



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
QUÍMICO-BIOLÓGICAS
UMSNH

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
QUÍMICO - BIOLÓGICAS**

**Efecto elicitor de los nanotubos de carbono
funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos sobre la
respuesta de defensa de *Solanum lycopersicum* a la
patogenicidad de *Phytophthora capsici*.**

Tesis

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Biología Experimental

Presenta:

QFB. Daniela Fernández Gómez

Director de tesis: Dr. H. Javier A. Villegas Moreno

Co-directora: Dra. Gladys Juárez Cisneros

Morelia, Mich. Junio de 2025

El trabajo de investigación plasmado en esta tesis se llevó a cabo durante el periodo marzo 2023 – febrero 2025 en el Laboratorio de Interacción Suelo-Planta-Microorganismo y Laboratorio de Biología Molecular de Plantas del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio, (LADIPA) del Colegio de Michoacán con el apoyo de beca por parte de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).



Agradecimientos:

Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer cada día en mí, gracias porque toda mi vida intentaron ofrecer lo mejor, se todo el esfuerzo que han hecho por mí, y sin importar como estuvieran las cosas siempre tenían una sonrisa, un buen consejo o una lección que me serviría en mi vida. Sin su apoyo esto no sería posible, estaré agradecida con ustedes toda mi vida y espero algún día regresarles, aunque sea una pequeña parte de todo lo que me han dado.

A la Doctora Gladys y el Doctor Javier, por la orientación y ayuda que me brindaron para la realización de esta tesis, por su apoyo y amistad que me permitieron aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto, por seguir apoyándome en esta etapa de mi vida.

Compañeros de laboratorio por apoyarme cuando se me complicaba y hacer que los días de trabajo sean mejores y no pesados, por darme alegrías. (M, N, A, N, F).

Gracias a mis sinodales D.C. Jesús Campos García, D.C. Alfonso Luna Cruz, D.C. Josué Altamirano Hernández, por tomarse el tiempo de apoyarme con la revisión.

Dedicatoria

Dentro de mi recorrido por la vida me pude dar cuenta que hay muchas cosas para las que soy buena, encontré destrezas y habilidades; pero lo importante es que pude descubrir que por más que disfrute trabajar sola, siempre obtendré un mejor resultado si lo realizo con la ayuda y buena compañía, que dentro del desarrollo de esta tesis se presentaron muchos momentos en los cuales iba todo mal o no de la forma que esperaba, entendí que la ayuda y apoyo siempre llega justo a tiempo.

Por esto mismo quiero dedicar esta tesis a mi familia por forjarme como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que incluye este; agradezco que estuvieron apoyándome en cada decisión que tomará, gracias a ustedes hoy puedo con alegría presentar y disfrutar este logro.

Contenido

Índice de figuras	7
Índice de tablas	11
ACRÓNIMOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Nanotecnología	15
1.2 Absorción y translocación de las nanopartículas en la planta	15
1.2.1 Absorción foliar	16
1.2.2 Absorción radicular	16
1.2.3 Absorción a través de semillas	16
1.3 Interacción nanopartículas-plantas	17
1.4 Interacción de nanotubos de carbono-plantas	18
1.5 Efectos de los nanotubos de carbono sobre el crecimiento y desarrollo vegetal	19
1.6 Nanotubos de carbono como agentes antimicrobianos	20
1.7 Funcionalización de los nanotubos de carbono con compuestos de interés biológico	21
1.7.1 Funcionalización no covalente de nanotubos de carbono	22
1.7.2 Funcionalización covalente de nanotubos de carbono	23
1.8 Elicitores	24
1.9 Ciclodipéptidos como moléculas elicitoras	26
1.10 Fitorreguladores	27
1.11 Especies reactivas de oxígeno	28
1.12 Sistema de defensa	29
1.12.1 Resistencia sistémica adquirida	30
1.12.2 Resistencia sistémica inducida	30
1.13 Patógenos	31
1.13.1 <i>Phytophthora</i> sp	32
1.14 <i>Solanum lycopersicum</i>	33
2. JUSTIFICACIÓN	35
3. HIPÓTESIS	36
4. OBJETIVOS	36
4.1 General	36
4.2 Específicos	36
5. MATERIALES Y MÉTODOS	37
5.1 Funcionalización y caracterización de NTC con CDPs	37

5.1.1 Ciclodipéptidos	37
5.1.2 Nanotubos de carbono de pared múltiple	38
5.1.2 Funcionalización no covalente	38
5.1.3 Caracterización de NTC	39
5.2 Bioensayos de <i>S. lycopersicum</i> infectadas con <i>P. capsici</i> y cultivadas con NTC con y sin funcionalizar con CDPs	40
5.2.1 Desinfección, cebado y siembra de las semillas de jitomate	40
5.2.2 Índice de vigor de <i>S. lycopersicum</i>	40
5.2.3 Desarrollo de plántulas de jitomate	40
5.2.4 Infección de las plántulas de jitomate con <i>P. capsici</i>	41
5.2.5 Crecimiento y biomasa de las plántulas de <i>S. lycopersicum</i>	41
5.2.6 Cuantificación de ROS y deshidrogenasas	41
5.3 Diseño experimental	42
5.4 Variables respuestas	43
5.5 Análisis estadístico	43
6. RESULTADOS	44
6.1 Análisis de nanopartículas por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	44
6.2 Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en la germinación de <i>S. lycopersicum</i> .	46
6.3 Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en el índice de vigor de <i>S. lycopersicum</i>	47
6.4 Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en el crecimiento de <i>S. lycopersicum</i>	52
6.5 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre el área foliar y arquitectura radical de <i>S. lycopersicum</i>	55
6.6 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre la biomasa de <i>S. lycopersicum</i>	64
6.7 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre la abundancia y localización de la enzima deshidrogenasa y especies reactivas de oxígeno en <i>S. lycopersicum</i>	66
6.8 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre el parte aérea y arquitectura radical de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	69
6.9 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre la biomasa de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	86
6.10 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre las ROS de <i>S. lycopersicum</i>	88
6.11 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre el daño en <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	91
7. DISCUSIÓN	92
8. CONCLUSIÓN	97
10. REFERENCIAS	98

Índice de figuras

Figura 1. Mecanismo de absorción y transporte de NPs en plantas mediante aplicación foliar o radicular.	17
Figura 2. Estructura de un nanotubo de carbono de pared simple (SWCNT) y de un nanotubo de carbono de pared múltiple (MWCNT).....	19
Figura 3. Esquema general de la entrada de las NPs en los sistemas vegetales, mostrando su efecto en la defensa oxidativa y estimulación de fitorreguladores.	21
Figura 4. Esquema de funcionalización no covalente de nanotubos de carbono con ciclodipéptidos.....	23
Figura 5. Esquema de funcionalización covalente de nanotubos de carbono con ciclodipéptidos.....	24
Figura 6. Acción de los elicitores en las plantas.	25
Figura 7. Mecanismo general de la defensa de las plantas durante la patogénesis.	31
Figura 8. Fases fenológicas de un cultivo de jitomate.....	34
Figura 9. Espectro de ciclodipéptidos obtenido por cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC).	37
Figura 10. Cuantificación de ciclodipéptidos.....	38
Figura 11. Proceso de funcionalización no covalente de nanotubos de carbono con ciclodipéptidos.....	39
Figura 12. Diagrama general del establecimiento de bioensayos de jitomate cultivado con nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos.....	42
Figura 13. Espectro de infrarrojo de nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos: A) nanotubos de carbono prístinos, B) ciclodipéptidos, C) nanotubos de carbono funcionalizados con 10 µg/mL de ciclodipéptidos, D) Nanotubos de carbono funcionalizados con 20 µg/mL de ciclodipéptidos.....	45
Figura 14. Índice de vigor de las semillas de <i>S. lycopersicum</i> cultivadas con CDPs y NTC prístinos o funcionalizados con CDPs.....	47
Figura 15. Imágenes representativas del efecto de los CDPs en la germinación de <i>S. lycopersicum</i> 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a X=0.75.....	48
Figura 16. Imágenes representativas del efecto de los NTC prístinos en la germinación de <i>S. lycopersicum</i> 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a X=0.75.....	49
Figura 17. Imágenes representativas del efecto de los NTC funcionalizados con CDPs en la germinación de <i>S. lycopersicum</i> 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a X=0.75.....	50
Figura 18. Imágenes representativas del efecto de los CDPs, NTC prístinos, NTC funcionalizados con CDPs en la germinación de <i>S. lycopersicum</i> 5 días después de la	

siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a X=0.75.....	51
Figura 19. Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en la longitud de la parte aérea de <i>S. lycopersicum</i> , 15 días después de su siembra.....	52
Figura 20. Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs en la longitud total de raíz de <i>S. lycopersicum</i> , 15 días después de su siembra.....	53
Figura 21. Imágenes representativas del efecto de CDPs, NTC prístinos y NTC funcionalizados con CDPs en el desarrollo de <i>S. lycopersicum</i> 15 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con cámara NIKON D7100.....	54
Figura 22. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la longitud foliar, 35 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i>	55
Figura 23. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el diámetro del tallo, 35 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i>	56
Figura 24. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la longitud de la raíz de <i>S. lycopersicum</i> , 35 días después de la siembra.	57
Figura 25. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el volumen radical, 35 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i>	58
Figura 26. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el área de superficie de la raíz, 35 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i>	59
Figura 27. Imágenes representativas del efecto de CDPs en el crecimiento de <i>S. lycopersicum</i> a los 35 días después de la germinación. Imágenes obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	60
Figura 28. Imágenes representativas del efecto de los NTC prístinos en el crecimiento de <i>S. lycopersicum</i> a los 35 días después de la germinación. Imágenes obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	61
Figura 29. Imágenes representativas del efecto de los NTC funcionalizados con CDPs en el crecimiento de <i>S. lycopersicum</i> a los 35 días después de la germinación. Imágenes obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	62
Figura 30. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs en el crecimiento de <i>S. lycopersicum</i> a los 35 días después de la germinación.	63
Figura 31. Peso fresco <i>S. lycopersicum</i> cultivado con NTC con y sin funcionalizar con CDPs, 35 días después de la siembra.	64
Figura 32. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el peso seco, 35 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i>	65
Figura 33. Determinación histoquímica del anión superóxido en hojas de jitomate cultivada con ciclodipéptidos, nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos, 35 días después de la siembra.	66
Figura 34. Determinación histoquímica de peróxido de hidrógeno en hojas de jitomate cultivada con ciclodipéptidos, nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos, 35 días después de la siembra.	67

Figura 35. Determinación histoquímica de deshidrogenasas en hojas de jitomate cultivada con ciclodipéptidos, nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos, 35 días después de la siembra.....	68
Figura 36. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre la longitud parte aérea de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> , 70 días después de la siembra.....	70
Figura 37. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el diámetro del tallo, 70 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	72
Figura 38. Imágenes que muestran el efecto de los CDPs en la parte aérea de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	73
Figura 39. Imágenes que muestran el efecto de NTC prístinos en la parte aérea de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	74
Figura 40. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs en la parte aérea de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	75
Figura 41. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs en la parte aérea de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra.....	76
Figura 42. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre la longitud total de la raíz de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> , 70 días después de la siembra.....	77
Figura 43. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el volumen radical, de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> , 70 días después de la siembra.	79
Figura 44. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el área de superficie de la raíz, de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> , 70 días después de la siembra.....	81
Figura 45. Imágenes que muestran el efecto de los CDPs sobre la arquitectura radical de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	82
Figura 46. Imágenes que muestran el efecto de los NTC prístinos sobre la arquitectura radical de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	83
Figura 47. Imágenes que muestran el efecto de los NTC prístinos sobre la arquitectura radical de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.	84
Fig. 48. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs sobre la arquitectura radical de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i> a los 70 días después de la siembra.	85
Figura 49. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el peso fresco, 70 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	86
Figura 50. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el peso seco, 70 días	

después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	87
Figura 51. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la intensidad del anión superóxido, 70 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	88
Figura 52. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la intensidad del peróxido de hidrógeno, 70 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	89
Figura 53. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la intensidad de las deshidrogenasas, 70 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	90
Figura 54. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el daño en plantas, 70 días después de la siembra de <i>S. lycopersicum</i> infectada con <i>P. capsici</i>	91

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Fitorreguladores y funciones durante el crecimiento y desarrollo de la planta.</i>	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. <i>Aminoácidos presentes en los ciclodipéptidos.....</i>	37
Tabla 3. <i>Concentración de NTC y CDPs que se utilizaron para la funcionalización.</i>	39
Tabla 4. <i>Tratamientos: S. lycopersicum con y sin exposición a P. capsici cultivado con CDPs, NTC prístinos y funcionalizados con CDPs.....</i>	42
Tabla 5. <i>Germinación de S. lycopersicum cultivada con nanotubos de carbono funcionalizados de forma no covalente con ciclodipéptidos.</i>	46

ACRÓNIMOS

Acrónimos	Significado
AJ	Ácido jasmónico
APX	Ascorbato peroxidasa
AS	Ácido salicílico
CAT	Catalasa
CDPs	Ciclodipéptidos
ET	Etileno
ETI	Inmunidad activada por efectores
FTIR	Espectroscopía de infrarrojo con transformación de Fourier
GPX	Glutación peroxidasa
HR	Respuesta de hipersensibilidad
ISR	Resistencia sistémica inducida
MAMPs	Patrones moleculares asociados a microbios
MWCNT	Multi-walled carbon nanotubes
NPs	Nanopartículas
NTC	Nanotubos de carbono
PAMPs	Patrones moleculares asociados a patógenos
PCD	Muerte celular programada
PGPR	Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal
POX	Peroxidasa
PPO	Polifenol oxidasa
PRR	Receptores transmembrana de reconocimiento de patrones
PTI	Inmunidad activada por patrones
QS	Quórum sensing
ROS	Especies reactivas de oxígeno
SAR	Resistencia sistémica adquirida
SOD	Superóxido dismutasa
SWCNT	Single-walled carbon nanotubes
TOR	Target of Rapamycin

RESUMEN

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial, sin embargo, su producción se ve amenazada por diversos patógenos, entre ellos *Phytophthora capsici*, un oomiceto causante de graves daños en raíces y tallos. Con el objetivo de fortalecer el sistema de defensa de la planta, se exploró el uso de nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos como agentes elicitores. Los nanotubos de carbono (NTC), por sus propiedades físico-químicas únicas, ofrecen una plataforma eficiente para la entrega dirigida de compuestos de interés. Por otra parte, los ciclodipéptidos (CDPs) son pequeñas moléculas cíclicas con reconocida actividad biológica. La funcionalización de los NTC-CDPs permitió desarrollar un sistema, que al ser aplicado desde el cebado de las semillas promoviera la germinación y estadio temprano del jitomate, además de actuar como agentes promotores de crecimiento provocando una estimulación de los mecanismos de defensa como las especies reactivas de oxígeno (ROS). Nuestros resultados indican que la combinación de estas nanopartículas y señales químicas naturales puede presentar una estrategia prometedora para promover el crecimiento vegetal y el manejo sustentable de enfermedades en cultivos agrícolas y de esta manera contribuir a la disminución de insumos químicos, por lo tanto, ayudando a contrarrestar los efectos negativos que se están observando por estos agroquímicos.

Palabras claves: Jitomate, fitopatógeno, nanopartículas, especies reactivas de oxígeno sistema de defensa.

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most important horticultural crops worldwide; however, its production is threatened by several pathogens, including *Phytophthora capsici*, an ommycete that causes severe damage to root and stems. In order to strengthen the plant's defense system, the use of carbon nanotubes functionalized with cyclopeptides as elicitor agents was explored. Carbon nanotubes (CNTs), due to their unique physicochemical properties, offer an efficient platform for the target delivery of compounds of interest. On the other hand, cyclodipeptides (CDPs) are small cyclic molecules with recognized biological activity. The functionalization of NTC-CDPs allowed the development of a system that, when applied from seed priming, would promote germination and early stage of tomato, in addition to acting as growth-promoting agents by stimulating defense mechanisms such as reactive oxygen species (ROS). Our results indicate that the combination of these nanoparticles and natural chemical signals may present a promising strategy to promote plant growth and sustainable disease management in agricultural crops and thus contribute to the reduction of chemical inputs, thus helping to counteract the negative effects that are being observed by these agrochemicals.

Key words: tomato, phytopathogen, nanoparticles, reactive oxygen species, reactive oxygen species, defense system.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Nanotecnología

La nanotecnología es una de las tecnologías más prometedoras del siglo XXI, siendo la capacidad de convertir la teoría de la nanociencia en aplicaciones útiles mediante la observación, la medición, la manipulación, ensamblaje, control y fabricación de materia a una escala nanométrica, permitiéndonos aplicar en múltiples áreas de la ciencia moderna, incluyendo física, farmacología, química, informática, ingeniería y agricultura [1]. La agricultura es un sector económico importante para la producción de diversos cultivos vegetales, ya sea para fines alimenticios o forrajeros, por lo que, en los últimos años la nanotecnología representa un parteaguas en el avance tecnológico-científico para mejorar la comprensión de la biología y fisiología de los cultivos vegetales para incrementar su rendimiento y calidad nutricional, esta alternativa reduce los costos económicos y ambientales actualmente generados por los insumos químicos [2]. Las nanopartículas (NPs) se definen como materiales naturales o artificiales con un tamaño de $\sim 1 - 100$ nm y, se les atribuyen propiedades fisicoquímicas especiales que las hacen de gran interés multidisciplinario. Las NPs se pueden clasificar según su tamaño, morfología, propiedades físicas y químicas, pueden clasificarse de acuerdo con su naturaleza química en orgánicas e inorgánicas [3]. Entre las NPs inorgánicas se encuentran por ejemplo las NPs de Cu, Al, Ag, ZnO, Si, TiO₂, y estas NPs puede servir como una fuente de micronutrientes para las plantas, favorecer procesos que estimulan la absorción de otros minerales para la nutrición vegetal, o favorecer procesos fisiológicos en las plantas desde distintos mecanismos de acción promoviendo el desarrollo vegetal [4]. Por otro lado, entre las NPs orgánicas se encuentran polímeros o lípidos nanoestructurados, así como otras NPs a base de carbono cristalino como el grafeno, los nanodots, fullerenos y los nanotubos de carbono (NTC).

1.2 Absorción y translocación de las nanopartículas en la planta

Investigaciones pioneras han demostrado que las NPs pueden ser absorbidas y transportadas por las plantas. No obstante, esto depende de varios factores, como el tamaño de las NPs, su área y carga superficial, la concentración en que se adicione, tiempo de exposición, método de absorción y la especie vegetal seleccionada como modelo biológico. Las NPs pueden ingresar al sistema vegetal mediante diversas estructuras, como los estomas y los pelos

radicales. Algunas investigaciones confirman que las plantas son capaces de absorber las nanopartículas [5], sin embargo, las pruebas directas del transporte de nanopartículas en las plantas son limitadas [6]. Lo que representa un reto, ya que comprender el comportamiento de la absorción y el transporte de la NPs en las plantas es fundamental para desarrollar NPs dirigidas, que puedan favorecer el desarrollo vegetal potenciando sus efectos en las plantas en beneficio del sector agrícola en general [7], [8]. Por otro lado, comprender el mecanismo detrás de la acción y la bioacumulación de NPs en las plantas contribuirá a descartar los riesgos asociados al uso de las NPs y garantizar la seguridad biológica para su uso en la agricultura.

1.2.1 Absorción foliar

Las NPs pueden ingresar a las hojas a través de los estomas o por penetración de la cutícula, esta actúa como una barrera foliar primaria, limitando la entrada de NPs con un tamaño superior a 5 nm y las NPs con tamaños superiores a 10 nm suelen entrar a través de los estomas Shahid *et al.*, (2021). Una vez dentro, su transporte celular se realiza mediante las rutas apoplástica o simplástica hacia el sistema vascular de la planta. La transferencia de NPs con tamaño entre 10 y 50 nm es favorecida a través del citoplasma de las células adyacentes mediante la ruta simplástica. En cambio, las NPs de mayor tamaño, entre 50 y 100 nm, se desplazan entre las células utilizando la ruta apoplástica. Las NPs se transportan junto con el flujo de azúcar a través de los tubos de tamiz del floema. Como resultado del transporte vascular por el floema, las NPs pueden moverse bidireccionalmente y acumularse en diferentes partes de la planta, como raíces, tallos, frutos, granos y hojas [9].

1.2.2 Absorción radicular

Las raíces de las plantas representan la vía principal de entrada para las NPs. Estas NPs pueden ser absorbidas a través de los pelos radicales y otras estructuras de las raíces. Una vez dentro de la planta, las NPs pueden moverse a través del apoplasto (vía extracelular) o del simplasto (vía intracelular) hacia el xilema, permitiendo su transporte a otras partes de la planta [9], [10].

1.2.3 Absorción a través de semillas

Las NPs también pueden ser absorbidas por las semillas mediante el cebado proceso que consiste en remojar las semillas en agua o soluciones acuosas con las NPs para mejorar sus propiedades, especialmente la germinación, afectando potencialmente el crecimiento y

desarrollo inicial de las plántulas. Este proceso de absorción puede tener implicaciones significativas en la fase temprana de desarrollo de la planta [11]. Las NPs pueden ingresar a las semillas a través de las acuaporinas, una clase de proteínas de membrana ubicuas que están involucradas en el transporte de agua [12]. En la figura 1 se muestra un diagrama sobre el mecanismo de absorción y transporte de las NPs en los sistemas vegetales mediante aplicación foliar y radicular.

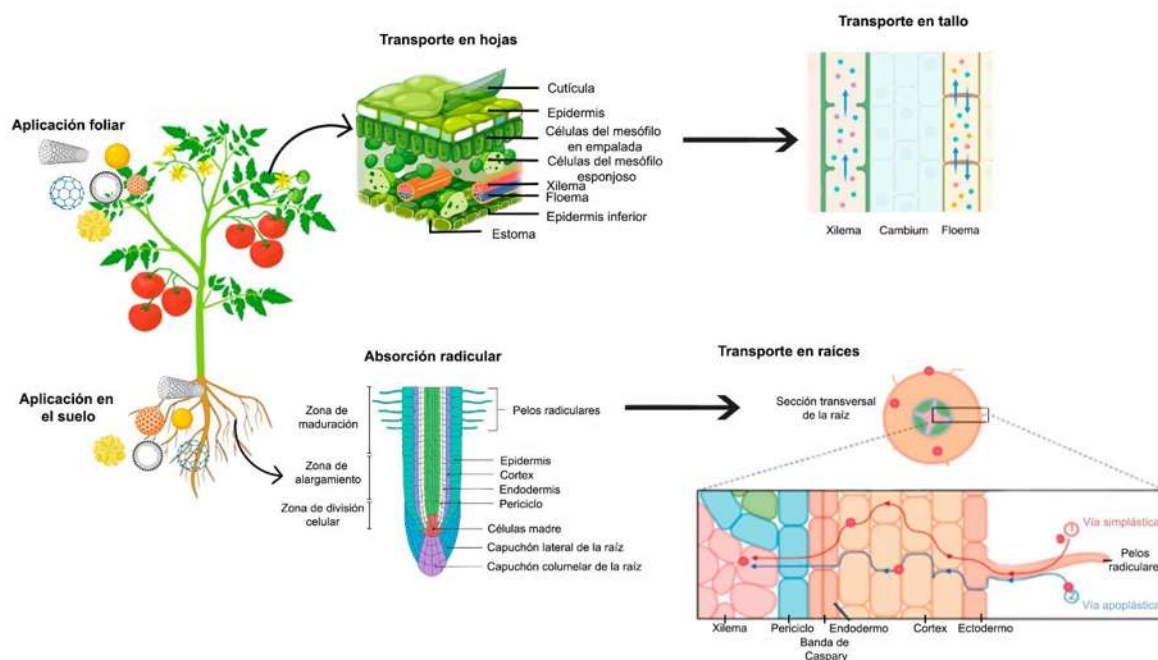


Figura 1. Mecanismo de absorción y transporte de NPs en plantas mediante aplicación foliar o radicular.

1.3 Interacción nanopartículas-plantas

Las NPs tienen un gran potencial para mejorar los rendimientos de los cultivos de interés agrícola, preservando el cuidado ecológico, sostenibilidad ambiental y reducir costos económicos. Por lo que fuertemente se explora el uso de NPs para aumentar la productividad agrícola mediante la entrega eficiente de nutrientes y el desarrollo de fertilizantes de liberación controlada [13], [14], dado que, en la última década, se ha documentado el uso de NPs en las plantas como partículas promotoras del crecimiento vegetal, al observarse efectos positivos en la germinación temprana de las semillas, mejorar la elongación y ramificación de raíz y estimular el desarrollo foliar. Investigaciones sobre el efecto de las NPs de sulfuro de plata (Ag₂S) y sulfuro de zinc (ZnS) reportaron que estas NPs promovieron la germinación

de semillas de soja (*Glycine max L.*) y trigo (*Triticum aestivum L.*), lo que se tradujo en un efecto positivo en la tasa de germinación de las semillas y en parámetros de crecimiento [15]. Afzal *et al.* (2021) utilizaron dos formas de partículas de hierro: óxido de hierro (FeO) que se estabilizó fitoquímicamente con un extracto de las flores de *Cassia occidentalis L.*, y NPs de sulfato de hierro (FeSO₄) en semillas de arroz (*Oryza sativa L.*), con el objetivo de aumentar la germinación de las semillas y la vitalidad de las plántulas mostrando que las nanopartículas de FeO tuvieron un efecto más favorable sobre el crecimiento de las plantas cuando se compararon con el efecto de las NPs de FeSO₄ y las plantas control [16], [17]. Por otro lado, el interés de la aplicación de NPs con propiedades antimicrobianas es creciente debido a que se ha demostrado que NPs como las de ZnO y CuO son efectivas para el control de diversas especies de hongos y bacterias fitopatógenas [18]. En este sentido, Wani y Shah, (2012) confirmaron la actividad antifúngica de las nanopartículas a base de Zn contra *Fusarium oxysporum* y *Mucor plumbeus*, y de manera similar, Sardella *et al.* (2017) reportaron los mismos hallazgos contra *Alternaria alternata* y *Rhizopus stolonifer* [17]. Por lo que, la aplicación de estas NPs representa una alternativa para reducir o sustituir el uso de pesticidas convencionales, que dañan fuertemente el ambiente y los organismos benéficos naturales para las plantas.

