 2019) entre las que destacan la activación de los mecanismos de defensa enzimáticos y la reducción de los niveles de estrés en plantas (Zárate-Martínez *et al.*, 2021).

Los CF se biosintetizan en las plantas por medio de rutas como la de ácido shikímico y la del acetato-malonato. Por la ruta del shikímico se pueden producir ácidos aromáticos como el ácido corísmico, prefénico, quínico, gálico que pueden ser parte estructural de otros compuestos funcionalizados. También a partir del ácido cinámico se pueden obtener grupos tan diversos como las cumarinas, las chalconas, los favonoles, flavanonas, ligninas y los lignanos (Martín, 2018). El fruto de tomate, por ejemplo, es fuente de compuestos fenólicos como ácidos fenólicos y flavonoides (Chaudhary *et al.*, 2018)

Los flavonoides son sustancias fenólicas aisladas de una amplia gama de plantas vasculares, de los que se conocen más de 8.000 compuestos individuales (Pier-Giorgio, 2000). Los flavonoides son una clase de metabolitos secundarios que también se conocen como vitamina P o citrina. Estos compuestos son pigmentos solubles en agua que se encuentran en las vacuolas de las células vegetales. Los flavonoides también pueden dividirse en tres grupos: antocianinas, flavonas y flavonoles. Están ampliamente distribuidos en las plantas, cumpliendo funciones de coloración, filtración de los rayos UV y fijación simbiótica del nitrógeno (Bhattacharya, 2019).

1.5.6.2 Capacidad Antioxidante

La capacidad antioxidante confiere a las plantas propiedades de neutralización de radicales libres y con ello previene un estado de estrés oxidativo lo que

necesariamente confiere a las plantas tolerancia al estrés (Méndez-Vázquez *et al.*, 2021). Los radicales libres provocan la degradación y muerte celular mientras que los antioxidantes los retrasan, disminuyendo así, el proceso de envejecimiento. En el cuerpo humano, la neutralización de los radicales libres depende del consumo de alimentos con propiedades antioxidantes ya que por si solo es incapaz de neutralizar los radicales libres. Existen alimentos en cantidad con un alto y variado contenido de fitonutrientes, muchos de los cuales poseen propiedades antioxidantes. Además de las bien conocidas vitaminas C y E y los carotenoides, existen otros compuestos como los flavonoides (incluyendo flavonas, isoflavonas, flavononas, antocianinas y catequizas) que son fuertes antioxidantes y que contribuyen significativamente a la capacidad antioxidante total (Gutierrez-Zavala *et al.*, 2007).

1.6 Problemática

La agricultura hoy en día enfrenta diversos desafíos. Uno de ellos es el estrés en plantas; este, puede ser causado por diversos factores, entre ellos, las condiciones ambientales extremas como el calor, la salinidad, la constante disminución de la disponibilidad de agua, etc.; y, sus efectos pueden ser devastadores en el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que necesariamente se ve reflejado en la productividad y calidad de los cultivos (Zandalinas *et al.*, 2020). Solo entre 2005 y 2015 tanto en África como América Latina y el Caribe la sequía fue el tipo de desastre más costoso, causando pérdidas en los cultivos y la ganadería de entre 10 700 y 13 000 millones de dólares (USD) (FAO, 2018). Por ejemplo, la productividad del jitomate es afectada seriamente en condiciones de estrés durante todas las etapas de desarrollo de la planta (Florida Bacallao y Bao Fundora, 2014).

Las NPs de SiO_2 y de magnetita muestran potencial como bioestimulantes y elicitores, por lo que, de ser aplicadas a semilla de jitomate, se podría incrementar la actividad antioxidante y por consiguiente la producción de metabolitos secundarios durante el proceso germinativo, lo que podría ser implementado como

una especie de preparación para enfrentar situaciones de estrés en campo causadas por diversos factores abióticos.

La incógnita científica consiste en determinar si la aplicación de NPs de SiO_2 y $Fe^{2+,3+}_2O_4$ en diferentes dosis en semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), mostrará un efecto hormético sobre variables fisiológicas, morfológicas y bioquímicas por sus propiedades fisicoquímicas y su funcionalidad como elicitores y estimulantes. Debido a que estas NPs inducen la generación de ROS que activan los sistemas enzimáticos antioxidantes y/o la síntesis de PAL y; por consiguiente incrementan la producción de compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante sin afectar negativamente el proceso de germinación.

1.7 Justificación

Las NPs de dióxido de silicio aplicadas en diversos cultivos y condiciones generan aumento en valores de diversas variables; tal es el caso del cultivo de jitomate, donde al aplicarlas en semilla se obtienen incrementos de 22.16% en la germinación y el índice de vigor de plántula incrementa hasta 5 veces más (Siddiqui y Al-Whaibi, 2014) conjuntamente, en algunos casos, se han reportado incrementos en la producción de metabolitos secundarios como el ácido rosmarinico, con un aumento de 8.2 veces más y 13 veces más el xantomicro de lo producido en un cultivo convencional de *Dracocephalum kotschy* (Nourozi *et al.*, 2019).

Por otra parte, las NPs de magnetita, tienen propiedades magnéticas y de biocompatibilidad (Alvear *et al.*, 2017), mejoran los procesos de crecimiento hasta por 11.68% en la altura y aumenta la floración hasta 88.49% en plantas de jitomate (Moreno-León *et al.*, 2017) además de activar las ROS e incrementar significativamente la actividad enzimática de POD y CAT por 40.18% y 32.37% respectivamente en plantas de tabaco (Cai *et al.*, 2020).

El jitomate es una de las hortalizas más consumidas del mundo (Marti *et al.*, 2018), en 2020 se reportó una producción mundial de 251.6 millones de toneladas

utilizando una superficie de cultivo de 6.1 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2022). Asimismo, es considerado como una fuente importante de antioxidantes “nutricionales” (vitaminas A, C y E) y antioxidantes “fitoquímicos no nutritivos” (licopeno, flavonoides, flavonas y compuestos fenólicos totales), cuyo consumo está relacionado con su potencial antimutagénico y propiedades anticancerígenas (Luna-Guevara y Delgado-Alvarado, 2014).

Sin embargo, a pesar de que el uso de NPs puede ser positivo para las plantas el efecto varía con las concentraciones aplicadas, propiedades fisicoquímicas de las NPs y especies vegetales (Aqeel *et al.*, 2022). No obstante, el impacto en el metabolismo secundario de las plantas aún es desconocido (Marslin *et al.*, 2017). En este sentido, se requiere evaluar el efecto de NPs como el dióxido de silicio y magnetita en el proceso de germinación y producción de metabolitos secundarios en plántula de jitomate como método de preparación para enfrentar posibles situaciones de estrés durante su ciclo de vida.

II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis

La aplicación de NPs de SiO_2 y $Fe^{2+,3+}_2O_4$ en diferentes dosis en semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), mostrará un efecto hormético sobre variables fisiológicas, morfológicas y bioquímicas en comparación con un proceso de germinación convencional.

Objetivo General

Determinar el efecto hormético de la aplicación de NPs de SiO_2 y Magnetita ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) en variables morfológicas y bioquímicas en plántula de jitomate para activar el sistema inmunológico y enzimático antioxidante de la planta.

Objetivos específicos

- a) Sintetizar las nanopartículas de SiO_2 mediante el método sol-gel y Magnetita ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) a partir del método de co-precipitación y caracterizarlas fisicoquímicamente.
- b) Determinar el efecto de la aplicación de NPs de SiO_2 y Magnetita ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) mediante el análisis de variables fisiológicas y morfológicas en el proceso de germinación de semillas de jitomate para establecer su efecto hormético.
- c) Determinar el efecto de la aplicación de NPs de SiO_2 y Magnetita ($Fe^{2+,3+}_2O_4$) mediante el análisis de variables bioquímicas durante el proceso de germinación de semillas de jitomate para establecer su efecto hormético.

III. METODOLOGÍA

La presente investigación se llevó a cabo en tres etapas (Ilustración 2) a partir de las cuales se describe el paso a paso.

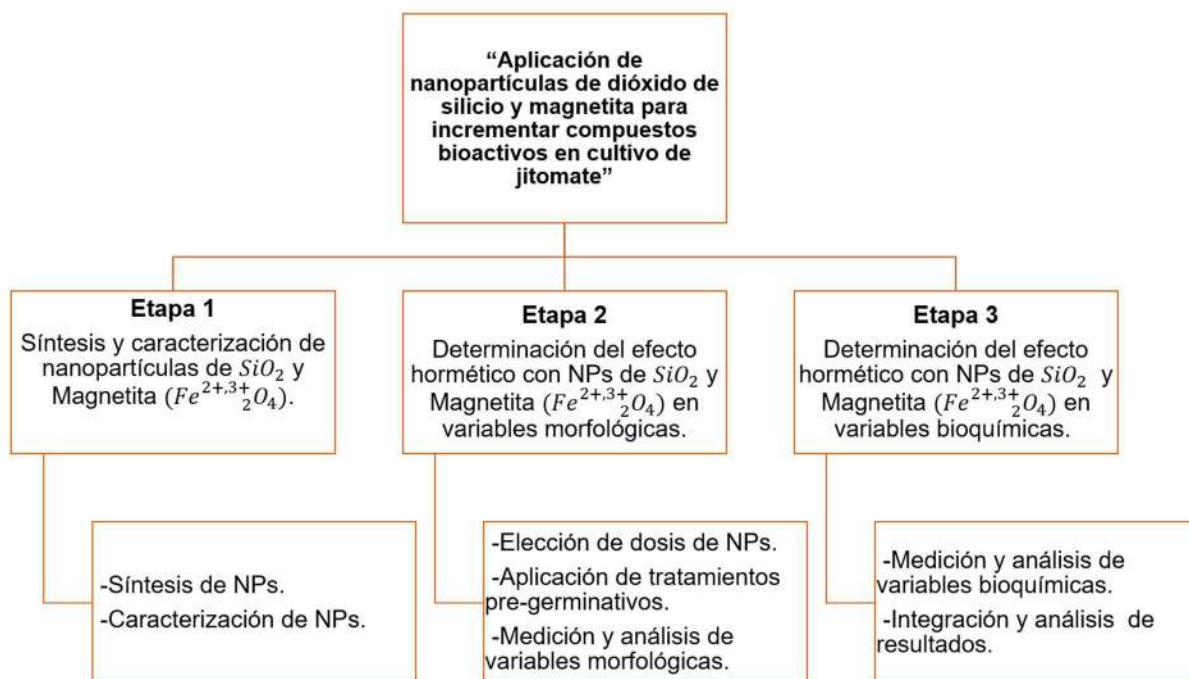


Ilustración 2. Esquema de etapas en la investigación

3.1 Síntesis y caracterización las nanopartículas de dióxido de silicio y magnetita para su aplicación en un cultivo de jitomate.

3.1.1 Síntesis y caracterización de NPs de dióxido de silicio.

Se preparó una solución de alcohol etílico absoluto, agua destilada y ácido oxálico que se agitó con la fuente ultrasónica marca BRANSON modelo 1510 durante 10 min. Después, se agregó gota a gota como precursor el compuesto TEOS (98 %, Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA) hasta integrarse por completo a la solución. Posteriormente se mezcló mecánicamente durante una hora. Una vez mezclado se dejó reaccionar durante 48 h a temperatura ambiente y se trituró para finalmente ser molido. Los reactivos se utilizaron con una relación molar

TEOS:Etanol:Agua:Ácido oxálico de 1:5.6:5.5:0.1, modificado de Rosales *et al.*, (2021).

La caracterización de las NPs de SiO₂, se realizó a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un JOE JSM-6060 LV, con microscopía electrónica de transmisión (TEM) utilizando un JEOL JEM 2000FX y con difracción de rayos x (XRD) obtenida de un difractómetro BRÜKER D8 ADVANCE.

3.1.2 Síntesis y caracterización de NPs de magnetita

Para la síntesis de NPs de magnetita se prepararon soluciones precursoras de cloruro férrico (0.5 M) y sulfato ferroso (0.5 M) por separado con agua destilada para combinarlos posteriormente, en el baño ultrasónico BRANSON 1510; primero se agregó el cloruro férrico y después de dos minutos en presencia de una atmósfera inerte de nitrógeno (N₂) se agregó la solución del sulfato ferroso y se agitó en baño ultrasónico por 15 min. Una vez finalizado el período, se agregaron 26.6 ml de una solución de hidróxido de amonio al 30% v/v que se agregaron con goteo preciso y controlado en presencia de las mismas condiciones mencionadas anteriormente por 15 minutos más. Una vez finalizado el proceso, la neutralización se realizó lavando la mezcla con etanol hasta alcanzar un pH neutro. Luego, mediante un proceso térmico se secó el material a 50 °C durante 24 h, modificado de de Santiago Colín et al. (2018).

La caracterización de las NPs de magnetita, se realizó a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un JOE JSM-6060 LV, con microscopía electrónica de transmisión (TEM) utilizando un JEOL JEM 2000FX y con difracción de rayos x (XRD) obtenida de un difractómetro BRÜKER D8 ADVANCE.

3.2 Determinación del efecto hormético con NPs de Dióxido de silicio y Magnetita en variables fisiológicas y morfológicas.

3.2.1 Aplicación de tratamientos a semilla.

La semilla de jitomate (EL CID F1, Harris Moran) fue sumergida en disoluciones preparadas de 100 ml de agua destilada con NPs (SiO₂ , Fe^{2+,3+}₂O₄ o la

combinación de ambas) a diez diferentes concentraciones por 24 h (Salazar-Mercado *et al.*, 2020). Por cada NP se consideraron dos tratamientos testigos: TA, donde se sumergieron en 100 ml de agua destilada por 24 h y TS donde las semillas se mantuvieron secas, pero a la misma temperatura que el resto de los tratamientos.

Siembra de semillas

Una vez transcurridas las 24 h se procedió a realizar la siembra en recipientes transparentes previamente desinfectados donde se colocó un filtro Whatman grado 2 esterilizado con 20 semillas de jitomate previamente tratadas y lavadas, se adicionaron 3 ml de agua destilada por recipiente, se cerraron y sellaron con Parafilm®. Posteriormente los recipientes se colocaron en una cámara de germinación a una temperatura constante de $22^{\circ}\text{C} \pm 2$ por 10 días (3 en completa oscuridad y 7 con un periodo de 12 horas luz). Los recipientes sellados únicamente se abrieron dos veces para regar 1 y 3 ml de agua destiladas a los 3 y 7 días después de la siembra.

3.2.2 Medición de Variables fisiológicas y morfológicas.

Se midieron las variables de: Porcentaje, tiempo medio, coeficiente de velocidad, índice de vigor e índice de tasa de germinación, longitud de tallo y raíz, peso fresco y seco.

Se llevó a cabo un conteo y registro de semillas germinadas diariamente, contando como germinada toda aquella semilla con un brote de radícula de por lo menos 1mm (Ilustración 3).

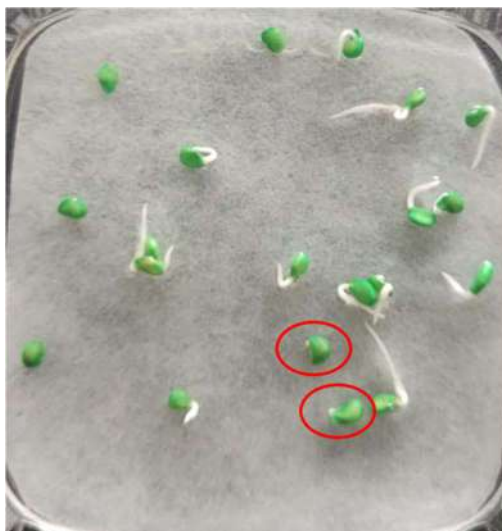


Ilustración 3 Brote de radícula en proceso de germinación

El registro se llevó a cabo del día 0 al 10 después de la siembra.

- **Porcentaje de germinación**

Para calcular el porcentaje de germinación se tomó el registro del día 10 de conteo:

$$PG (\%) = \frac{NG}{NS} * 100 \quad (1)$$

Donde NG son el total de plantas germinadas hasta el día 10 de medición y NS son el total de semillas sembradas.

- **Tiempo medio de germinación**

Se calculó de acuerdo a la ecuación propuesta por Ferrer-Gallego et al. (2013) de donde se obtiene el número de días que toma la germinación del 50% del total de semillas germinadas.

$$T50 (días) = T_1 + \left[\frac{N+1}{2-N_1} * \frac{T_2-T_1}{N_2-N_1} \right] \quad (2)$$

Donde:

N es el % final de semillas germinadas.

N_1 es el % de semillas germinadas inmediatamente antes de N/2.

N_2 es el % de semillas germinadas inmediatamente después de N/2.

T_1 es el número de días que corresponden a N_1

T_2 es el número de días que corresponden a N_2

- **Coeficiente de velocidad de germinación**

Se calculó con la ecuación propuesta por Al-Ansari y Ksiksi (2016).

$$CVG(\%) = \frac{\sum F}{\sum F * X} * 100 \quad (3)$$

Donde:

F es el número de nuevas semillas germinadas en el día X.

X es número de días después de la siembra en el que se hace el conteo.

- **Índice de tasa de germinación**

Se calculó con la ecuación propuesta por Al-Ansari y Ksiksi (2016).

$$ITG (\% \text{ día}^{-1}) = \frac{\sum PG}{X} \quad (4)$$

Donde:

PG es el porcentaje de germinación en el día X.

X es el número de días después de la siembra.

- **Índice de vigor de plántula**

Se calculó utilizando la ecuación propuesta por Vashisth y Nagarajan (2010).

$$IVP(\%mm) = PG * ML \quad (5)$$

Donde:

ML es la media de la longitud de las plántulas (longitud de raíz+ longitud de tallo).

PG es el porcentaje de germinación final.

- **Longitud de tallo y de raíz**

Se llevó a cabo utilizando un vernier digital el día 10 (último día de conteo de semillas germinadas). Se tomaron aleatoriamente 8 plántulas por repetición y se midieron. Las medidas se expresaron en mm.

- **Peso fresco y seco**

Las mismas 8 plántulas a las que se les midió longitud de tallo y raíz fueron pesadas en una balanza y se registró un solo peso por repetición (de las 8 muestras juntas). El peso fresco se expresó en mg.

Posteriormente estas mismas 8 plántulas fueron secadas en un horno de convección forzada a 100 °C por 36 h y se registró su peso total en mg.

3.3 Determinación del efecto hormético con NPs de dióxido de silicio y magnetita aplicadas en el cultivo de jitomate sobre variables bioquímicas.

3.3.1 Medición de variables bioquímicas

Para el experimento se contempló medir las variables bioquímicas: proteína total, enzimas CAT, SOD y PAL, fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante.

- **Proteína total**

La cuantificación de la proteína se determinó por el método de Bradford (1976), el cual cuantifica la unión del colorante Azul de Coomasie G-250 a una proteína desconocida y se comparó con el estándar de diferentes concentraciones de proteína suero de albúmina bovina (BSA). La concentración se determinó la concentración espectrofotométricamente, la lectura de absorbancia se llevó a

cabo a los 595 nm. Las unidades se expresaron por mg por gramo de muestra fresca.

- **Las enzimas CAT, SOD, y PAL.**

Posteriormente la actividad de PAL se determinó espectrofotométricamente a 290 nm por la cuantificación de ácido cinámico formado a partir de la catálisis de L-fenilalanina y se midió de acuerdo al método reportado por Toscano *et al.*, (2018) con modificaciones. La actividad de CAT se determinó espectrofotométricamente a 240 nm por la cuantificación de peróxido de hidrógeno catalizado de acuerdo al método reportado por Afiyanti y Chen (2014) con modificaciones. La actividad de SOD se determinó espectrofotométricamente por la inhibición de la reducción de nitroazul de tetrazolio de acuerdo al método reportado por Hayat *et al.* (2018), la lectura de la absorbancia se realizó a los 560 nm. Los resultados se expresaron en unidades por miligramo de proteína.

- **Fenoles totales**

Se determinaron espectrofotométricamente utilizando el Método de Folin-Ciocalteu explicado por Vergara-Castañeda *et al.*, (2010), se utilizó ácido gálico como estándar. Se usaron 140 µL de extracto metanólico de plántula de jitomate y se mezclaron con 460 µL de agua destilada y 250 µL de reactivo Folin-Ciocalteu (1N). Después de 5 min, 1250 µL de carbonato de sodio al 20 % (p/v) se añadieron. La mezcla se agitó en el vórtice y se incubó durante 2 h en la oscuridad. La absorbancia se midió a 760 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalente de ácido gálico por gramo de peso liofilizado (mg GAE/g).

- **Flavonoides totales**

Se utilizó la metodología descrita por Garcia-Mier *et al.* (2015) usando rutina como estándar. 50 µL del extracto metanólico de plántula de jitomate (0.5 mg/mL) se mezcló con 180 µL de agua destilada y 20 µL de una solución de 2-aminoetil-difenilborato al 1 (p/v). La absorbancia se midió a 404 nm. Los resultados

se expresaron como mg equivalentes de rutina por gramo de peso liofilizado (mg RE/g).

- **Capacidad antioxidante**

La actividad antioxidante de los extractos se evaluó mediante el método del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) (Parit *et al.*, 2018), y los resultados se expresaron como el porcentaje de decoloración del DPPH (% de inhibición del radical) denominado así como porcentaje de inhibición (IHB), que se calculó con la ecuación 6.

$$IHB\% = \left(\frac{A_{DPPH} - A_s}{A_{DPPH}} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde (A_s) es la absorbancia de la solución que contiene la muestra, y (A_{DPPH}) es la absorbancia de la solución de DPPH.

Se midió además la capacidad antioxidante por la técnica de FRAP; se preparó la solución FRAP (buffer ácido acético-acetato de sodio (pH 3,6), TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil)-s-triazina) y $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) que se mantuvo a 37°C. Para la lectura se colocaron 230 μ L de solución FRAP y 20 μ L del extracto metanólico de plántula de jitomate, se leyó a 595 nm a los tiempos: 0, 4 y 30 minutos, modificado de Benzie y Strain (1996).