1.4 Interacción de nanotubos de carbono-plantas

Por otro lado, los estudios sobre el uso de NPs a base de carbono cristalino como los NTC en las plantas es creciente, debido a que poseen propiedades fisicoquímicas únicas atribuidas principalmente a su tamaño, estructura química y morfología [19]. Los NTC se pueden considerar NPs constituidos por una o varias láminas de grafeno, que es una red cristalina y hexagonal de átomos de carbono enrollada. De acuerdo con el número de capas o láminas de grafeno que los constituyen, los NTC se han clasificado principalmente en nanotubos de carbono de pared simple o Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNT), mientras que al enrollar múltiples hojas de grafeno se forman los nanotubos de carbono de pared múltiple o Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) [20], [21]. Los NTC poseen una combinación de propiedades idóneas como lo son su composición química a base de C=C, C-H, C-O, diámetro nanométrico, integridad estructural, alta conductividad eléctrica y estabilidad química [22],[22]. En la figura 2 se muestra un esquema gráfico representativo de la

estructura típica de un nanotubo de carbono de pared simple y de un nanotubo de carbono de pared múltiple.

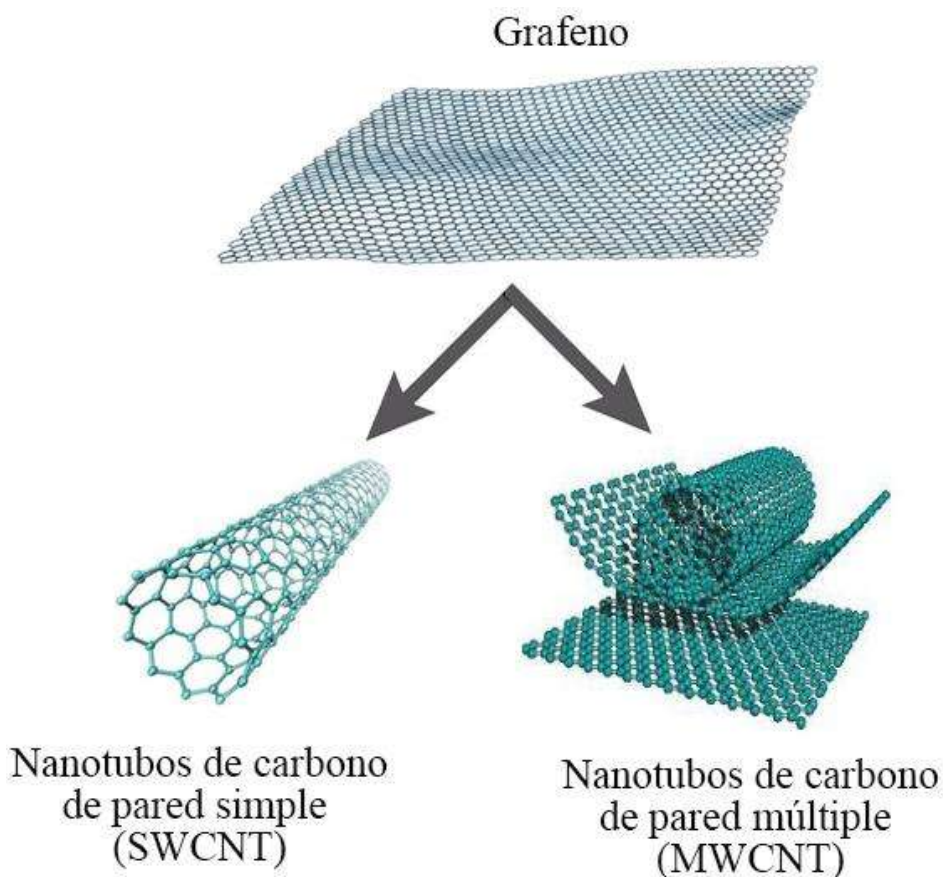


Figura 2. Estructura de un nanotubo de carbono de pared simple (SWCNT) y de un nanotubo de carbono de pared múltiple (MWCNT).

1.5 Efectos de los nanotubos de carbono sobre el crecimiento y desarrollo vegetal

Los efectos de los NTC en el crecimiento y la reproducción de las plantas pueden ser inducidos directamente por distintos mecanismos, entre ellos podemos considerar las interacciones de los NTC con proteínas vegetales, factores de transcripción o ADN, o indirectamente al inducir el aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) [23]. Los NTC se han reconocido como agentes promotores de la germinación de semillas y en el crecimiento de cultivos [24], [25]. Por ejemplo, Khodakovskaya *et al.*, (2013) reportaron que los NTC suplementados en jitomate (*Solanum lycopersicum*) activaron el sistema reproductivo de las plantas y aumentaron la producción de frutos dos veces más que

las plantas control [26]. Del mismo modo, se demostró que usando MWCNT se mejoró la germinación y el crecimiento del brócoli (*Brassica oleracea var. italica*) bajo estrés salino [27]. Por otra parte, se ha documentado el impacto de los NTC como agentes antimicrobianos, ya que pueden inhibir el crecimiento y el desarrollo de biopelículas bacterianas [28]. Sin embargo, aunque, se ha logrado avanzar en la síntesis y el uso de NTC en los sistemas vegetales, sigue siendo necesario un constante estudio de los mecanismos de acción de estas NPs en las plantas, para intentar explicar esta interacción ya que se han documentado resultados contrastantes de sus efectos [29] y comprenderlos permitirá su aplicación óptima y segura.

1.6 Nanotubos de carbono como agentes antimicrobianos

Los NTC podrían ser una alternativa para el control de patógenos por su acción antimicrobiana e inducir la activación del sistema de defensa antioxidante en las plantas [30], [31]. Al respecto, Kang *et al.*, (2007) demostraron que los NTC de pared simple mostraron actividad antimicrobiana, lo que causó la destrucción de la membrana celular de los microorganismos a través del contacto directo y, por lo tanto, redujo la viabilidad celular en un 80% [32]. Por otro lado, Saleemi *et al.*, (2020) estudió los efectos antimicrobianos de los NTC contra *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* y *Candida albicans*, y demostraron que los NTC de pared múltiple inhiben el crecimiento de los patógenos que analizaron. En particular, demostraron que los NTC pueden dañar selectivamente las paredes o membranas de los patógenos, dependiendo no solo de los grupos funcionales y la longitud de los nanotubos, sino también de la morfología de los patógenos [33].

La comprensión de la interacción de NPs-Planta, NPs-Patógenos, y la interacción tripartita, juega un rol fundamental para el desarrollo de nuevas alternativas dirigidas al mejoramiento del rendimiento de las plantas, algunos de los procesos involucrados en la interacción de las NPs con una planta se muestran en la figura 3. En primera instancia, se esquematiza la absorción radicular, las NPs ingresan por los pelos radicales y se transportan hacia el xilema, integrándose al flujo de nutrientes y agua. Simultáneamente, en la absorción foliar, penetran por los estomas o directamente a través de la cutícula. Una vez internalizadas, estas NPs desempeñan un papel crucial en el desarrollo y la fisiología de la planta. Promueven el

crecimiento de la radícula, lo que mejora la absorción de nutrientes como de agua, y un aumento de la biomasa y al fortalecimiento de la planta en general. Además, contribuyen al fortalecimiento de la pared celular, mejorando la estructura y resistencia de los tejidos vegetales. En respuesta a un ataque de patógenos, las NPs inducen una explosión oxidativa, promoviendo la generación de ROS y un aumento en fitorreguladores como el ácido salicílico (AS), ácido jasmónico (AJ) y etileno (ET), fundamentales para la defensa vegetal. Finalmente, estas nanopartículas estimulan la producción de fitorreguladores, como las auxinas y citoquininas, que regulan el crecimiento y desarrollo de la planta, lo que refuerza su capacidad de adaptación y resistencia a condiciones adversas.

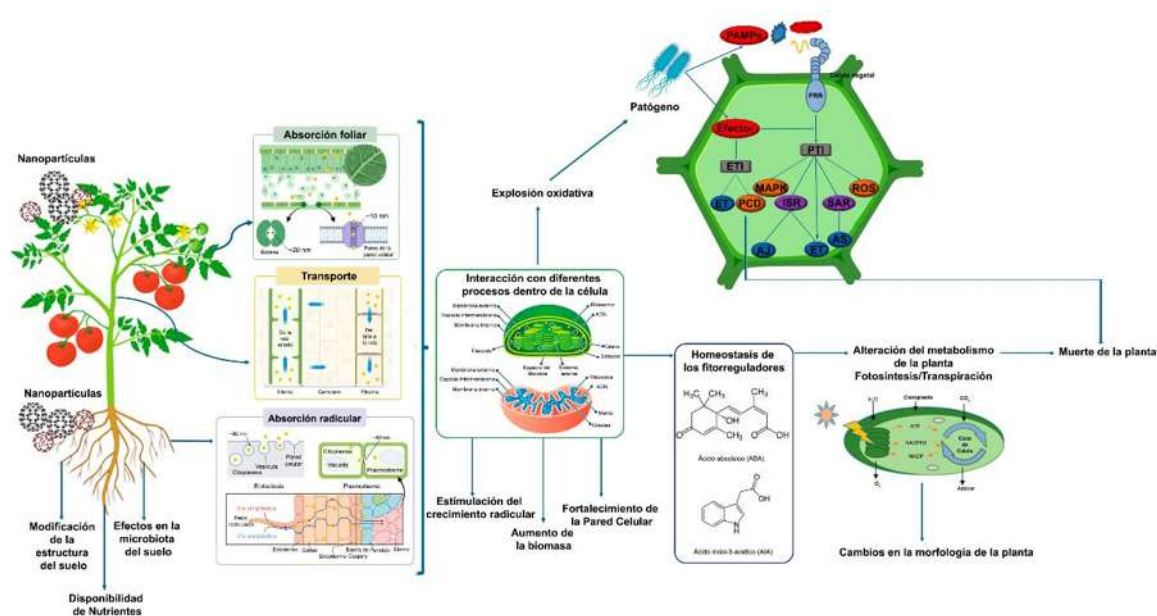


Figura 3. Esquema general de la entrada de las NPs en los sistemas vegetales, mostrando su efecto en la defensa oxidativa y estimulación de fitorreguladores.

1.7 Funcionalización de los nanotubos de carbono con compuestos de interés biológico

Si bien, la aplicación de NPs ha demostrado tener fuerte potencial para el control de fitopatógenos, las NPs como los NTC, también representan una alternativa al ser utilizados como vehículo para acarrear moléculas de interés con atributos que favorezcan el desarrollo en los sistemas vegetales, confiriéndole una mayor especificidad y resistencia para que estas moléculas efficienten su acción biológica en los sistemas vegetales. Para ello, uno de los

principales métodos que se emplean es la funcionalización de NTC.

La funcionalización se define como la modificación de propiedades de los NTC u otros alótropos cristalinos del carbono, por la adsorción y/o unión de átomos o moléculas en las paredes de los NTC. Debido a la forma tubular que poseen los NTC, estos tienen un volumen interno que se puede utilizar para albergar funcionalidades específicas [34]. Cañas *et al.*, (2008) evaluaron la diferencia entre los efectos de los NTC funcionalizados y no funcionalizados sobre el crecimiento de las plantas de col silvestre (*Brassica oleracea*), zanahoria (*Daucus carota*), pepino (*Cucumis sativus*), cebolla (*Allium cepa*), jitomate (*Solanum lycopersicum*) y lechuga (*Lactuca sativa*), estos investigadores demostraron que ambos tipos de funcionalización modificaron la elongación radicular de estas plantas [35]. De forma general, la funcionalización de NTC puede ser no covalente y covalente:

1.7.1 Funcionalización no covalente de nanotubos de carbono

La funcionalización no covalente, es un método “no invasivo”, es decir que preserva las propiedades de los NTC. Se basa en la adsorción de moléculas mediante fuerzas de Van der Waals sin modificar la estructura original de los NTC, es decir, conserva sus propiedades electrónicas y mecánicas, además de mejorar la solubilidad. Una de las ventajas de la funcionalización no covalente, es que, al presentar interacciones débiles entre la molécula unida con los NTC, permite una fácil liberación de esta molécula al entrar en contacto con el sistema biológico [36]. En la figura 4 se muestra un esquema gráfico hipotético de la funcionalización no covalente de los NTC con diferentes ciclodipéptidos.

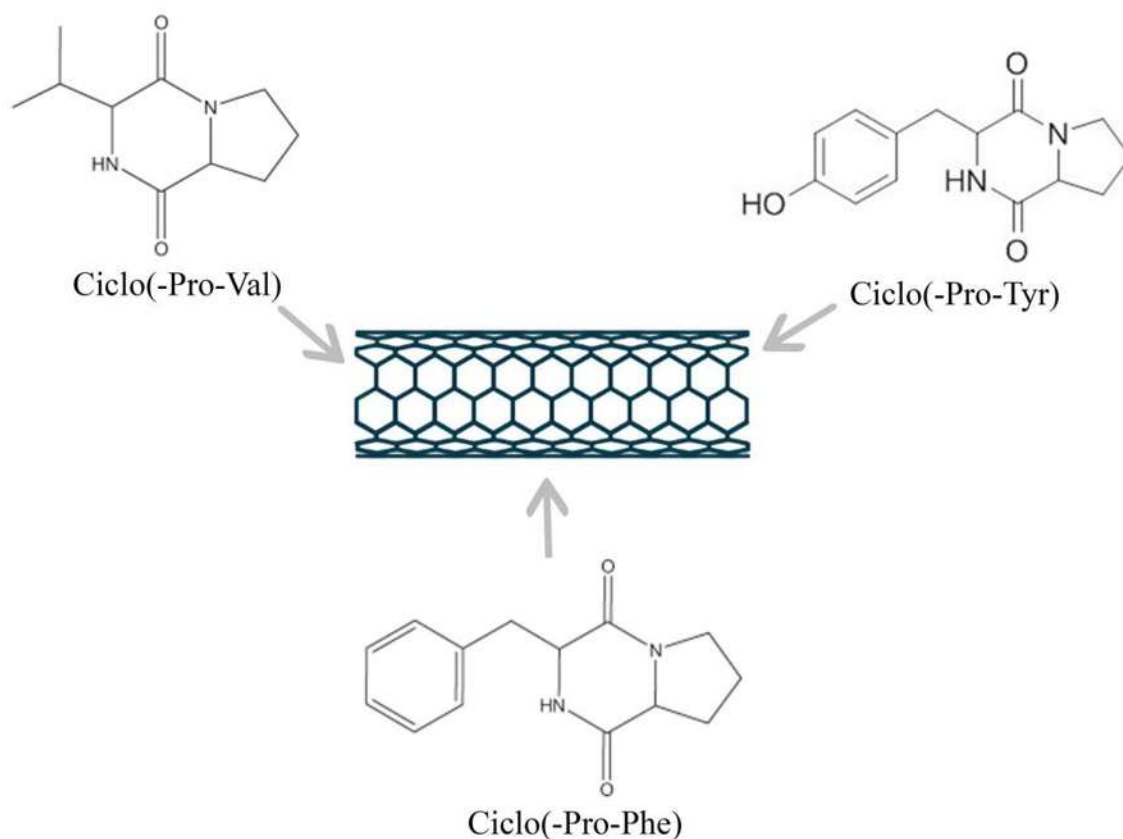


Figura 4. Esquema de funcionalización no covalente de nanotubos de carbono con ciclodipéptidos.

1.7.2 Funcionalización covalente de nanotubos de carbono

La funcionalización covalente tiene como base la unión covalente de los grupos funcionales a la superficie de los NTC, en sus extremos, paredes laterales o sus defectos estructurales [37] causada por agentes químicos que causan la oxidación en la red cristalina y permite la unión de grupos funcionales en los sitios donde se rompen los dobles enlaces o enlaces sp^2 [38]. Entre los principales agentes oxidantes se utiliza el HNO_3/H_2SO_4 , estos insertan oxígeno y grupos funcionales como los grupos carboxilo, cetona, hidroxilo y los grupos ésteres que facilitan la unión de otras moléculas o compuestos químicos [39]. Esta funcionalización se basa en la reactividad de los defectos estructurales en los cuales se introducen grupos funcionales, moléculas o compuestos como los fármacos [40]. En la figura 5 se muestra un esquema gráfico de la funcionalización covalente de los NTC con diferentes ciclodipéptidos, donde se realiza una oxidación y una aminación subsecuente, para posteriormente unir grupos funcionales negativos presentes en los ciclodipéptidos.

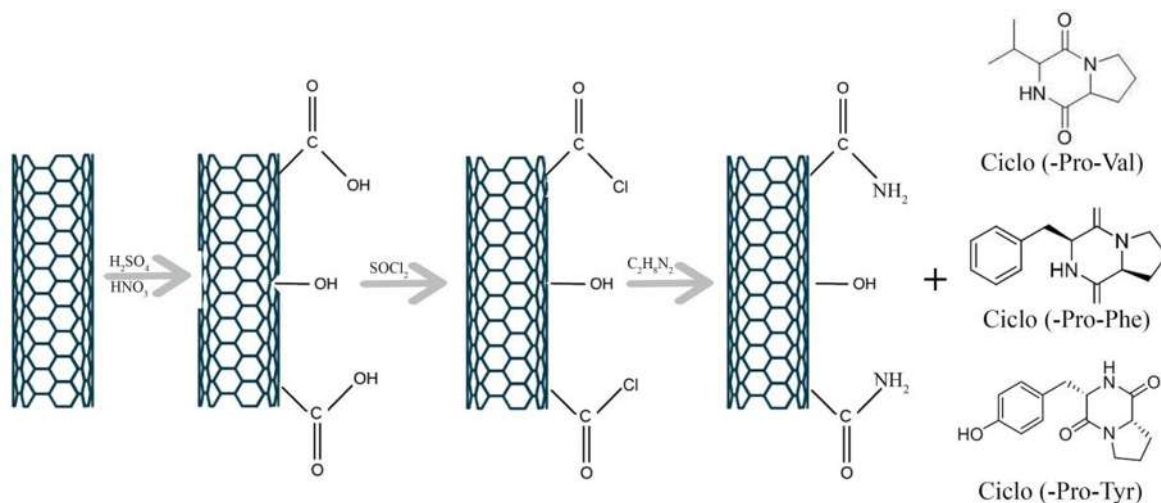


Figura 5. Esquema de funcionalización covalente de nanotubos de carbono con ciclodipéptidos.

La funcionalización de NTC se ha realizado uniendo grupos funcionales como las aminas, amidas y grupos carboxilos principalmente, en el área biomédica también se ha documentado la funcionalización de NTC con moléculas y biomoléculas como el ADN, fármacos y proteínas. Esto último, representa una alternativa en la agricultura, aún sin explorar, en la que se pueden aprovechar moléculas como los elicitores en las plantas, capaces de estimular el sistema de defensa vegetal, usando como vehículo a los NTC para mejorar su actividad en las plantas.

1.8 Elicitores

Los elicitores son compuestos de bajo peso molecular que estimulan la respuesta inmune de las plantas activando una cascada de señalización de defensa vegetal. Se han clasificado en dos tipos: elicitores obtenidos de patógenos (elicitores exógenos) y elicitores obtenidos de plantas (elicitores endógenos). La mayoría de los elicitores exógenos de las respuestas de defensa de las plantas son inespecíficos y varían ampliamente en su naturaleza química, incluidas proteínas, oligosacáridos, glicoproteínas y lípidos. Las respuestas de defensa inducibles pueden activarse no solo por encuentros con patógenos en tejidos vegetales, sino también por tratamiento con elicitores. En consecuencia, los elicitores son ahora ampliamente utilizados para estudiar los mecanismos moleculares de las respuestas de defensa [41]. El primer paso para que el elicitore comience la respuesta inmune es activada por un receptor específico, del cual todavía en la actualidad se conoce poco, sin embargo, se

han hecho avances que nos indican algunos receptores de unión a inductores de glucano debido a que estos sitios de unión son activados con calor y se piensa que son de naturaleza proteica [42].

En la figura 6 se muestra un esquema identificando algunas de las formas clave de acción de los elicitores en las plantas, para desencadenar una serie de respuestas moleculares, bioquímicas y fisiológicas que constituyen el sistema de defensa de la planta. Primero se lleva a cabo el reconocimiento del elicitador, las plantas poseen receptores en sus membranas celulares que son capaces de reconocer estructuras específicas presentes en los elicitores. Una vez que el elicitador es reconocido por el receptor, se desencadena una cascada de eventos de señalización intracelular. Esto implica la activación y regulación de moléculas señalizadoras como lo son los fitorreguladores como el ácido jasmónico (AJ) y el ácido salicílico (AS) los cuales juegan un papel importante en la respuesta de defensa de las plantas. Por otro lado, se lleva a cabo la producción de metabolitos secundarios como alcaloides, terpenoides o fenoles, que tiene propiedades antimicrobianas o repelentes de herbívoros. Asimismo, se genera una respuesta fisiológica como es la producción de ROS como un mecanismo de respuesta de defensa ante un patógeno. Y como último mecanismo de defensa la planta puede producir la muerte en el sitio de infección y de esta manera evitar una infección al resto de la planta. En conjunto, estos procesos permiten a la planta activar una respuesta de defensa específica y adaptada a la amenaza percibida.

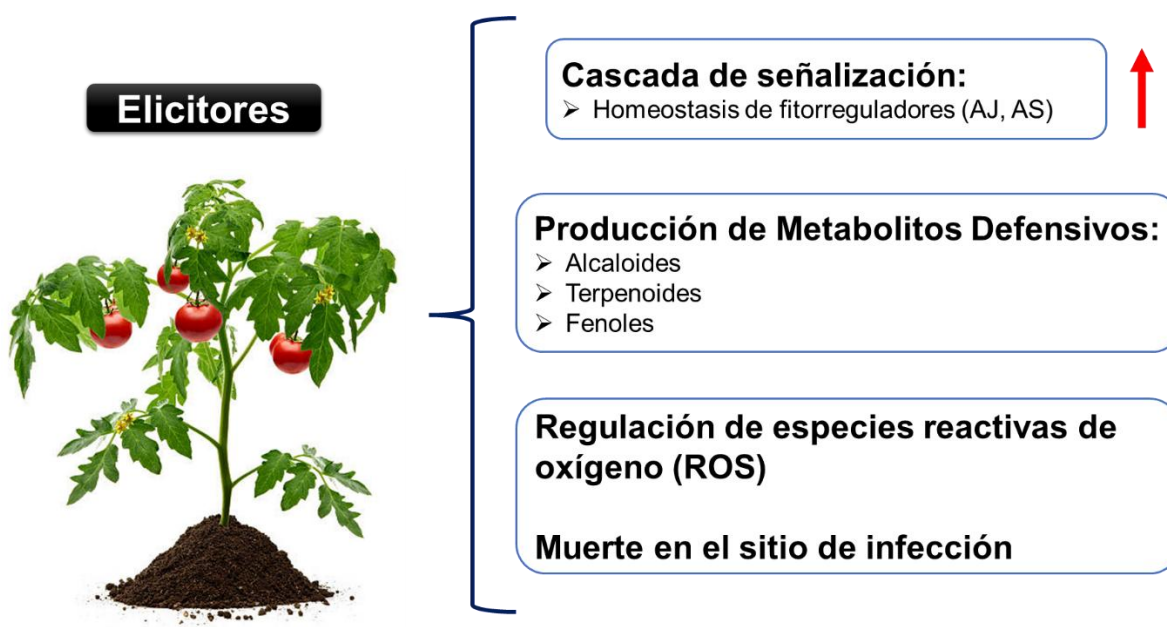


Figura 6. Acción de los elicitores en las plantas.

1.9 Ciclodipéptidos como moléculas elicitoras

Pseudomonas aeruginosa es un patógeno oportunista de plantas y animales, que produce factores de virulencia para infectar o colonizar a sus huéspedes eucariotas. Los ciclodipéptidos (CDPs) producidos por *P. aeruginosa* son moléculas cíclicas compuestas por dos aminoácidos unidos por enlaces peptídicos y son producidos por una amplia variedad de organismos, desde bacterias y hongos hasta animales [43], [44]. Estas moléculas han sido ampliamente estudiadas por sus diversas actividades biológicas. Estas moléculas pertenecen a una gran clase de compuestos orgánicos que median la detección de quórum sensing (QS) y las interacciones entre reinos en organismos evolutivamente distantes, como las bacterias y las plantas. [45], [46]. Los sistemas de detección de quórum sensing regula la producción de compuestos como las catalasas, proteasa, alcalina, elastasa y lectina, entre otros, que también coordinan procesos biológicos como la simbiosis, la resistencia al estrés oxidativo y la resistencia a los antibióticos [47], [48], [49]. Estudios realizados por Ortiz-Castro *et al.*, (2011) demostraron que los CDPs en *Arabidopsis thaliana*, estimularon el desarrollo vegetal, y al mismo tiempo, la exposición de esta planta a los CDPs generó una mayor resistencia al ataque de patógenos como *P. aeruginosa*, este resultado se ha asociado a una estimulación de los CDPs sobre el balance de fitorreguladores como el ácido jasmónico (AJ) y el ácido salicílico (AS) en respuesta a patrones moleculares asociados a patógenos [46]. Así mismo, en trabajos de investigación recientes, se ha documentado que algunos CDPs pueden activar la vía auxínica, mientras que otros pueden inhibir la vía de señalización Target of Rapamycin (TOR), que es una vía canónica en la progresión del ciclo celular en respuesta al estado energético y nutricional ambiental [46]. En este sentido, los CDPs pueden tener efectos positivos o negativos sobre los sistemas vegetales, dependiendo de la concentración y el tipo de CDPs.

En el contexto de la biotecnología, los ciclodipéptidos han sido identificados como posibles moléculas elicitoras, es decir compuestos capaces de activar respuestas de defensa en plantas. Estas respuestas incluyen la producción de metabolitos secundarios, proteínas de defensa, y la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que ayudan a la planta a resistir ataques de patógenos. Ofreciendo un amplio potencial en campos como lo es la agricultura sostenible, dando una alternativa a los pesticidas químicos, reduciendo el impacto ambiental asociado al uso intensivo de agroquímicos, minimizando la contaminación del suelo y el

agua. Además, el uso de los CDPs no se limita a la protección de cultivos contra patógenos, ya que también pueden mejorar el crecimiento vegetal.