Todas las mediciones espectrofotométricas se obtuvieron en un espectrofotómetro Thermo Scientific Multiskan Go.

3.4 Diseño y arreglo experimental

Se utilizaron 20 semillas por recipiente con un total de 4 repeticiones por tratamiento para un total de 11 tratamientos considerando el tratamiento testigo

T (Ilustración 4) por NP (SiO_2 , $Fe^{2+,3+}_2O_4$ y la combinación de ambas). El acomodo de las repeticiones en la cámara de germinación fue aleatorio.

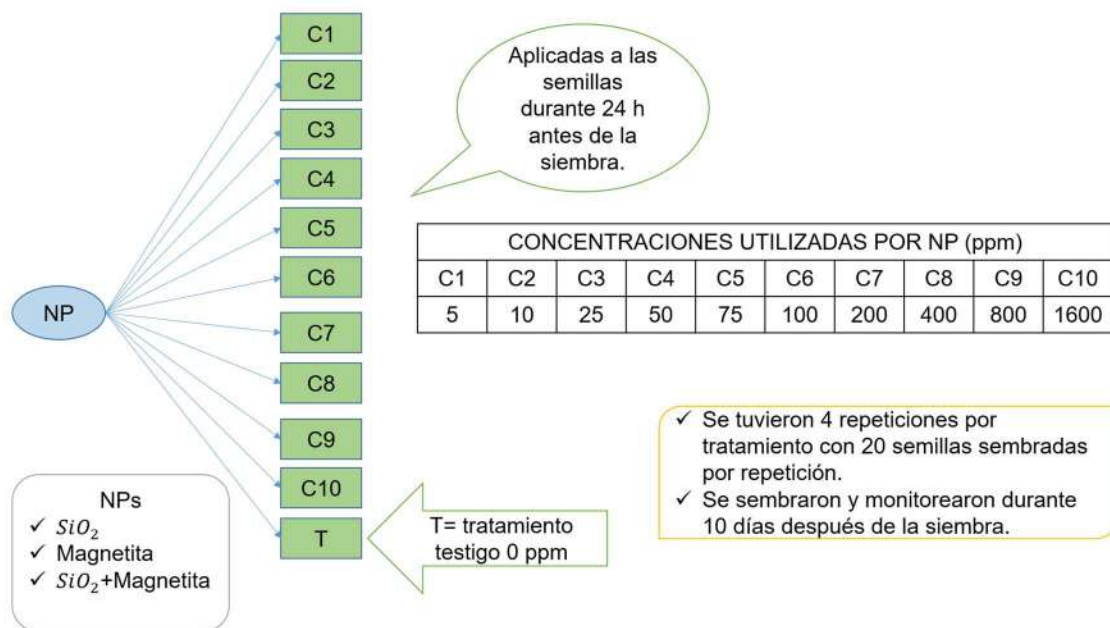


Ilustración 4. Tratamientos utilizados por NP.

3.5 Análisis de datos

Las variables evaluadas se sometieron a una prueba de normalidad utilizando el software estadístico InfoStat®, posteriormente se realizó el análisis de varianza de Fisher o Kruskal Wallis se utilizó para su análisis el software estadístico Origin Pro®, cuando se encontraron diferencias entre tratamientos se sometieron a un análisis de Tukey o Dunn, en ambos casos a un nivel de significancia de 0.05.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de dióxido de silicio y magnetita

4.1.1 Caracterización de dióxido de silicio

Se realizó un análisis XRD para determinar la cristalinidad de las NPs de SiO_2 y el difractograma obtenido se muestra en la figura 1. Donde el patrón muestra la señal característica de alta intensidad a 24° de la fase amorfa del SiO_2 y es concordante con lo reportado en otras investigaciones (Cordoba *et al.*, 2023; Gorji *et al.*, 2021).

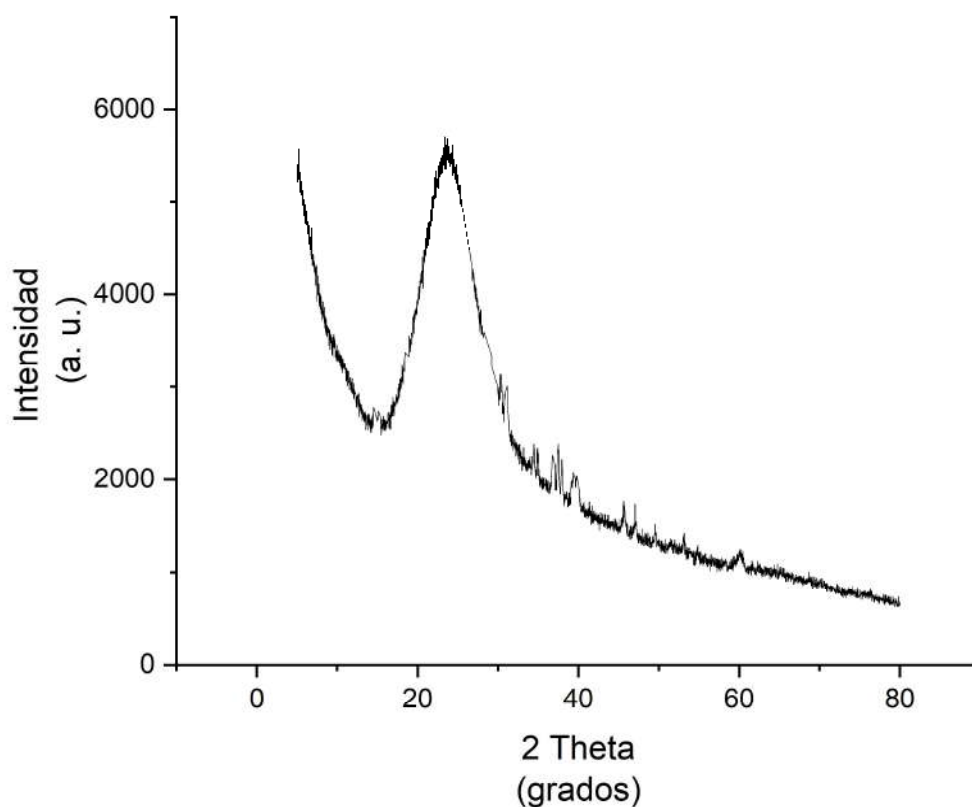


Figura 1. Difracción de rayos x de NPs de dióxido de silicio.

Los resultados del XRD fueron confirmados con la caracterización de TEM (Figura 2) Donde se aprecia la fase amorfa de las NPs de SiO_2 (a, b y c) y la caracterización SEM (d) que revela la uniformidad del compuesto.

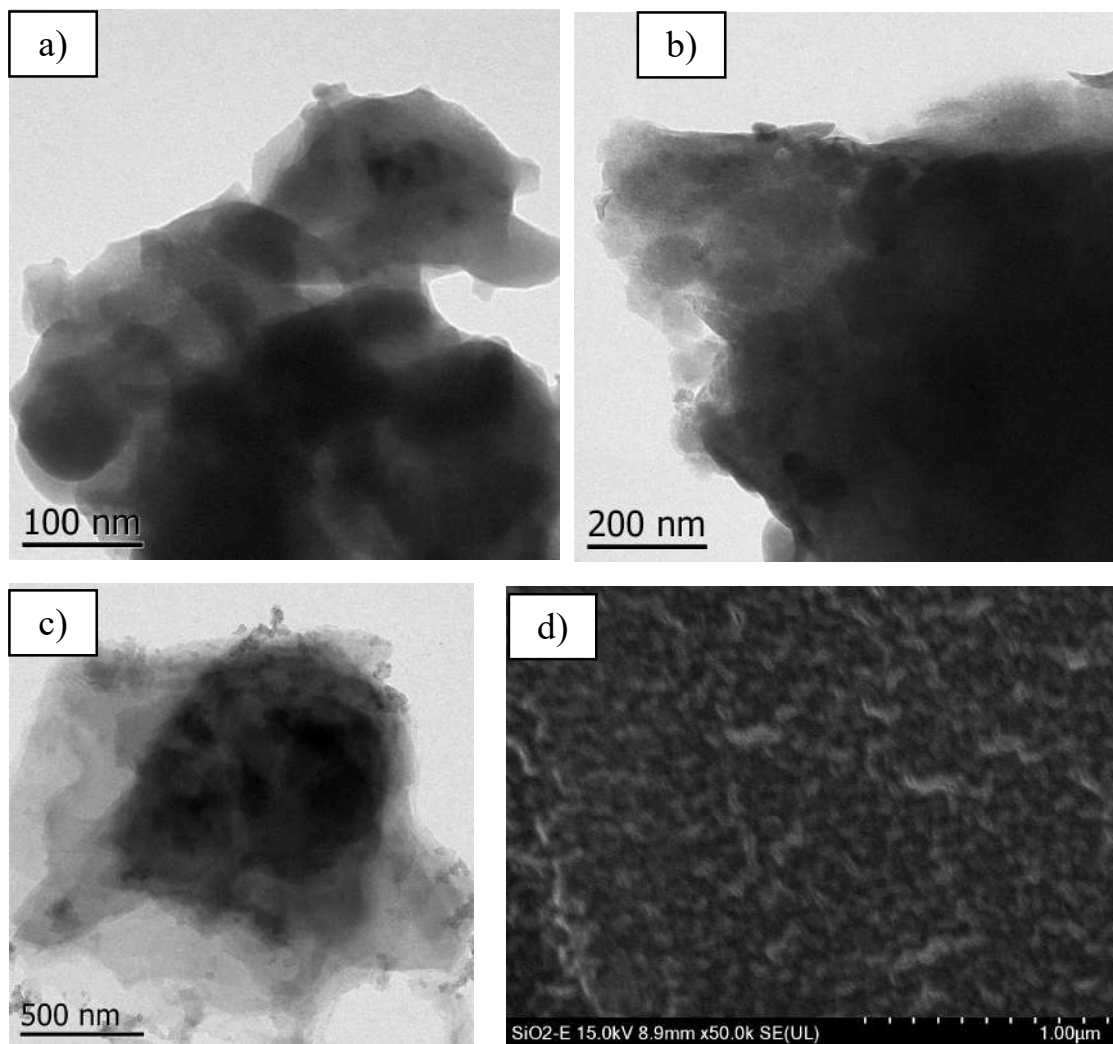


Figura 2. Caracterización TEM y SEM de Nanopartículas de SiO₂

4.1.2 Caracterización de Magnetita

Se realizó el análisis XRD para determinar la cristalinidad de las NPs de magnetita y el difractograma obtenido se muestra en la figura 3 donde se puede apreciar el patrón XRD con las señales características de la fase cristalina de la magnetita, donde su estructura de espinela se ve reflejada en los 29.3, 35.68, 43.24, 57.26 y 62.9°, todos valores aproximados a los reportados por (Vargas-Ortíz *et al.*, 2021) lo

que puede predecir la presencia de magnetita.

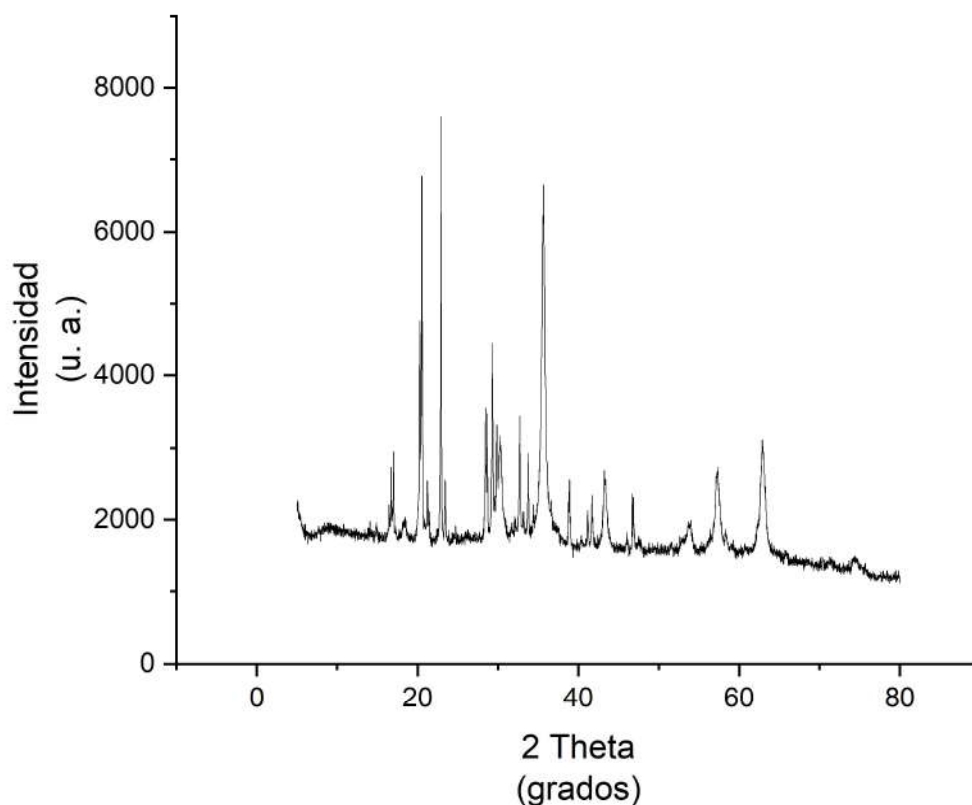


Figura 3. Difracción de rayos x de NPs de magnetita.

Los resultados del XRD fueron confirmados con la caracterización de TEM y SEM (Figura 4) Donde se aprecia una baja dispersión de partículas en general debido a la inevitable aglomeración de partículas del compuesto como resultado de las propiedades magnéticas del mismo. Sin embargo, aun así se pueden apreciar las diminutas partículas dentro de las grandes aglomeraciones.

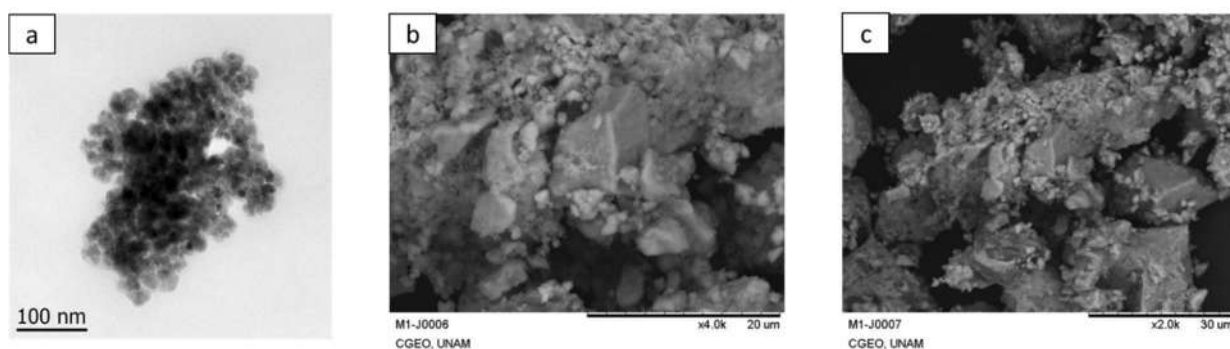


Figura 4. Caracterización TEM y SEM de Nanopartículas de magnetita.

4.2 Determinación el efecto de la aplicación de NPs de dióxido de silicio y magnetita mediante el análisis de variables fisiológicas y morfológicas en el proceso de germinación de semillas de jitomate para establecer su efecto hormético.

4.2.1 Efecto hormético de NPs de dióxido de silicio sobre variables fisiológicas y morfológicas.

De acuerdo a los análisis realizados se encontró que no hay diferencia significativa entre tratamientos en cuanto al porcentaje de germinación de acuerdo a la prueba de Kruskal Wallis. Los porcentajes de germinación obtenidos oscilaron entre 86.25 % (200 ppm) y 93.75 % (25, 75, 100 y 1600 ppm); aunque no se encontraron diferencias significativas, la aplicación de NPs de SiO_2 en 25, 75, 100 y 1600 ppm incremento el porcentaje de germinación mientras que al aplicar 200 ppm como el porcentaje de germinación disminuyo, lo anterior implica que, en grandes cantidades de semilla sembrada la aplicación de NPs podría incrementar o disminuir hasta 3.75% el porcentaje de germinación (Tabla 1).

Tabla 1. Variables morfológicas en germinación de semillas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio.

Concentración (ppm)	PG (%)	T50 (días)	ITG (% día^{-1})	CVG (%)
0	90.00±5.40	2.53±0.10 ab	9.00±0.54	30.14±1.43
5	90±3.54	2.70±0.14 ab	9.00±0.35	31.10±1.73
10	91.25±2.39	2.49±0.03 ab	9.13±0.24	31.56±0.86
25	93.75±2.39	2.51±0.08 ab	9.38±0.24	31.58±1.66
50	92.50±3.23	2.44±0.10 ab	9.25±0.32	33.08±2.65
75	93.75±3.15	2.31±0.08 ab	9.38±0.31	34.48±1.35
100	93.75±3.75	2.31±0.06 a	9.38±0.38	38.13±1.82
200	86.25±1.25	2.74±0.08 b	8.63±0.13	29.60±1.92
400	90.00±4.56	2.43±0.03 ab	9.00±0.46	33.33±2.18
800	91.25±2.39	2.55±0.03 ab	9.13±0.24	30.31±0.61
1600	93.75±3.15	2.60±0.05 ab	9.38±0.31	31.54±1.05

Elaboración propia. Porcentaje de germinación (PG), Tiempo medio de germinación (T50), coeficiente de velocidad de germinación (CVG), índice de tasa de germinación (ITG). Los niveles conectados por columna con distintas letras son significativamente diferentes de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

El T50, variable relacionada con la velocidad de germinación, si mostró diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Krukall Wallis por lo que al aplicar el test de Dunn se identificó al tratamiento testigo con el menor tiempo para obtener el 50% de la germinación total obtenida (1.63 días); a excepción del tratamiento donde se usaron 10 ppm (2.75 días) el resto de los tratamientos son iguales estadísticamente al testigo y su T50 osciló entre 2.16 (800 ppm) y 2.62 días (50 ppm) (Figura 5).

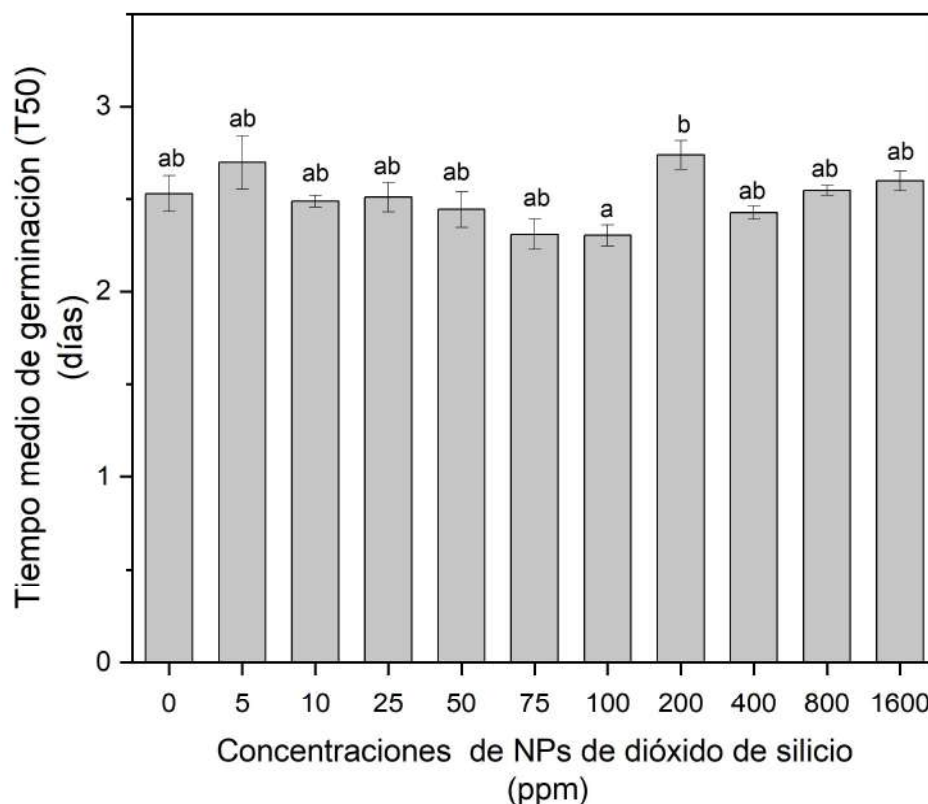


Figura 5. Tiempo medio de germinación (T50) obtenido al aplicar NPs de SiO₂ en semillas de jitomate.

Prueba de normalidad de los datos $r=0.926$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$.

Por otro lado, en cuanto al tiempo medio de germinación, que representa el número de días necesarios para alcanzar el 50% de la germinación final obtenida y que además es un indicativo de la velocidad de germinación (Ferrer et al., 2013) se encontró que si hay una diferencia significativa entre los tratamientos de 100 y 200 ppm; cuando se aplicaron 100 ppm se obtuvo un tiempo medio de germinación de 2.3 días mientras que con 200 ppm se obtuvo un tiempo medio de germinación de 2.74 días. En comparación con el tratamiento testigo no se encontraron diferencias significativas, pero si requirió de más tiempo para alcanzar el 50% de la capacidad germinativa (2.53 días) (Figura 5). Lo anterior significa que a las dosis mencionadas

si beneficia la velocidad con las que germinan las semillas o en su defecto, se puede retrasar el proceso como se encontró con 200 ppm.

El coeficiente de velocidad de germinación (CVG), indicador del porcentaje de germinación a través de los días transcurridos no mostró diferencias significativas entre tratamientos, aunque con la concentración de 100 ppm se incrementó 8 % más que el tratamiento testigo. Ese resultado sugiere que la capacidad de germinación de las semillas se puede ver influenciada positivamente por la aplicación de las NPs de SiO_2 en ciertas concentraciones.