1.10 Fitorreguladores

Los fitorreguladores son metabolitos producidos por las plantas a bajas concentraciones, estos regulan diversos procesos fisiológicos como su crecimiento, desarrollo, proceso reproductivo, longevidad e incluso la muerte. En general, los fitorreguladores se dividen en dos grupos en función de su acción en las plantas; el primer grupo entran las auxinas, giberelinas, citoquininas, brasinoesteroides, ácido jasmónico y estrigolactonas. Estas moléculas de señalización desempeñan un papel importante en las actividades promotoras del crecimiento vegetal mediante la división celular, la diferenciación celular, la elongación, floración. El segundo grupo están los fitorreguladores como el ácido abscísico, ácido salicílico y el ácido jasmónico que participan estrechamente en la respuesta al estrés biótico y abiótico [50]. Los fitorreguladores juegan un papel antagónico o sinérgico entre sí, la homeostasis de estos es esencial para regular el correcto crecimiento y desarrollo vegetal, así como en su respuesta de defensa a factores bióticos y abióticos.

Las respuestas de las plantas a la invasión de patógenos han sido estudiadas en relación con la síntesis y la señalización de estos fitorreguladores. La resistencia frente a los patógenos necrótrofos depende en gran medida de vías de señalización complejas que involucran al AJ, AS, ET y ácido abscísico (ABA). La defensa efectiva contra los necrótrofos se basa en gran medida al balance entre estos fitorreguladores esenciales, que pueden actuar de manera diferente en distintos sistemas patológicos [51].

El AJ es considerado un componente de la vía de transducción de señales en los mecanismos de defensa de las plantas [52], [53], es producido por la planta principalmente después del daño producido por un patógeno, microorganismos o insectos, y da como resultado un incremento de la producción de compuestos de resistencia, entre ellos el ácido salicílico y el etileno [54]. El AS es un mensajero endógeno importante por lo que está relacionado con compuestos de defensa de las plantas contra patógenos [55]. Por otra parte, se ha documentado que las ROS desempeñan un papel clave sobre la regulación de estos fitorreguladores en respuesta al estrés biótico.

Tabla 1. Fitorreguladores y funciones durante el crecimiento y desarrollo de la planta.

Fitorregulador	Funciones							Referencia
	Germinación	Crecimiento	Floración	Desarrollo de fruto	Abcisión	Latencia de la semilla	Mecanismo de defensa	
Giberelinas	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	[58]
Auxinas	No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	[59]
Citoquininas	No	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	[60]
Ácido abscísico	No	No	No	No	Sí	Sí	No	[61]
Ácido jasmónico	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí	[62]
Ácido salicílico	No	Sí	No	Sí	No	No	Sí	[63]

1.11 Especies reactivas de oxígeno

Las ROS son moléculas producidas de forma natural por las plantas, las principales ROS documentadas son el superóxido (O_2^-), el radical hidroxilo (OH^\cdot) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [56]. La generación de ROS juega un papel crucial en la señalización que regula diversos procesos biológicos, como la defensa contra patógenos, la apoptosis (muerte celular programada) y el cierre de estomas [57]. El desbalance entre la producción de ROS y el sistema de defensa antioxidante en las plantas puede alterar la función celular al afectar la integridad de la membrana, ácidos nucleicos y proteínas [40], una ruptura de la función celular, daño e incluso la muerte celular. Por lo tanto, la regulación de la abundancia de ROS en las plantas debe ser efectivo, y se lleva a cabo mediante reacciones enzimáticas y no enzimáticas. Los mecanismos enzimáticos de eliminación de ROS en las plantas se basan en la actividad peroxidasa (POX), la polifenol oxidasa (PPO), la superóxido dismutasa (SOD), la ascorbato peroxidasa (APX), la glutatión peroxidasa (GPX) y la catalasa (CAT), que son esenciales para la regulación de las ROS. Por otro lado, en la última década, se ha documentado que las ROS, a bajas concentraciones son esenciales en la señalización en las plantas, controlando procesos del crecimiento y desarrollo vegetal, así como en la respuesta a estímulos bióticos [41] y abióticos [42].

1.12 Sistema de defensa

Las plantas han ido desarrollando sistemas de defensa para crecer en entornos donde existen factores bióticos como las interacciones con bacterias, hongos, virus o insectos y algunos abióticos como la temperatura, sequía, calor y luz. Emplear nuevas formas de activar los sistemas de respuesta de defensa de las plantas para contrarrestar los factores adversos podría ser transformador para la agricultura.

Las plantas pueden exponer resistencia a las enfermedades y daños causados por organismos al confiar en la inmunidad innata de las células y la señalización sistémica del sitio de infección [58], [59], [60]. La penetración del huésped puede ocurrir a través de estomas, lesiones físicas o penetración directa de la superficie de la planta [61]. Esta interacción implica el reconocimiento de la invasión del huésped y la manipulación de la biología del huésped para provocar la colonización o daño celular [62], [63], [64], [65]. Por lo que un mecanismo de defensa exitoso debe inhibir la infección del organismo y limitar el daño de patógenos a toda la planta.

Las plantas pueden identificar patrones moleculares asociados a microbios o patógenos, conocidos como MAMPs (Patrones Moleculares Asociados a Microbios) o PAMPs (Patrones Moleculares Asociados a Patógenos), tales como la flagelina bacteriana y la quitina fúngica. Este reconocimiento se lleva a cabo mediante receptores transmembrana de reconocimiento de patrones (PRR). Esta detección desencadena la primera cadena de defensa inmunitaria de las plantas, conocida como inmunidad activada por patrones (PTI) [66]. Durante la PTI se activan las proteínas quinasas activadas por mitógenos (MAPKs), aumenta la producción de ET y se acumulan ROS [67]. Sin embargo, los patógenos pueden eludir esta defensa inicial suprimiendo la señalización de PTI o evitando el reconocimiento de PRR a través de la secreción de efectores de virulencia [68]. Los efectores son un tipo de molécula asociada a la virulencia, administrada por los patógenos utilizando sistemas de secreción microbiana en las células vegetales o en el apoplasto, con el fin de inhibir la respuesta inmunitaria de la planta [68]. Los efectores son reconocidos por proteínas R presentes en las plantas, que activan una segunda capa de defensa, llamada inmunidad activada por efectores (ETI) y provocan la muerte celular programada (PCD) o una respuesta de hipersensibilidad (HR) y un rápido aumento de la producción de ET destinada a restringir la propagación del patógeno [69], [70]. Durante la PTI, se produce un aumento en la síntesis de fitorreguladores (además

del ET) implicados en el establecimiento de la resistencia sistémica adquirida (SAR) y la resistencia sistémica inducida (ISR), como el AS y el AJ, respectivamente. Este sistema inmunitario complejo y preciso, construido a partir de la competencia huésped-patógeno permite a los microorganismos beneficiosos inducir la inmunidad de las plantas al interferir en los procesos clave de PTI y ETI mediante la modulación de los pequeños ARN del huésped.

La resistencia sistémica de las plantas se puede clasificar en dos tipos: la resistencia sistémica inducida (ISR) y resistencia sistémica adquirida (SAR). La ISR es provocada por la interacción como microbios no patógenos, mientras que la SAR es desencadenada por patógenos [71], [72]. Cuando las plantas son colonizadas por microorganismos beneficiosos se induce un estado fisiológico de la planta huésped conocido como "cebado". Este "cebado" prepara a las plantas para que respondan de una manera más rápida y vigorosa contra la siguiente invasión de algún patógeno. Esta respuesta es una característica distintiva de la resistencia sistémica inducida por la presencia de microorganismos benéficos [73].

1.12.1 Resistencia sistémica adquirida

Se define como un fenómeno en el que las partes no expuestas de las plantas se vuelven resistentes a las infecciones causadas por organismos biotróficos presentes en cualquier otra parte de la planta está mediada por procesos dependientes del AS y se asocia con la producción de proteínas PR [74].

1.12.2 Resistencia sistémica inducida

Se define como un aumento de la capacidad de defensa que se activa en respuesta a patógenos necrótróficos y microorganismos benéficos como las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) en las plantas generalmente está mediada por las vías del AJ y ET [75].

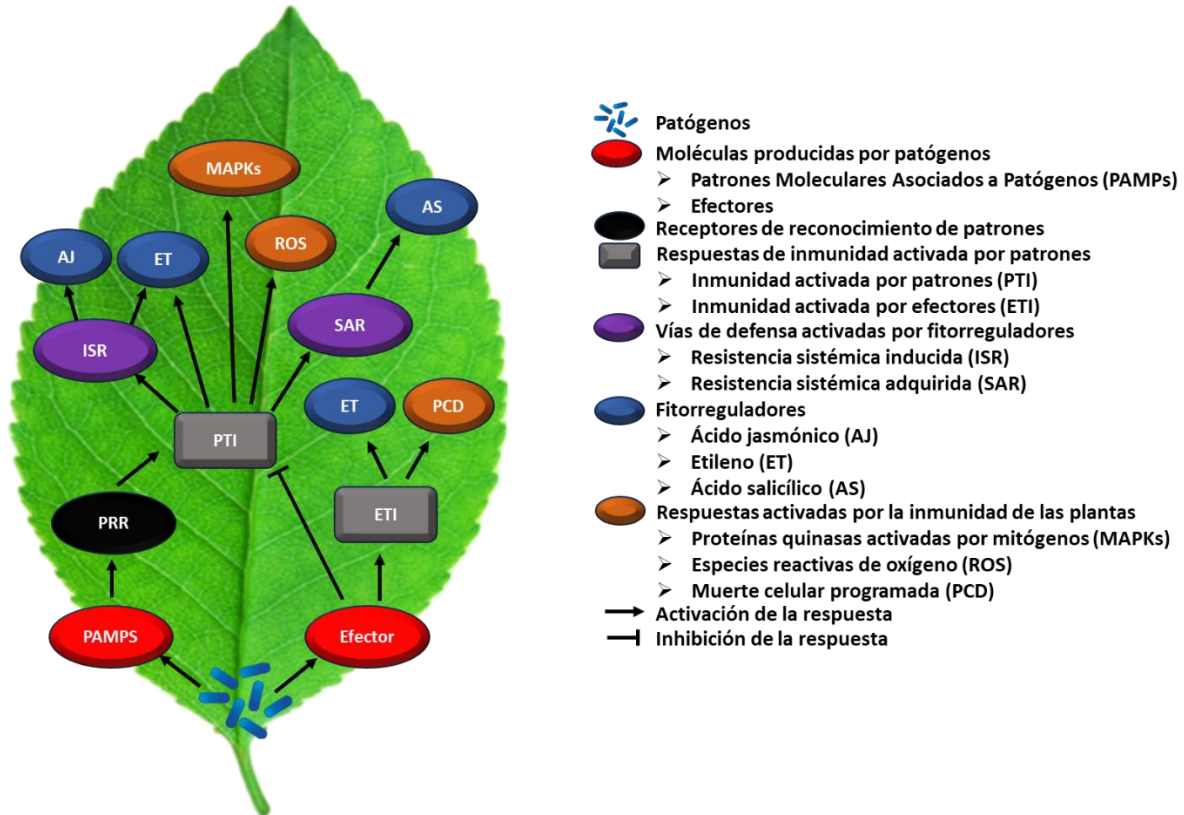


Figura 7. Mecanismo general de la defensa de las plantas durante la patogénesis.

1.13 Patógenos

Las enfermedades fitopatógenas son causadas principalmente por virus, bacterias, hongos, oomicetes, nemátodos, entre otros. Estas enfermedades son responsables de daños severos al crecimiento de las plantas y pérdidas de rendimiento en los principales cultivos, como cereales y hortalizas [76]. Las plantas están constantemente expuestas a una vasta diversidad de microorganismos, que incluyen tanto patógenos como organismos beneficiosos. La capacidad de la planta para reconocer un patógeno potencial y activar respuestas inmunitarias adecuadas para defenderse. Los patógenos invasores se clasifican en función de su modo de adquisición de nutrientes como necrótrofos, biótrofos o hemibiótrofos. Los patógenos necrótrofos matan las células de la planta y luego absorben los nutrientes. Por el contrario, los biótrofos obtienen nutrientes mientras mantienen vivo al huésped. Los hemibiótrofos tienen un ciclo de vida dual, comenzando como biótrofos y eventualmente adoptando un modo de vida necrótrofos, pero la duración de estas fases varía de un hemibiótrofos a otro [77].

1.13.1 *Phytophthora* sp

Phytophthora pertenece a la familia Peronosporaceae y al filo Oomycota en el reino Stramenipila, este *oomycete* de interés científico, debido a que es de los patógenos más comunes e invasivos en plantas [78], causa pérdidas o daños a cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum*), chile (*Capsicum annuum*) y calabacita zuchinni (*Cucurbita pepo*); impactos ambientales, donde afecta bosques o comunidades de plantas herbáceas [79]. *P. capsici* se considera uno de los patógenos de mayor interés científico debido a su tasa evolutiva, diversidad genética, rapidez de dispersión, adaptación hacia nuevos hospedantes y ambientes, y podría representar una amenaza para la seguridad alimentaria a nivel mundial [80], [81]. *P. infestans*, el agente causal del tizón tardío en los cultivos de papa y jitomate, y *P. capsici*, un patógenos importante del jitomate, otras solanáceas y cucurbitáceas, causando una pérdida importante en los cultivos agrícolas, provocando pérdidas económicas importantes, siendo una de las principales razones por la que se busca comprender el parasitismo y la epidemias de *Phytophthora*. Ruiz-Chutan *et al.*, (2018), con *P. infestans* en cultivos de jitomate y papa obtuvieron una alta diversidad genética entre los aislados del patógeno, esto permitió caracterizar las variantes presentes en las zonas productoras, lo cual es crucial para facilitar un mejor control de la enfermedad [82]. Jupe *et al.*, (2013), observaron la formación de haustorios (estructuras que permiten al patógeno extraer nutrientes del huésped) en las primeras etapas de la infección, así como cambios en la expresión genética tanto en el patógeno como en las plantas de jitomate a lo largo del proceso de infección, estos cambios los monitorearon utilizando microarreglos, revelando alteraciones en los genes de *P. capsici* durante la infección de los tejidos del jitomate [83]. Por otro lado, Raya-Hernández *et al.*, (2023), analizaron los efectos de promotores microbianos del crecimiento vegetal como lo son *Rhizophagus irregularis* y *Azospirillum brasilense* las cuales aplicaron en plantas de *Capsicum annuum* L. infectadas con *P. capsici*, demostrando que estos promotores suprimieron el desarrollo de las plantas e incrementan los síntomas de la enfermedad, como la pudrición de la raíz y el marchitamiento, resaltando los riesgos potenciales del uso de inoculantes microbianos en los suelos con patógenos presentes [84].

Un oomiceto, produce tanto oosporas como zoosporas, las cuales son estructuras de

reproducción sexual y asexual, respectivamente. Estas esporas le permiten al patógeno sobrevivir en el suelo durante períodos prolongados, con la capacidad de mantener los suelos infestados durante años. Las zoosporas, necesarias para la dispersión e infección de nuevas plantas, requieren una lámina de agua para su movilidad. La temperatura ambiente óptima para el desarrollo de la enfermedad oscila entre 24 y 28°C, mientras que la temperatura óptima del suelo es de 18°C. En el contexto de postcosecha, la temperatura óptima para la infección de los frutos es de 27°C. En resumen, los tres factores clave para el manejo eficaz de la enfermedad son la temperatura, la humedad/riego y la presencia del inóculo en el suelo. La infección por este fitopatógeno causa necrosis de la base del tallo y la radícula, marchitamiento y manchas irregulares que van afectando de una manera progresiva la planta hasta causar la muerte vegetal [85].

1.14 *Solanum lycopersicum*

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es una planta dicotiledónea, perteneciente a la familia solanaceae. El jitomate es una planta perenne de porte arbustivo que se cultiva anual, se caracteriza por tener frutos carnosos, brote simpodial y hojas compuestas, su estudio ha permitido mejorar la productividad, calidad de la fruta y la resistencia al estrés biótico y abiótico [86]. El desarrollo del cultivo comprende dos fases: una vegetativa y otra reproductiva. La fase vegetativa se inicia desde la siembra en semilleros, seguida de la germinación, la emergencia y el trasplante a campo, el cual se realiza con un promedio de tres a cuatro hojas verdaderas, entre 30 a 35 días después de la siembra (figura 8) y a partir del trasplante hasta el inicio o aparición del primer racimo floral. La fase reproductiva se inicia desde la formación del botón floral, que ocurre entre los 30 y 35 días después del trasplante, el llenado del fruto, que dura aproximadamente 60 días para el primer racimo, iniciándose la cosecha a los 90 días, con una duración de tres meses para una cosecha de 8 a 10 racimos. En total la fase reproductiva tiene una duración de 180 días aproximadamente.

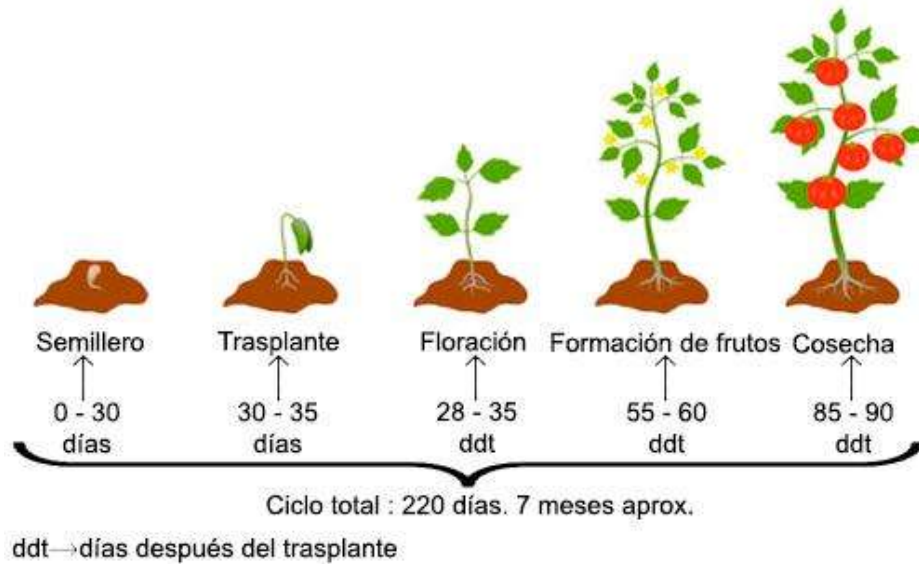


Figura 8. Fases fenológicas de un cultivo de jitomate.

El jitomate es uno de los cultivos más importantes de México y del mundo, debido a su alto valor económico y como fuente de vitaminas, minerales y antioxidantes, los cuales son fundamentales para la nutrición y salud humana [87]. A nivel mundial, el jitomate es la segunda hortaliza más cultivada, donde México ocupa el décimo lugar a nivel mundial en superficie de siembra anual [88]. En México en el ciclo agrícola Otoño-Invierno 2023, se sembraron 23,283 ha de jitomate, de los cuales se cosecharon 17,714.13% (239 ha), con una producción de 921 mil 31 t, 58 mil 474 mayor (6.8%) que la reportada al periodo del mismo ciclo de 2022. Los incrementos más relevantes, se presentan en Sinaloa con 24,295 t, Baja California Sur 19,593 ton, San Luis Potosí de 11,127 y Querétaro 6,929 más en relación con lo obtenido en el ciclo 2022, por el contrario, las disminuciones más significativas las reportan, Michoacán 11,849 t, Colima 5971 t y Coahuila 4988 t menos. El jitomate mexicano se encuentra dentro de los principales productores de exportación de México. En el último quinquenio, se han destinado en promedio, cerca de 143 mil toneladas mensuales al mercado externo. Los principales destinos de la hortaliza mexicana han sido el estadounidense y canadiense, hasta abril han adquirido 662 mil y mil 430 toneladas respectivamente [89]. Debido a la importancia que tiene el jitomate se buscan alternativas para reducir o sustituir el uso de insumos químicos que se aplican tradicionalmente para el control de enfermedades fitopatógenas como las causadas por *P. capsici*, los cuales, son de los microorganismos que más pérdidas causan en las hortalizas.

2. JUSTIFICACIÓN

Solanum lycopersicum es una de las hortalizas con mayor importancia a nivel mundial, sin embargo, su producción se reduce fuertemente debido a fitopatógenos como *Phytophthora capsici*. Para controlar estos fitopatógenos, en la agricultura convencional se usan plaguicidas que traen consigo un enorme daño ambiental, resistencia de los microorganismos y pérdidas económicas. En la actualidad se ha demostrado el efecto positivo de los nanotubos de carbono y los ciclodipéptidos bacterianos de forma independiente sobre el sistema de defensa de las plantas y en la promoción del crecimiento vegetal, sin embargo, no se ha explorado el uso de ciclodipéptidos como elicitores, utilizando NTC funcionalizados como vehículo para inducir una mejor respuesta inmunitaria y el desarrollo de *S. lycopersicum*. Por lo que este proyecto de investigación aportara nuevo conocimiento sobre el efecto elicitor de los NTC funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos para estimular la respuesta inmunitaria de *S. lycopersicum* y de esta manera reducir el daño causado por *P. capsici*.

3. HIPÓTESIS

Los nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos como elicitores, estimularán la respuesta de defensa de *Solanum lycopersicum* ante la patogenicidad de *Phytophthora capsici*.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar el efecto elicitor de nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos, sobre la respuesta de defensa de *Solanum lycopersicum* ante la patogenicidad de *Phytophthora capsici*.

4.2 Específicos

1. Funcionalizar nanotubos de carbono con ciclodipéptidos por método no covalente.
2. Evaluar el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados sobre el desarrollo de *S. lycopersicum* infectado con *P. capsici*.
3. Determinar el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados sobre la producción de ROS en *S. lycopersicum* inoculado con *P. capsici*.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este trabajo de investigación la metodología se dividió en dos etapas: en la primera se desarrolló la metodología para funcionalizar los NTC con distintas concentraciones de NTC y CDPs y posteriormente se hizo el análisis para caracterización y confirmación de la funcionalización. En la segunda parte del proyecto se realizaron los análisis para evaluar el efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs como moléculas elicitoras en cultivo de *S. lycopersicum* inoculadas con *P. capsici*.

5.1 Funcionalización y caracterización de NTC con CDPs

5.1.1 Ciclodipéptidos

Para este estudio se usaron CDPs) proporcionados por el Laboratorio de Biotecnología Microbiana, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La determinación de los CDPs se hizo mediante cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC por sus siglas en inglés), para su análisis se utilizaron 10 microlitros. La mezcla de CDPs se caracterizó como lo describe Vázquez-Rivera *et al.*, 2015 [90] (Tabla 2).

Tabla 2. Aminoácidos presentes en los ciclodipéptidos.

Ciclodipéptidos	Minutos	Área
L-Pro-L-Val	3.25-3.46	36232089
L-Pro-L-Tyr	3.46-3.98	4356059
L-Pro-L-Phe	5.87-6.14	18972428

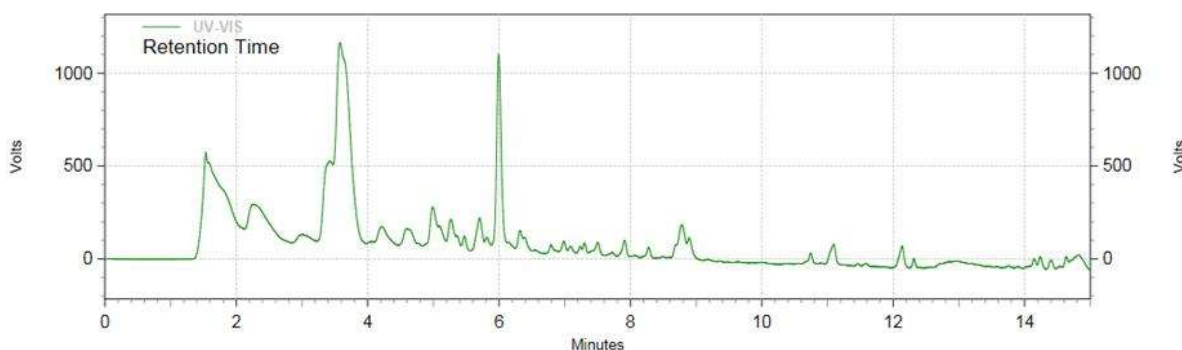


Figura 9. Espectro de ciclodipéptidos obtenido por cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC).

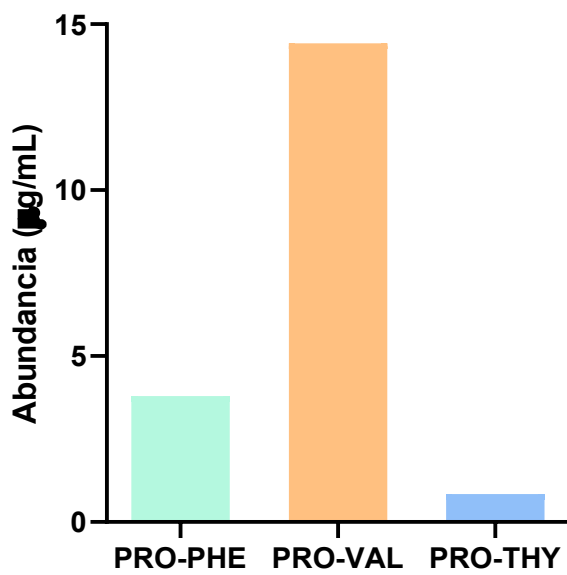


Figura 10. Cuantificación de ciclodipéptidos.

5.1.2 Nanotubos de carbono de pared múltiple

Se usaron MWCNT con un diámetro exterior de 6 a 13 nm, un diámetro interior de 2,0 a 4,0 nm, con longitudes de 2,5 a 20 mm, espesor medio de pared de 7-13 capas, y una pureza ~98% (Aldrich, Cat 698849).

5.1.2 Funcionalización no covalente

Para realizar la funcionalización de los NTC se hicieron lavados con etanol para eliminar las estructuras amorfas y se dejaron secar. Posteriormente se expusieron los NTC en dimetilformamida (DMF) y se sonicaron durante 10 min. Después se centrifugaron a 3341 rpm/10 min, este paso se repitió hasta que no se precipitaron los NTC o se detectaron agregados (NTC parcialmente solubles). El sobrenadante se dejó secar y una vez seco se dispersaron los NTC en DMF durante 30 minutos en la caja de refrigeración con hielo. Transcurrido ese tiempo, se obtuvieron distintas concentraciones de NTC (Tabla 3) y se diluyeron en buffer de fosfato (PBS), 10mM, pH=7. Las soluciones se sonicaron con sonda durante 6 minutos para eliminar agregados de NTC (10 segundo de ejecución/10 segundos reposo). Posteriormente se adicionaron los CDPs recién sonicados a las soluciones. Se dispersaron las soluciones nuevamente en un sonicador en baño de hielo durante 20 minutos (frecuencia 37kHz y 25°C). Finalmente se dejó incubar durante la noche en un rotor a 800

rpm a 25°C. En la figura 11 se muestra un diagrama general del proceso de la funcionalización que se llevó a cabo.



Figura 11. Proceso de funcionalización no covalente de nanotubos de carbono con ciclodipéptidos.

Tabla 3. Concentración de NTC y CDPs para la funcionalización.

NTC ($\mu\text{g/mL}$)	CDPs ($\mu\text{g/mL}$)	NTC-CDPs ($\mu\text{g/mL}$)
90	40	30:10
	60	30:20
180	40	60:10
	60	60:20
270	40	90:10
	60	90:20

5.1.3 Caracterización de NTC

Para confirmar la funcionalización de los NTC con los CDPs, las muestras se analizaron mediante:

- Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) que permitió identificar los grupos funcionales de las moléculas presentes en las muestras.

5.2 Bioensayos de *S. lycopersicum* infectadas con *P. capsici* y cultivadas con NTC con y sin funcionalizar con CDPs

Para evaluar el efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs como moléculas elicitoras en cultivo de *S. lycopersicum* inoculada con *P. capsici* se establecieron bioensayos dosis-respuesta de *S. lycopersicum*, suplementados con CDPs 10, 20, 40 y 60 µg/mL, NTC prístinos 30, 60 y 90 µg/mL, NTC-CDPs 30:10, 60:10 y 90:10 µg/mL y NTC-CDPs 30:20, 60:20 y 90:20 µg/mL. En la figura 12 se muestra el diagrama general de esta etapa experimental.

5.2.1 Desinfección, cebado y siembra de las semillas de jitomate

Las semillas de *S. lycopersicum* se desinfectaron durante 7 minutos con etanol al 70% (v/v) y después realizaron 5 lavados con H₂O destilada estéril. Posteriormente se mantuvieron inmersas en los distintos tratamientos y se conservaron en reposo 24 h a 4°C. Finalmente se sembraron las semillas de *S. lycopersicum* en agrolita/peat moss (1:1) esterilizada previamente a 120°C/30 minutos, en semilleros y se dejaron en casa sombra. Al tercer día se empezó a evaluar la emergencia de las semillas. Plántulas con 26 días de crecimiento se trasladaron en agrolita/peat moss (1:1) en macetas de polipropileno de 5 pulgadas, manteniendo la humedad a capacidad de campo. Se utilizaron cinco macetas para cada tratamiento con 5 semillas cada una.

5.2.2 Índice de vigor de *S. lycopersicum*

Para evaluar el índice de vigor se tomaron plantas a los 15 días después de la siembra donde se multiplicó el porcentaje de germinación que obtuvimos por la longitud de las plántulas.

5.2.3 Desarrollo de plántulas de jitomate

Posterior al trasplante, las plántulas se regaron con solución nutritiva con la siguiente composición química (g/L): NH₄NO₃, K₂HPO₄, KH₂PO₄, MgSO₄, NaCl, CaCl₂, FeSO₄, solución oligoelementos (mg/L): (KI, H₃BO₃, MnSO₄*4H₂O, ZnSO₄*2H₂O, CuSO₄*5H₂O, CoCl₂*6H₂O), la solución se agregó dos veces por semana. Las plántulas se mantuvieron en casa sombra durante 35 y 70 días, con luz LED de 17:7 horas luz y oscuridad.

5.2.4 Infección de las plántulas de jitomate con *P. capsici*

Plántulas de 35 días de crecimiento se infectaron con *P. capsici* donde la cantidad de propágulo fue de 1×10^5 de *P. capsici* que se colocó en las plantas mediante el método de explante (un disco del agar con el fitopatógeno) en la base de la raíz. Después de 35 días posteriores a la inoculación se evaluó las siguientes variables:

5.2.5 Crecimiento y biomasa de las plántulas de *S. lycopersicum*

Para evaluar el crecimiento de jitomate se obtuvo el área foliar y arquitectura radical, para ello, las plantas se cosecharon, y se lavaron con agua para eliminar los residuos de sustrato de las raíces, posteriormente las plantas se escanearon con el equipo Epson Expression 11000XL donde se analizó la parte aérea de la planta y la arquitectura radical con el software “WinRHIZO 2013 Basic, Reg, Pro & Arabidopsis For Root Measurement”. Para la medición del diámetro del tallo se utilizó un vernier digital el cual se colocó en la base del tallo para tomar las mediciones. Después de analiza parámetros de crecimiento, estas plántulas se pesaron en balanza analítica para obtener su peso fresco, posteriormente estas plantas se conservaron en sobres de papel y se dejaron en horno de secado por 24 h a 70°C para eliminar el H₂O de las plantas y se pesaron después para obtener el peso seco.

5.2.6 Cuantificación de ROS y deshidrogenasas

Para la detección de las ROS en los tejidos vegetales se realizaron tinciones en las hojas, para ello, plantas de 35 y 70 días de desarrollo se cosecharon y se colocaron en una solución de etanol al 96% a 60°C. Para eliminar pigmentos como la clorofila, presente en ellos tejidos vegetales.

Una vez que se despigmentaron las plantas, se realizaron tinciones como se describe a continuación para la localización y cuantificación histoquímica de ROS y deshidrogenasas:

1. Tinción con cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC):

El TTC es una sal blanca y sustrato de las deshidrogenasas y, su metabolito es un tinte rojo, que hace que la célula se vuelva roja en tejido viable y blanca en tejido muerto.

2. Localización y cuantificación histoquímica de superóxido (O₂⁻):

Para detectar la producción del anión (O₂⁻), los cortes de raíz y follaje se tiñeron durante 60 min con una solución de nitrobluetetrazolium (NBT) al 0,1% (p/v) en buffer de fosfato de

potasio 50 mM con pH 7.5, en oscuridad

3. Localización histoquímica y cuantificación de H₂O₂:

La cuantificación y la localización histoquímica de H₂O₂ se realizó mediante una tinción con 3,3-diaminobenzidine hydrochloride (DAB).

Una vez realizadas las tinciones, los fragmentos de plantas se lavaron con agua destilada y se mantuvieron en etanol al 70% (v/v) a 4°C para eliminar excedentes del colorante y conservación de las muestras hasta su análisis. Para el análisis y cuantificación colorimétrica que permitió de forma indirecta analizar la abundancia de ROS y deshidrogenasas, las muestras se observaron en con estereoscopio LEICA a X=0.75 y se obtuvieron fotografías que analizaron con el software ImageJ.

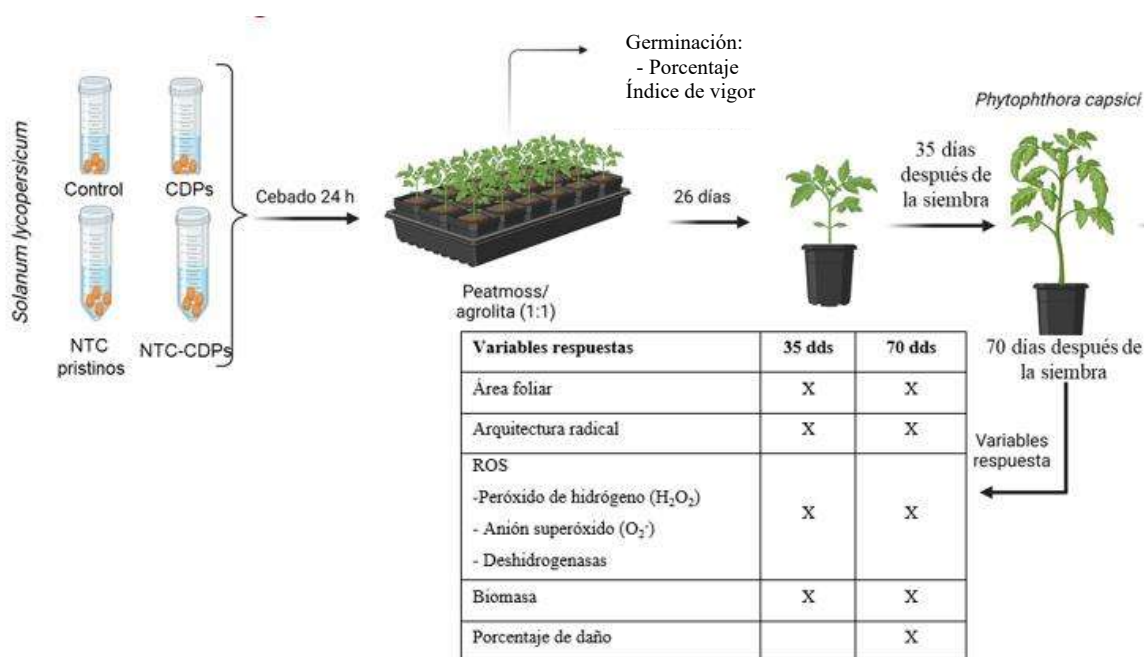


Figura 12. Diagrama general del establecimiento de bioensayos de jitomate cultivado con nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipeptidos.

5.3 Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental completamente aleatorio, con 28 tratamientos, en los cuales se incluyeron 2 controles cada uno con sus correspondientes concentraciones de nanopartículas y ciclodipeptidos (Tabla 4):

Tabla 4. Tratamientos: *S. lycopersicum* con y sin exposición a *P. capsici* cultivado con CDPs, NTC prístinos y funcionalizados con CDPs.

Tratamientos con y sin <i>P. capsici</i>				
Control	CDPs	NTC pristinios	NTC-CDPs ($\mu\text{g/mL}$)	NTC-CDPs ($\mu\text{g/mL}$)
0	-	-	-	-
-	10	-	-	-
-	20	-	-	-
	40			
	60			
-	-	30	30:10	30:20
-	-	60	60:10	60:20
-	-	90	90:10	90:20

- **Nota:** todas las plantas fueron suplementadas con solución nutritiva.

5.4 Variables respuestas

Las variables respuesta analizadas fueron:

- Germinación: se evaluó el porcentaje de germinación durante 8 días posteriores a la siembra de la semilla, mientras que el índice de vigor se evaluó con plántulas de 15 días después de la siembra.
- ROS: la cuantificación histoquímica de O_2 , H_2O_2 y deshidrogenasas se realizó en plantas de 35 y 70 días de crecimiento.
- Crecimiento vegetal y biomasa: se midió la longitud del tallo, arquitectura radical 35 y 70 días de crecimiento.
- Porcentaje de daño en hoja: se evaluó a los 70 días de crecimiento.

5.5 Análisis estadístico

Los datos de germinación se analizaron con T student con $p \leq 0.05$. $n=10$ en el software Statist y los datos para el análisis de las plantas a los 35 y 70 días después de la siembra, se utilizó a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y las medias se compararon mediante el método LSD con $p \leq 0.05$ con $n=5$ en el software RStudio.

6. RESULTADOS

6.1 Análisis de nanopartículas por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Para identificar los grupos funcionales en los NTC, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs, se analizaron las muestras mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Los espectros obtenidos mostraron los grupos funcionales característicos de los NTC prístinos, correspondientes al C=C a 1536cm^{-1} , C-O a 1140cm^{-1} y O-H a 3708 y 2280cm^{-1} (Fig. 13A), mientras que en los CDPs se generaron los grupos N-H a 3401 , 3003 y 2918cm^{-1} , C=O a 1659cm^{-1} , O-H a 1406cm^{-1} y C-N a 1315cm^{-1} (Fig. 13B) característicos en moléculas como los aminoácidos, por otro lado, en los NTC funcionalizados se detectaron grupos funcionales tanto de NTC como de CDPs (Fig. 13C y 13D).

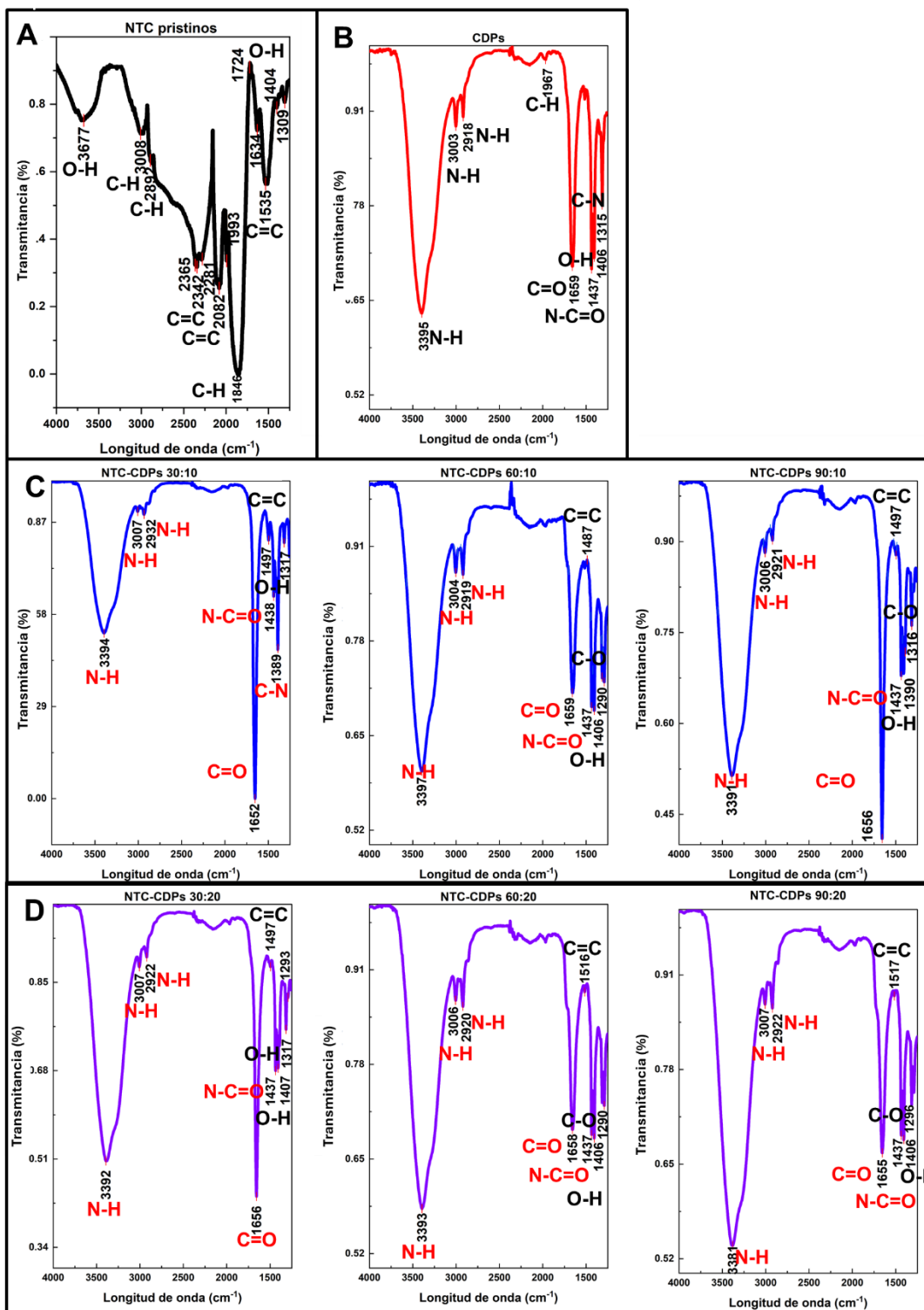


Figura 13. Espectro de infrarrojo de nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos: A) nanotubos de carbono prístinos, B) ciclodipéptidos, C) nanotubos de carbono funcionalizados con 10 $\mu\text{g/mL}$ de ciclodipéptidos, D) Nanotubos de carbono funcionalizados con 20 $\mu\text{g/mL}$ de ciclodipéptidos.

6.2 Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en la germinación de *S. lycopersicum*.

Los resultados de germinación (tabla 5) mostraron que la adición de CDPs a 20 y 60 µg/mL retardó y redujo el porcentaje de germinación en jitomate, 8 días posteriores a la siembra se alcanzó un máximo de germinación de 83% y 69% respectivamente, mientras que a 10 µg/mL se alcanzó un 95% a los 7 días. En contraste, se observó que, con la adición de NTC prístinos en las tres concentraciones probadas, se incrementó tanto la velocidad como el porcentaje de germinación comparado con las semillas control a partir desde el día 5 días posteriores a la siembra, al octavo día se alcanzó porcentajes de 100% en las semillas germinadas con 30 µg/mL de NTC prístinos. Por otro lado, se observó que al suplementar las semillas con NTC funcionalizados con 10 y 20 µg/mL de CDPs, en todos los tratamientos incrementó el porcentaje de germinación de 96 y 100 %, los NTC-CDPs 30:10 y 30:20 µg/mL fueron los tratamientos que generaron un 100% de germinación desde el día 6 días posteriores a la siembra, comparado con las semillas control, que tuvo un 93% al día 8. Este resultado sugiere que el efecto inhibitor de los CDPs al suplementarlos de forma individual, es decir, sin NTC, se contrarrestó al suplementar los NTC funcionalizados con CDPs, y esta sinergia estimula la germinación.

Tabla 5. Germinación de *S. lycopersicum* cultivada con nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipeptidos.

Tratamientos	NTC (µg/mL)	CDPs (µg/mL)	Porcentaje de germinación (%)					
			Días después de la siembra					
			3	4	5	6	7	8
Control	0		21	89	91	93	93	93
CDPs	0	10	12*	77	86*	93	95	95
	0	20	4*	64*	74	77*	81	83
	0	40	18	52	65	82	82	82
	0	60	0*	33*	36*	61*	64*	69*
NTC prístinos	30	0	40*	89	99	100	100	100
	60	0	19	85	93	99	99	99
	90	0	35*	88	97	99	99	99
NTC-CDPs	30	10	67*	95	100	100	100	100
	60	10	53*	89	96	96	97	97
	90	10	23	87	95	96	97	97
	30	20	52*	92	96	100	100	100
	60	20	32	79	88	92	96	96
	90	20	39*	76	83	85	97	97

Nota: Los datos se analizaron con T studet con $p \leq 0.05$. $n=10$. Valores en la misma columna con letra diferente representan diferencias significativas.

6.3 Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en el índice de vigor de *S. lycopersicum*

Los resultados mostraron que en los tratamientos con NTC prístinos o funcionalizados con CDPs el índice de vigor del jitomate fue superior en la mayoría de las concentraciones suplementadas, donde los NTC prístinos a 60 $\mu\text{g/mL}$, NTC-CDPs a 30:20 $\mu\text{g/mL}$ son los tratamientos donde se detectaron diferencias significativas, mientras que los tratamientos con CDPs a 10 y 20 $\mu\text{g/mL}$, NTC-CDPs 60:10 y 60:20 $\mu\text{g/mL}$ tuvieron un índice de vigor muy similar o menor comparado con el control y en contraste, al suplementar CDPs a 60 $\mu\text{g/mL}$, el índice de vigor fue significativamente inferior (Figura 14).

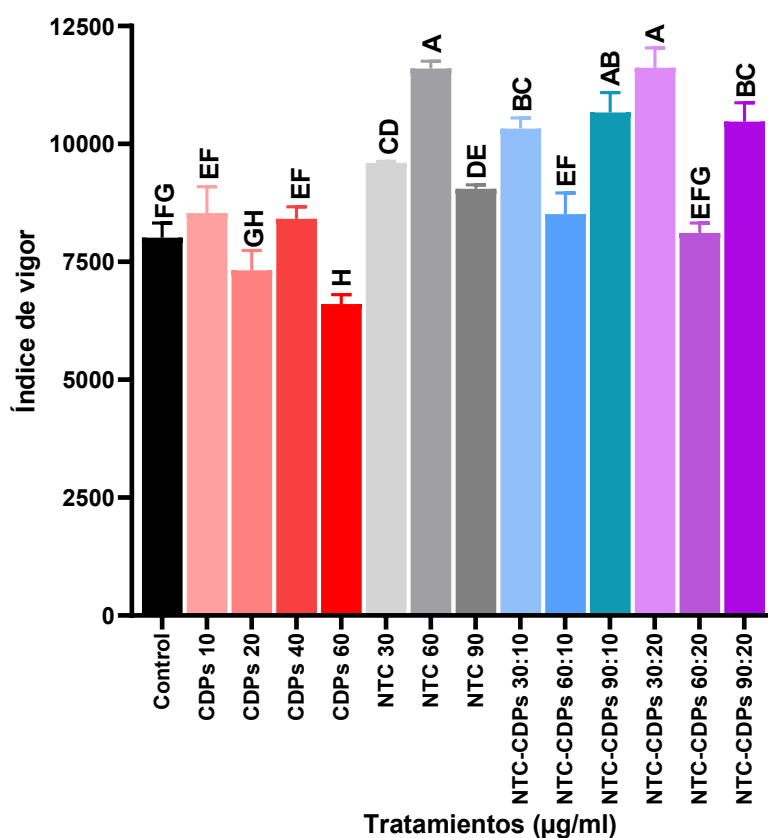


Figura 14. Índice de vigor de las semillas de *S. lycopersicum* cultivadas con CDPs y NTC prístinos o funcionalizados con CDPs.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

Las figuras 15-17 muestran imágenes representativas de *S. lycopersicum* cultivada con NTC prístino y NTC funcionalizados con CDPs a 30, 60 y 90 $\mu\text{g/mL}$ y CDPs a 10, 20, 40 y 60 $\mu\text{g/mL}$, 5 días después de la siembra. En esta figura pueden observarse diferencias en tamaño la radícula, en donde a mayor concentración de CDPs retrasó la emergencia de la radícula y causó una menor formación de pelos radiculares, mientras que con la adición de NTC prístino se observó mayor presencia de pelos radiculares a concentración de 30 $\mu\text{g/mL}$. Por otro lado, se observó que el efecto de los NTC-CDPs en todas las concentraciones contrarrestó este efecto negativo que se observó con los CDPs individualmente, y, por el contrario, estimularon la longitud de la radícula y aumentó la cantidad y tamaño de los pelos radiculares.

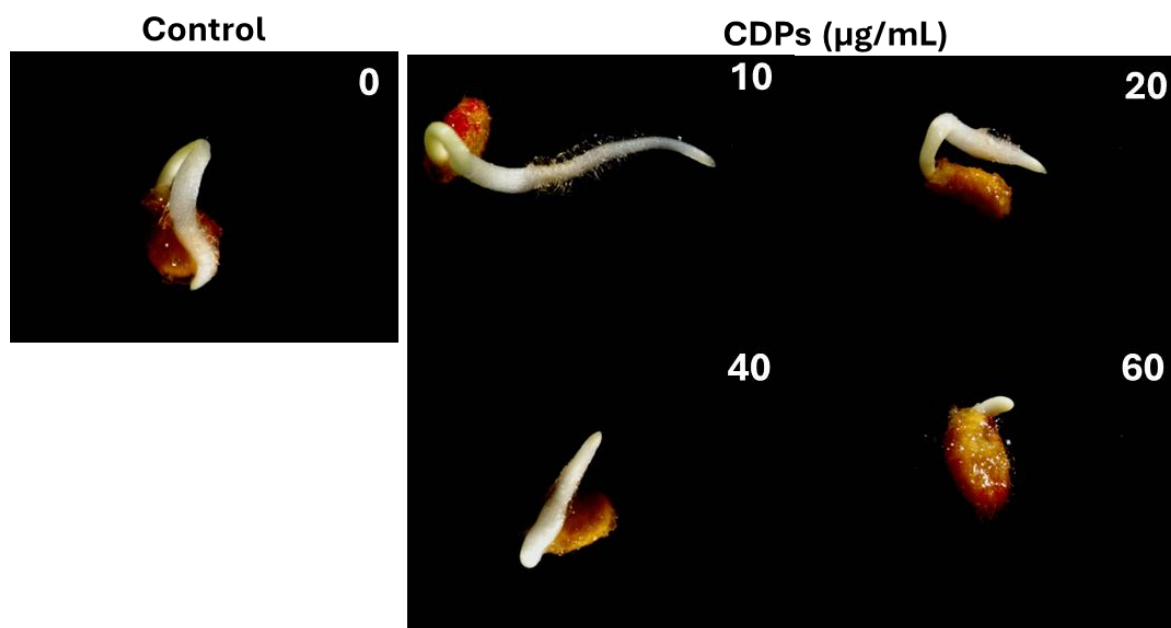


Figura 15. Imágenes representativas del efecto de los CDPs en la germinación de *S. lycopersicum* 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a $X=0.75$.