El índice de tasa de germinación (ITG) corresponde al porcentaje de germinación promedio por día después se la siembra y se encontró que no hay diferencias significativas según la prueba de Kruskal Wallis. En general el ITG mostro se ubicó entre 8.63 y 9.38 %/día. El menos porcentaje por día se obtuvo al aplicar 200 ppm de NPs de SiO_2 , por debajo del valor obtenido en el tratamiento testigo (0 ppm) donde se obtuvo 9%, mientras que el mejor ITG se obtuvo en los tratamientos de 25, 75, 100 y 1600 ppm con un 9.38% (Tabla 1). Estos resultados indican que aunque no se encontró una diferencia significativa entre tratamientos si se está generando un efecto sobre el proceso de germinación de la semilla al aplicar dichas NPs.

Con respecto a la longitud de tallo, se identificó diferencia significativa entre tratamientos, posicionando a las mejores longitudes en los tratamientos de 50, 100, 200, 400 y 800 ppm registrando un incremento de entre 23.69 % (200 ppm) y 30.78 % (100 ppm) respecto al tratamiento testigo (0 ppm), lo anterior sugiere un efecto bioestimulante en el crecimiento de plántula con la aplicación de NPs de SiO_2 (Tabla 2).

Tabla 2. Longitud de plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio.

Concentración (ppm)	Longitud de Tallo (mm)	Longitud de Raíz (mm)	Longitud Total (mm)
0	19.88±1.03 bc	7.43±0.40 c	27.30±1.26 de
5	19.36±1.25 bc	9.53±0.51 abc	28.88±1.62 cde
10	18.35±1.01 c	8.29±0.48 bc	26.65±1.19 e
25	21.67±0.91 abc	9.11±0.40 abc	30.78±1.16 bcde
50	25.78±0.96 a	8.26±0.39 bc	34.03±1.20 abc
75	19.52±1.18 bc	9.34±0.47 abc	28.86±1.48 cde
100	26.00±0.87 a	10.92±0.83 a	36.93±1.29 a
200	24.59±0.88 a	9.58±0.64 abc	34.17±1.26 abc
400	25.17±0.87 a	9.39±0.52 abc	34.56±1.13 abc
800	25.76±0.86 a	10.23±0.48 ab	35.98±1.12 ab
1600	23.54±0.78 ab	9.08±0.59 abc	32.61±0.82 abcd

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.997$, $r=0.961$ y $r=0.999$. Los niveles conectados por columna con distintas letras son significativamente diferentes de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

La longitud de raíz mostró diferencias significativas entre tratamientos y sus mejores resultados oscilaron entre 9.08 mm (1600 ppm) y 10.92 mm (100ppm), este último tratamiento un 46.97% más respecto al tratamiento testigo (0 ppm) donde se obtuvo 7.43 mm. Lo anterior sugiere un efecto bioestimulante en aquellos tratamientos donde se aplicaron las NPs de SiO₂. Con respecto a la longitud total, se puede observar que la concentración de 100 ppm fue superior al resto de los tratamientos registrando 36.93 mm de longitud, un 35.27% más de la longitud registrada en el tratamiento testigo; esto sugiere a la dosis 100 ppm como la dosis con el mayor efecto bioestimulante.

El índice de vigor de plántula (IVP) es el producto de la longitud total de la planta y el porcentaje total de germinación obtenido por tratamiento. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 6a), identificando al tratamiento con el mayor IVP (3474.22 mm%), es decir, un 40.95% más respecto al tratamiento testigo (2464.84 mm%). Para esta variable en particular los tratamientos con el mayor valor oscilaron entre 2950.05 mm% (200 ppm) y 3474.22 mm% (100 ppm). Además de eso, en la figura 6b y 6c se muestra la modelación matemática de la variable de 0 a 100 ppm y la modelación matemática de 100 a 1600 ppm, calculadas

en base a los datos recabados durante el experimento y que muestran una predicción del comportamiento basada en la dosis-respuesta, en ambos casos se generó un polinomio de cuarto grado (Tabla 18) con una R^2 de 0.9728 y 1, en ninguno de los casos coincidente con el típico comportamiento hormético.

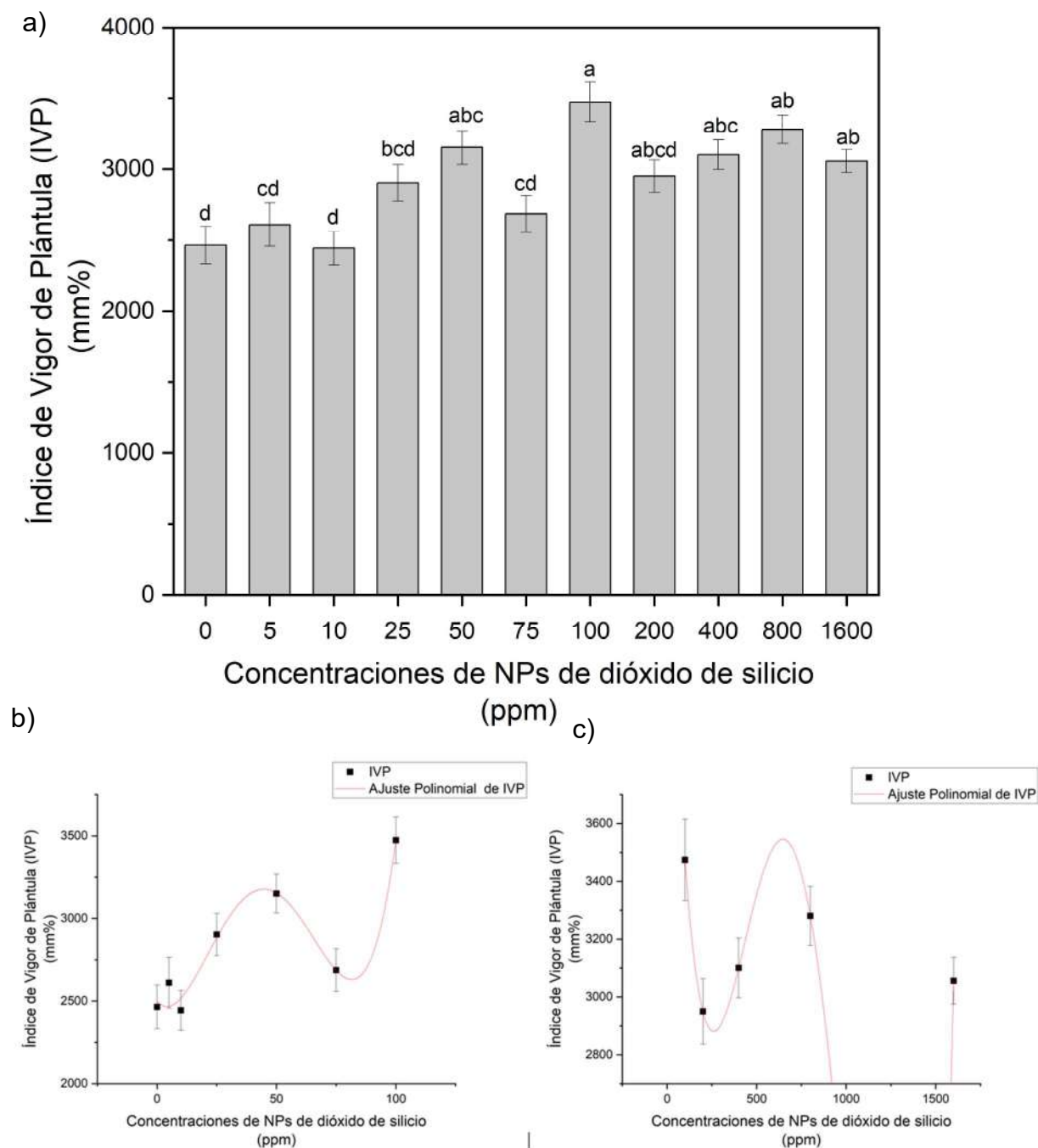


Figura 6. Índice de Vigor de Plántula (IVP) obtenido con la aplicación de NPs de SiO_2 . a) Gráfica de barras, comparación de medias, b) modelación matemática de la variable con las concentraciones de 0 a 100 ppm, c) modelación matemática con las concentraciones de 100 a 1600 ppm.

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.991$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$.

El peso fresco de plántula no mostró diferencias significativas entre tratamientos, aunque, se obtuvieron pesos superiores al tratamiento testigo en la mayoría de los tratamientos, excepto en 400 ppm mientras que los mejores resultados se obtuvieron en las concentraciones de 50, 100 y 200 ppm (Tabla 3).

Tabla 3. Peso fresco y seco de plántula de jitomate tratada con NPs de SiO₂.

Concentración (ppm)	Peso Fresco (mg)	Peso Seco (mg)
0	227.98±28.15	79.33±22.02
5	276.80±23.03	167.53±35.84
10	261.75±28.44	121.30±22.83
25	311.43±10.97	146.23±8.10
50	334.48±30.66	123.70±20.53
75	243.45±26.36	92.45±19.16
100	304.48±21.02	155.23±18.08
200	300.05±28.47	121.63±15.41
400	211.83±34.31	98.30±28.07
800	233.50±11.77	95.70±9.60
1600	229.38±35.98	47.10±10.63

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.993$, $r=0.976$. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

El peso seco de plántula es una variable que tampoco mostró diferencias significativas entre tratamientos, aun así, se obtuvo un peso seco superior al testigo cuando se aplicaron NPs de SiO₂ en todos los tratamientos excepto cuando se aplicaron 1600 ppm que registro un peso seco de 47.10 mg muy por debajo del resto de los tratamientos incluyendo el testigo (Tabla 2).

4.2.2 Efecto hormético de NPs de magnetita sobre variables fisiológicas y morfológicas.

Al analizar el porcentaje de germinación no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Krukal Wallis, aun así, el porcentaje total de germinación fue superior al testigo (87.5%) en aquellos tratamientos donde se aplicaron las NPs excepto en el tratamiento de 800 ppm (86.25%). Los mejores porcentajes se obtuvieron al usar las concentraciones 25 y 1600 ppm obteniendo

un porcentaje de germinación de 96.25%, es decir, un 8.75% más que el tratamiento testigo (Tabla 4).

Tabla 4. Variables morfológicas en germinación de semillas de jitomate tratadas con NPs de magnetita.

Concentración (ppm)	PG (%)	T50 (días)	ITG (% día ⁻¹)	CVG (%)
0	87.5±6.61	1.63±0.07 a	8.75±0.66	45.32±3.60 a
5	95±2.04	2.55±0.11 ab	9.50±0.20	29.64±0.96 b
10	92.5±2.50	2.75±0.17 b	9.25±0.25	30.18±1.30 ab
25	96.25±2.39	2.46±0.30 ab	9.63±0.24	32.42±3.50 ab
50	88.75±4.27	2.62±0.15 ab	8.88±0.43	30.36±2.22 ab
75	93.75±2.39	2.44±0.03 ab	9.38±0.24	31.66±0.18 ab
100	93.75±1.25	2.49±0.06 ab	9.38±0.13	32.10±2.32 ab
200	95±2.04	2.28±0.07 ab	9.50±0.20	35.46±2.25 ab
400	90±2.04	2.42±0.08 ab	9.00±0.20	31.80±1.55 ab
800	86.25±2.39	2.16±0.06 ab	8.63±0.24	37.79±1.14 ab
1600	96.25±2.39	2.21±0.11 ab	9.63±0.24	33.72±1.31 ab

Elaboración propia. Porcentaje de germinación (PG), Tiempo medio de germinación (T50), Índice de tasa de germinación (ITG), coeficiente de velocidad de germinación (CVG). Prueba de normalidad de los datos $r=0.926$, $r=0.955$, $r=0.970$ $n=4$. Los niveles conectados por columna con distintas letras son significativamente diferentes de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

El T50, variable relacionada con la velocidad de germinación, si mostró diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Krukall Wallis por lo que al aplicar el test de Dunn se identificó al tratamiento testigo con el menor tiempo para obtener el 50 % de la germinación total obtenida (1.63 días), y, a excepción del tratamiento donde se usaron 10 ppm (2.75 días), el resto de los tratamientos son iguales estadísticamente al testigo y su T50 osciló entre 2.16 (800 ppm) y 2.62 días (50 ppm) (Figura 7).

El índice total de germinación no mostró diferencias significativas entre tratamientos, pero, los mayores porcentajes por día los registraron los tratamientos de 25 y 1600 ppm (9.63 %/día). En lo referente al CVG el mayor porcentaje lo registró el tratamiento testigo (45.32 %) mientras que el menor porcentaje se obtuvo del tratamiento de 5 ppm (29.64 %), el resto de los tratamientos fueron iguales al testigo de acuerdo al test de Dunn.

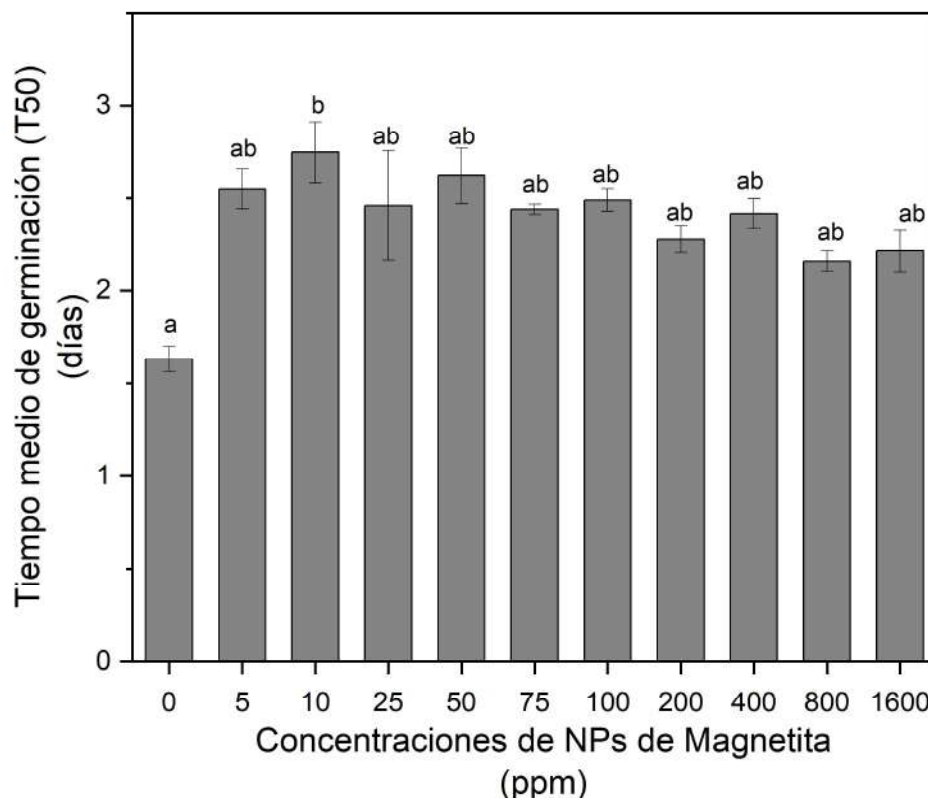


Figura 7. Tiempo medio de germinación (T50) obtenido al aplicar NPs de magnetita en semillas de jitomate.

Prueba de normalidad de los datos $r=0.955$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$.

La longitud de tallo registró diferencias significativas entre tratamientos, posicionando a 1600 ppm de magnetita como el tratamiento con la mayor longitud de tallo (29.34 mm), 23.84 % más que el tratamiento testigo (23.69 mm). Por otra parte, los tratamientos de 75, 100 y 400 ppm fueron estadísticamente iguales a 1600 ppm mientras que la concentración de 5 ppm registro la menor longitud (22.23 mm) (Tabla 5). La longitud de raíz, registro sus mayores valores en 10, 200 y 1600 ppm con 10.01, 10.66 y 10.66 mm respectivamente, aunque estadísticamente no se tuvo diferencia significativa entre tratamientos.

La longitud total si mostró diferencias significativas entre tratamientos, se encontró que 1600 ppm de magnetita fue el tratamiento con el mayor valor como resultado (40.01 mm), un 23.37% más que lo registrado en el tratamiento testigo (32.43 mm), mientras que 1600, 10, 75, 100, 200 y 400 ppm tuvieron igualdad estadística de acuerdo con el test de Tukey. En lo referente a la menor longitud total registrada, se encontró en el tratamiento de 5 ppm (31.33 mm). Lo anteriormente expuesto sugiere un efecto bioestimulante de las NPs de magnetita en plántula de jitomate.

Tabla 5. Longitud de plántula de jitomate tratada con NPs de magnetita.

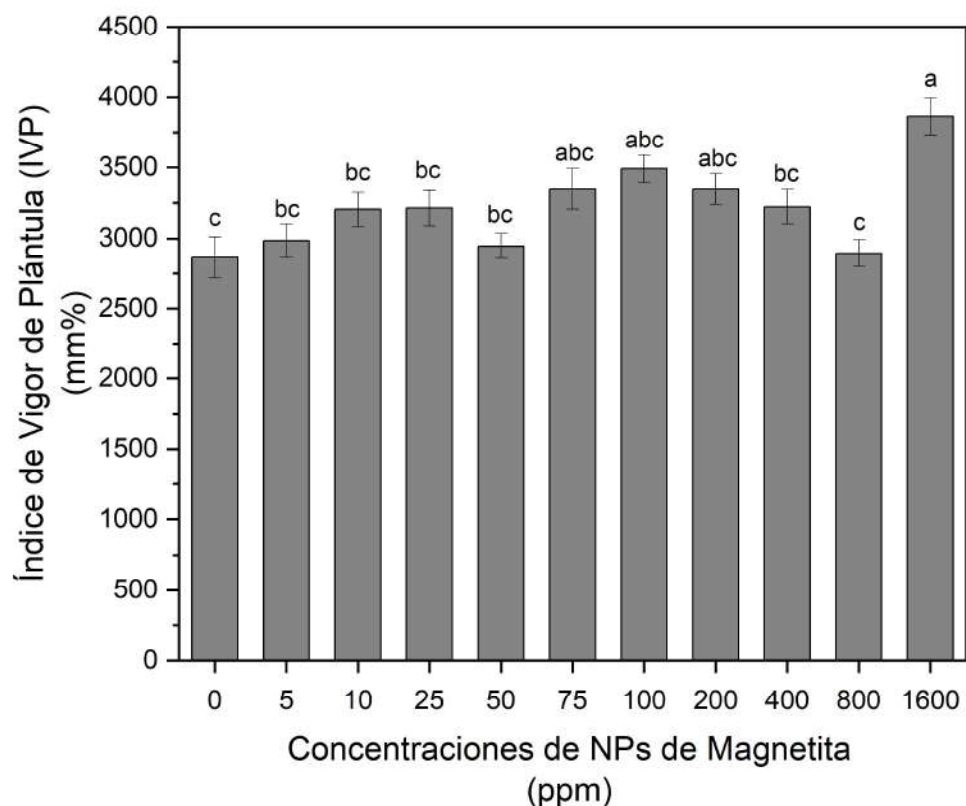
Concentración (ppm)	Longitud de Tallo (mm)	Longitud de Raíz (mm)	Longitud Total (mm)
0	23.69±1.00 bc	8.74±0.53	32.43±1.36 bc
5	22.23±0.91 c	9.10±0.52	31.33±1.16 c
10	24.73±0.89 bc	10.01±0.79	34.74±1.34 abc
25	24.97±0.96 bc	8.48±0.45	33.45±1.31 bc
50	24.68±0.61 bc	8.59±0.46	33.28±0.95 bc
75	26.36±0.82 ab	9.16±0.75	35.52±1.31 abc
100	27.23±0.78 ab	9.98±0.46	37.20±1.02 ab
200	25.01±0.73 bc	10.18±0.57	35.19±1.04 abc
400	26.00±1.09 abc	9.90±0.54	35.91±1.40 abc
800	24.21±0.94 bc	9.49±0.57	33.69±1.21 bc
1600	29.34±0.93 a	10.66±0.43	40.01±1.23 a

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.995$, $r=0.964$ y $r=0.995$. Los niveles conectados por columna con distintas letras son significativamente diferentes de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

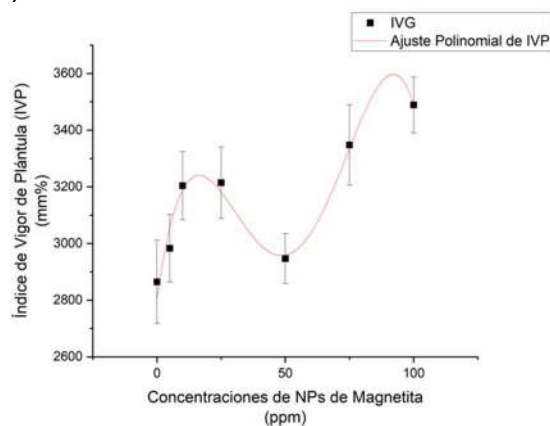
El IVP es una variable que representa el producto entre la longitud total y el porcentaje total de germinación obtenida por tratamiento; en este caso, si se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, se identificó a 1600 ppm como el tratamiento el mayor IVP (3863.75 mm%) un 34.87 % más que el tratamiento testigo (2864.77 mm%), las concentraciones de 75, 100 y 200 ppm resultaron con igualdad estadística a las 1600 ppm aunque sus valores fueron menores a este último (Figura 8a). en cuanto a la modelación matemática de la IVP se encontró que un polinomio de cuarto grado representa la dosis respuesta para las concentraciones que van de 0 a 100 ppm (Figura 8b), mientras que las

concentraciones de 100 a 1600 ppm forman parte de un polinomio de segundo grado (Figura 8c) con una R^2 ajustada de 0.9253 y 0.9426 respectivamente (Tabla 21); en ambos casos no coincidentes con el comportamiento típico esperado en la hormesis.

a)



b)



c)

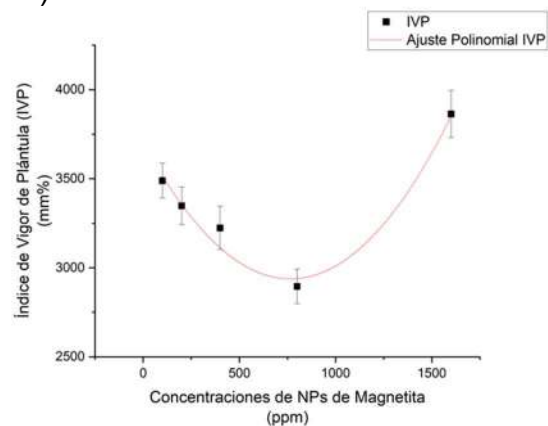


Figura 8. Índice de Vigor de Plántula (IVP) obtenido con la aplicación de NPs de magnetita. a) gráfica de barras, comparación de medias, b) modelación matemática de la variable con las concentraciones de 0 a 100 ppm, c) modelación matemática con las concentraciones de 100 a 1600 ppm).