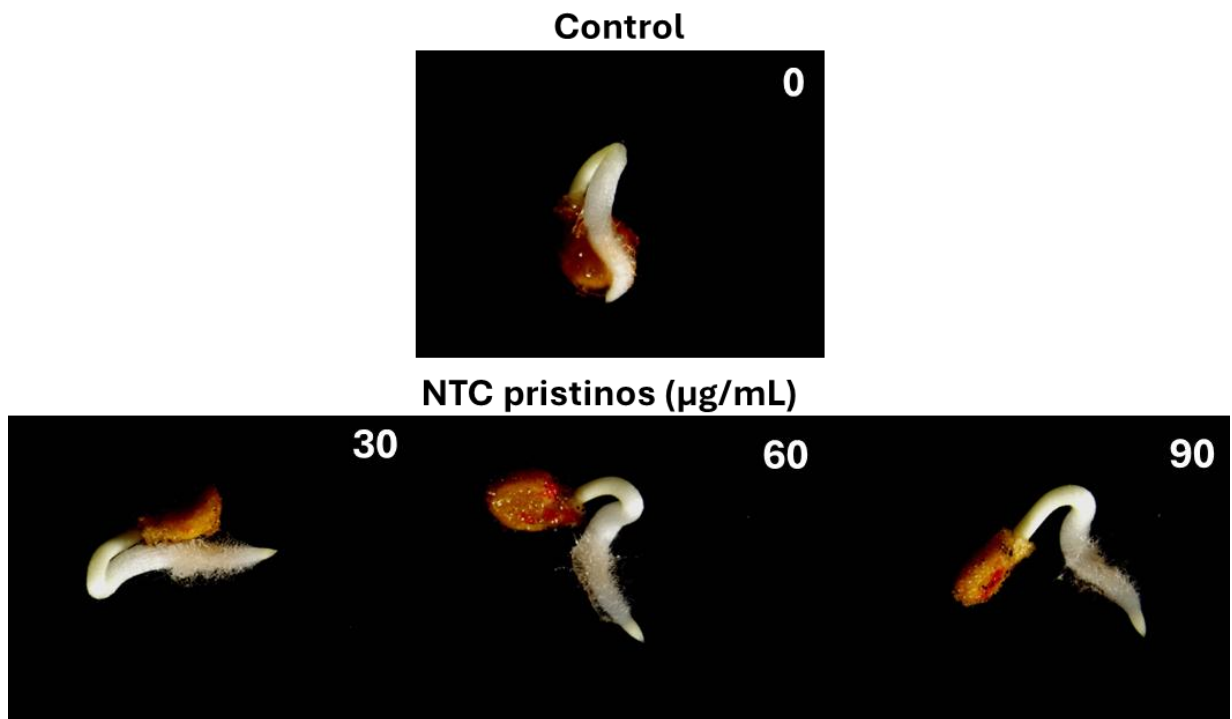


Figura 16. Imágenes representativas del efecto de los NTC pristinos en la germinación de *S. lycopersicum* 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a $X=0.75$.

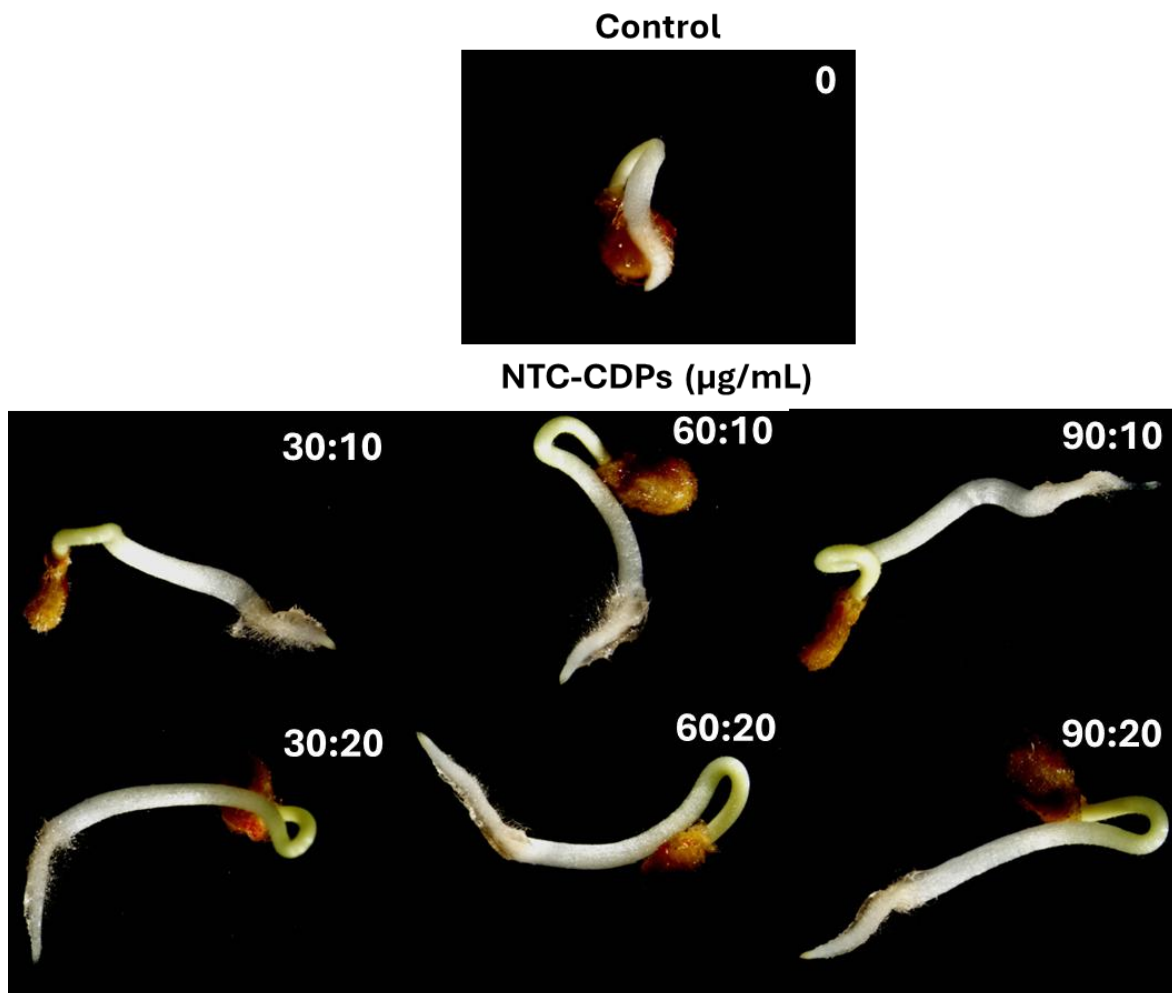


Figura 17. Imágenes representativas del efecto de los NTC funcionalizados con CDPs en la germinación de *S. lycopersicum* 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a $X=0.75$.

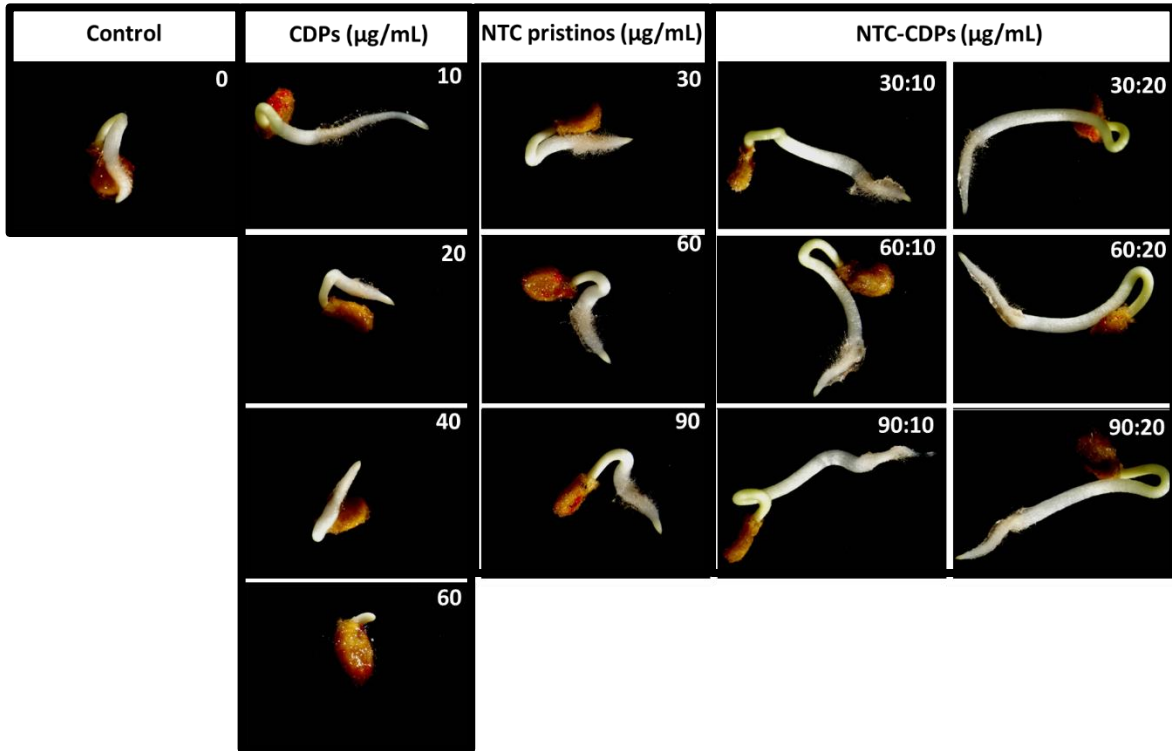


Figura 18. Imágenes representativas del efecto de los CDPs, NTC prístinos, NTC funcionalizados con CDPs en la germinación de *S. lycopersicum* 5 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con estereoscopio leica a $X=0.75$.

6.4 Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en el crecimiento de *S. lycopersicum*

La figura 19 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre la longitud foliar del jitomate, evaluado 15 días después de la siembra. Los resultados mostraron que, a etapas tempranas de crecimiento, todos los tratamientos estimularon en la longitud foliar de las plántulas, donde los NTC-CDPs 30:10 y 60:10 $\mu\text{g/mL}$ mostraron diferencia la mayor longitud, comparado con las plántulas control y con los distintos tratamientos.

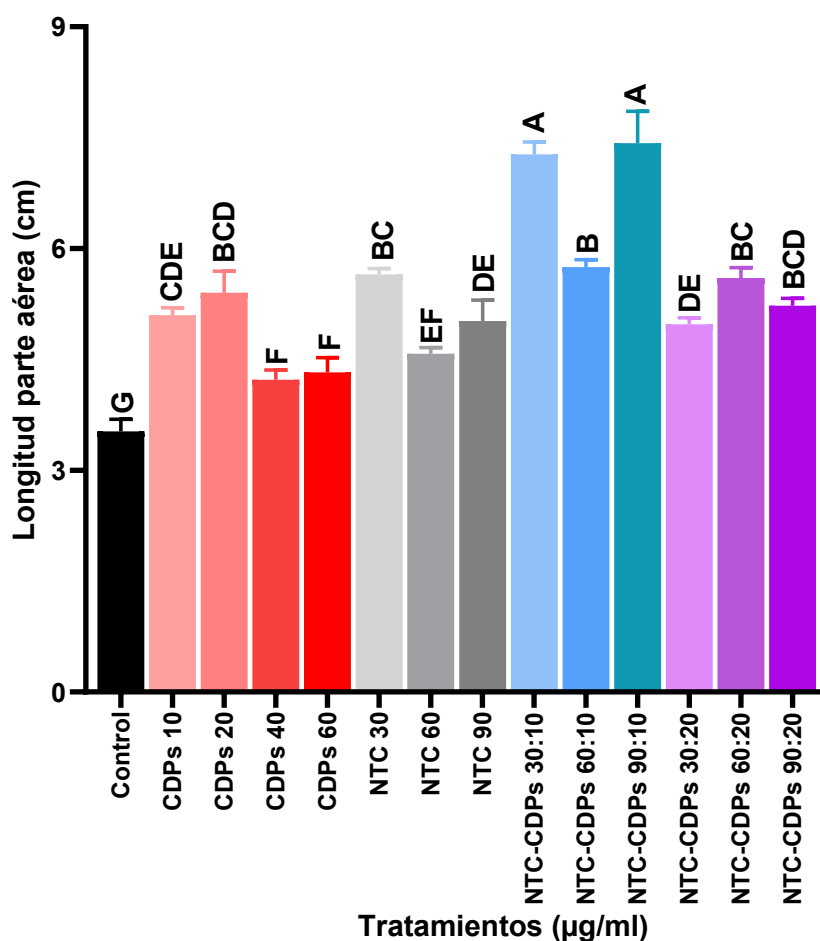


Figura 19. Efecto de los NTC prístinos y funcionalizados con CDPs en la longitud de la parte aérea de *S. lycopersicum*, 15 días después de su siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 20 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre la longitud radical de *S. lycopersicum*, evaluado 15 días después de la siembra. Los resultados mostraron un incremento significativo en los tratamientos de CDPs 20 µg/mL, NTC-CDPs 90:10 y 90:20 µg/mL respecto al control, mientras que se observan efectos negativos en las plantas de los tratamientos con 60 µg/mL CDPs y NTC prístinos a 90 µg/mL respecto a las plántulas control.

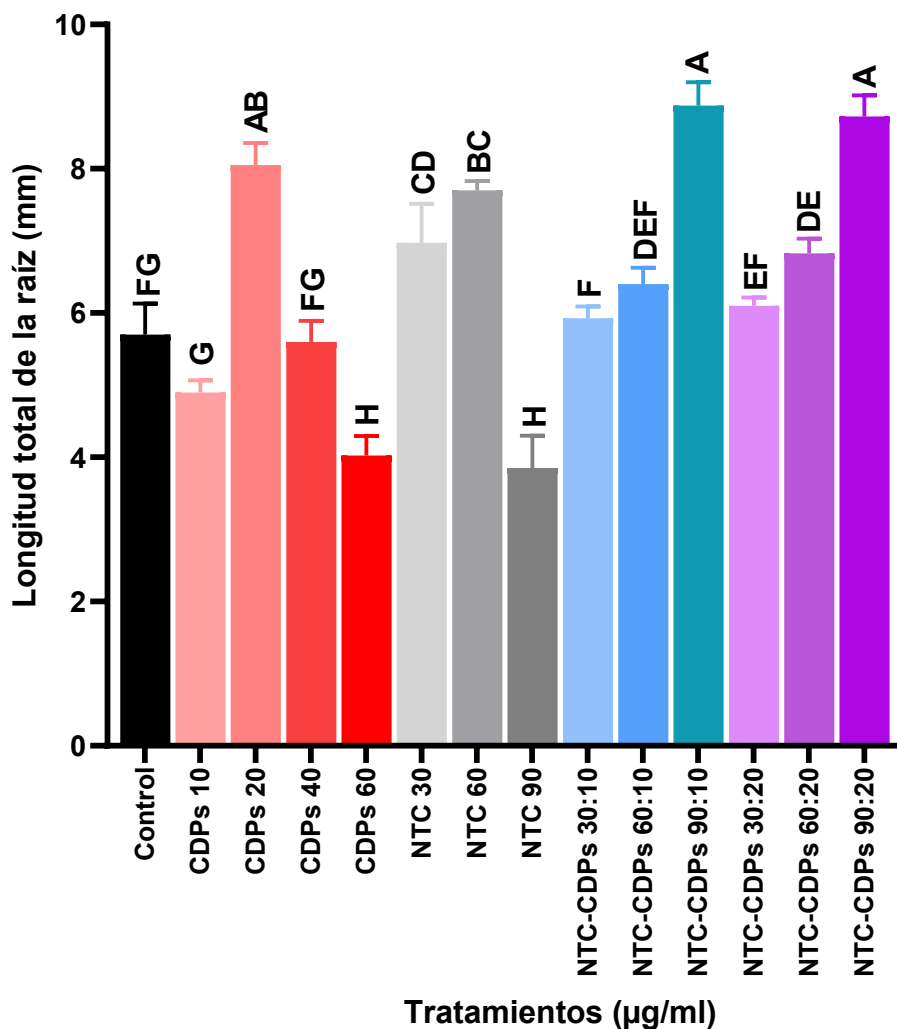


Figura 20. Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs en la longitud total de raíz de *S. lycopersicum*, 15 días después de su siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

Las figuras 21 muestra imágenes representativas del crecimiento de *S. lycopersicum* cultivada con CDPs a 10 y 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$, NTC prístinos, NTC funcionalizados con CDPs a 30, 60 y 90 $\mu\text{g}/\text{m}$, 15 días después de la germinación. En la figura 21 se observa que en etapa temprana del crecimiento de *S. lycopersicum* los tratamiento con mayor longitud foliar fueron NTC-CDPs 90:10 y 90:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$, mientras que sobre la arquitectura radical es NTC-CDPs 30:20 y 90:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$.

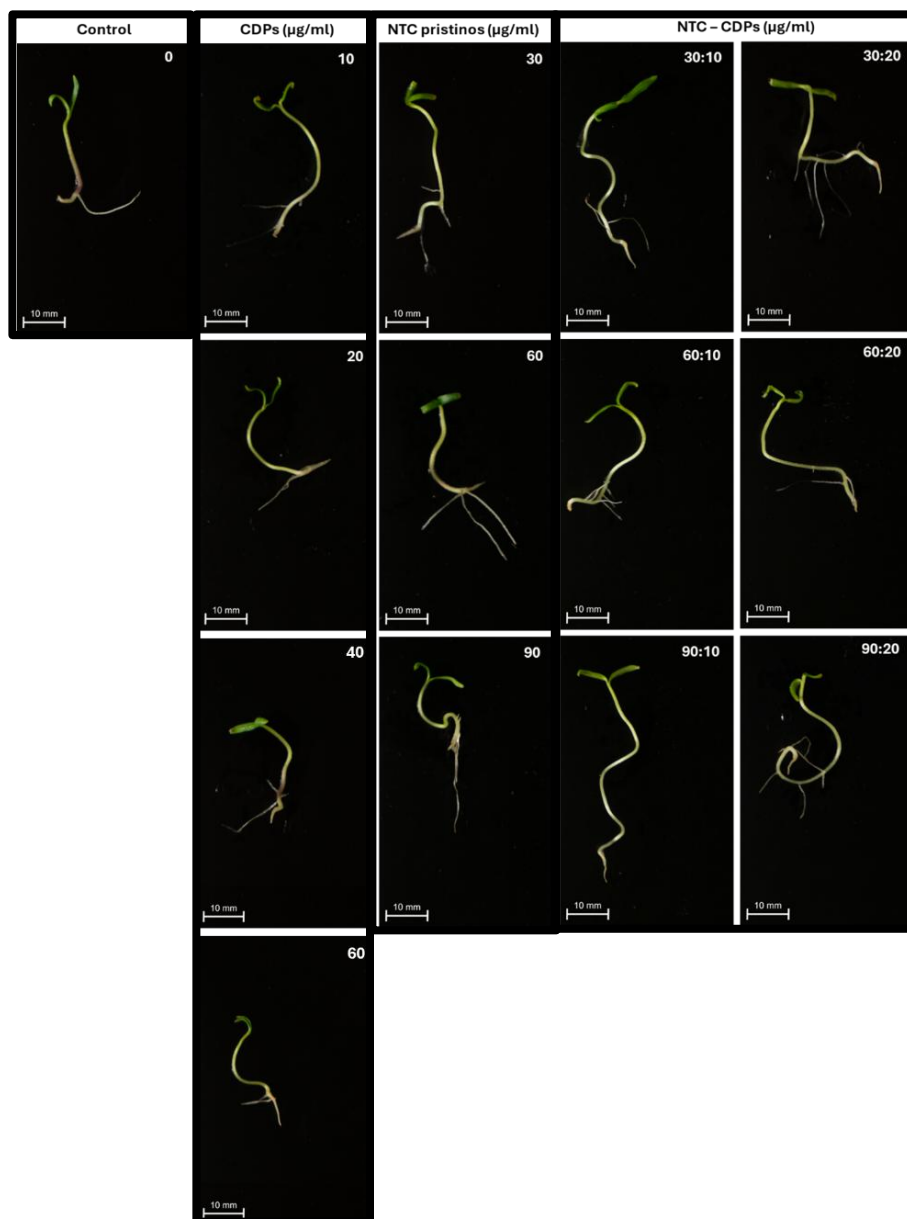


Figura 21. Imágenes representativas del efecto de CDPs, NTC prístinos y NTC funcionalizados con CDPs en el desarrollo de *S. lycopersicum* 15 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas con cámara NIKON D7100.

6.5 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre el área foliar y arquitectura radical de *S. lycopersicum*

La figura 22 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre la longitud del tallo de *S. lycopersicum* 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron una diferencia significativa en las plantas donde se suplementaron NTC-CDPs 30:20, 60:20 y 90:10 $\mu\text{g/mL}$ comparado con la altura de las plantas control. Esto también se observó en los tratamientos individuales en donde se suplementaron 60 $\mu\text{g/mL}$ de CDPs y 30 $\mu\text{g/mL}$ de NTC prístinos.

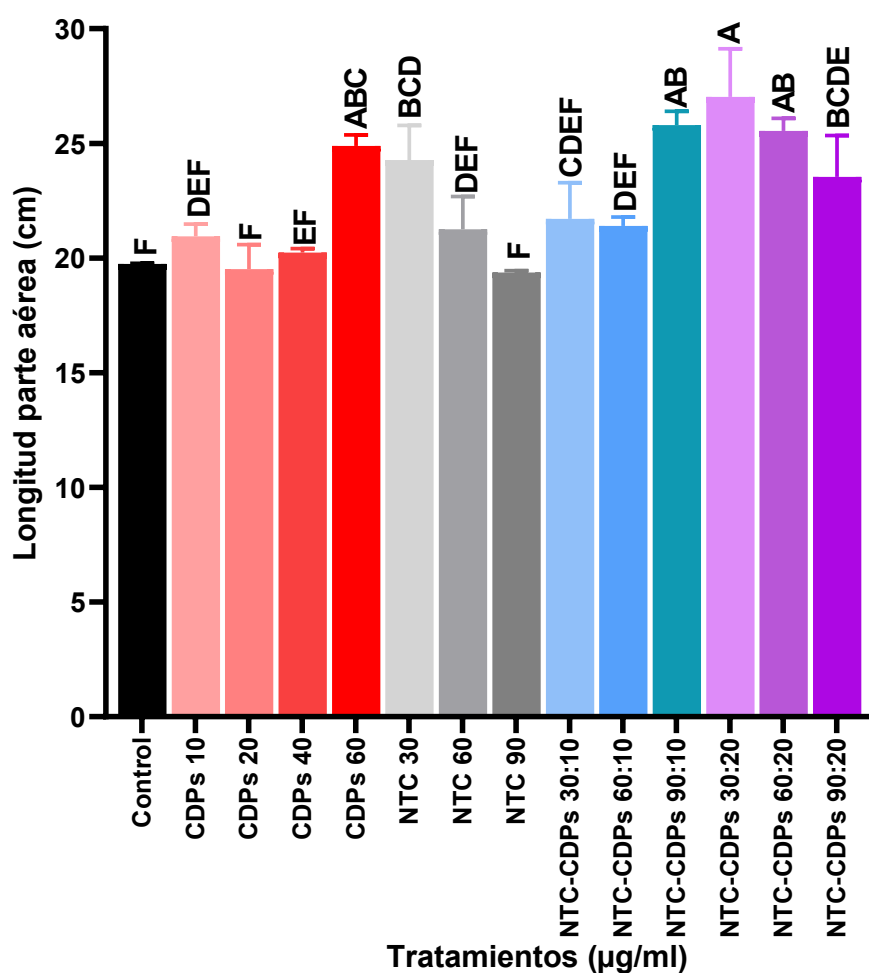


Figura 22. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la longitud foliar, 35 días después de la siembra de *S. lycopersicum*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 23 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre el diámetro del tallo de *S. lycopersicum*, evaluado 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron que las plantas con los CDPs a 60 µg/mL, NTC-CDPs 30:10 µg/mL, 90 µg/mL y 30:20 µg/mL tienen un diámetro mayor en comparación del control, en contraste, al suplementar NTC-CDPs 30:10 µg/mL el diámetro del tallo disminuyó significativamente.

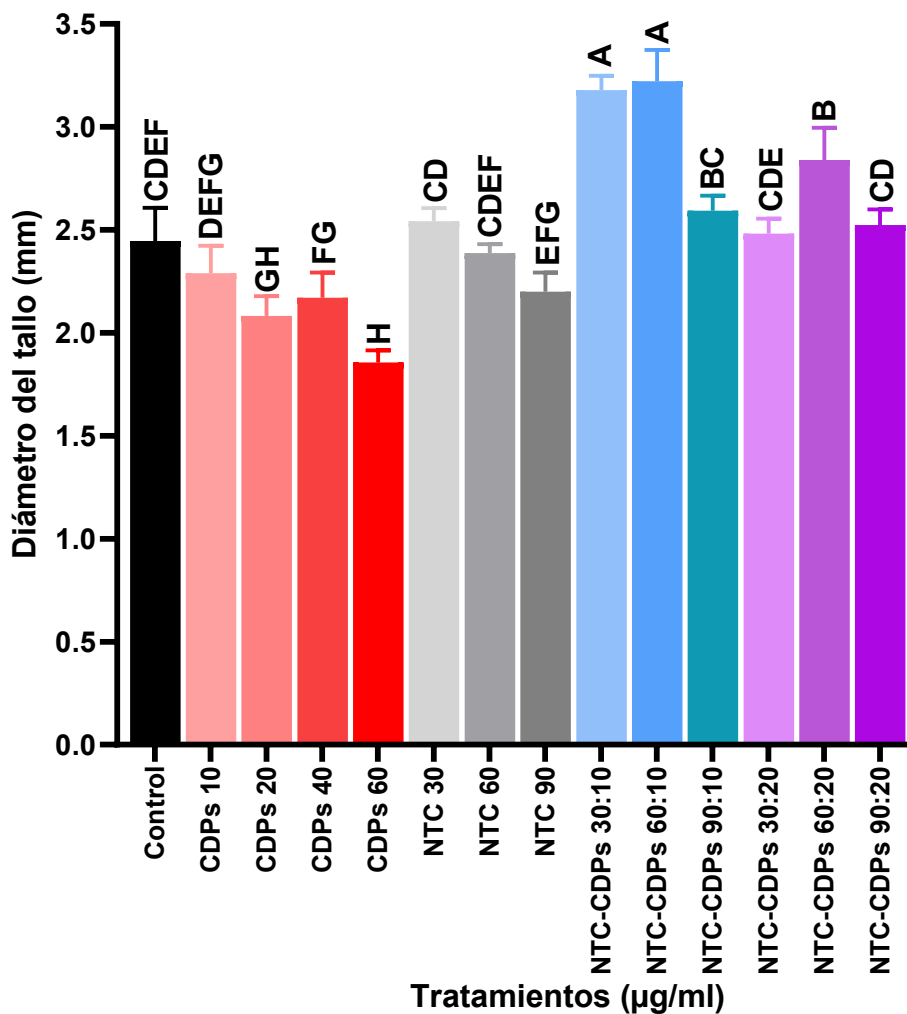


Figura 23. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el diámetro del tallo, 35 días después de la siembra de *S. lycopersicum*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 24 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre la longitud radical de *S. lycopersicum*, evaluado 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron que con la adición de CDPs 40 µg/mL y NTC-CDPs 90:10 µg/mL incrementó la longitud de las raíces, en contraste, se observó que los NTC prístinos 90 µg/mL y NTC-CDPs 30:10 µg/mL afectaron significativamente la longitud de la raíz comparado con las plantas control.