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.986$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$.

El peso fresco no mostró diferencias significativas entre tratamientos, aun así, el tratamiento con la concentración de 1600 ppm (280.65 mg) fue superior al resto de los tratamientos incluyendo el tratamiento testigo (232.35 mg). En lo referente al peso seco el tratamiento de 5 ppm obtuvo el mayor peso seco (99.45 mg) igualmente por encima del peso seco obtenido en el tratamiento testigo (60.00 mg) (Tabla 6).

Tabla 6. Peso fresco y seco de plántula de jitomate tratada con NPs de magnetita. .

Concentración (ppm)	Peso Fresco (mg)	Peso seco (mg)
0	232.35±1.23	60.00±4.73
5	269.05±12.71	99.45±8.41
10	257.90±6.76	78.80±11.74
25	240.93±13.05	70.63±9.63
50	204.35±9.41	52.25±6.54
75	254.65±14.83	64.60±8.96
100	253.58±8.59	67.10±10.72
200	226.70±12.93	60.55±4.14
400	223.68±21.72	55.83±6.30
800	263.35±11.39	82.50±9.37
1600	280.65±15.64	88.80±3.63

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.994$, $r=0.982$. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

4.2.3 Efecto hormetico de la combinación de NPs de dióxido de silicio y magnetita sobre variables fisiológicas y morfológicas.

Al aplicar NPs combinadas de dióxido de silicio y magnetita en semillas de jitomate se encontró que el porcentaje de germinación no mostro diferencias significativas entre tratamientos y que el tratamiento testigo obtuvo el mayor porcentaje de germinación (97 %), mientras que el menor porcentaje de germinación se obtuvo en la concentración de 800 ppm con un porcentaje de 86 %; en aquellos tratamientos donde se aplicaron NPs el mayor porcentaje de germinación se obtuvo de 96 % con 25 y 75 ppm (Tabla 7) .

En cuanto a T50, es decir, días que tomo obtener el 50% del porcentaje total de germinación, no se encontraron diferencias significativas pero el tratamiento testigo obtuvo el mejor tiempo (1.54 días), el resto de los tratamientos oscilaron entre 1.55 y 1.81 días en 50 y 1600 ppm respectivamente (Figura 9).

El ITG no mostró diferencias significativas entre tratamientos y los resultados obtenidos para esta variable oscilaron entre 9 y 9.63 %/día mientras que el tratamiento testigo registró el mayor ITG con 9.75 %/día (Tabla 7).

El CVG no mostró diferencias significativas y el tratamiento testigo registro el valor más elevado con 47.52 % mientras que el tratamiento de 400 ppm registro el menor CVG con un 37.69 %.

Tabla 7. Variables morfológicas en germinación de semillas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio y Magnetita.

Concentración (ppm)	PG (%)	T50 (días)	ITG (% dia^{-1})	CVG (%)
0	97±1.44	1.54±0.03	9.75±0.14	47.52±1.99
5	95±3.54	1.73±0.12	9.50±0.35	41.97±3.08
10	92±3.23	1.58±0.04	9.25±0.32	46.05±2.16
25	96±1.25	1.61±0.02	9.63±0.13	46.12±0.71
50	93±3.75	1.55±0.02	9.38±0.38	46.72±2.14
75	96±2.39	1.57±0.04	9.63±0.24	46.01±2.53
100	92±1.44	1.73±0.06	9.25±0.14	40.69±2.63
200	93±3.75	1.58±0.04	9.38±0.38	46.55±2.13
400	90±4.08	1.87±0.12	9.00±0.41	37.69±1.73
800	86±2.39	1.67±0.04	8.63±0.24	42.19±0.95
1600	91±5.54	1.81±0.05	9.13±0.55	40.97±1.26

Elaboración propia. Porcentaje de germinación (PG), Tiempo medio de germinación (T50), índice de tasa de germinación (ITG), coeficiente de velocidad de germinación (CVG). Prueba de normalidad de los datos $r=0.936$, $r=0.801$, $r=0.936$, $r=0.970$. Los niveles conectados por columna con distintas letras son significativamente diferentes de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

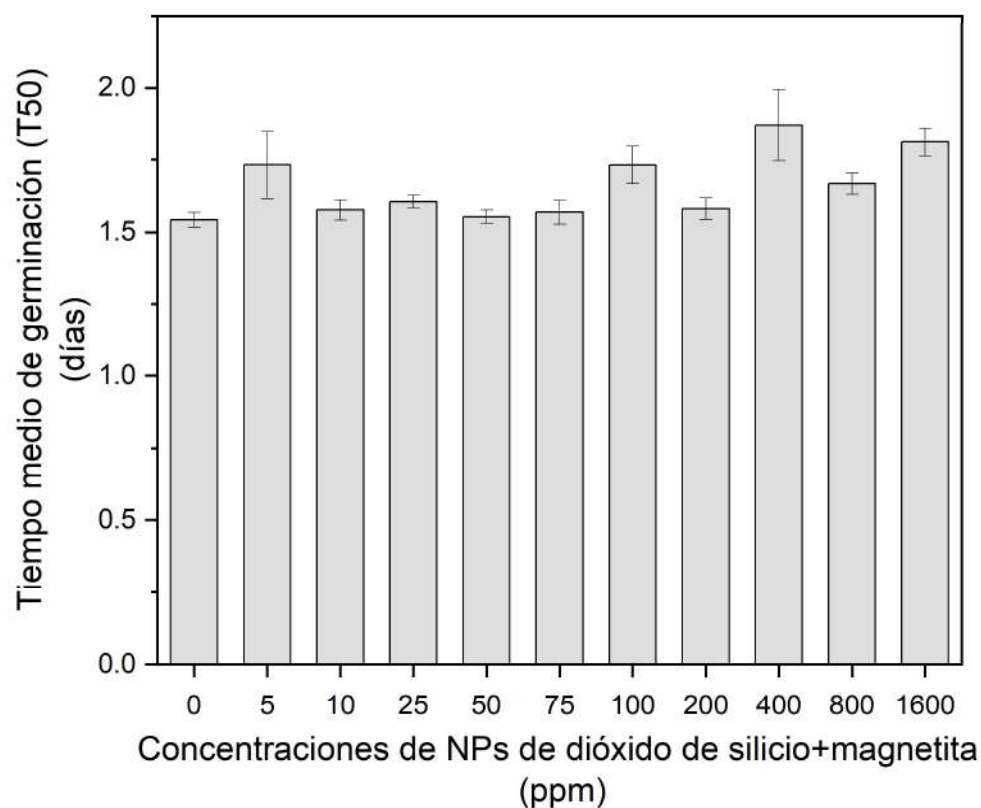


Figura 9. Tiempo medio de germinación (T50) obtenido al aplicar NPs de dióxido de silicio+ magnetita en semillas de jitomate.

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.801$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$).

Al aplicar NPs combinadas de dióxido de silicio y magnetita se encontró diferencia significativa entre tratamientos, para la variable de longitud de tallo, con la concentración de 200 ppm (26.84 mm), 800 ppm (26.60 mm) y 1600 ppm (26.04 mm) y 0 ppm (25.99 mm) mientras que la menor longitud de tallo se obtuvo en el tratamiento de 5 ppm con 13.10 mm de longitud (Tabla 8).

La longitud de raíz mostró diferencias significativas entre tratamientos, la mayor longitud de raíces se obtuvo en el tratamiento de 100 ppm (10.02 mm). Los tratamientos con los mejores resultados fueron 0, 25, 50, 75, 100 y 200 ppm mientras que las raíces más pequeñas se obtuvieron al utilizar la concentración de

5 ppm (6.42 mm). Por otra parte, la longitud total no mostró diferencias entre tratamientos aunque la mayor longitud se registró en 200 ppm (Tabla 8).

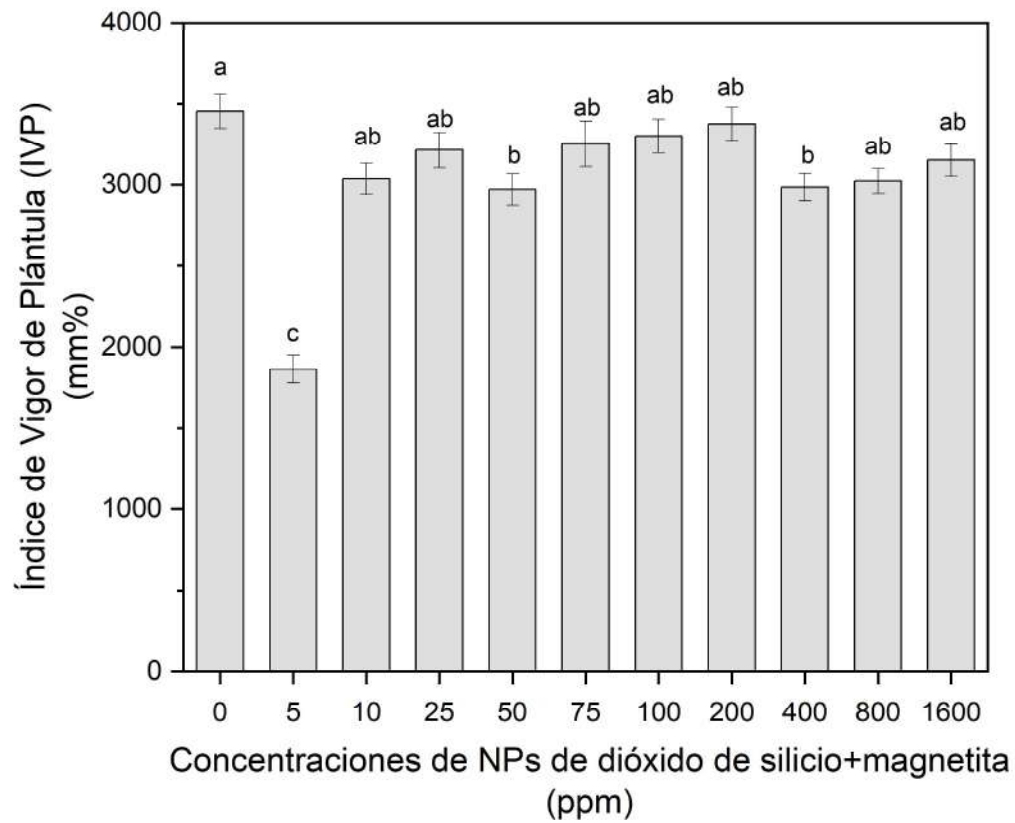
Tabla 8. Longitud de plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio + magnetita.

Concentración (ppm)	Longitud de Tallo (mm)	Longitud de Raíz (mm)	Longitud Total (mm)
0	25.99±0.85 a	9.45±0.44 a	35.43±1.07
5	13.10±0.73 c	6.42±0.28 b	19.53±0.80
10	24.83±0.68 ab	8.00±0.47 ab	32.83±1.00
25	24.52±0.74 ab	8.90±0.60 a	33.42±1.16
50	22.28±0.86 b	9.49±0.38 a	31.78±1.04
75	24.63±0.82 ab	9.11±0.94 a	33.74±1.38
100	25.64±0.69 ab	10.02±0.56 a	35.67±1.08
200	26.84±0.79 a	9.14±0.45 a	35.98±1.00
400	25.53±0.68 ab	7.69±0.36 ab	33.22±0.88
800	26.60±0.64 a	8.51±0.49 ab	35.11±0.93
1600	26.04±0.70 a	8.56±0.40 ab	34.60±0.96

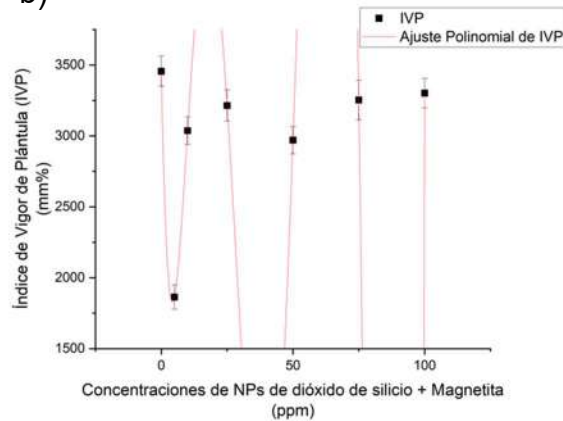
Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.986$, $r=0.996$, $r=0.958$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$.

El IVP muestra diferencias significativas entre tratamientos, posicionando como el tratamiento un mayor IVP al tratamiento testigo con 3455.83 mm% mientras que el mayor valor obtenido con el uso de NPs de dióxido de silicio y magnetita se obtuvo al aplicar 200 ppm, y se generó un IVP de 3375.72 mm%. Los mayores IVP se obtuvieron con las concentraciones: 0 10, 25, 75, 100, 200, 800 y 1600 ppm mientras que el menor IVP se adquirió con la concentración de 5 ppm (1863.45 mm%) (Figura 10a). Adicionalmente la modelación matemática basada en los datos dosis-respuesta registrados para la variable IVP, permite predecir el comportamiento esperado para las mismas entre las dosis 0 y 100 ppm (Figura 10b) y 100 y 1600 ppm (Figura 10c), ambas descritas por funciones de tipo polinomial, de sexto y cuarto grado, con una R^2 de 1 en ambos casos (Tabla 24), comportamiento no coincidente con el comportamiento normalmente esperado cuando se tiene hormesis.

a)



b)



c)

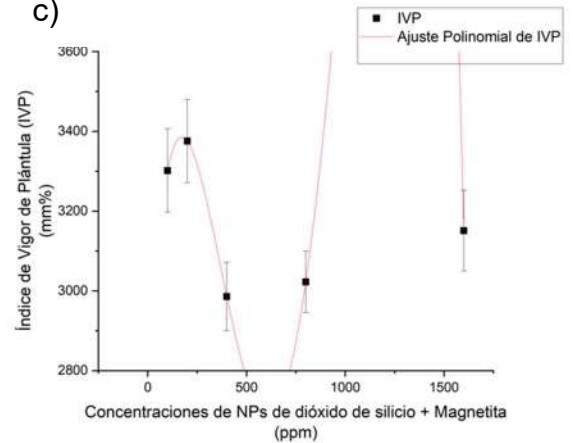


Figura 10. Índice de Vigor de Plántula (IVP) obtenido con la aplicación de NPs de dióxido de silicio + magnetita. a) Gráfica de barras, comparación de medias, b) modelación matemática de la variable con las concentraciones de 0 a 100 ppm, c) modelación matemática con las concentraciones de 100 a 1600 ppm).

Elaboración Propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.952$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$.

El peso fresco no mostró diferencias significativas entre tratamientos y el mayor valor se obtuvo con la concentración de 1600 ppm mientras que el menor peso fresco se obtuvo al utilizar 5 ppm (Tabla 9). Al igual que el peso fresco, el peso seco no presento diferencias significativas entre tratamientos, pero el mayor peso fresco se obtuvo en la concentración de 1600 ppm.

Tabla 9. Peso fresco y seco de plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio + magnetita.

Concentración (ppm)	Peso Fresco (mg)	Peso seco (mg)
0	282.28±9.55	67.50±1.80
5	143.85±22.22	42.30±5.73
10	265.98±6.52	56.13±5.91
25	258.58±7.80	55.30±10.20
50	266.68±22.23	63.65±5.96
75	250.73±21.37	49.60±9.71
100	297.40±9.39	66.50±5.01
200	288.30±12.53	61.85±16.55
400	280.60±9.57	57.45±12.42
800	272.40±23.98	58.10±8.69
1600	301.43±11.39	73.88±6.53

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.909$, $r=0.961$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Dunn ($p=0.05$) $n=4$. Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

4.3 Determinación del efecto de la aplicación de NPs de dióxido de silicio y magnetita mediante el análisis de variables bioquímicas durante el proceso de germinación de semillas de jitomate para establecer su efecto hormético.

4.3.1 Efecto hormetico de NPs de dióxido de silicio sobre variables bioquímicas.

La proteína total analizada en los tratamientos expuestos a NPs de dióxido de silicio mostró diferencias significativas; se encontró que la concentración de 1600 ppm genero un mayor contenido de proteína, registró 15.01 mg de proteína por g de

muestra fresca mientras que al aplicar 25 ppm se obtuvo el menor contenido de proteína (5.78 mg de proteína/ g de muestra fresca), incluso por debajo del tratamiento testigo (10.69 mg de proteína/ g de muestra fresca) (Figura 11).

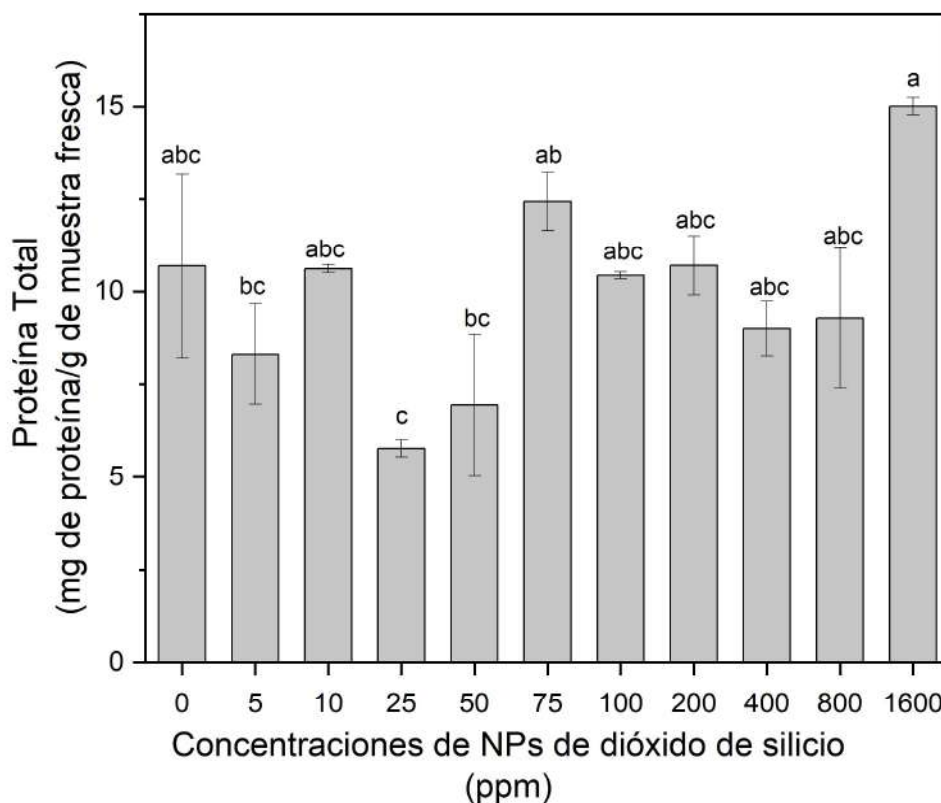


Figura 11. Proteína Total en plántulas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio.

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.984$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

La actividad enzimática antioxidante mostró diferencias significativas entre tratamientos; cuando se analizó la actividad de la enzima SOD, enzima antioxidante relacionada con las estrategias de defensa de las plantas sometidas a estrés (Stephenie *et al.*, 2020); se encontraron diferencias significativas que mostraron a la concentración de 400 ppm como el tratamiento con mayor actividad de dicha enzima (1.0385 U/mg de proteína), 20 veces más que en el tratamiento testigo, este

último identificado como el tratamiento con la menor actividad de SOD (Tabla 10) el resto de los tratamientos se mantuvieron por encima del tratamiento testigo y por debajo de lo encontrado en el tratamiento de 400 ppm, en el caso del tratamiento con 100 ppm que mostró actividad bio estimulante en variables como T50 e IVP, se cuantificaron 0.3873 U/mg de proteína, 7 veces más la actividad de SOD en el tratamiento testigo.

La actividad de la enzima CAT, enzima antioxidante que participa en los procesos de señalización cuando las plantas deben enfrentar situaciones fisiológicas y adversas (Palma *et al.*, 2020). Mostró diferencias significativas entre tratamientos, con la aplicación de las NPs de dióxido de silicio; en este caso la concentración de 10 ppm mostro la mayor actividad de CAT, 5 veces más que el tratamiento testigo, mientras que para el tratamiento de 100 ppm se cuantificaron 0.4341 U/ mg de proteína; 1.5 veces más que la actividad de CAT en el tratamiento testigo.

La actividad de la enzima PAL se incrementa por factores ambientales y se relaciona con la inducción de la síntesis de compuestos fenólicos (Taiz y Zeiger, 2010), en este caso, la aplicación de NPs de dióxido de silicio mostró diferencias significativas entre tratamientos y la concentración de 25 ppm registró la mayor actividad de esta enzima, 30 % más de lo que se registró en el tratamiento testigo mientras que el tratamiento de 100 ppm mostró menor actividad de la enzima que el tratamiento testigo (Tabla 10).

Tabla 10. Actividad enzimática antioxidante en plántulas tratadas con NPs de dióxido de silicio.

Concentración (ppm)	SOD (U/mg de proteína)	CAT (U/mg de proteína)	PAL (U/mg de proteína)
0	0.0481±0.003 e	0.1712±0.013 ef	0.0192±0.0001 b
5	0.3203±0.076 bcd	0.8292±0.007 b	0.0176±0.0014 bc
10	0.0817±0.013 de	1.0761±0.045 a	0.0182±0.0004 bc
25	0.1434±0.027 cde	0.1390±0.004 f	0.0253±0.0017 a
50	0.1938±0.024 cde	0.1775±0.011 ef	0.0197±0.0020 ab
75	0.4758±0.076 b	0.7438±0.014 b	0.0103±0.0012 d
100	0.3873±0.048 bc	0.4341±0.030 c	0.0135±0.0010 cd
200	0.2230±0.005 bcde	0.2937±0.008 d	0.0174±0.0003 bc
400	1.0385±0.109 a	0.2465±0.019 de	0.0165±0.0010 bc
800	0.3862±0.030 bc	0.8267±0.009 b	0.0173±0.0003 bc
1600	0.2405±0.034 bcde	0.2187±0.015 def	0.0106±0.0010 d

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.984$, $r=0.911$, $r=0.981$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos se muestran como promedio $\pm$ error estándar.

Los compuestos fenólicos poseen propiedades bioactivas (De la Rosa *et al.*, 2019) entre las que destacan la activación de los mecanismos de defensa enzimáticos y la reducción de los niveles de estrés en plantas (Zárate-Martínez *et al.*, 2021).

La cuantificación de fenoles totales mostró diferencias significativas entre tratamientos; se encontró que con la concentración de 800 ppm se incrementó 49 % el contenido de fenoles totales en comparación con el tratamiento testigo (557.76 mg GAE/ g de muestra seca) y que con la concentración de 100 ppm se incrementó un 35% más la producción de fenoles totales, el resto de los tratamientos mostraron un contenido de fenoles totales superior al tratamiento testigo excepto el tratamiento de 5 ppm cuyo contenido de fenoles se mantuvo por debajo del obtenido en el tratamiento testigo (Figura 12).

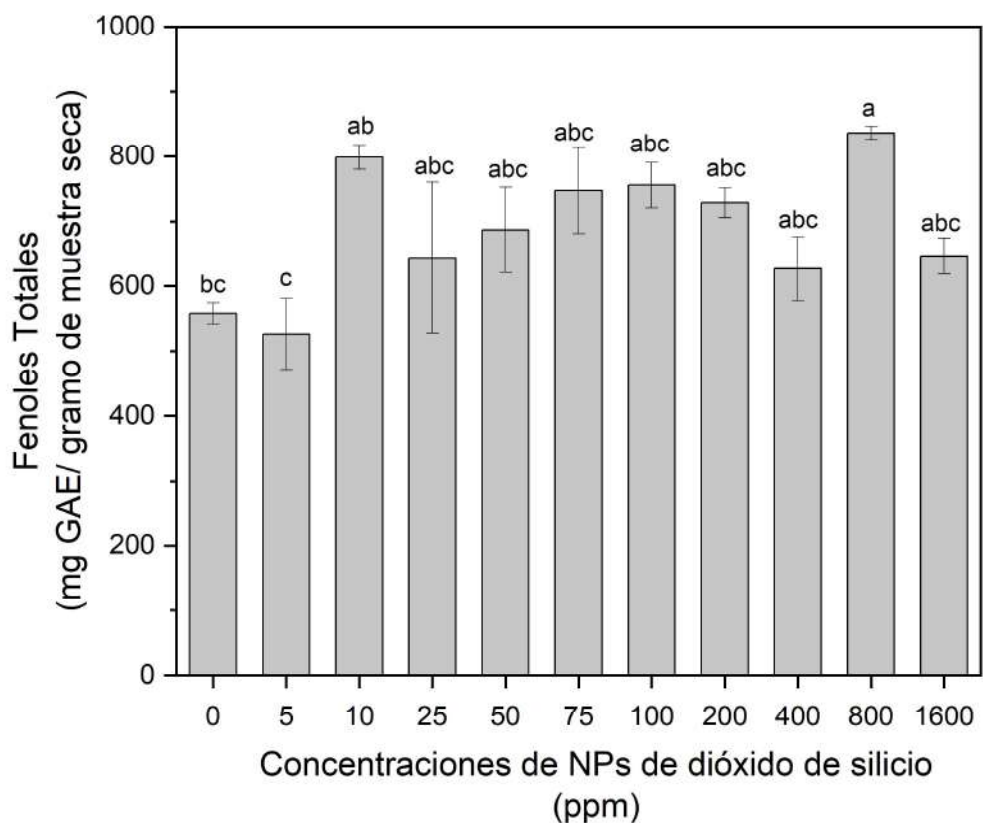


Figura 12. Fenoles totales en plántula de jitomate procedente de semillas tratadas con NPs de dióxido de silicio.

Prueba de normalidad de los datos $r=0.996$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

Los flavonoides cumplen funciones relacionadas a la protección de la planta contra factores ambientales como la exposición a rayos UV (Bhattacharya, 2019). Los flavonoides totales mostraron diferencia significativa entre tratamientos; la concentración de 1600 ppm fue el tratamiento con el mayor contenido, mientras que el tratamiento de 5 ppm fue el tratamiento con el menor contenido de flavonoides (Figura 13).

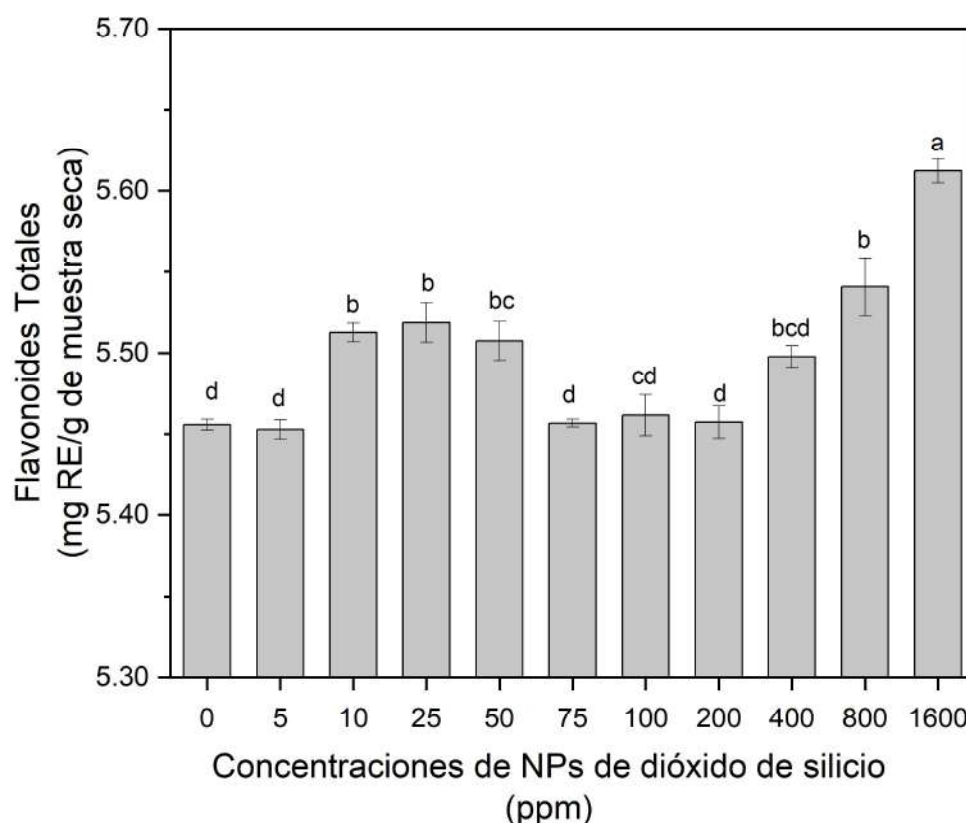


Figura 13. Flavonoides Totales en plántula de jitomate tratada con NPs de SiO₂

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.996$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

La capacidad antioxidante confiere a las plantas propiedades de neutralización de radicales libres para prevenir el estado de estrés oxidativo, lo que necesariamente confiere a las plantas tolerancia al estrés (Méndez-Vázquez *et al.*, 2021). Por lo mismo medir la capacidad antioxidante proporciona información importante sobre los efectos de la aplicación de NPs. El porcentaje de inhibición del radical DPPH mostro diferencias significativas entre tratamientos; el mayor porcentaje de inhibición se registró en el tratamiento de 1600 ppm con un 97.16 %, 4.48 % más del porcentaje registrado en el tratamiento testigo, el resto de los tratamientos fueron superiores a este último (Tabla 11). Respecto a la capacidad antioxidante por el método DPPH se encontró que hay diferencia significativa entre tratamientos; el

tratamiento de 1600 ppm registro 348.92 mg ET/ g de muestra seca, el resto de los tratamientos fue superior al tratamiento testigo.

La capacidad antioxidante por el método de FRAP, mostró diferencias significativas entre tratamientos; se encontró que los tratamientos de 75 y 100 ppm registraron la mayor actividad antioxidante mientras que 5, 200 y 1600 ppm registraron la mejor capacidad antioxidante incluso en comparación con el tratamiento testigo (Tabla 11).

Tabla 11. Capacidad Antioxidante en plántula tratada con NPs de dióxido de silicio.

Concentración (ppm)	Porcentaje de Inhibición del radical DPPH (%)	AOC DPPH (mg TE/g de muestra seca)	AOC FRAP (mg TE/g de muestra seca)
0	92.68±0.59 d	330.49±1.97 e	112.09±2.34 ab
5	96.93±0.71 a	342.97±2.37 abc	95.23±1.88 c
10	93.35±0.18 d	334.36±0.62 de	110.05±2.30 ab
25	93.07±0.42 d	333.43±1.42 de	113.99±2.70 ab
50	93.67±0.41 cd	335.44±1.38 cde	103.38±1.91 bc
75	96.11±0.30 ab	343.64±1.01 ab	116.20±1.95 a
100	94.40±0.61 bcd	339.61±2.07 bcd	116.02±4.13 a
200	94.88±0.21 abcd	332.88±0.68 de	94.70±0.44 c
400	95.76±0.54 abcd	337.44±1.78 bcde	102.42±1.78 bc
800	94.58±0.18 bcd	338.51±0.62 bcd	104.76±0.90 abc
1600	97.16±0.47 a	348.92±1.59 a	96.01±4.05 c

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.992$, $r=0.98$, $r=0.996$. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

4.3.2 Efecto hormético de NPs de magnetita sobre variables bioquímicas.

La proteína total se ve influenciada por la aplicación de NPs de magnetita ya que de acuerdo a la cuantificación de proteínas se identificó que hay diferencias significativas entre tratamientos; a 50 ppm se incrementa el contenido de proteína total (16.91 mg /g de muestra fresca) mientras que a 100 ppm se registró el menor contenido de proteína (6.20 mg/ g de muestra fresca), incluso por debajo de la

proteína contenida en el tratamiento testigo (11.41 mg/ g de muestra fresca) (Figura 14).

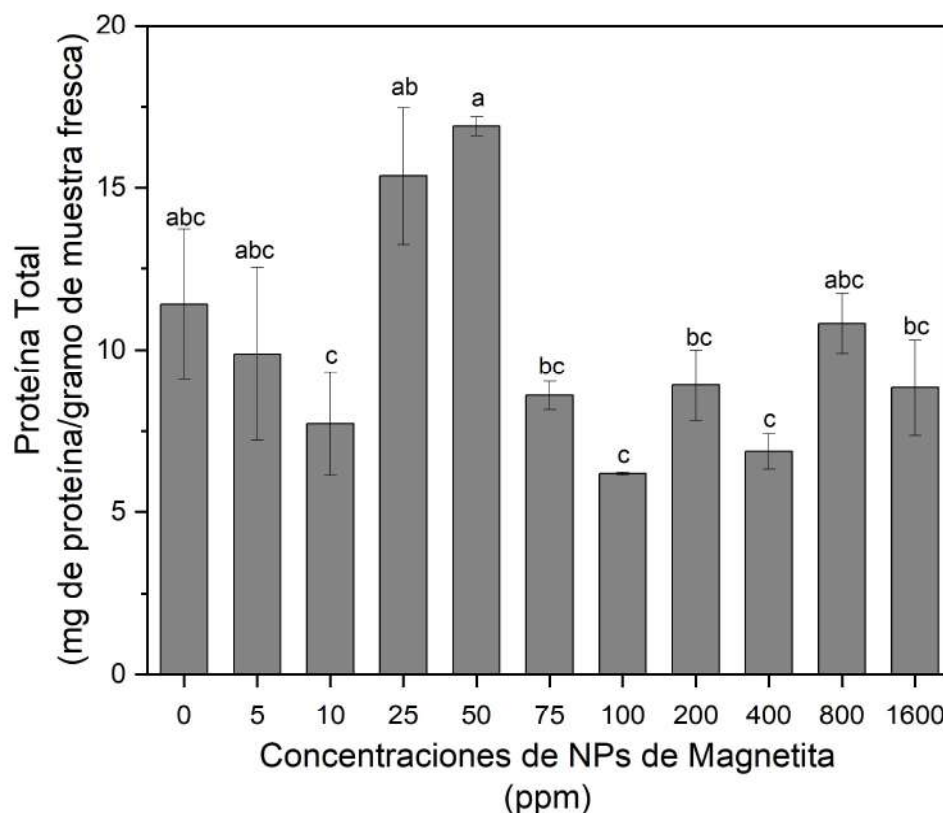


Figura 14. Proteína Total en plántulas de jitomate tratadas con NPs de magnetita.

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.984$, $r=0.911$, $r=0.981$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos se muestran como promedio $\pm$ error estándar.

La actividad enzimática antioxidante mostró diferencias significativas entre tratamientos cuando se aplicaron NPs de Magnetita; la actividad de SOD se incrementó hasta 4 veces más que en el tratamiento testigo en la concentración de 10 ppm mientras que la concentración de 50 ppm registró una actividad de SOD por debajo del tratamiento testigo (Tabla 12).

La actividad de CAT mostró diferencias significativas entre tratamientos; en las concentraciones de 10 y 100 ppm, tratamientos donde se registró la mayor actividad

de CAT, 1.85 y 1.88 veces más que el tratamiento testigo, mientras el tratamiento de 5 ppm registró menor actividad CAT que este último.

La actividad de la enzima PAL mostró diferencias significativas entre tratamientos, la concentración de 100 ppm registró la mayor actividad de PAL mientras que con la concentración de 50 ppm se registró una menor actividad de PAL, incluso por debajo de lo registrado en el tratamiento testigo.

Tabla 12. Actividad enzimática antioxidante en plántulas de jitomate tratadas con NPs de magnetita.

Concentración (ppm)	SOD (U/mg de proteína)	CAT (U/mg de proteína)	PAL (U/mg de proteína)
0	0.1654±0.0418 de	0.2452±0.0107 cd	0.0155±0.0006 c
5	0.3192±0.0304 bcd	0.2184±0.0325 cde	0.0167±0.0003 c
10	0.8818±0.0776 a	0.6991±0.0111 a	0.0223±0.0003 b
25	0.2227±0.0109 cde	0.0989±0.0092 f	0.0150±0.0004 c
50	0.0642±0.0102 e	0.1549±0.0143 ef	0.0109±0.0005 d
75	0.4229±0.0035 b	0.4119±0.0049 b	0.0231±0.0009 b
100	0.1714±0.0052 de	0.7070±0.0190 a	0.0288±0.0011 a
200	0.1967±0.0178 cde	0.1302±0.0051 ef	0.0222±0.0007 b
400	0.3433±0.0482 bc	0.1757±0.0279 def	0.0238±0.0005 b
800	0.2791±0.0165 bcd	0.2932±0.0074 c	0.0152±0.0015 c
1600	0.1635±0.0109 de	0.1913±0.0255 de	0.0170±0.0008 c

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.880$, $r=0.892$, $r=0.984$. Letras distintas entre columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos se muestran como promedio $\pm$ error estándar.

El contenido de fenoles totales entre tratamientos mostró diferencias significativas, el mayor contenido de fenoles se obtuvo con la concentración de 75 ppm (830.75 mg GAE/ g de muestra seca), un 23.8 % más que el tratamiento testigo, mientras las concentraciones de 10, 100, 200 y 400 ppm tuvieron un menor contenido de fenoles totales que el mismo (Figura 15).

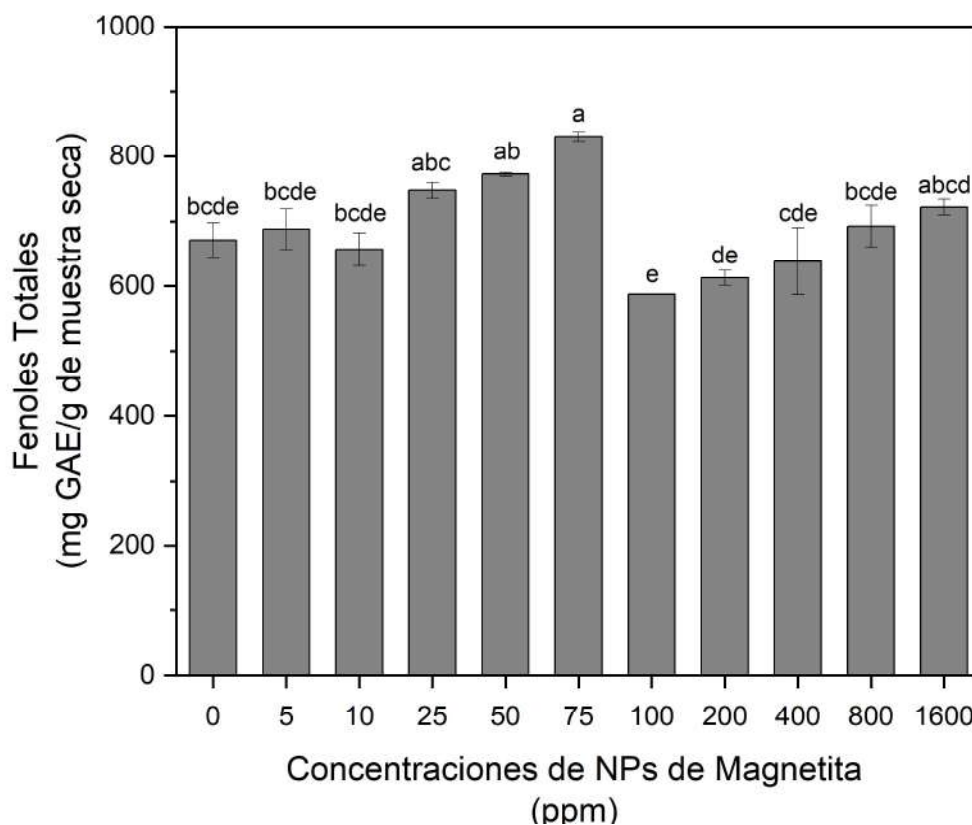


Figura 15. Fenoles totales en plántula de jitomate procedente de semillas tratadas con NPs de magnetita.

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.996$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$) $n=32$.

El contenido de flavonoides mostró diferencias significativas entre tratamientos, se identificó a la concentración de 100 ppm como el tratamiento con el mayor contenido (5.65 mg RE/ g de muestra seca) mientras que el tratamiento testigo fue el tratamiento que registro la menor cantidad de flavonoides (5.47 mg RE/ g de muestra seca) (Figura 16).

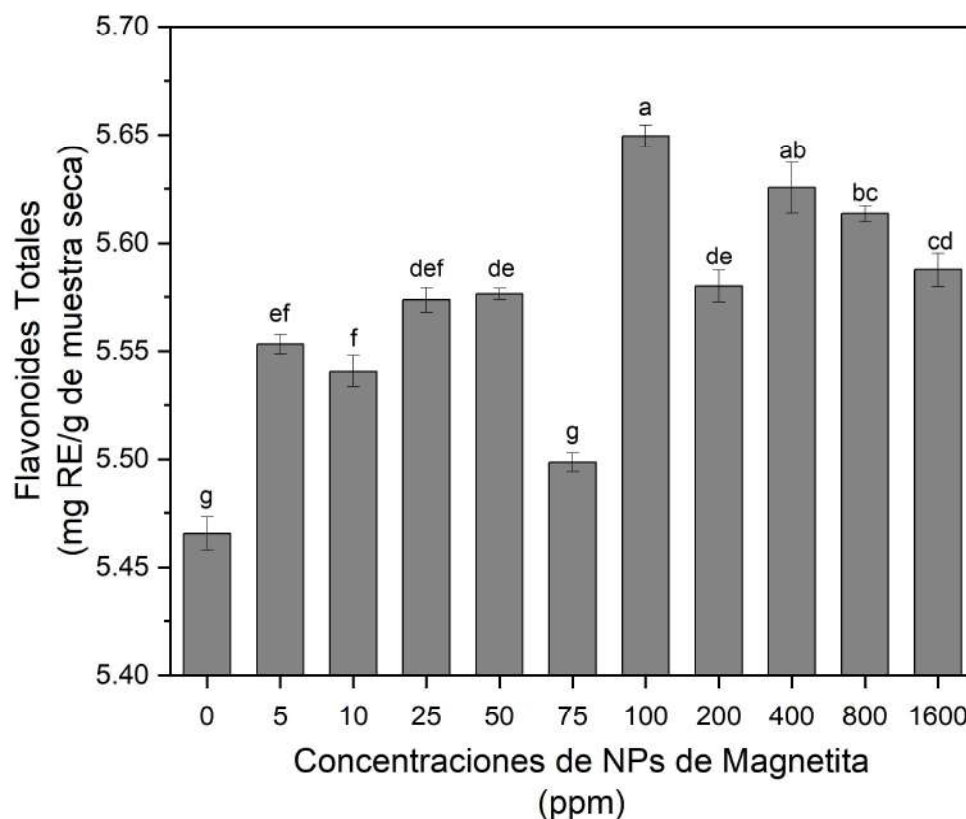


Figura 16. Flavonoides Totales en plántula de jitomate tratada con NPs de Magnetita.