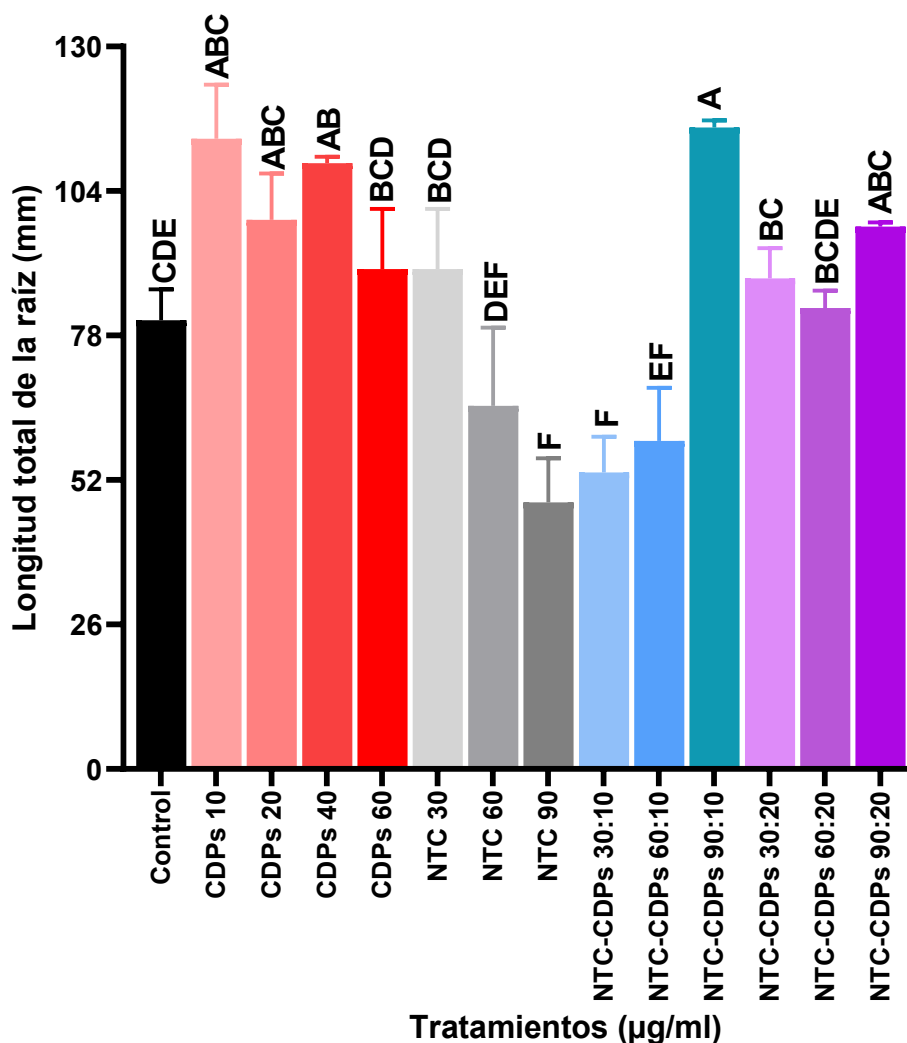


Figura 24. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en la longitud de la raíz de *S. lycopersicum*, 35 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 25 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre el volumen radical de las plantas de *S. lycopersicum*, evaluado 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron que con la adición de CDPs a 10 µg/mL y 60 µg/mL, NTC prístinos 30 µg/mL, NTC-CDPs 90:10, 30:20 y 60:20 µg/mL incrementó el volumen radical de *S. lycopersicum*, mientras que los demás tratamientos no mostraron diferencia significativa a las plantas control.

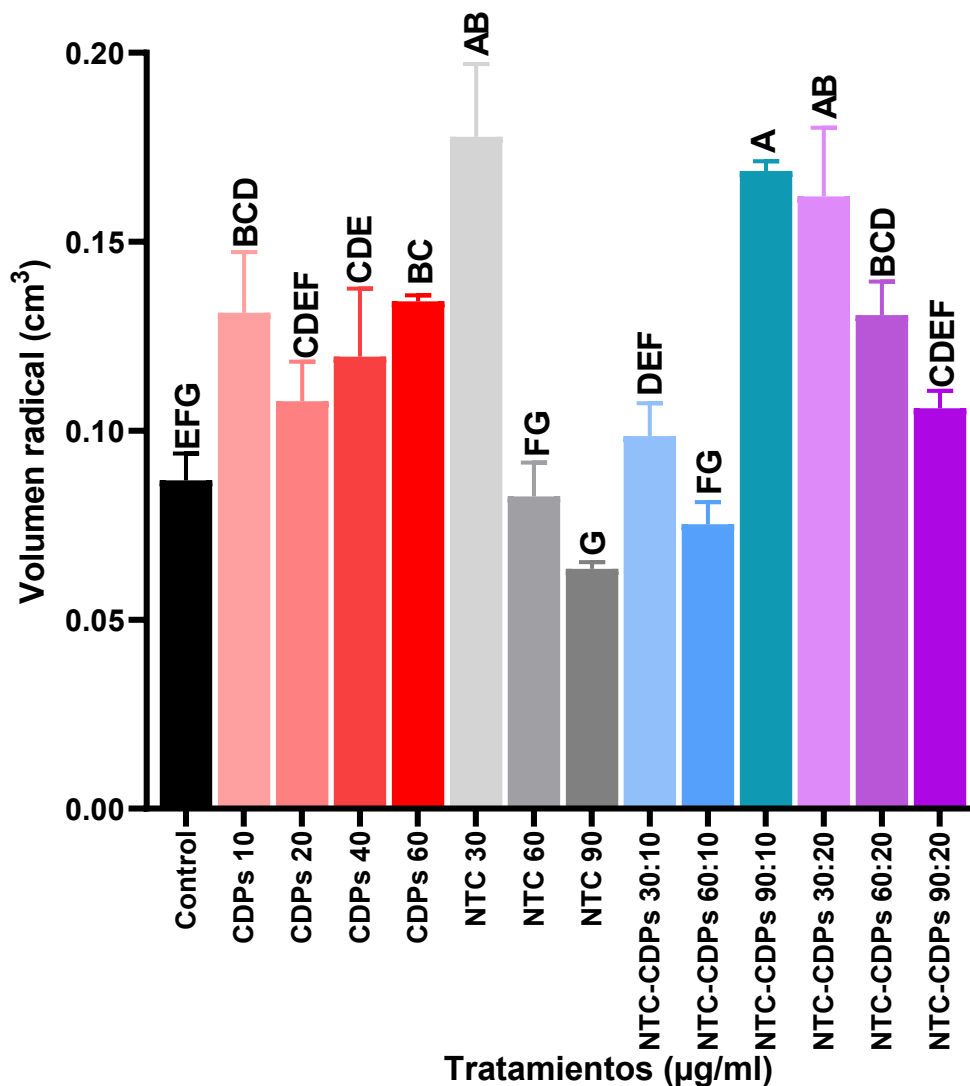


Figura 25. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el volumen radical, 35 días después de la siembra de *S. lycopersicum*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 26 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDP y NTC funcionalizados con CDPs sobre el área de superficie radical de *S. lycopersicum*, evaluado 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron que la adición de los CDPs de forma individual incrementó el área de superficie radical de las plantas en las cuatro concentraciones suplementadas, mientras que los NTC prístinos la contracción más baja (30 µg/mL) estimuló el área de la raíz, a concentraciones más altas disminuyó, donde el tratamiento con 90 µg/mL, se redujo significativamente, comparado con el de las plantas control. Por otro lado, se observó que la adición de NTC-CDPs funcionalizados favoreció el área radical en los tratamientos con 90:10 µg/mL y 30:20 µg/mL.

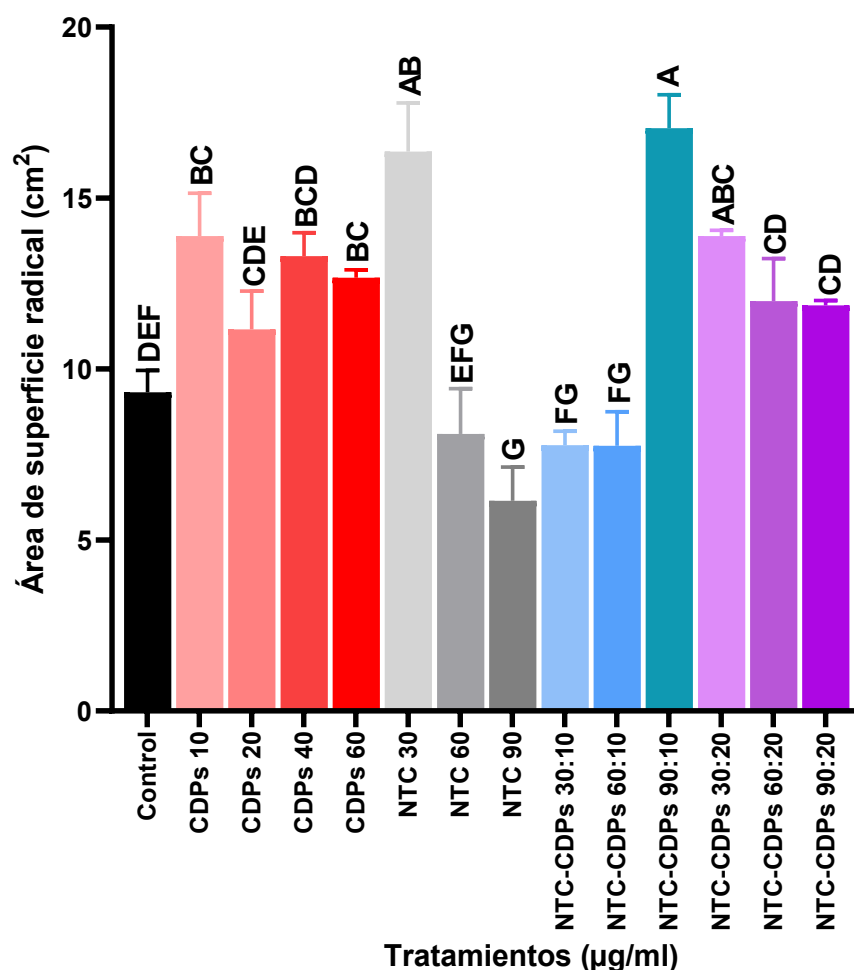


Figura 26. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el área de superficie de la raíz, 35 días después de la siembra de *S. lycopersicum*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.



Figura 27. Imágenes representativas del efecto de CDPs en el crecimiento de *S. lycopersicum* a los 35 días después de la germinación. Imágenes obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

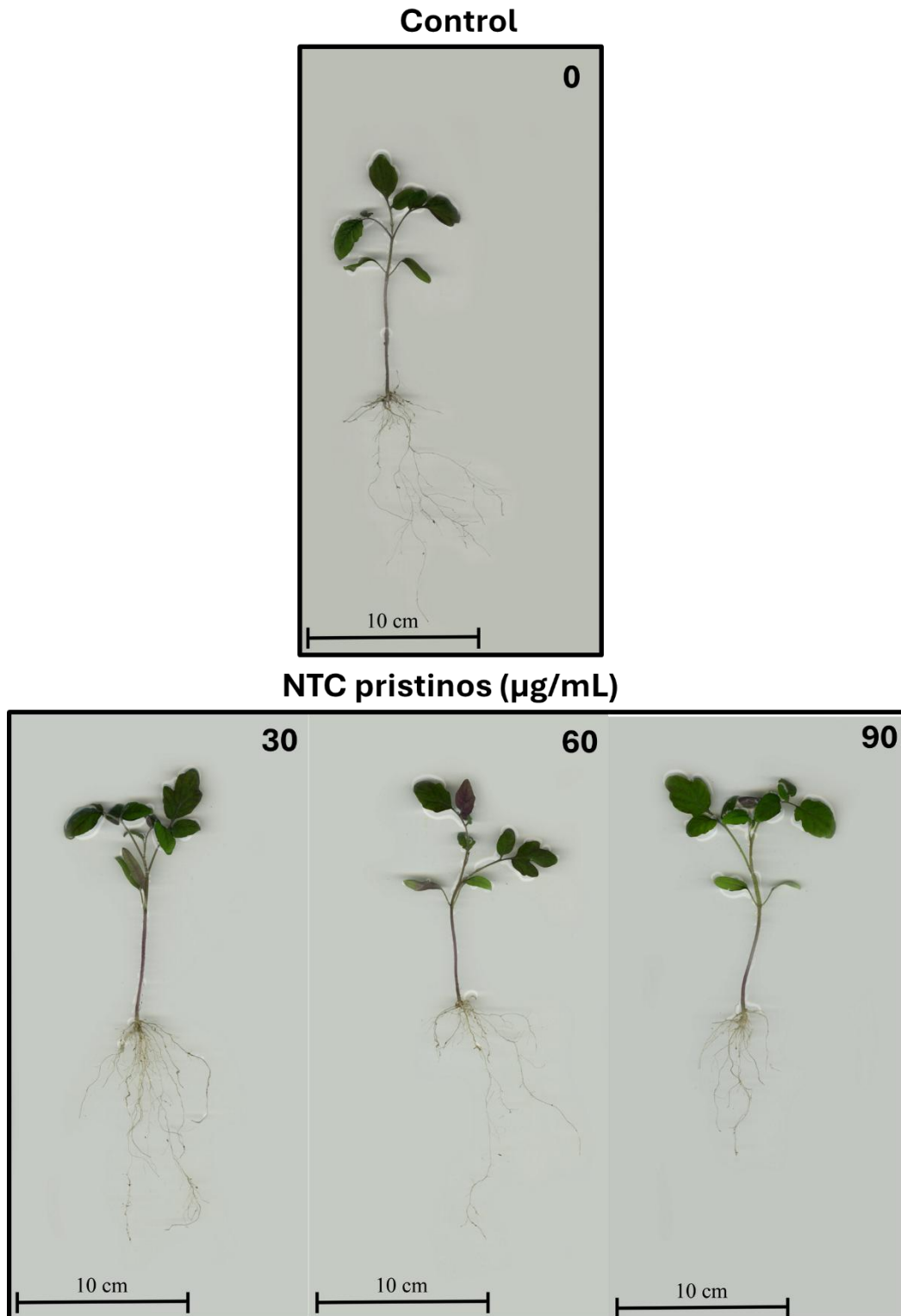


Figura 28. Imágenes representativas del efecto de los NTC prístinos en el crecimiento de *S. lycopersicum* a los 35 días después de la germinación. Imágenes obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

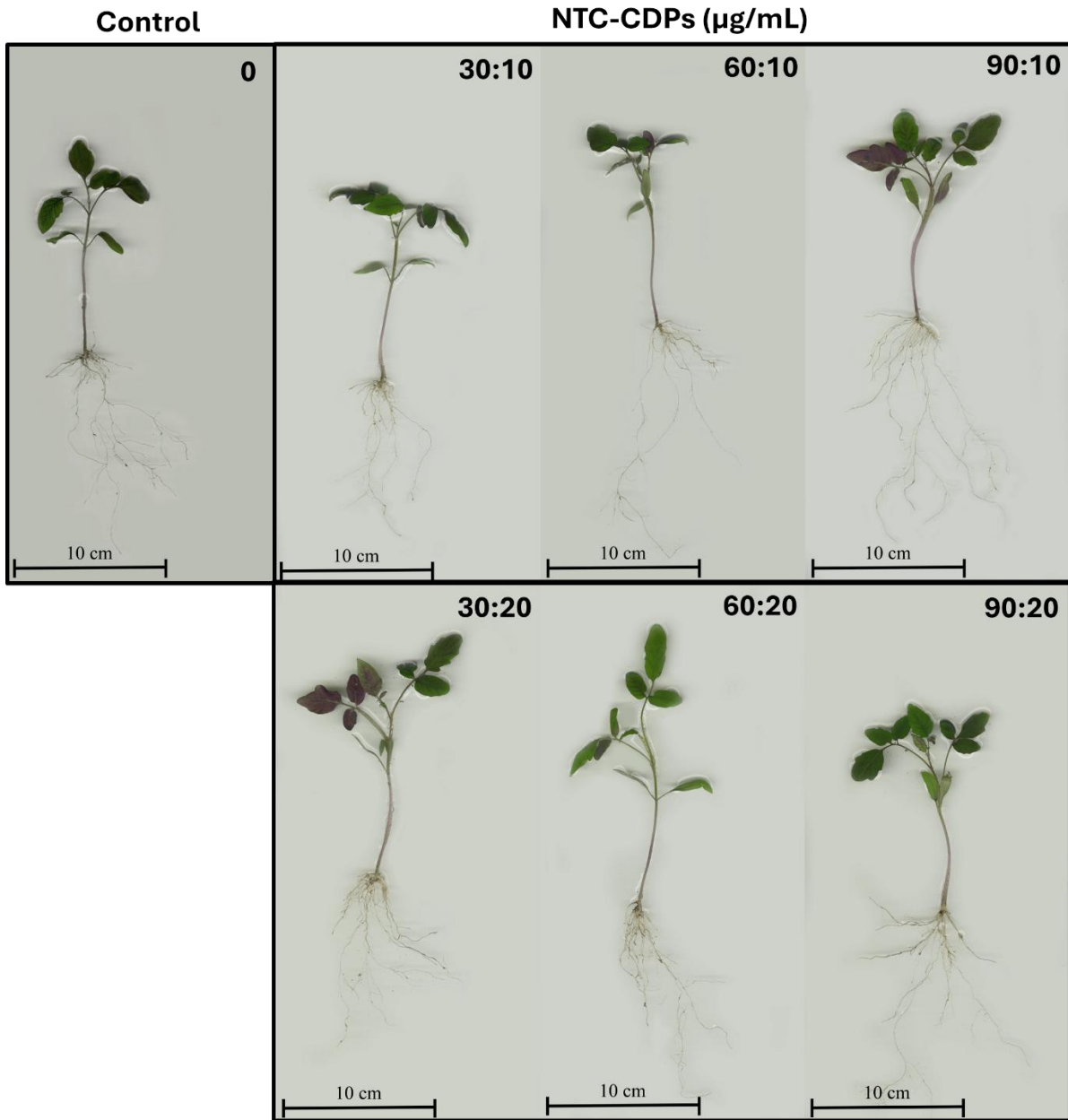


Figura 29. Imágenes representativas del efecto de los NTC funcionalizados con CDPs en el crecimiento de *S. lycopersicum* a los 35 días después de la germinación. Imágenes obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

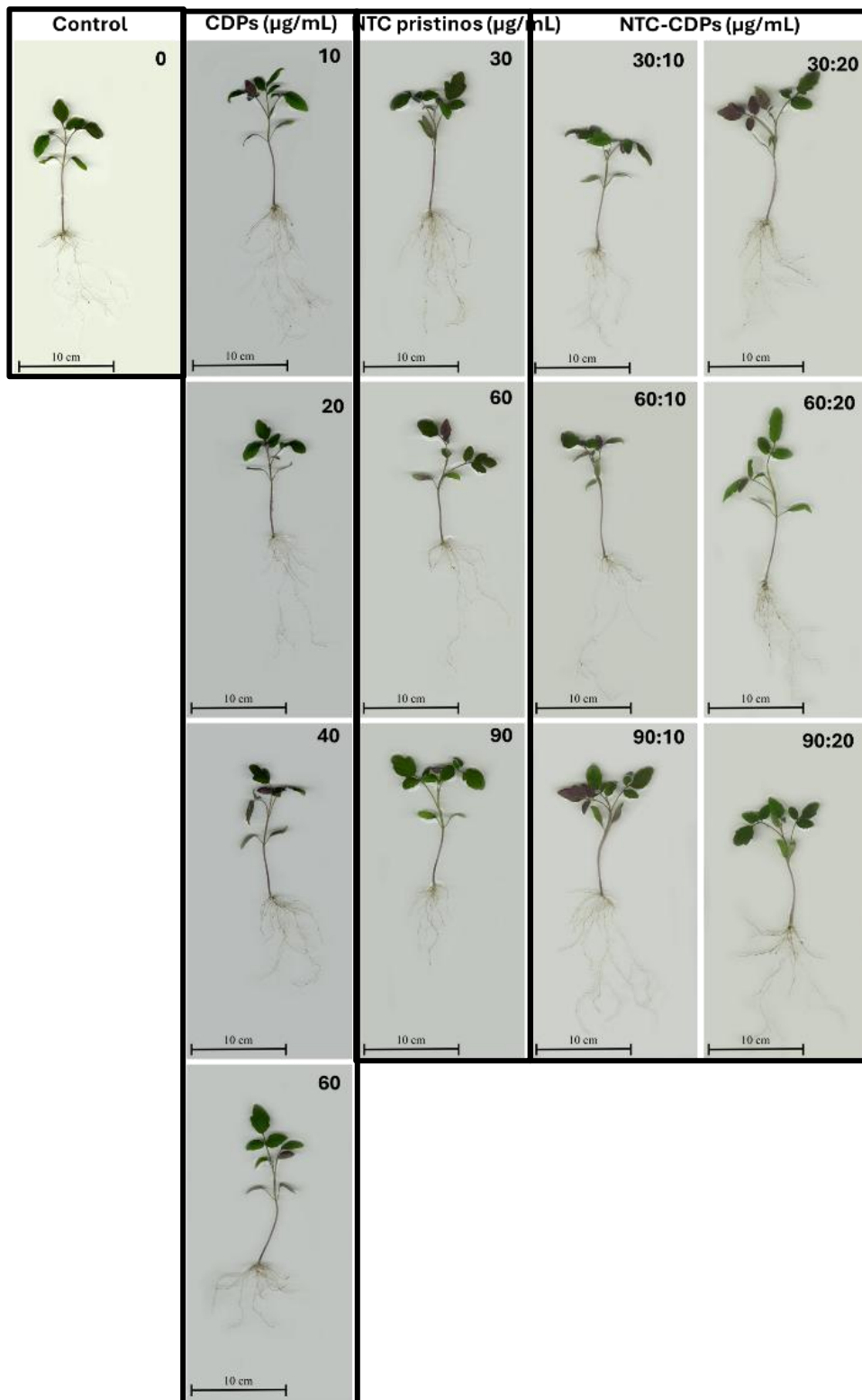


Figura 30. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs en el crecimiento de *S. lycopersicum* a los 35 días después de la germinación.

Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

6.6 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre la biomasa de *S. lycopersicum*

La figura 31 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre el peso fresco de *S. lycopersicum*, evaluado 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron que los tratamientos de CDPs 10 µg/mL y 60 µg/mL, NTC prístinos 30 µg/mL, NTC-CDPs 90:10 µg/mL y 30:20 µg/mL generaron un incremento en el peso fresco total de las plantas, en comparación con las del control, por el contrario, NTC-CDPs a 60:10 µg/mL causaron una disminución en el peso fresco vegetal en comparación con las plantas control.

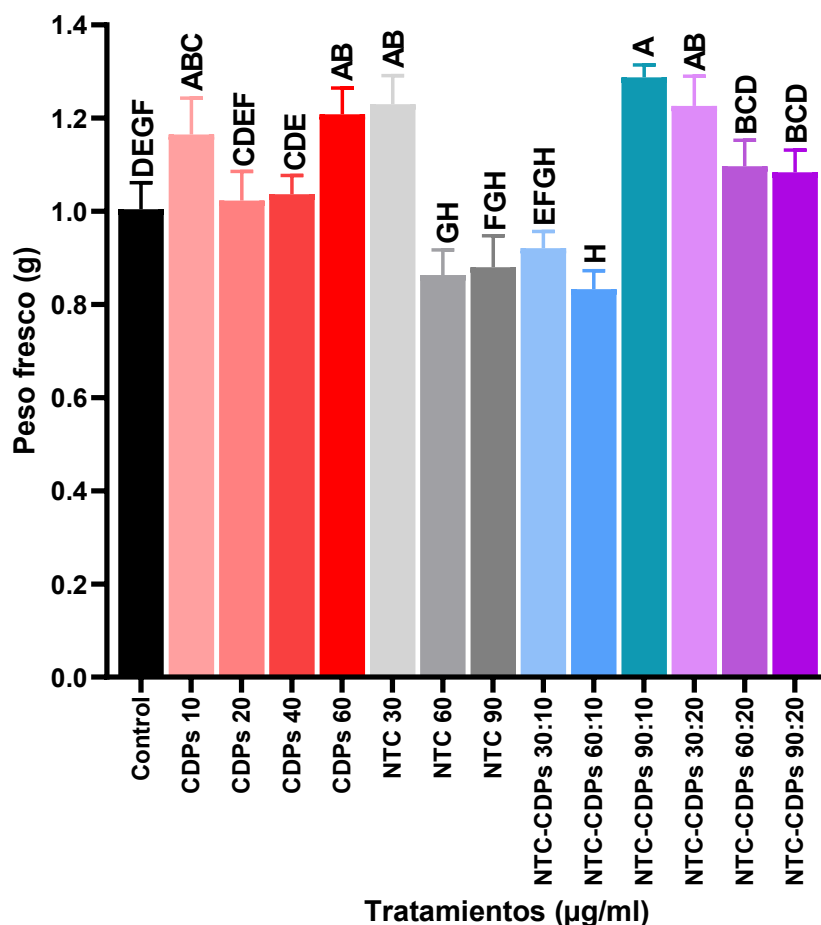


Figura 31. Peso fresco *S. lycopersicum* cultivado con NTC con y sin funcionalizar con CDPs, 35 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 32 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre el peso seco de *S. lycopersicum*, evaluado 35 días después de la siembra. Los resultados mostraron 60 µg/mL de CDPs incrementaron el peso seco vegetal, mientras que al suplementar NTC prístinos se observó que la dosis más baja (30 µg/mL) generó incrementos significativos en el peso, sin embargo, al ir incrementando la concentración de nanopartículas esta biomasa se vio afectada, siendo significativamente diferente con 90 µg/mL. Sobre la respuesta de biomasa seca a la presencia de NTC-CDPs, se observó que únicamente al suplementar 90:10 µg/mL de estas nanopartículas funcionalizadas, se incrementó la biomasa significativamente.