Prueba de normalidad de los datos $r=0.996$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

El porcentaje de inhibición del radical DPPH muestra diferencias significativas entre tratamientos; la concentración de 5 ppm obtuvo el mayor porcentaje de inhibición (91.90 %) mientras la concentración de 1600 ppm registro el menor porcentaje de inhibición (86.65 %) porcentaje menor al porcentaje de inhibición del tratamiento testigo (88.74 %) (Tabla 13). En cuanto a la capacidad antioxidante medida por método de DPPH, se registraron diferencias significativas entre tratamientos; la concentración de 5 ppm registró el mayor contenido de mg ET/g de muestra seca (164.76). Mientras que 1600 ppm registro la menor capacidad antioxidante (155.15 mg ET/ g de muestra seca), incluso menor al tratamiento testigo (157.87 mg ET/ g de muestra seca). De igual forma, la capacidad antioxidante medida utilizando el

método de FRAP registro diferencias significativas entre tratamientos; la concentración de 75 ppm registró 123.38 mg TE/ g de muestra seca mientras que 800 ppm obtuvo 99.12 mg TE/ g de muestra seca, valor registrado por debajo del tratamiento testigo (104.31 mg TE/ g de muestra seca).

Tabla 13. Capacidad Antioxidante en plántula tratada con NPs de Magnetita.

Concentración (ppm)	Porcentaje de Inhibición del radical DPPH (%)	AOC DPPH (mg TE/g de muestra seca)	AOC FRAP (mg TE/g de muestra seca)
0	88.74±1.34 ab	157.87±2.23 ab	104.31±2.49 cd
5	91.90±0.02 a	164.76±0.03 a	114.12±2.45 abc
10	88.48±0.37 ab	158.22±0.62 ab	110.09±4.19 bcd
25	88.62±0.64 ab	160.04±1.08 ab	120.52±3.90 ab
50	89.77±0.30 ab	161.98±0.50 ab	104.31±1.07 cd
75	90.68±0.24 ab	161.90±0.39 ab	123.38±0.68 a
100	88.21±0.47 ab	159.34±0.79 ab	101.18±2.28 cd
200	87.84±0.41 ab	157.15±0.68 b	112.31±2.98 abc
400	88.61±0.14 ab	159.23±0.23 ab	109.07±2.86 bcd
800	88.90±0.53 ab	160.52±0.90 ab	99.12±0.20 d
1600	86.65±2.14 b	155.15±3.57 b	112.95±2.07 abc

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.943$, $r=0.940$, $r=0.980$. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

4.3.3 Efecto hormetico de la combinación de NPs de dióxido de silicio y magnetita sobre variables bioquímicas.

Al aplicar NPs combinadas de dióxido de silicio y magnetita se encontraron diferencias significativas entre tratamientos; se determinó que cuando se aplican 5 ppm se obtiene el mayor incremento en la producción de proteína total, mientras que al aplicar 50 ppm se disminuye la producción de proteína incluso por debajo de la proteína que se produce cuando no se aplica dicha combinación de NPs (Figura 17).

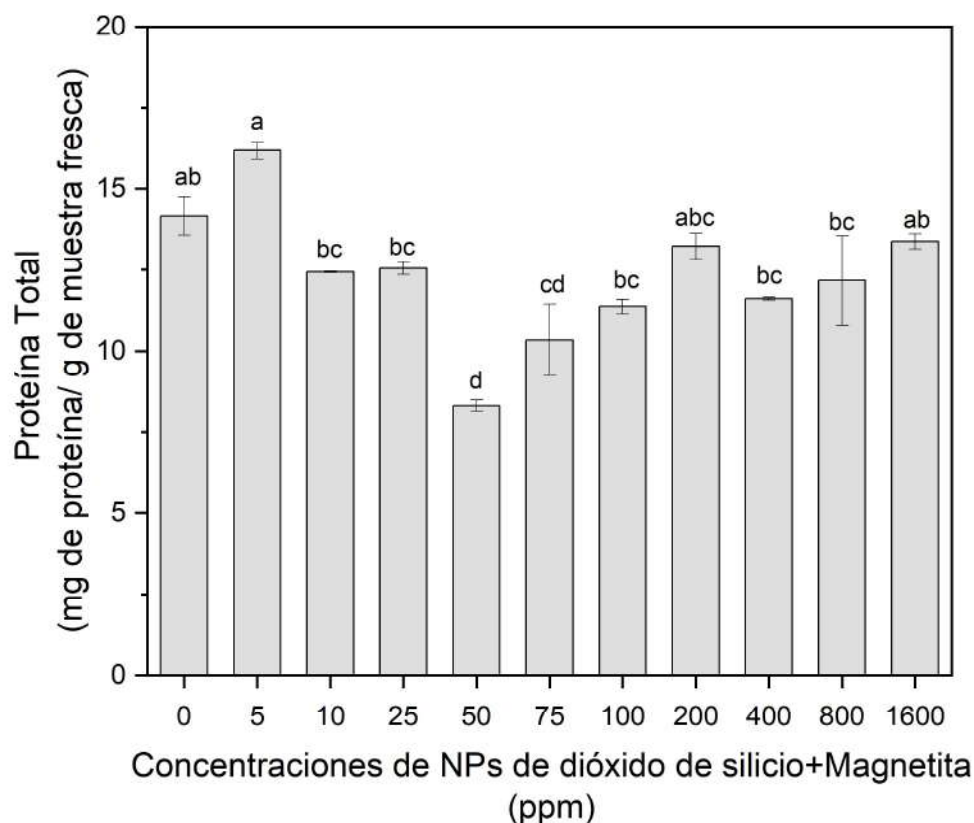


Figura 17. Proteína Total en plántulas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio + Magnetita.

Prueba de normalidad de los datos $r=0.982$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

La actividad de enzimas antioxidantes mostró diferencias significativas entre tratamientos. La producción de SOD se incrementó 1.6 veces más que en el tratamiento testigo (Tabla 14) mientras que cuando se aplicaron 5 ppm se obtuvo una 2.97 veces menor que en el tratamiento testigo. La enzima CAT mostró diferencias significativas entre tratamientos; la concentración de 10 ppm causó la mayor producción de la enzima CAT con un incremento del 45 % más que el tratamiento testigo, mientras que al aplicar 75 ppm se disminuyó 60 % la producción de CAT respecto al testigo.

En referencia a la actividad enzimática de PAL se vio influenciada por la aplicación de las NPs; esto, ya que se encontraron diferencias estadísticas significativas entre

tratamientos; se identificó que al aplicar 75 ppm se incrementó 45 % su actividad en comparación con el tratamiento testigo (Tabla 14), mientras que al aplicar la concentración de 25 ppm se disminuyó la actividad de PAL un 70 % respecto al tratamiento testigo. Los tratamiento con 10, 100 y 200 ppm mostraron la mayor actividad de PAL.

Tabla 14. Actividad enzimática antioxidante en plántulas de jitomate tratadas con NPs de dióxido de silicio + magnetita.

Concentración (ppm)	SOD (U/mg de proteína)	CAT (U/mg de proteína)	PAL (U/mg de proteína)
0	0.5484±0.0121 de	0.4294±0.0324 bc	0.0131±0.0007 bc
5	0.1381±0.0158 f	0.4162±0.0219 bc	0.0086±0.0005 c
10	0.7340±0.0334 cd	0.6249±0.0168 a	0.0127±0.0005 abc
25	0.3568±0.0115 ef	0.3744±0.0144 cd	0.0077±0.0039 c
50	0.2564±0.0232 f	0.4686±0.0099 b	0.0160±0.0006 ab
75	1.0005±0.1422 b	0.2674±0.0203 e	0.0190±0.0001 a
100	0.9584±0.0336 bc	0.2506±0.0084 ef	0.0136±0.0012 abc
200	0.1583±0.0061 f	0.3017±0.0110 de	0.0125±0.0002 abc
400	0.1588±0.0118 f	0.2141±0.0125 ef	0.0120±0.0005 bc
800	1.4470±0.0641 a	0.1770±0.0150 fg	0.0110±0.0004 bc
1600	0.1981±0.0093 f	0.1215±0.0147 g	0.0107±0.0015 bc

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.921$, $r=0.984$, $r=0.950$. Letras distintas entre columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos se muestran como promedio $\pm$ error estándar.

Fenoles totales, mostró diferencias significativas entre tratamientos; se encontró que las concentraciones de 0 (910.70 mg GAE/ g de muestra seca), 50 (923.78 mg GAE/ g de muestra seca), 75 928.07 mg GAE/ g de muestra seca) y 100 ppm (913.40 mg GAE/ g de muestra seca) obtuvieron el mayor contenido de fenoles, mientras que 712.42 mg GAE/ g de muestra seca con una concentración de 400 ppm fue la concentración que generó el menor contenido de fenoles (Figura 18).

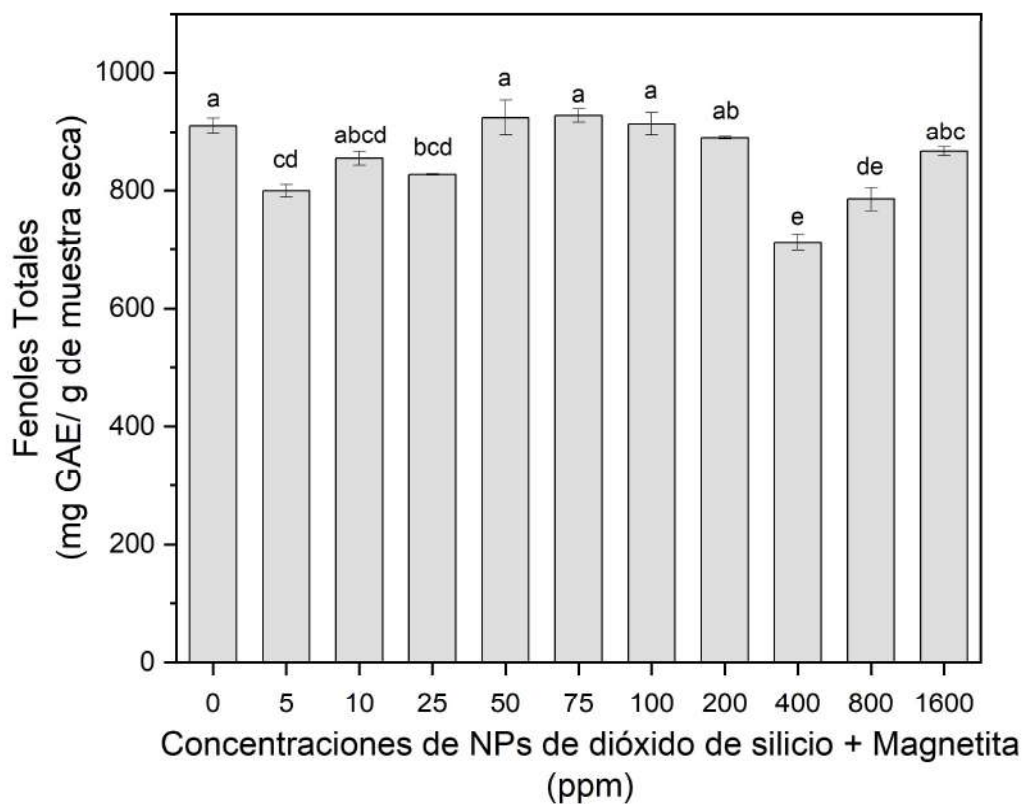


Figura 18. Fenoles totales en plántula de jitomate procedente de semillas tratadas con NPs de dióxido de silicio + magnetita.

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.982$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

La concentración de flavonoides es otra variable que mostró diferencias significativas entre tratamientos; las concentraciones de 0 (5.35 mg RE/g de muestra seca), 75 ppm (5.39 mg RE/g de muestra seca), 400 y 800 ppm ((5.40 mg RE/g de muestra seca) obtuvieron la mayor producción de flavonoides mientras que cuando se aplicaron 10 ppm (5.09 mg RE/g de muestra seca) de las NPs se obtuvo una menor concentración de flavonoides que en el resto de los tratamientos, incluyendo al tratamiento testigo (Figura 19).

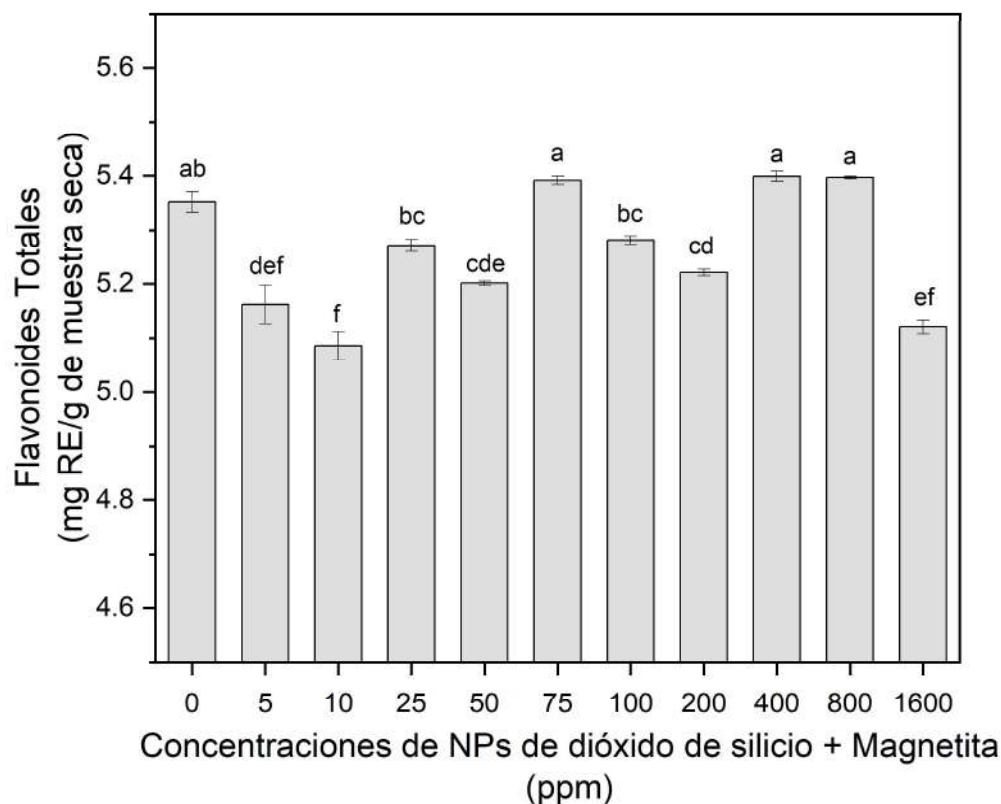


Figura 19. Flavonoides Totales en plántula de jitomate tratada con NPs de dióxido de silicio + magnetita

Prueba de normalidad de los datos $r=0.982$. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$).

En el porcentaje de inhibición del radical DPPH se encontró que al aplicar 5 ppm de la combinación de NPs se incrementa 6.65 % más que el tratamiento testigo, alcanzado un porcentaje de inhibición del radical del 92.50 % mientras que 85.21 fue menor porcentaje de inhibición registrado, por debajo del tratamiento testigo (85.85 %) y se obtuvo al aplicar una concentración de 400 ppm (Tabla 15).

La capacidad antioxidante medida por el método de DPPH y expresada en términos de mg TE/ g de muestra seca, también registró diferencias significativas entre tratamientos, una vez más se identificó a 5 ppm como la concentración aplicada que generó una mayor capacidad antioxidante con (164.13 mg TE/ g de muestra seca), mientras que al aplicar 400 ppm se obtuvieron 151.99 mg TE/ g de muestra seca,

capacidad antioxidante menor a la encontrada en el tratamiento testigo (153.07 mg TE/ g de muestra seca).

La capacidad antioxidante medida con el método de FRAP, registro diferencias significativas entre tratamientos; se identificó que cuando se aplicaron 50 ppm de las NPs combinadas se obtuvieron 161.01 mg TE/ g de muestra seca mientras que cuando se aplicaron 400 ppm se obtuvieron 118 ,68 mg TE/ g de muestra seca, valor ubicado por debajo de lo obtenido en el tratamiento testigo (150.12 mg TE/ g de muestra seca).

Tabla 15. Capacidad Antioxidante en plántula tratada con NPs de dióxido de silicio + Magnetita.

Concentración (ppm)	Porcentaje de Inhibición del radical DPPH (%)	AOC DPPH (mg TE/g de muestra seca)	AOC FRAP (mg TE/g de muestra seca)
0	85.85±0.4993 d	153.07±0.8304 d	150.12±2.53 ab
5	92.50±0.3550 a	164.13±0.5905 a	145.62±5.43 b
10	89.88±0.5644 b	159.78±0.9387 b	124.90±0.71 de
25	88.63±0.0144 bc	157.70±0.0239 bc	137.81±1.52 bcd
50	85.41±0.3938 d	152.34±0.6550 d	161.01±2.75 a
75	85.89±0.0705 d	153.14±0.1172 d	131.88±1.39 cde
100	86.71±0.2010 cd	154.50±0.3343 cd	146.34±1.00 b
200	86.14±0.1606 d	153.54±0.2672 d	144.91±1.04 bc
400	85.21±0.6779 d	151.99±1.1275 d	118.68±4.38 e
800	87.12±0.6527 cd	155.17±1.0857 cd	141.24±0.80 bc
1600	85.77±0.4998 d	152.93±0.8312 d	146.91±3.16 b

Elaboración propia. Prueba de normalidad de los datos $r=0.932$, $r=0.932$, $r=0.988$. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

En general, se identificó que aplicar NPs de dióxido de silicio como tratamiento pre-germinativo si genera un efecto positivo para las plántulas, y aunque las diferencias no son significativas en algunas variables como lo son el porcentaje de germinación, el ITG y el CVG si se incrementan respecto al tratamiento testigo, de igual forma, se pudo verificar el efecto bioestimulante en variables como T50, longitud de tallo, raíz e índice de vigor de plántula que si mostraron diferencias significativas entre

tratamientos, esto coincide con lo obtenido previamente por Siddiqui y Al-Whaibi, (2014); así también se encontró que si hay un efecto sobre variables de tipo bioquímico lo que coincide con lo encontrado por Nourozi y colaboradores (2019) y Mukarram y colaboradores (2021), quienes proponen el uso de NPs de dióxido de silicio como una alternativa para incrementar la producción compuestos bioactivos en las plantas. Adicionalmente se encontró que la concentración de 100 ppm de NPs de dióxido de silicio, aplicadas como tratamiento pre-germinativo en semillas de jitomate, es una de las concentraciones que ofrece mejores resultados en las variables medidas, por el ejemplo, al aplicar esta concentración se obtuvo el mejor IVP además de incrementar la enzimática antioxidante, el contenido de fenoles y flavonoides totales además de la capacidad antioxidante por el método de DPPH y FRAP. Lo anterior indica que a esta dosis se puede generar un efecto bioestimulante y elicitor en durante el proceso de germinación y primeras etapas de crecimiento en la plántula.

Cuando se aplicaron NPs de magnetita en semilla de frijol se confirmó que su aplicación modifica el proceso de germinación (Duran *et al.*, 2018) lo que es coincidente con lo encontrado en esta investigación ya que se incrementaron significativamente variables como T50 e IVP, además de confirmar que se incrementa la actividad enzimática antioxidante ayudando a prevenir el daño por oxidación (Iannone *et al.*, 2016) al inducir un incremento en la producción de metabolitos secundarios: fenoles y flavonoides en comparación con el tratamiento testigo. La dosis que presenta un mejor resultado en una mayor cantidad de variables es la concentración de 1600 ppm que incremento el IVP y la cuantificación de fenoles y flavonoides totales, sin dejar de lado la capacidad antioxidante medida por el método de FRAP.

En cuanto a la aplicación de las NPs combinadas se pudo observar que no hay diferencias significativas entre tratamientos sobre variables como el IVP, no obstante, si se reportaron dosis donde se generaron incrementos en la longitud total y de raíz, además de incrementar proteína y fenoles totales al aplicar la

concentración de 200 ppm. Sin embargo, cuando se utilizaron las NPs combinadas no tuvieron los efectos encontrados que cuando se aplicaron por separado. El impacto sobre variables de importancia económica fue mayor cuando se aplicaron por separado. Lo anterior podría tener que ver con el hecho de que se está generando una interacción entre dos diferentes NPs que podría estar bloqueando o neutralizando los efectos que pueden generar si se aplican por separado.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de NPs de SiO₂, Magnetita y la combinación de ambas, genera un efecto bioestimulante y elicitor al incrementar la actividad enzimática antioxidante sin afectar negativamente el proceso de germinación y el crecimiento de la plántula. Específicamente cuando las NPs se aplican por separado los efectos en el crecimiento y la presencia de indicadores de defensa en la planta de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) fueron superiores. Los efectos se vieron influenciados por la dosis, el tipo de nanopartícula y la interacción entre ambos nanomateriales. Adicionalmente, el efecto que se observa en las curvas dosis respuesta no concuerda con un comportamiento típico hormético a las dosis evaluadas. Por lo anterior, se sugiere explorar dosis en concentraciones intermedias para determinar su aplicación. Los resultados son prometedores hasta cierto punto, pues el uso de Nanomateriales puede llegar a ser muy complejo y existen una serie de factores relacionados con la interacción semilla-planta-nanopartícula y la residualidad y/o toxicidad en el ambiente que deben ser investigados antes de poder utilizarse a gran escala.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afiyanti, M. y Chen, H. J. (2014). Catalase activity is modulated by calcium and calmodulin in detached mature leaves of sweet potato. *Journal of Plant Physiology*, 171(2), 35–47.
- Aguirre-Becerra, H.(2021). Rendimiento y producción de metabolitos secundarios en plántula de jitomate con fotoperiodo complementado mediante sistema de iluminación LED. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Biosistemas. Universidad Autónoma de Querétaro.01-01-2021.Repositorio digital. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2446>
- Ahmad, A., Saman H. S., Palma, J. M. y Corpas F. J. (2022).Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology. *Chemosphere* 290 (2022) 133329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133329>
- Al-Ansari, F. and Ksiksi, T. (2016) A Quantitative Assessment of Germination Parameters: The Case of *Crotalaria persica* and *Tephrosia apollinea*. *The Open Ecology Journal*, 9, 13-21. <https://doi.org/10.1038/180037b0>
- Almutairi, Z. (2016). Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress. *Plant Omics Journal* 9(1):106-114 (2016) ISSN: 1836-3644.
- Alvarado, A.M., Aguirre-Becerra, H., Vázquez-Hernández, M., Magaña-López, E., Parola-Contreras, I., Caicedo-Lopez, L.H., Contreras-Medina, L.M., García-Trejo, J.F., Guevara-González, R.G. y Feregrino-Pérez, A.A. (2019). Influence of Elicitors and Eustressors on the Production of Plant Secondary Metabolites. *Natural Bio-active Compounds*. DOI:10.1007/978-981-13-7154-7_11Corpus ID: 202853128.
- Alvear, D., Galeas, S., Guerrero, V.H. y Debut, A. (2017). Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita. *Revista Politécnica* - Julio 2017, Vol. 39, No. 2.

- Apel, K. y Hirt, H. (2004). REACTIVE OXYGEN SPECIES: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55(1), 373–399. doi:10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701
- Aqeel, U., Aflab, T., Khan, M. M. A., Naeem, M. y Khan, M. N.(2022). A comprehensive review of impacts of diverse nanoparticles on growth, development and physiological adjustments in plants under changing environment. *Chemosphere*. Volume 291. Part 1. March 2022, 132672. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132672.
- Arias, L. D., Montaña, D., L.N., Velasco, S., M.A. y Martínez, G., J. (2018). Alimentos funcionales: avances de aplicación en agroindustria. *Revista Tecnura*, 22(57), 55-68. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.12178>
- Ávila-Juárez, L. y Miranda-Rodríguez, H. (2018). Variations in Bioactive Content in Different Tomato Trusses due to Elicitor Effects. *Journal of Chemistry*, 2018, 1–9. doi:10.1155/2018/2736070
- Ávila-Juárez, L., Torres-Pacheco, I., Ocampo-Velázquez, R. V., Feregrino-Pérez, A. A., Hernández, A. C. y Guevara-González, R. G. (2017). Integrating Plant Nutrients and Elicitors for Production of Secondary Metabolites, Sustainable Crop Production and Human Health: A Review. *International Journal of Agriculture & Biology*, 19(3).
- Bai, M., Yang, G.-S., Chen, W.-T., Mao, Z.-C., Kang, H.-X., Chen, G.-H. y Xie, B.-Y. (2012). Genome-wide identification of Dicer-like, Argonaute and RNA-dependent RNA polymerase gene families and their expression analyses in response to viral infection and abiotic stresses in *Solanum lycopersicum*. *Gene*, 501(1), 52–62. doi:10.1016/j.gene.2012.02.009
- Balaguera-López, H. E., Cárdenas-Hernández, J. F. y Álvarez-Herrera, J. G. (2009). Effect of gibberellic acid (GA3) on seed germination and growth of tomato (*Solanum Lycopersicum* L.). *Acta Horticulturae*, (821), 141–148. doi:10.17660/actahortic.2009.821.15
- Bernhoft, A. (2010) In: Bioactive compounds in plants – benefits and risks for man and animals. Aksel Bernhoft editor. Oslo: The Norwegian Academy of

- Science and Letters, 2010. ISBN 978-82-7099-583-7.
<http://www.dnva.no/geomed>
- Bertin, N. y Génard, M. (2018). Tomato quality as influenced by preharvest factors. *Scientia Horticulturae*, 233, 264–276. doi:10.1016/j.scienta.2018.01.056
- Bharadwaj, D. (2016). Sustainable agriculture and plant breeding. En Al-Khayri, J., Mohan, s. y Johnson, D. (Eds.) *Advances in plant breeding strategies: agronomic, abiotic and biotic stress traits* (pp. 3-34). Estados Unidos: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-22518-0
- Bhattacharya, A. (2019). High-Temperature Stress and Metabolism of Secondary Metabolites in Plants. Effect of High Temperature on Crop Productivity and Metabolism of Macro Molecules, 391–484. doi:10.1016/b978-0-12-817562-0.00005-7
- Biswas P., Raliya R.(2019). Synthesis of nanocomposites and their use in enhancing plant nutrition (Patente de Estados Unidos de America, No. US20190202750A1) Washington University in St Louis WUSTL. <https://patents.google.com/patent/US20190202750A1/en?q=US2019%2f0202750A1+>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248–254.
- Cabezas Gutiérrez, A., Camus Araya, F., Condori, W. E., González Vallejos, F. A., & Mazuela Águila, P. (2022). El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *Idesia (Arica)*, 40(1), 129-133.
- Cai, L., Cai, L., Jia, H., Liu, C., Wang, D., y Sun, X. (2020). Foliar Exposure of Fe₃O₄ Nanoparticles on *Nicotiana benthamiana*: Evidence for Nanoparticles Uptake, Plant Growth Promoter and Defense Response Elicitor against Plant Virus. *Journal of Hazardous Materials*, 122415. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122415

- Calabrese, E. J. (2013). Biphasic dose responses in biology, toxicology and medicine: Accounting for their generalizability and quantitative features. *Environmental Pollution*, 182, 452–460. doi:10.1016/j.envpol.2013.07.046.
- Carvajal, C. C. (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo. *Med. leg. Costa Rica* [online]. 2019, vol.36, n.1, pp.91-100. ISSN 2215-5287.
- Céspedes, M. E. M., Hernández L. I. y Llopiz J. N. (2022). Enzimas que participan como barreras fisiológicas para eliminar los radicales libres: II. Catalasa. *Rev Cubana Invest Bioméd* [online]. 1996, vol.15, n.2.
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B. y Nagpal, A. K. (2018). Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8), 2833–2849. doi:10.1007/s13197-018-3221-z
- Cheng, G. W. y Breen, P. J. (1991). Activity of Phenylalanine Ammonia-Lyase (PAL) and Concentrations of Anthocyanins and Phenolics in Developing Strawberry Fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116(5), 865–869. doi:10.21273/jashs.116.5.865
- CONABIO. (2009). Heike Vibrans (ed.), 2009, Malezas de México. *Solanum Lycopersicum*. fecha de acceso: 10 de junio del 2022. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/solanaceae/lycopersicon-esculentum/fichas/ficha.htm>
- Córdoba, A.; Rivera-Muñoz, E.M.; Velázquez-Castillo, R.; Esquivel, K. PDMS/TiO₂ and PDMS/SiO₂ Nanocomposites: Mechanical Properties' Evaluation for Improved Insulating Coatings. *Nanomaterials* 2023, 13, 1699. <https://doi.org/10.3390/nano13101699>
- Cruz-Bojórquez, R. M., González-Gallego, J., y Sánchez-Collado, P. (2013). Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*, 28(1), 6-15.
- Dao, T. T. H., Linthorst, H. J. M., y Verpoorte, R. (2011). Chalcone synthase and its functions in plant resistance. *Phytochemistry Reviews*, 10(3), 397–412. doi:10.1007/s11101-011-9211-7.

- De la Rosa, L. A., Moreno-Escamilla, J. O., Rodrigo-García, J. y Alvarez-Parrilla, E. (2019). Phenolic Compounds. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 253–271. doi:10.1016/b978-0-12-813278-4.00012-9
- de Santiago Colín, D. M., Martínez-Chávez, L.A., Ángeles Cuán, Elizalde-Peña, Eduardo A., Alvarado Rivera, J., Guzmán, C., Escobar-Alarcón, L., Esquivel, K. (2018). Sonochemical coupled synthesis of Cr-TiO₂ supported on Fe₃O₄ structures and chemical simulation of the degradation mechanism of Malachite Green dye, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Volume 364, 2018, Pages 250-261, ISSN 1010-6030, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.06.004>.
- de Santiago Colín, D.M., Martínez-Chávez, L.A., Cuán, Á., Elizalde-Peña, E.A., Rivera, J.A., Guzmán, C., Escobar-Alarcón, L. y Esquivel, K. (2018). Sonochemical coupled synthesis of Cr-TiO₂ supported on Fe₃O₄ structures and chemical simulation of the degradation mechanism of Malachite Green dye. *J Photochem Photobiol A Chem* 364:250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.06.004>
- Dixon, R.A., Dey, P.M. y Whitehead, I.M. (1982). Purification and properties of chalcone isomerase from cell suspension cultures of *Phaseolus vulgaris*. *Biochimica et Biophysica Acta*, 715, 25-33.
- Du Jardin, P.(2015).“Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation” *Scientia horticulturae*, no. 196, pp. 3-14, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Duran, N. M., Medina-Llamas, M., Cassanji, J. G. B., de Lima, R. G., de Almeida, E., Macedo, W. R. y Pereira de Carvalho, H. W. (2018). Bean Seedling Growth Enhancement Using Magnetite Nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5746–5755. doi:10.1021/acs.jafc.8b00557
- El-Gazzar, N. y Ismail, A. M. (2020). The potential use of Titanium, Silver and Selenium nanoparticles in controlling leaf blight of tomato caused by

- Alternaria alternata*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 27, 101708. doi:10.1016/j.bcab.2020.101708
- Erofeeva, E. A. (2022a). Hormesis in plants: its common occurrence across stresses. Current Opinion in Toxicology. S2468-2020(22)00011-0 <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.006>.
- Erofeeva, E. A. (2022b). A method for assessing the frequency of hormetic trade-offs in plants. MethodsX 9 (2022) 101610. DOI of original article: 10.1016/j.scitotenv.2021.150059.
- Fan, X.-X., Xu, Z.-G., Liu, X.-Y., Tang, C.-M., Wang, L.-W. y Han, X. (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. Scientia Horticulturae, 153, 50–55. doi:10.1016/j.scienta.2013.01.017
- FAOSTAT (Food and Agriculture Data) .(2022). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAOSTAT. Revisado por última vez el 12 de febrero del 2022. A las 20:22 h en <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Ferreira-Montero, I. J. y Luengo-Fernández, E. (2007). La dieta como concepto terapéutico. Conceptos de alimento funcional y de nutraceutico. Situación actual de los alimentos funcionales y nutraceuticos. Aspectos legales. Alimentos funcionales y nutraceuticos. Sociedad Española de Cardiología. ISBN-13: 978-84-690-3758-4.
- Ferrer-Gallego, P.P., I. Ferrando, C. Gago, E. Laguna.(2013). Manual para la conservación de germoplasma y el cultivo de la flora valenciana amenazada. Colección Manuales Técnicos Biodiversidad, 3. Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient. Generalitat Valenciana. Valencia.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2017). Panorama Agroalimentario. Tomate Rojo 2017. Revisado por última vez el 15 de junio del 2022. A las 14:44 h

en <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=65310>

- Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Segura-Castruita, M. A., Mendoza-Tacuba, L., Gallegos-Robles, M. A., GarciaHernández, J. L. y Vázquez-Vázquez, C. (2018). Changes in nutraceutical quality of tomato under different organic substrates. *Horticultura Brasileira* 36: 189-194. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180207>
- Foyer, Ch. H. y Hanke, G. (2022). Chapter 5 - Abiotic stress and adaptation of electron transport: Regulation of the production and processing of ROS signals in chloroplasts. *Photosynthesis in Action*. Academic Press. 2022. Pages 85-102. ISBN 9780128237816. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823781-6.00010-1>.
- Fugang L., Hoang H., Pham R. G., Anderson J. D.(2020). Triazole formulations (Patente de Estados Unidos de America, No. US20200245626A1). Vive Crop Protection Inc. <https://patents.google.com/patent/US20200245626A1/en?q=US2020%2f0245626A1+>
- Ganguly, R., Singh, A. K., Kumar, R. Gupta, A., Kumar, P. A. y Pandey, A. K. (2019). Nanoparticles as modulators of oxidative stress. *Nanotechnology in Modern Animal Biotechnology*.
- García-Enciso, E. L., Robledo-Olivo, A., Benavides-Mendoza, A., Solís-Gaona, S., y González-Morales, S.(2018). Efecto de elicitors de origen natural sobre plantas de tomate sometidas a estrés biótico. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* vol. esp. núm. 20 01 de abril - 15 de mayo, 2018.
- García-Mateos, R. y Pérez Leal, R. (2003). Fitoalexinas: mecanismo de defensa de las plantas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 9, núm. 1, enero-junio, 2003, pp. 5-10. Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México.
- Garcia-Mier, L., Jimenez-Garcia, S. N., Guevara-González, R. G., Feregrino-Perez, A. A., Contreras-Medina, L. M. y Torres-Pacheco, I. (2015). Elicitor

- Mixtures Significantly Increase Bioactive Compounds, Antioxidant Activity, and Quality Parameters in Sweet Bell Pepper. *Journal of Chemistry*, 2015, 1–8. doi:10.1155/2015/269296.
- González-Moscoso, M., Martínez-Villegas, N.V., Meza-Figueroa, D., Rivera-Cruz, M.C., Cadenas-Pliego, G. y Juárez-Maldonado, A. (2021). Las Nanopartículas de SiO₂ Mejoran la Absorción de Nutrientes en Plantas de Tomate Desarrolladas en Presencia de Arsénico. *Revista bio ciencias*, 8, e1084. Epub 04 de octubre de 2021. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1084>
- Gorji, B.; Allahgholi Ghasri, M.R.; Fazaeli, R.; Niksirat, N. (2021). Synthesis and Characterizations of Silica Nanoparticles by a New Sol-Gel Method. *J. Appl. Chem. Res.* 2021, 6, 22–26.
- Grabowska, M., Wawrzyniak, D., Rolle, K., Chomczyński, P., Oziwicz, S., Jurga, S., y Barciszewski, J. (2019). Let food be your medicine: nutraceutical properties of lycopene. *Food & Function*. doi:10.1039/c9fo00580c 10.1039/c9fo00580c
- Gulzar, B., Mujib, A., Malik, M. Q., Mamgain, J., Syeed R., y Zafar, N. (2020) “Plant tissue culture: agriculture and industrial applications,” *Transgenic technology based value addition in plant biotechnology*, pp. 25-49, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818632-9.00002-2>
- Gutierrez-Zavala, Á., Ledesma-Rivera, L., García-García, I. y Grajales- Castillejos, O. (2007) Capacidad antioxidante total en alimentos convencionales y regionales de Chiapas, México. *Rev Cubana Salud Pública* [online]. 2007, vol.33, n.1. ISSN 0864-3466.
- Hayat, S., Ahmad, H., Ali, M., Ren, K. y Cheng, Z. (2018). Aqueous garlic extract stimulates growth and antioxidant enzymes activity of tomato (*Solanum lycopersicum*). *Scientia Horticulturae*, 240, 139–146.
- Hoag G. E., Collins J. B., Varma R. S., Nadagouda M. (2009). Green synthesis of nanometals using plant extracts and use thereof, (Patente de International Patent Cooperation Treaty, No. WO2009140694A3). Verutek Technologies,

Inc.

<https://patents.google.com/patent/WO2009140694A3/en?q=WO2009%2f140694A3+>

- Horton, H. R., Moran, L. A., Scrimgeour, K. G., Perry, M. D. y Rawn, J. D.(2008). Principios de Bioquímica. Cuarta Edición. Pearson Educación, México, 2008.ISBN: 978-970-26-1025-0chew
- Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., Rehman, M. Z. ur, Qayyum, M. F., Wang, H. y Rinklebe, J. (2019). Responses of wheat (*Triticum aestivum*) plants grown in a Cd contaminated soil to the application of iron oxide nanoparticles. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173, 156–164. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.01.118
- Iannone, M. F., Groppa, M. D., de Sousa, M. E., Fernández van Raap, M. B. y Benavides, M. P. (2016). Impact of magnetite iron oxide nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) development: Evaluation of oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*, 131, 77–88. doi:10.1016/j.envexpbot.2016.07.004
- Jaramillo, N. J. E.; Rodríguez, V. P.; Guzmán, A. M. y Zapata, C. M. A.(2006). El cultivo de tomate bajo invernadero (*Lycopersicon esculentum*. Mili). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, Centro de Investigación "La Selva", Apartado Aéreo 100, Rionegro, Antioquia, Colombia. Boletín Técnico. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 48 páginas.
- Jayakumar P. S., Samboju, N. J., Yau, K. S.(2019). Nanoparticle-Mediated Delivery of Sequence-Specific Nucleases (Patente de Japon, No. JP6513127B2). Dow Agro Sciences LLC. <https://patents.google.com/patent/JP6513127B2/en>
- Karuppanapandian, T., Moon, J. C., Kim, C., Manoharan, K. y Kim, W. (2011). Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 709-725.

- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., AlMutairi, K. A. y Siddiqui, Z. H. (2017). Role of nanomaterials in plants under challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 194–209. doi:10.1016/j.plaphy.2016.05.038
- Kris-Etherton, P. M., Hecker, K. D., Bonanome, A., Coval, S. M., Binkoski, A. E., Hilpert, K. F. y Etherton, T. D. (2002). Bioactive compounds in foods: their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. *The American Journal of Medicine*, 113(9), 71–88. doi:10.1016/s0002-9343(01)00995-0
- Lira-Saldivar, R.H., Mendez-Arguello, B., De los Santos-Villarreal, G. y Vera-Reyes I.(2018) Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Versión On-line ISSN 2007-9621versión impresa ISSN 0188-6266.*Acta univ* vol.28 no.2 México mar./abr. 2018.
- Llinàs, M.C. y Sánchez-García, D. (2013). Nanopartículas de sílice: preparación y aplicaciones en biomedicina. *AFINIDAD LXXI*, 565, Enero - Marzo 2014.
- Loarca-Piña, G., Mendoza, S., Ramos-Gómez, M. y Reynoso, R. (2010). Antioxidant, antimutagenic, and antidiabetic activities of edible leaves from *Cnidoscolus chayamansa* Mc. Vaugh. *J Food Sci*. 2010 75(2):H68-72. doi: 10.1111/j.1750-3841.2009.01505.x
- López, M L. (2017). Manual técnico del cultivo de tomate (*Solanum Lycopersicum*) /Costa Rica. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.San José, C.R. : INTA, 2017.121 p. ISBN 978-9968-586-27-6
- López-Lima, D., Mtz-Enriquez, A. I., Carrión, G., Basurto-Cereceda, S., y Pariona, N. (2021). The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for *Fusarium* wilt and plant growth promoter. *Scientia Horticulturae*, 277, 109810. doi:10.1016/j.scienta.2020.109810 10.1016/j.scienta.2020.109810
- López-Martínez, J. D., Vázquez-Díaz, D. A., Esparza-Rivera, J. R., García-Hernández, J. L., Castruita-Segura, M. A., y Preciado-Rangel, P. (2016). Yield and nutraceutical quality of tomato fruit produced with nutrient

- solutions prepared using organic materials. *Revista fitotecnia mexicana*, 39(4), 409-414.
- Luna-Guevara, M. L. y Delgado-Alvarado, A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) • Avances en Investigación Agropecuaria Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes. 2014. 18(1): 51-66 Issn 0188789-0.
- Maldonado, S. O., Jiménez, V. E. N., Guapillo, V. M. R. B., Ceballos, R. G. M. y Mendez, B. E. (2010). Free radicals and their role in chronic-degenerative diseases. *Rev Med UV*. 2010;10(2):32-39.
- Marslin, G., Sheeba, C. J. y Franklin, G. (2017). Nanoparticles Alter Secondary Metabolism in Plants via ROS Burst. *Frontiers in Plant Science*, 8. doi:10.3389/fpls.2017.00832
- Martí, R., Leiva-Brondo, M., Lahoz, I., Campillo, C., Cebolla-Cornejo, J. y Roselló, S. (2018). Polyphenol and l -ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments. *Food Chemistry*, 239, 148–156. doi:10.1016/j.foodchem.2017.06.102
- Martín, G. D. A. (2018). Los Compuestos Fenólicos, Un Acercamiento A Su Biosíntesis, Síntesis Y Actividad Biológica. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(1), 81–104. <https://doi.org/10.22490/21456453.1968>.
- Méndez-Vázquez, J. R., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A., Cabrera-De-la-Fuente, M., Robledo-Olivo, A., & González-Morales, S. (2021). Efecto del riego deficitario en la acumulación de compuestos antioxidantes en plantas de tomate. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(2).
- Mol, J.N.M., Robbins, M.P., DIXON, R.A. y Veltkamp, E. (1985). Spontaneous and enzymic rearrangement of naringenin chalcone to flavanone. *Phytochemistry*, 24(10), 2267- 2269.
- Monardes, H. (2009). 1. Importancia económica del cultivo en la región, país y el mundo. *Manual de cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum* Mill.), 5. Innova Chile CORFO.

- Moreno-León, K. (2017). Aplicación foliar de nanopartículas de zinc, cobre y hierro como estimuladores en el desarrollo de plántulas de tomate. Tesis para obtener el grado de Especialista en Manejo Sustentable de Recursos Naturales de Zonas Áridas y Semiáridas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 2017-07-02.Repositorio Digital.
- Mukarram, M., Khan, M. M. A. y Corpas, F. J. (2021). Silicon nanoparticles elicit an increase in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (Steud.) Wats) agronomic parameters with a higher essential oil yield. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125254. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125254
- Navarro-González, I. y Periago, M. J.(2016). El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional?. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética. Spanish Journal of Human Nutrition and Dietetics. Rev Esp Nutr Hum Diet.* 2016; 20(4): 323 – 335. doi: 10.14306/renhyd.20.4.208
- Nilanjan D., K.(2019). Plant nutrient coated nanoparticles and methods for their preparation and use (Patente de los Estados Unidos de América No. US10196319B2). University of Calcutta. <https://patents.google.com/patent/US10196319B2/en#patentCitations>
- Nourozi, E., Hosseini, B., Maleki, R. y Mandoulakani, B. A. (2019). Pharmaceutical important phenolic compounds overproduction and gene expression analysis in *Dracocephalum kotschyi* hairy roots elicited by SiO₂ nanoparticles. *Industrial Crops and Products*, 133, 435–446. doi:10.1016/j.indcrop.2019.03.053
- Olvera-Novoa, M. A., Martínez Palacios, C. y Real de León, E. (1993). Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos. México: FAO.
- Osorio-Anaya, A. M., Dueñas-Morales, F., Aquino-Granados, P., Chero-Osorio, S. y Condemarin-Vargas, V. R. (2018). Caracterización e incorporación de nanopartículas industriales de SiO₂ Portland tipo 1 en cemento. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(3), 279-290.
- Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C. A., Gutiérrez-Ruelas, N. J., Sánchez, E., Barrios, D. L. O., Chávez-Mendoza, C. y Sida-Arreola, J. P. (2021).