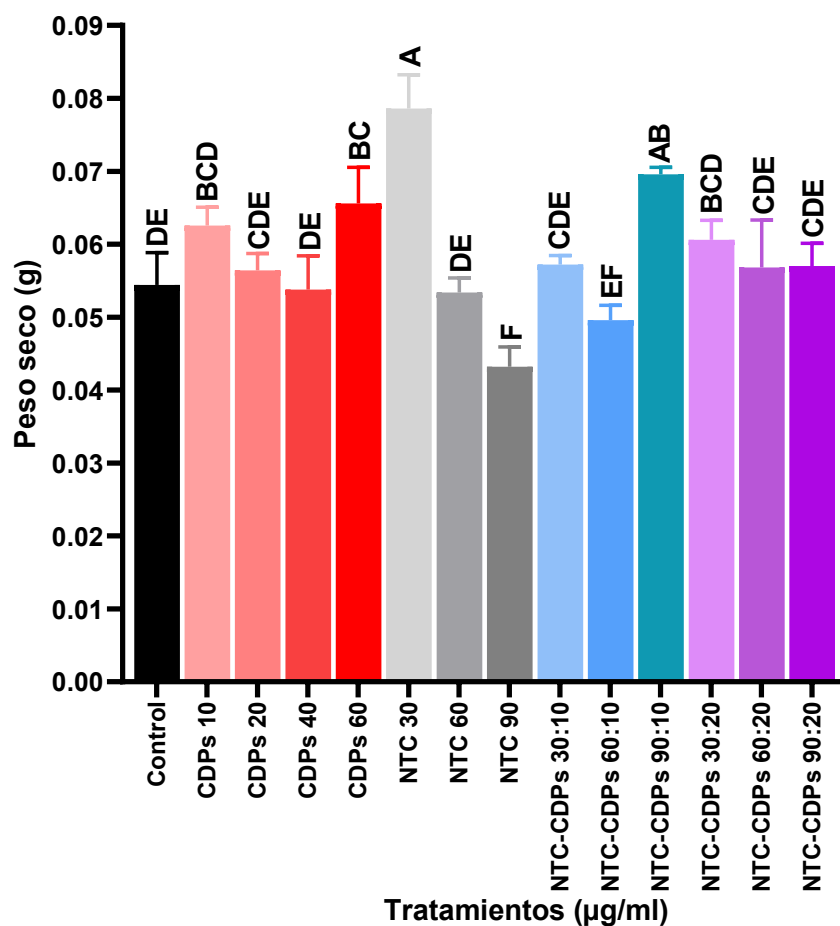


Figura 32. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el peso seco, 35 días después de la siembra de *S. lycopersicum*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

6.7 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre la abundancia y localización de la enzima deshidrogenasa y especies reactivas de oxígeno en *S. lycopersicum*

La figura 33 muestra la abundancia de O_2^- localizada en las hojas de jitomate. Los resultados mostraron que al suplementar CDPs a 20 $\mu\text{g/mL}$ se incrementó la producción de O_2^- y en contraste, las plantas con NTC-CDPs, mostraron una menor producción de este radical libre con los valores significativamente más bajos en los tratamientos con 30:10 $\mu\text{g/mL}$ y 90:20 $\mu\text{g/mL}$, lo que sugiere un posible efecto protector frente al estrés oxidativo.

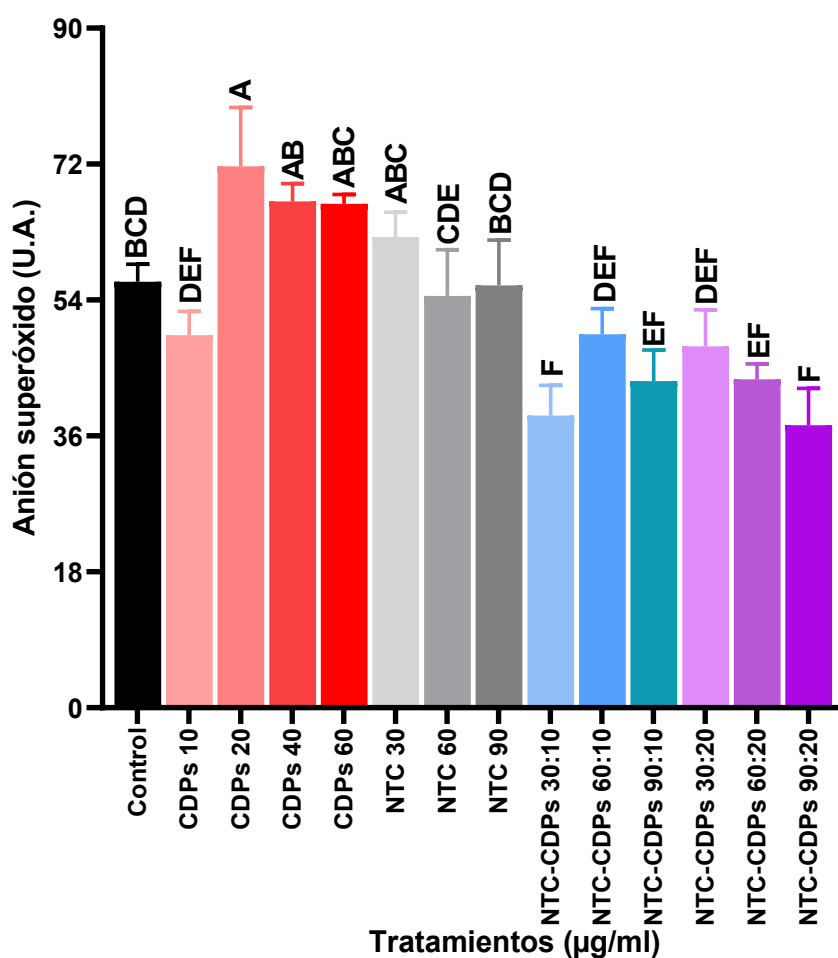


Figura 33. Determinación histoquímica del anión superóxido en hojas de jitomate cultivada con ciclodipéptidos, nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos, 35 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error

estándar. n=5. Las letras distintas representan diferencias significativas. En la figura 34 se muestra la intensidad de H₂O₂, en las hojas de jitomate, los resultados mostraron que en las hojas de jitomate donde se suplementaron 10 µg/mL de CDPs, NTC prístinos a 30 y 90 µg/mL y 60:20 µg/mL de NTC-CDPs se redujo significativamente la presencia de peróxido de hidrógeno en las hojas. Por otro lado, los NTC-CDPs suplementados en concentración de 60:10 estimuló la formación de este radical.

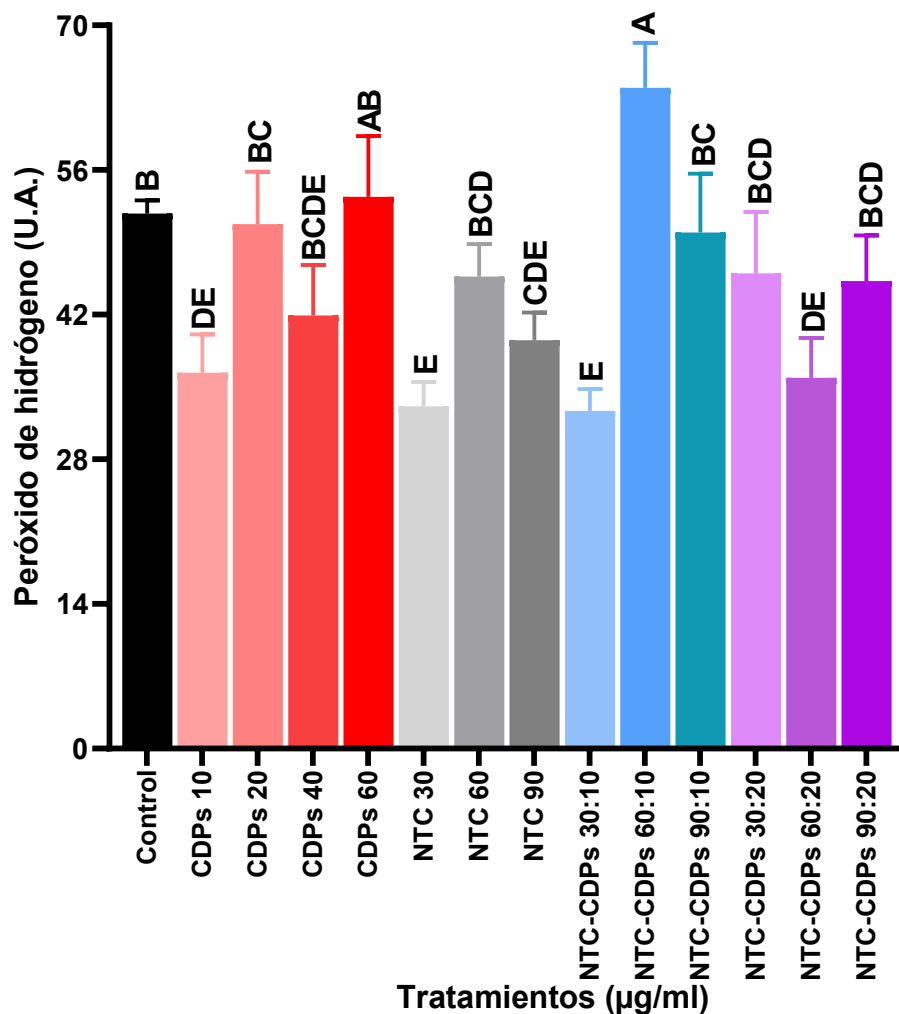


Figura 34. Determinación histoquímica de peróxido de hidrógeno en hojas de jitomate cultivada con ciclodipéptidos, nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos, 35 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. n=5. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 35 muestra la abundancia de deshidrogenasas en las hojas de *S. lycopersicum*, se observó que los tratamientos con CDPs sin NTC incrementaron significativamente la abundancia de deshidrogenasas en comparación con la de las plantas control, especialmente a 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$. Por otro lado, al suplementar NTC prístinos se detectó que a 30 y 90 $\mu\text{g}/\text{mL}$ también se estimuló la presencia de esta proteína, siendo a 90 donde se generó la abundancia más alta que todos los tratamientos. Mientras que la respuesta de la planta a la presencia de NTC-CDPs en general fue similar a lo detectado en las plantas control, donde la abundancia de deshidrogenasa detectada no mostró diferencias significativas, a excepción de los tratamientos suplementados con 60:10, 30:20 y 90:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$, donde se detectaron diferencias significativas comparado con las plantas control, sin embargo, esta diferencia es conservadora, comparada a la respuesta detectada en las plantas de los demás tratamientos.

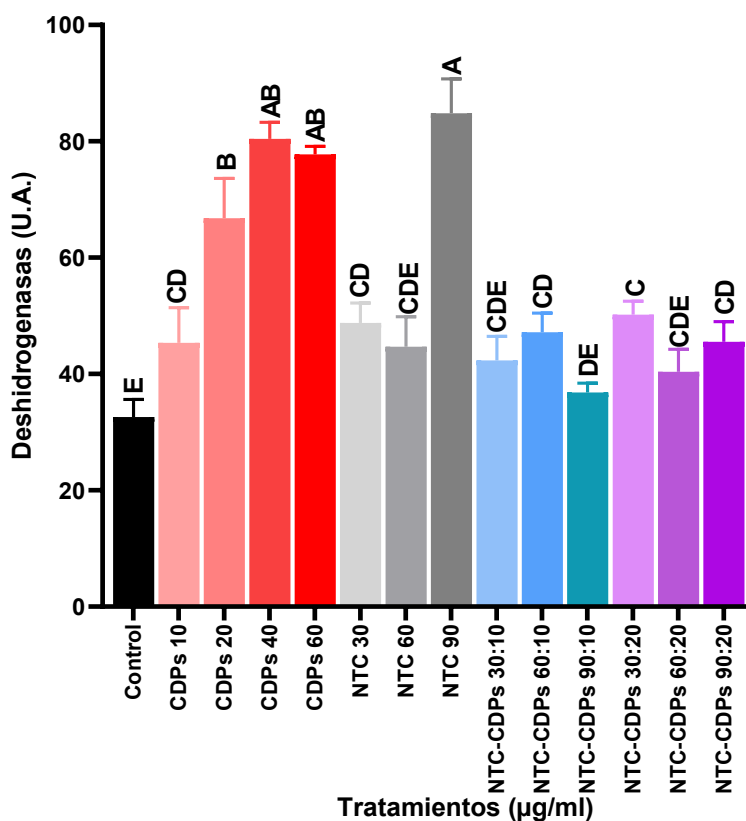


Figura 35. Determinación histoquímica de deshidrogenasas en hojas de jitomate cultivada con ciclodipéptidos, nanotubos de carbono prístinos y funcionalizados con ciclodipéptidos, 35 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

En los siguiente resultados, se muestra el efecto obtenido en plantas de jitomate infectadas *P. capsici* y cultivadas con CDPs, NTC prístinos y NTC funcionalizados con CDPs.

6.8 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre el parte aérea y arquitectura radical de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*

La figura 36 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre la longitud del tallo de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluada 70 días después de la siembra. Los resultados mostraron que, a nivel del tallo, el fitopatógeno no afectó el crecimiento al inocularse sin ningún tratamiento, al no detectarse diferencias significativas con las plantas control sin *Phytophthora*. Sin embargo, cuando se infectaron las plantas y se les adicionaron Ciclodipéptidos en concentraciones de 20 y 60, pudimos observar que se redujo significativamente el tamaño del tallo, esto fue similar al agregar 30 µg/mL de NTC prístinos o NTC-CDPs a 90:10 y 30:20 µg/mL. Por otro lado, también identificamos que a 90 µg/mL no solo no fue reducido el tamaño del tallo por la exposición al fitopatógeno, sino que se estimuló su longitud de estas plantas.

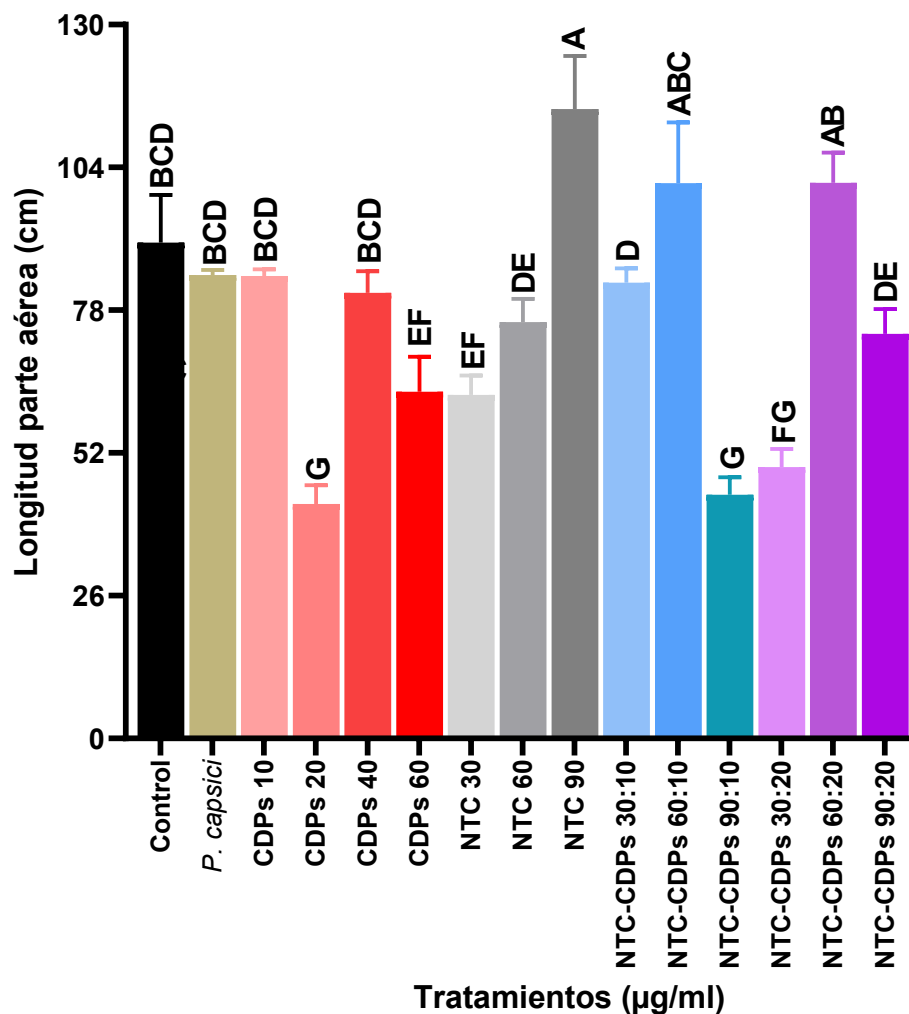


Figura 36. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre la longitud parte aérea de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, 70 días después de la siembra

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 37 presenta el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre el diámetro del tallo de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluado 70 días después de la siembra. Los resultados mostraron que la infección por *P. capsici* sin ningún tratamiento, disminuyó significativamente el diámetro del tallo de las plantas de jitomate. Este efecto negativo se vio revertido en las plantas tratadas con 10, 40 y 60 $\mu\text{g}/\text{mL}$ de CDPs. De forma similar, se observó que NTC prístinos a 30 y 90 $\mu\text{g}/\text{mL}$ se mantuvieron sin diferencias significativas con las plantas sin fitopatógeno. Por otro lado, la sinergia NTC-CDPs mostró un efecto dependiente a la concentración suplementada donde a concentraciones de 30:10, 60:10 y 60:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$, no se detectaron diferencias significativas comparado con el control, sin embargo, en las demás concentraciones, se observó que el diámetro del tallo disminuyó, incluso, en el tratamiento con NTC-CDPs 90:10, se observó una disminución del diámetro superior a las plantas infectadas con *P. capsici* donde no se aplicó ningún tratamiento.

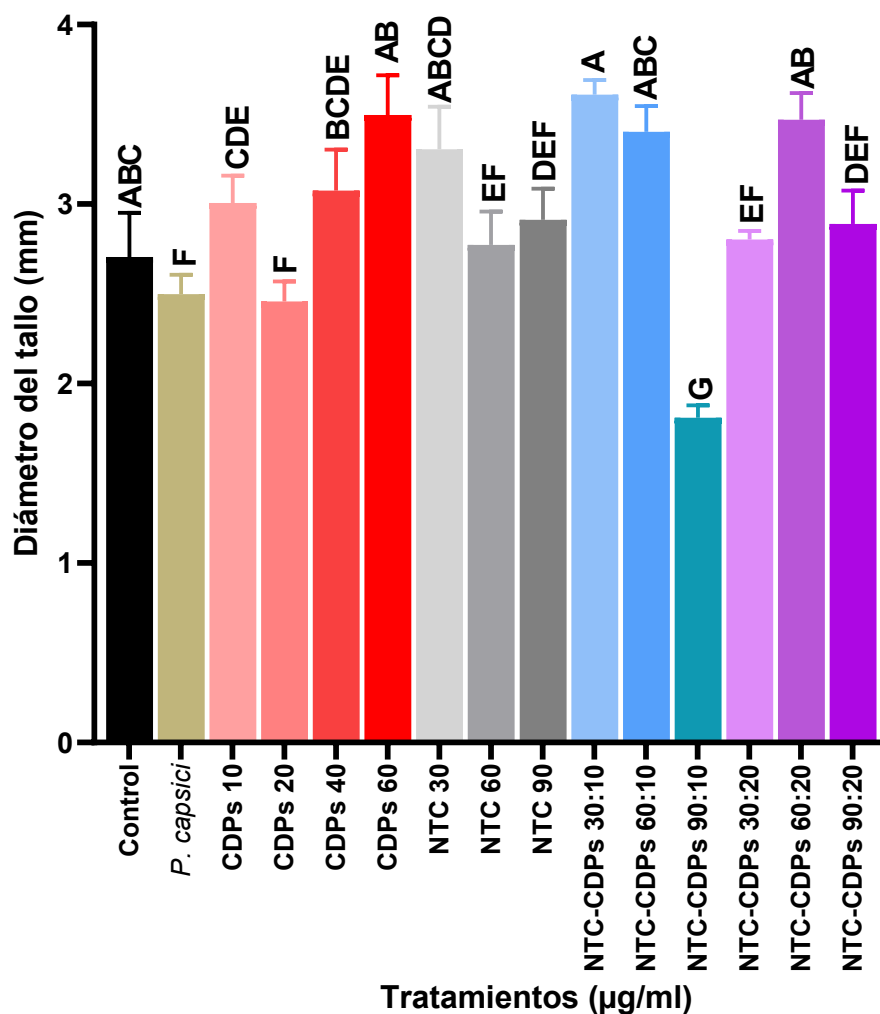


Figura 37. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el diámetro del tallo, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

En las figuras se muestran imágenes del follaje de las plantas de jitomate infectadas con *P. capsici* y suplementadas con CDPs, NTC prístinos y funcionalizados con CDPs.

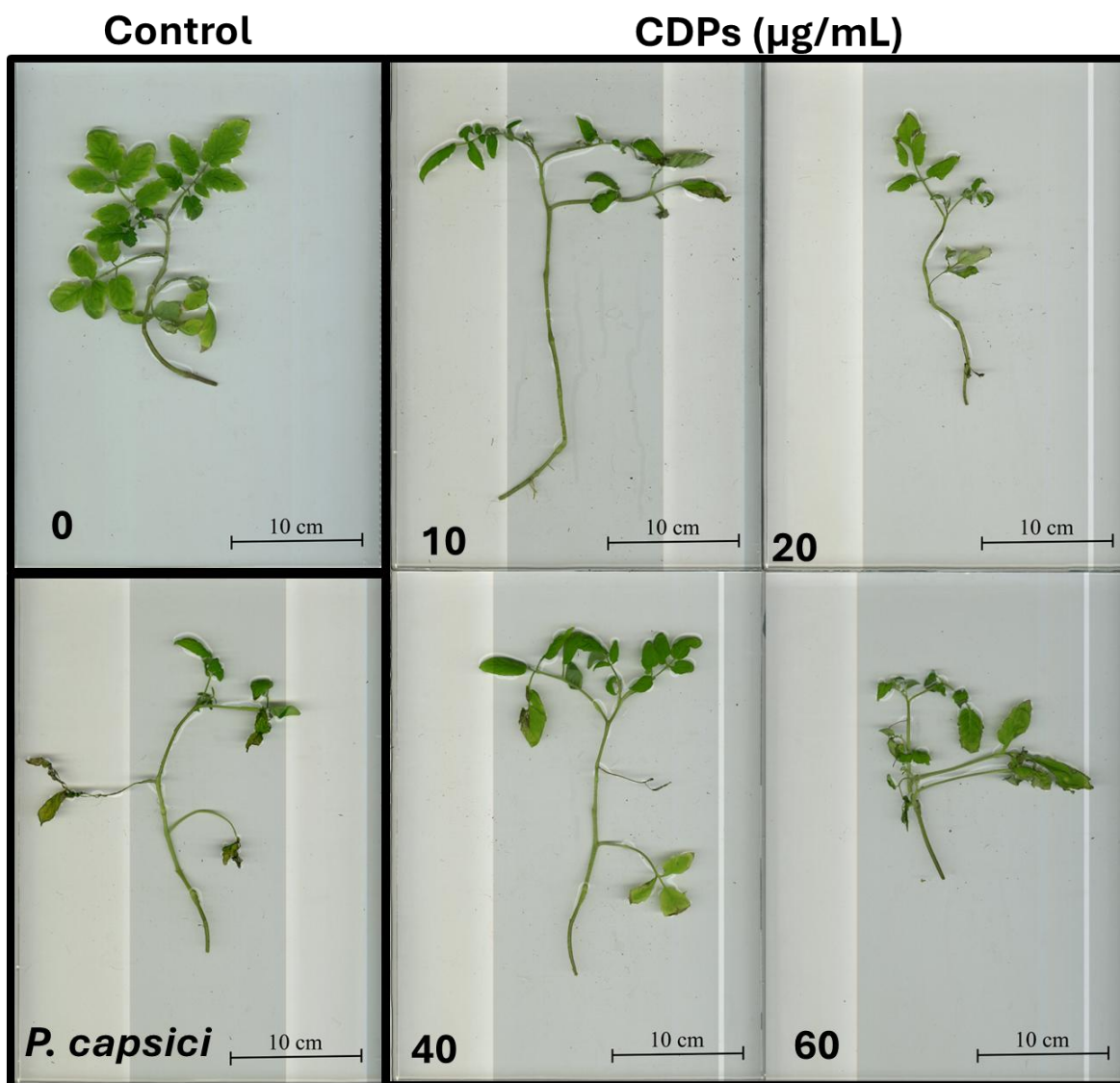


Figura 38. Imágenes que muestran el efecto de los CDPs en la parte aérea de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