- Efficiency of foliar application of zinc oxide nanoparticles versus zinc nitrate complexed with chitosan on nitrogen assimilation, photosynthetic activity, and production of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Horticulturae*, 288, 110297. doi:10.1016/j.scienta.2021.110297
- Palma, J. M., Mateos, R. M., López-Jaramillo, J., Rodríguez-Ruiz, M., González-Gordo, S., Lechuga-Sancho, A. M. y Corpas, F. J. (2020). Plant catalases as NO and H₂S targets. *Redox Biology*, 34, 101525. doi:10.1016/j.redox.2020.101525.
- Pandey, R. P., Parajuli, P., Koffas, M. A. G. y Sohng, J. K. (2016). Microbial production of natural and non-natural flavonoids: Pathway engineering, directed evolution and systems/synthetic biology. *Biotechnology Advances*, 34(5), 634-662. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.02.012
- Paramo, L. A., Feregrino-Pérez, A. A., Guevara, R., Mendoza, S. y Esquivel, K. (2020). Nanoparticles in agroindustry: Applications, toxicity, challenges, and trends. *Nanomaterials*, 10(9), 1654.
- Parit, S. B., Dawkar, V. V., Tanpure, R. S., Pai, S. R. y Chougale, A. D. (2018). Nutritional Quality and Antioxidant Activity of Wheatgrass (*Triticum aestivum*) Unwrap by Proteome Profiling and DPPH and FRAP assays. *Journal of Food Science*, 83(8), 2127–2139. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14224>
- Pérez-Davison, G., Restrepo-Manrique, R., Martínez- Sánchez, G. 2009. Hormesis: Antecedentes e implicaciones en los sistemas biológicos. *Latin American Journal of Pharmacy*. 28(6): 956-60 (2009).
- Picasso, G., Chacon, J., Uzuriaga, R. y Ruiz, G. (2012). Preparación de nanopartículas de magnetita por los métodos sol-gel y precipitación: estudio de la composición química y estructura. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 78. 170-182.
- Pier-Giorgio, P.(2000) Flavonoids as Antioxidants. *Journal of Natural Products* 2000 63 (7), 1035-1042 DOI: 10.1021/np9904509

- Poschenrieder, C., Cabot, C., Martos, S., Gallego, B. y Barceló, J. (2013). Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science*, 212, 15–25. doi:10.1016/j.plantsci.2013.07.01.
- Pütter, J. (1974). Peroxidases. *Methods of Enzymatic Analysis*, 685–690. doi:10.1016/b978-0-12-091302-2.50033-5
- Rácz, A., Hideg, É., y Czégény, G. (2018). Selective responses of class III plant peroxidase isoforms to environmentally relevant UV-B doses. *Journal of Plant Physiology*, 221, 101–106. doi:10.1016/j.jplph.2017.12.010
- Rastogi, A. Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Zivcak, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N. I. y Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *A.Biotech.* 9:90. Springer.
- Rosabal-Ayan, L., Martínez-González, L., Reyes-Guerrero, Y. y Núñez-Vázquez, M. (2013). Resultados preliminares del efecto de la aplicación de Biobras-16 en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Cultivos Tropicales*, 34(3), 71-75. ISSN 0258-5936.
- Rosales, A., Ortiz-Frade, L., Medina Ramirez, I., Godínez, L. y Escalante, K. (2021). Self-cleaning of SiO₂-TiO₂ coating: Effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films. *Ultrasonics Sonochemistry*. 73. 105483. doi:10.1016/j.ultsonch.2021.105483.
- Rout, G. R. y Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*, 3(0), 1–24. doi:10.7831/ras.3.1
- Salas-Pérez, L, González, F. J. A., García, C. M., Sifuentes-Ibarra, E., Parra-Terrazas, S. y Preciado-Rangel, P. (2016). Calidad biofísica y nutracéutica de frutos de tomate producido con sustratos orgánicos. *Revista Electrónica Nova Scientia*. Nova Scientia ISSN 2007 – 0705, N° 17 Vol. 8(2), 2016 pp: 310 – 325.
- Salazar-Mercado, S. A., Botello-Delgado, E. A. y Quintero-Caleño, J. D. (2020). Tetrazolium test optimization to evaluate the viability in *Solanum*

- lycopersicum L. seeds. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1344.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1344
- Sarkar, M. M., Mathur, P. y Roy, S. (2022). Silicon and nano-silicon: New frontiers of biostimulants for plant growth and stress amelioration. In *Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement* (pp. 17-36). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00010-8>
- Sebastian A. D., De Basque S. M., Mc Clanahan D. N., Ratinen P., M. Maatanin M., Sagirati A.(2022). Tobacco-derived nanocellulose material (Patente de China, No. CN110621822B). RJ Reynolds Tobacco Co.
<https://patents.google.com/patent/CN110621822B/en?q=CN110621822B>
- +
- Sharma, I. y Ahmad, P. (2014). Catalase. *Oxidative Damage to Plants*, 131–148. doi:10.1016/b978-0-12-799963-0.00004-6
- Siddiqui, M. H. y Al-Whaibi, M. H. (2014). Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(1), 13–17. doi:10.1016/j.sjbs.2013.04.005
- Singh, A., Tiwari, S., Pandey, J., Lata, C. y Singh, I. K. (2021). Role of nanoparticles in crop improvement and abiotic stress management. *Journal of Biotechnology*, 337, 57–70. doi:10.1016/j.jbiotec.2021.06.022
- Stephenie, S., Chang, Y. P., Gnanasekaran, A., Esa, N. M. y Gnanaraj, C. (2020). An insight on superoxide dismutase (SOD) from plants for mammalian health enhancement. *Journal of Functional Foods*, 68, 103917. doi:10.1016/j.jff.2020.103917
- Szöllősi, R. (2014). Superoxide Dismutase (SOD) and Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Oxidative Damage to Plants*, 89–129. doi:10.1016/b978-0-12-799963-0.00003-4 10.1016/b978-0-12-799963-0.00003-4
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. 5th Edition, Sinauer Associates Inc., Sunderland, 782 p.

- Toscano, S., Ferrante, A., Leonardi, C. y Romano, D. (2018). PAL activities in asparagus spears during storage after ammonium sulfate treatments. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 34–41.
- Vargas-Hernandez, M., Macias-Bobadilla, I., Guevara-Gonzalez, R.G., Romero-Gomez, SdJ., Rico-Garcia, E., Ocampo-Velazquez, R.V., Alvarez-Arquieta, LdL. y Torres-Pacheco, I. (2017). Plant Hormesis Management with Biostimulants of Biotic Origin in Agriculture. *Frontier Plant Science*. 8:1762. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01762>
- Vargas-Ortíz, J. R., Böhnelt, H. N., Gonzalez, C. y Esquivel, K. (2021). Magnetic nanoparticle behavior evaluation on cardiac tissue contractility through Langendorff rat heart technique as a nanotoxicology parameter. *Applied Nanoscience*, 11(9), 2383-2396. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02031-y>
- Vashisth, A., Nagarajan, S. (2010). Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of Plant Physiology*, Volume 167, Issue 2, 2010, Pages 149-156, ISSN 0176-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.011>.
- Vázquez-Hernández, M. C., Parola-Contreras, I., Montoya-Gómez, L. M., Torres-Pacheco, I., Schwarz, D. y Guevara-González, R. G. (2019). Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production. *Scientia Horticulturae*, 250, 223-229. doi:10.1016/j.scienta.2019.02.053
- Vergara-Castañeda, H.A., Guevara-González, R.G., Ramos-Gómez, M., Reynoso-Camacho, R., Guzmán-Maldonado, H., Feregrino-Pérez, A.A., Oomah, B.D. y Loarca-Piña, G. (2010). Non-digestible fraction of cooked bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Bayo Madero suppresses colonic aberrant crypt foci in azoxymethane-induced rats. *Food and Function* 1: 294-300. DOI: <https://doi.org/10.1039/c0fo00130a>

- Vitale, A. A., Bernatene, E. A. y Pomilio, A. B. (2010). Carotenoides en quimioprevención: Licopeno. *Acta bioquímica clínica latinoamericana*. 2010, vol.44, n.2. ISSN 0325-2957.
- Waszczak, C., Carmody, M. y Kangasjärvi, J. (2018). Reactive Oxygen Species in Plant Signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 69(1), 209–236. doi:10.1146/annurev-arplant-042817-040322
- Wurm, F., Landfestel, K., Iyamsavas, D., Tines, E., Fischer, J. (2022). Lignin biomaterial as agricultural drug carrier (Patente de China No. CN109068654B). Biotechnology And Pharmaceutical Research Institute Co ltd Max Planck Gesellschaft zur Foerderung der Wissenschaften eV. <https://patents.google.com/patent/CN109068654B/en#patentCitations>
- Xiaozhou M., Jingqu W., Jiao S., Xianchao S., Guangjin, F., Lin C., Daibin W., Chen X.(2022). Preparation method of antibacterial copper nanoparticle composite gel (Patente de China, No. CN112913838B). Chongqing Duomin Biotechnology Co Ltd. <https://patents.google.com/patent/CN112913838B/en?q=CN112913838B>
- Yau K. H., Yau K. S., Jayakumarpong S., J., Madrigueras F., Burroughs F. Ch. S., Narasimha Ch. S. N., Webb, S., Earl W. E. (2021). Manufacture of functionalized linear DNA cassettes and quantum dot / nanoparticle mediated delivery in plants (Patente de Japón, No. JP6891215B2). Corteva Agriscience LLC. <https://patents.google.com/patent/JP6891215B2/en>
- Zárate-Martínez, W., González-Morales, S., Ramírez-Godina, F., Robledo-Olivo, A., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Efecto de los ácidos fenólicos en el sistema antioxidante de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.). *Agronomy Mesoamerican*, 854-868.
- Zhou, K., Yang, S. y Li, S.-M. (2021). Naturally occurring prenylated chalcones from plants: structural diversity, distribution, activities and biosynthesis. *Natural Product Reports*. doi:10.1039/d0np00083c

ANEXOS

NPs de dióxido de silicio

Tabla 16. Índice de vigor de plántula (IVP) y proteína total en tratamientos de NPs de dióxido de silicio

Concentración (ppm)	IVP (mm%)	Proteína Total (mg de proteína/g de muestra fresca)
0	2464.84±132.18 d	10.69±2.47 abc
5	2611.23±153.42 cd	8.32±1.36 bc
10	2443.63±119.93 d	10.61±0.11 abc
25	2903.50±127.95 bcd	5.78±0.23 c
50	3151.09±118.14 abc	6.95±1.92 bc
75	2687.61±129.57 cd	12.44±0.78 ab
100	3474.22±140.76 a	10.44±0.09 abc
200	2950.05±113.44 abcd	10.71±0.80 abc
400	3100.67±103.02 abc	9.01±0.74 abc
800	3280.42±102.06 ab	9.29±1.89 abc
1600	3055.83±81.04 abc	15.01±0.23 a

Elaboración propia. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

Tabla 17. Fenoles y flavonoides en plántula de semilla tratada con NPs de dióxido de silicio.

Concentración (ppm)	Fenoles (mg GAE/g de muestra seca)	Flavonoides (mg RE/g de muestra seca)
0	557.76±16.36 bc	5.46±0.003 d
5	526.09±54.87 c	5.45±0.006 d
10	798.72±18.63 ab	5.51±0.006 b
25	643.98±116.10 abc	5.52±0.012 b
50	686.75±65.60 abc	5.51±0.012 bc
75	747.26±66.20 abc	5.46±0.002 d
100	755.54±35.03 abc	5.46±0.013 cd
200	728.59±23.15 abc	5.46±0.010 d
400	626.63±49.77 abc	5.50±0.007 bcd
800	836.30±10.35 a	5.54±0.018 b
1600	646.51±27.57 abc	5.61±0.007 a

Elaboración propia. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

Tabla 18. Modelación matemática de IVP al aplicar con NPs dióxido de silicio.

IVP con NPs de dióxido de silicio			
Ajuste polinomial (concentraciones 0-100 ppm)		Ajuste polinomial (concentraciones 100-1600 ppm)	
Ecuación	$y = \text{Intercepción} + B1 \cdot x^1 + B2 \cdot x^2 + B3 \cdot x^3 + B4 \cdot x^4$	Ecuación	$y = \text{Intercepción} + B1 \cdot x^1 + B2 \cdot x^2 + B3 \cdot x^3 + B4 \cdot x^4$
Intercepción	2499.55521 ± 98.54009	Intercepción	4756.78188 ± --
B1	-16.97794 ± 18.78344	B1	-17.67014 ± --
B2	2.33523 ± 0.88106	B2	0.0541 ± --
B3	-0.04866 ± 0.01417	B3	-5.84672E-5 ± --
B4	2.79811E-4 ± 7.18586E-5	B4	1.94647E-8 ± --
Suma residual de cuadrados	1.35518	Suma residual de cuadrados	0
R ²	0.97281	R ²	1
R ² ajustada	0.91843	R ² ajustada	--

Elaboración propia.

NPs de Magnetita

Tabla 19. Índice de vigor de plántula (IVP) y proteína total en tratamientos de NPs de Magnetita.

Concentración (ppm)	IVP (mm%)	Proteína Total (mg de proteína/g de muestra fresca)
0	2864.77±146.90 c	11.41±2.32 abc
5	2982.89±119.46 bc	9.88±2.66 abc
10	3204.13±120.60 bc	7.73±1.57 c
25	3214.69±125.75 bc	15.37±2.10 ab
50	2946.75±88.53 bc	16.91±0.29 a
75	3347.92±142.01 abc	8.60±0.44 bc
100	3489.11±98.25 ab	6.20±0.04 c
200	3347.88±106.14 abc	8.91±1.09 bc
400	3223.58±121.13 bc	6.88±0.54 c
800	2895.41±96.32 c	10.82±0.91 abc
1600	3863.75±132.19 a	8.84±1.47 bc

Elaboración propia. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

Tabla 20. Fenoles y flavonoides en plántula de semilla tratada con NPs de Magnetita.

Concentración (ppm)	Fenoles (mg GAE/g de muestra seca)	Flavonoides (mg RE/g de muestra seca)
0	671.04 $\pm$ 26.41 bcde	5.47 $\pm$ 0.0076 g
5	687.80 $\pm$ 31.16 bcde	5.55 $\pm$ 0.0044 ef
10	656.71 $\pm$ 25.60 bcde	5.54 $\pm$ 0.0074 f
25	747.61 $\pm$ 12.36 abc	5.57 $\pm$ 0.0057 def
50	772.66 $\pm$ 3.03 ab	5.58 $\pm$ 0.0025 de
75	830.75 $\pm$ 7.25 a	5.50 $\pm$ 0.0043 g
100	587.10 $\pm$ 0.61 e	5.65 $\pm$ 0.0050 a
200	612.77 $\pm$ 11.69 de	5.58 $\pm$ 0.0072 de
400	638.42 $\pm$ 51.68 cde	5.63 $\pm$ 0.0118 ab
800	692.28 $\pm$ 32.33 bcde	5.61 $\pm$ 0.0036 bc
1600	722.11 $\pm$ 12.11 abcd	5.59 $\pm$ 0.0078 cd

Elaboración propia. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

Tabla 21. Modelación matemática de IVP al aplicar con NPs de Magnetita

IVP con NPs de Magnetita			
Ajuste polinomial (concentraciones 0-100 ppm)		Ajuste polinomial (concentraciones 100-1600 ppm)	
Ecuación	$y = \text{Intercepción} + B1 \cdot x^1 + B2 \cdot x^2 + B3 \cdot x^3 + B4 \cdot x^4$	Ecuación	$y = \text{Intercepción} + B1 \cdot x^1 + B2 \cdot x^2$
Intercepción	2805.10148 $\pm$ 70.01391	Intercepción	3704.55071 $\pm$ 79.23943
B1	63.22646 $\pm$ 12.98805	B1	-2.00531 $\pm$ 0.27595
B2	-2.91917 $\pm$ 0.58017	B2	0.00131 $\pm$ 1.63028E-4
B3	0.04509 $\pm$ 0.0092	Suma residual de cuadrados	1.14839
B4	-2.15323E-4 $\pm$ 4.66768E-5	R ²	0.9713
Suma residual de cuadrados	0.62954	R ² ajustada	0.9426
R ²	0.97513		
R ² ajustada	0.92539		

Elaboración propia.

NPs de dióxido de silicio + Magnetita

Tabla 22. Índice de vigor de plántula (IVP) y proteína total en tratamientos de NPs de dióxido de silicio + Magnetita.

Concentración (ppm)	IVP (mm%)	Proteína Total (mg de proteína/g de muestra fresca)
0	3455.83±106.47 a	14.16±0.59 ab
5	1863.45±86.67 c	16.17±0.27 a
10	3037.19±97.39 ab	12.44±0.02 bc
25	3214.48±110.18 ab	12.55±0.19 bc
50	2970.45±95.95 b	8.30±0.18 d
75	3252.95±140.92 ab	10.34±1.09 cd
100	3301.64±104.53 ab	11.37±0.22 bc
200	3375.72±104.27 ab	13.23±0.40 abc
400	2985.81±85.50 b	11.61±0.04 bc
800	3022.55±77.03 ab	12.18±1.38 bc
1600	3151.16±101.07 ab	13.39±0.24 ab

Elaboración propia. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

Tabla 23. Fenoles y flavonoides en plántula de semilla tratada con NPs de dióxido de silicio + Magnetita

Concentración (ppm)	Fenoles (mg GAE/g de muestra seca)	Flavonoides (mg RE/g de muestra seca)
0	910.70±13.04 a	5.35±0.0190 ab
5	799.80±10.51 cd	5.16±0.0356 def
10	854.13±11.58 abcd	5.09±0.0270 f
25	827.00±1.24 bcd	5.27±0.0112 bc
50	923.78±30.42 a	5.20±0.0043 cde
75	928.07±11.19 a	5.39±0.0077 a
100	913.40±19.59 a	5.28±0.0073 bc
200	888.78±2.17 ab	5.22±0.0058 cd
400	712.42±14.21 e	5.40±0.0097 a
800	785.86±19.63 de	5.40±0.0028 a
1600	866.18±7.53 abc	5.12±0.0128 ef

Elaboración propia. Letras distintas por columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p=0.05$). Los datos presentados corresponden al promedio $\pm$ error estándar.

Tabla 24. Modelación matemática de IVP al aplicar con NPs de dióxido de silicio + Magnetita

IVP con NPs de dióxido de silicio + Magnetita			
Ajuste polinomial (concentraciones 0-100 ppm)		Ajuste polinomial (concentraciones 100-1600 ppm)	
Ecuación	$y = \text{Intercepción} + B1 \cdot x^1 + B2 \cdot x^2 + B3 \cdot x^3 + B4 \cdot x^4 + B5 \cdot x^5 + B6 \cdot x^6$	Ecuación	$y = \text{Intercepción} + B1 \cdot x^1 + B2 \cdot x^2 + B3 \cdot x^3 + B4 \cdot x^4$
Intercepción	$3455.82813 \pm --$	Intercepción	$2821.24525 \pm --$
B1	$-890.8403 \pm --$	B1	$7.50994 \pm --$
B2	$152.8981 \pm --$	B2	$-0.0307 \pm --$
B3	$-8.674 \pm --$	B3	$3.7732E-5 \pm --$
B4	$0.20862 \pm --$	B4	$-1.33737E-8 \pm --$
B5	$-0.00221 \pm --$	Suma residual	0
B6	$8.4448E-6 \pm --$	de cuadrados	
Suma residual	0	R ²	1
de cuadrados		R ² ajustada	--
R ²	1		
R ² ajustada	--		

Elaboración propia.

Productos Obtenidos durante la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas

Rodríguez-Jurado S. y Feregrino-Pérez A. A. Microplantas: una alternativa de consumo alimentario. Elementos 133 (2024) 109-112



Microplantas: una alternativa de consumo alimentario

Susana **Rodríguez-Jurado**
Ana A. **Feregrino-Pérez**

Otorgan la presente
CONSTANCIA a:

SUSANA RODRÍGUEZ JURADO

Por su participación en el

**CURSO DE CAPACITACIÓN:
FORMACIÓN PARA EL ACOMPAÑAMIENTO
TÉCNICO A PRODUCTORES DEL ESTADO
DE QUERÉTARO**

Impartido a través del Centro de Educación Continua
Del 24 de julio al 11 de agosto del 2023.
Duración total de 30 horas.



Dr. Manuel Toledano Ayala
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA



Ing. Guadalupe Murillo Flores
COORD. DEL CENTRO DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Otorgan la presente
CONSTANCIA a:

SUSANA RODRIGUEZ JURADO

Por ganar el

| 3^{ER} LUGAR |

con la presentación Pitch
"Agroamealco"
el día 02 de diciembre del 2022



Dr. Manuel Toledano Ayala
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA



Dr. Carlos Andres Pérez Ramirez
COORDINADOR DE VINCULACIÓN
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA



Dra. Ma. Sandra Hernández López
COORDINACIÓN DE EMPENDIMIENTO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



PIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA



Se otorga el presente
RECONOCIMIENTO a:

SUSANA RODRÍGUEZ JURADO

Por asistir a los eventos de
XVI Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro

Noviembre de 2022
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
SECRETARÍA ADMINISTRATIVA
COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN CIVIL UNIVERSITARIA

Otorgan la presente:



CONSTANCIA

A:

Susana Rodríguez Jurado

Por su destacada participación en el:

CURSO DE MANEJO DE MATERIALES PELIGROS

Dónde a través de las diferentes actividades se logró resaltar la importancia y comprensión del adecuado manejo de las sustancias peligrosas, reduciendo así el riesgo en los espacios de trabajo.

Querétaro, El Marqués a 15 de noviembre de 2023 con una duración de 5 horas

CPCUAQ - 2023 - 1340

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO

COORDINACIÓN
DE PROTECCIÓN CIVIL
UNIVERSITARIA
Ing. Rafael Ernesto Porras Inoja
Coordinador de Protección Civil Universitaria



*Este documento tiene validez de un año.

SOMOS UAQ
SERVICIOS DE TRANSFORMACIÓN