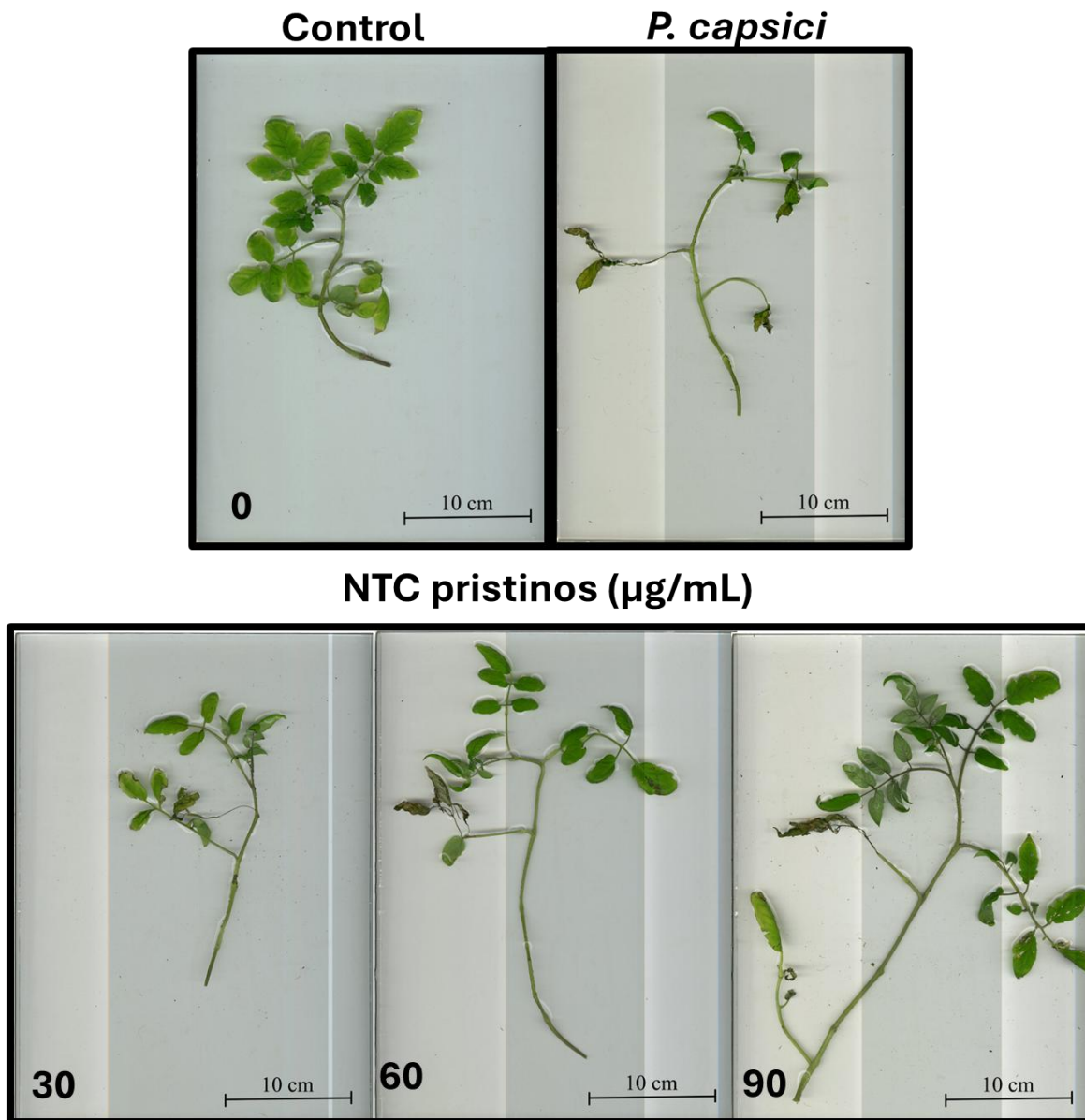


Figura 39. Imágenes que muestran el efecto de NTC pristinos en la parte aérea de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

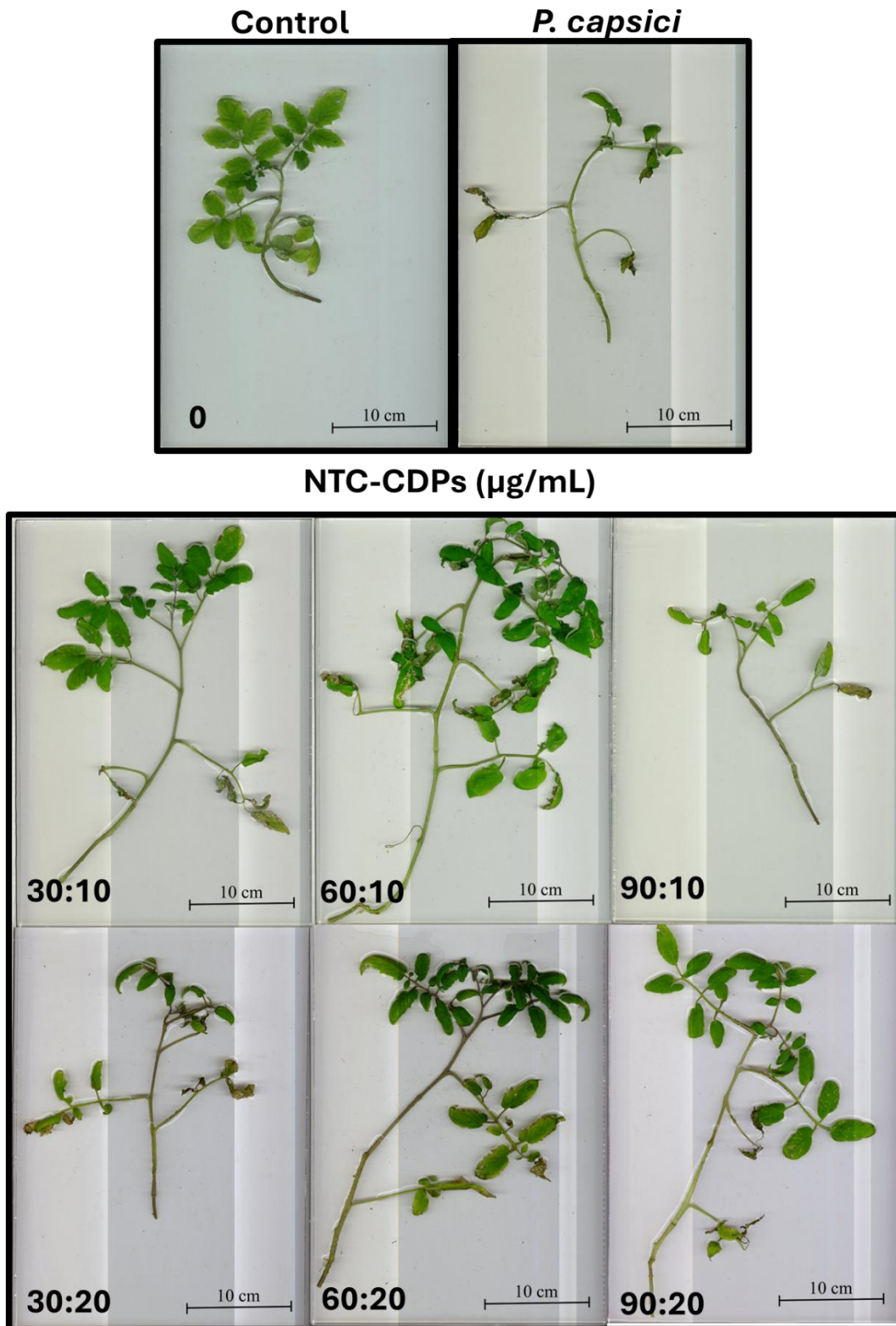


Figura 40. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs en la parte aérea de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.



Figura 41. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs en la parte aérea de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra.

Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

La figura 42 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre la longitud total de la raíz de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluada 70 días después de la siembra. Los resultados mostraron que la inoculación de *P. capsici* en jitomate, sin ningún tratamiento, redujo significativamente la longitud de la raíz comparado con las plantas control. Mientras que al suplementarles los distintos tratamientos se observó que, en la mayoría de los tratamientos, se contrarrestó el efecto negativo del patógeno, además, en tratamientos con la aplicación de 20 µg/mL de CDPs, 90 µg/mL de NTC prístinos y NTC-CDPs en concentraciones de 60:10 y 60:20 µg/mL se obtuvieron raíces del ~200% más grandes que en las plantas control, lo que muestra que no solo se contrarrestó el fitopatógeno, sino que se está estimulando el desarrollo radical de estas plantas.

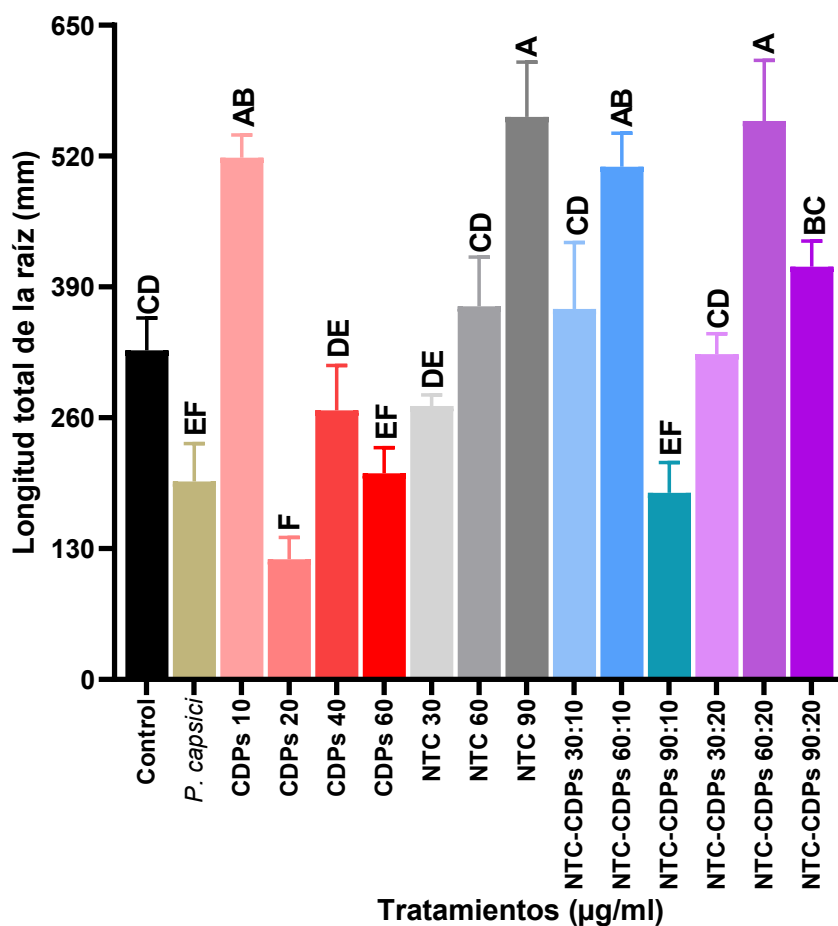


Figura 42. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre la longitud total de la raíz de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, 70 días después de la siembra

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

En la figura 43 se muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre el volumen radical de las plantas de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, de 70 días de crecimiento. Se observó un efecto negativo importante con la presencia del fitopatógeno, en las plantas inoculadas con *P. capsici*, se observó que el volumen radical se redujo en un ~50 % comparado al control. Por otro lado, la respuesta de las plantas con los distintos tratamientos fue muy variable, en los tratamientos con la adición de CDPs, observamos que el volumen de las raíces fue similar o menor a las plantas con el fitopatógeno, a excepción de las plantas con 10 µg/mL de CDPs, que se mantuvo sin diferencias significativas a las plantas control. Este efecto también se detectó al suplementar los NTC prístinos con 30 y 60 µg/mL conservaron un volumen radical igual que las plantas con *P. capsici*, y las que se suplementaron con 90 µg/mL tuvieron un volumen similar al de las plantas control. Al evaluar los efectos de los NTC-CDPs, se detectó que a 60:10, 30:20 y 90:20 µg/mL conservaron un sistema radical igual que las plantas control y superior a las plantas inoculadas con el fitopatógeno, mientras que NTC-CDPs 60:20 µg/mL estimuló el volumen radical, obteniendo un crecimiento significativo comparado con las plantas sin patógeno. Por otro lado, los tratamientos con CDPs 20 y 60 µg/mL, NTC-CDPs 90:10 µg/mL registraron los volúmenes radicales más bajos.

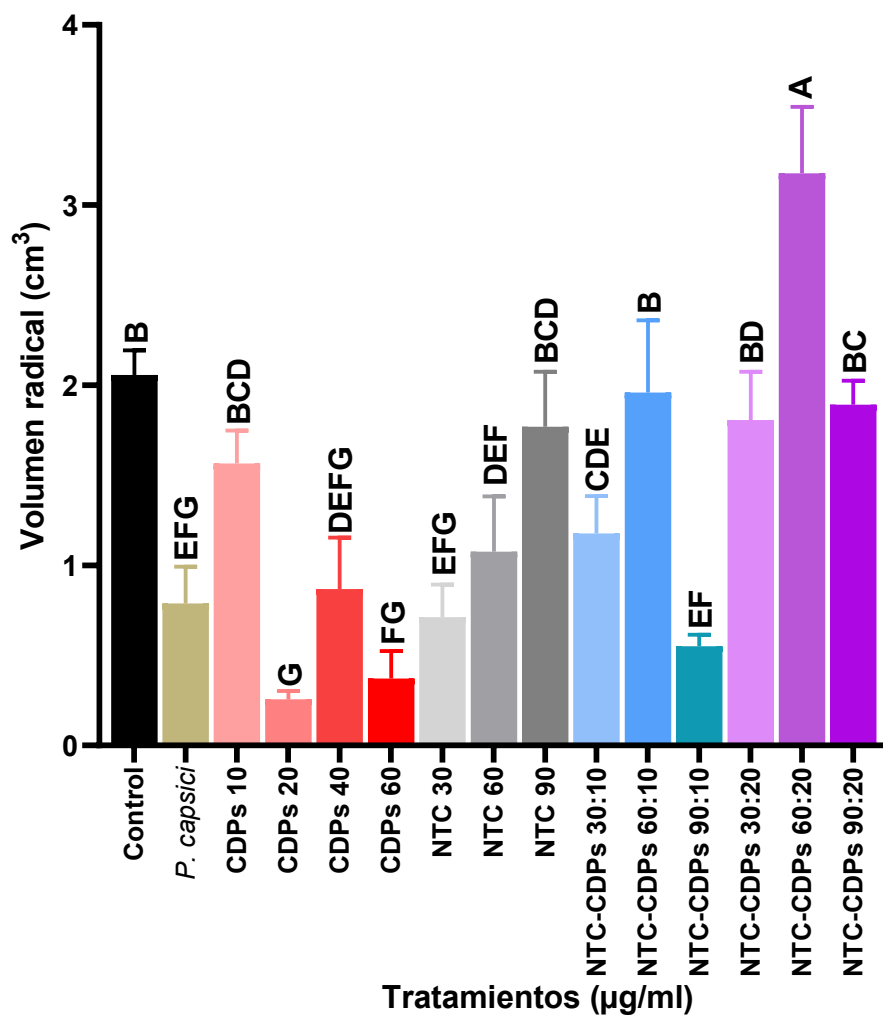


Figura 43. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el volumen radical, de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, 70 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 44 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y los NTC funcionalizados con CDPs sobre el área de superficie radical de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluada 70 días después de la siembra. Los resultados obtenidos, mostraron que los tratamientos suplementados con 90 µg/mL de NTC prístinos, NTC-CDPs a 60:10 y 60:20 µg/ml incrementaron el área de superficie radical de jitomate, comparado con las plantas control, y se generó un aumento de 200% comparado con las plantas infectadas con *P. capsici* sin tratamiento, lo que sugiere que estos tratamientos están contrastando el daño del patógeno y al mismo tiempo estimulan la raíz. Por otro lado, en algunos tratamientos, no se ve un efecto tan marcado, sin embargo, el área radical es igual a las plantas control y superior significativamente comparado a las plantas con el patógeno, esto se observó en los tratamientos con 10, 40 µg/mL de CDPs, con NTC prístinos a 30 y 60 µg/mL y en los tratamientos con NTC- CDPs 30:10, 30:20 y 90:20 µg/mL. Por el contrario, también se observó que los tratamientos como 20 y 60 µg/mL de CDPs y 90:10 µg/mL de NTC-CDPs a nivel de área radical, no tuvieron ningún efecto protector, al tener áreas radical sin diferencias significativas con las plantas con el fitopatógeno y sin ningún tratamiento.

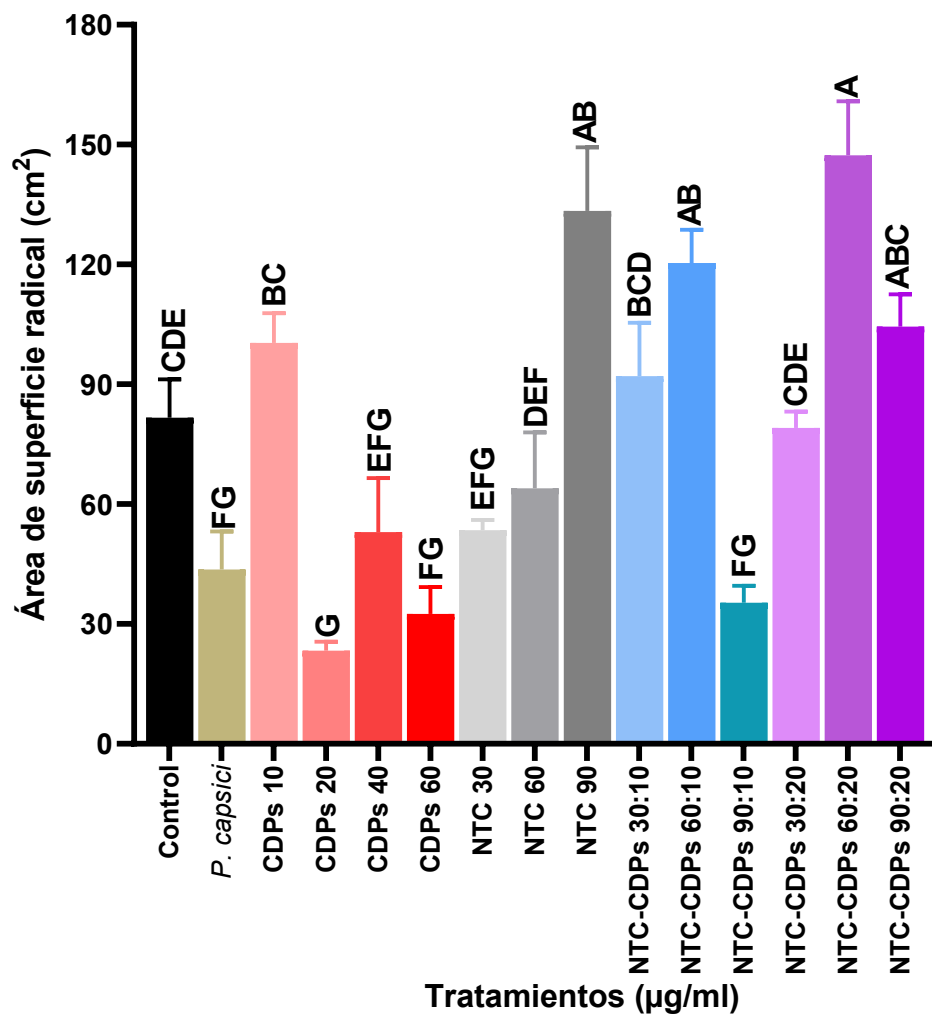


Figura 44. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el área de superficie de la raíz, de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, 70 días después de la siembra.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

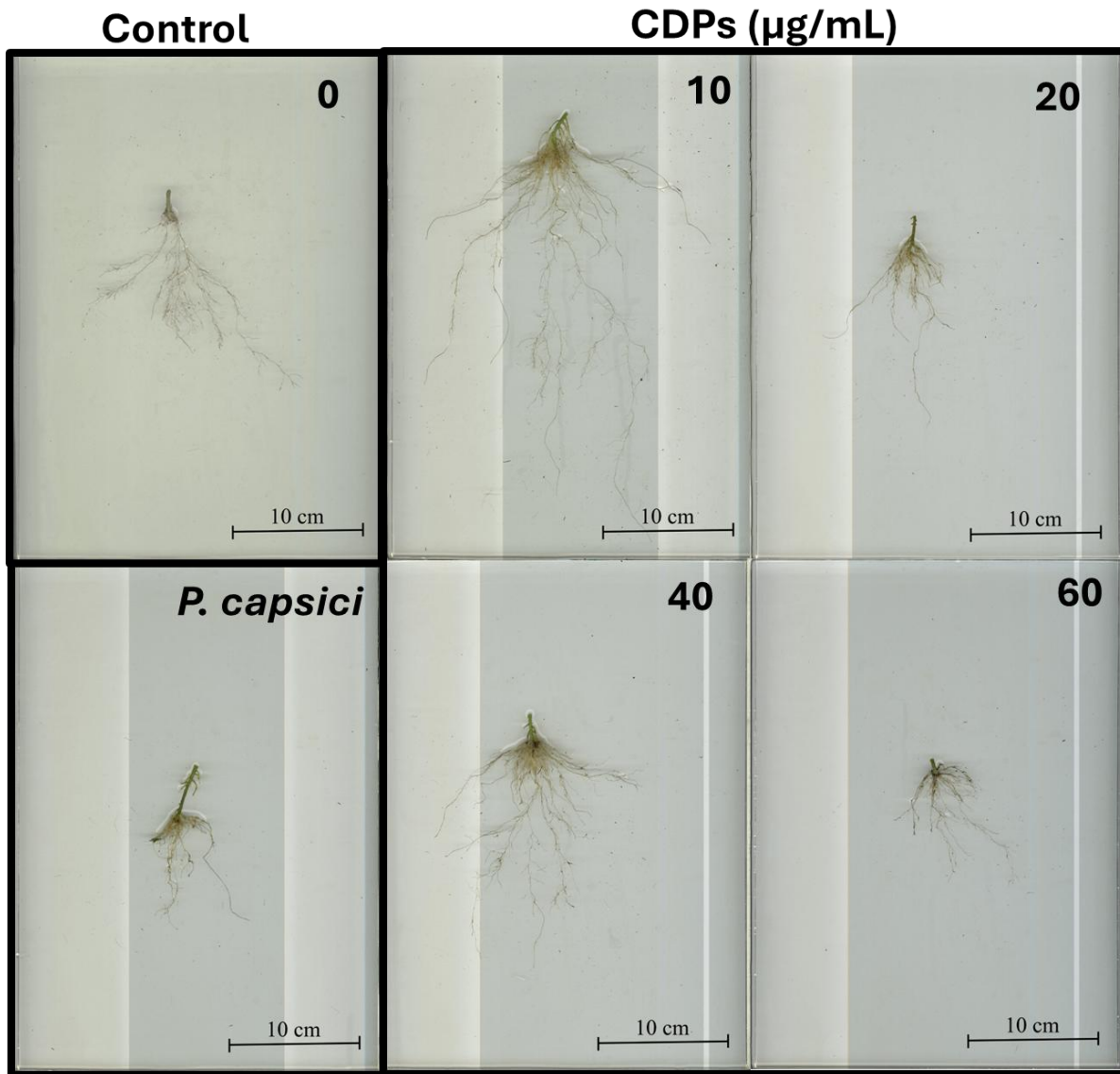


Figura 45. Imágenes que muestran el efecto de los CDPs sobre la arquitectura radical de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

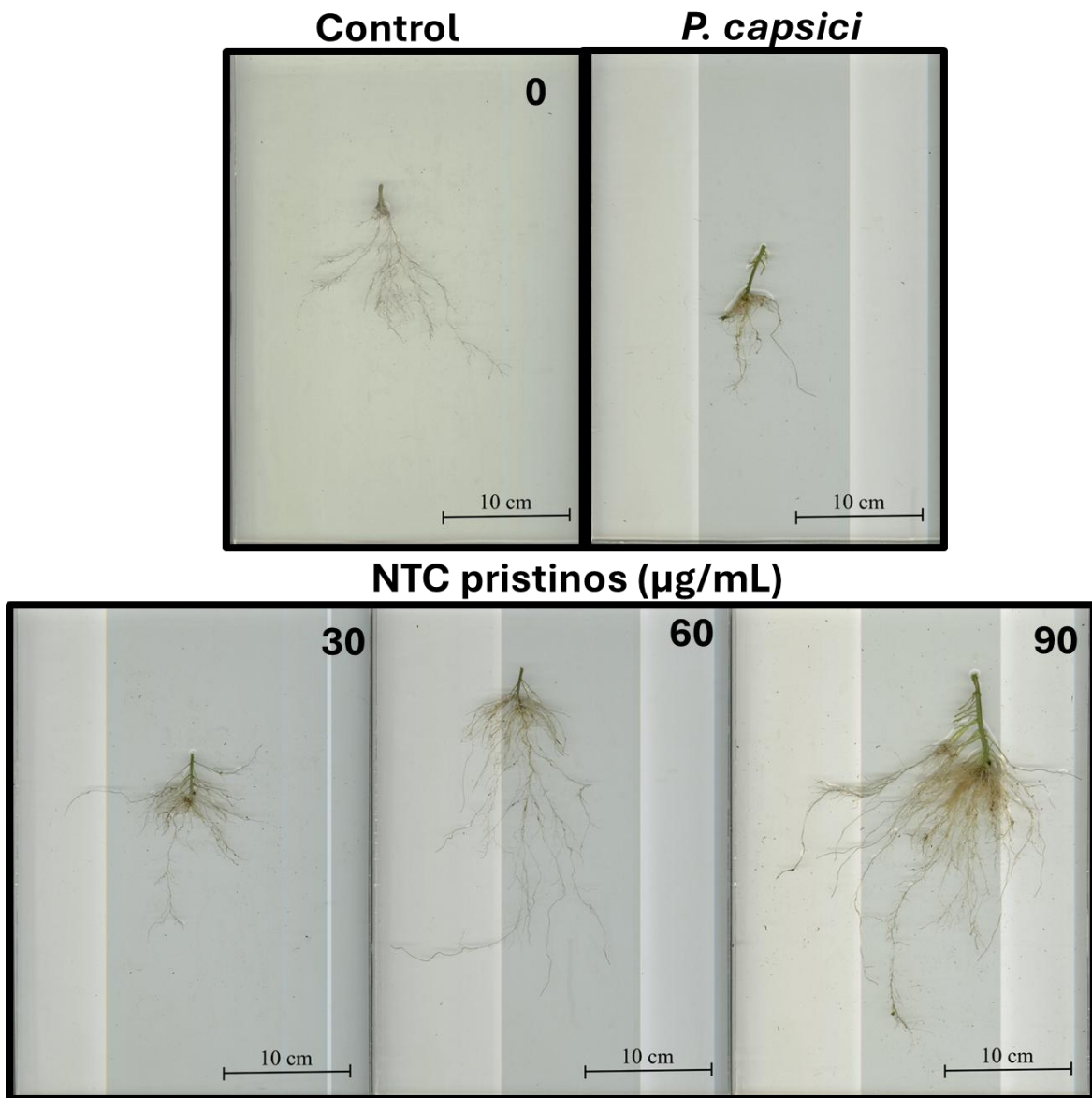


Figura 46. Imágenes que muestran el efecto de los NTC pristinos sobre la arquitectura radical de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

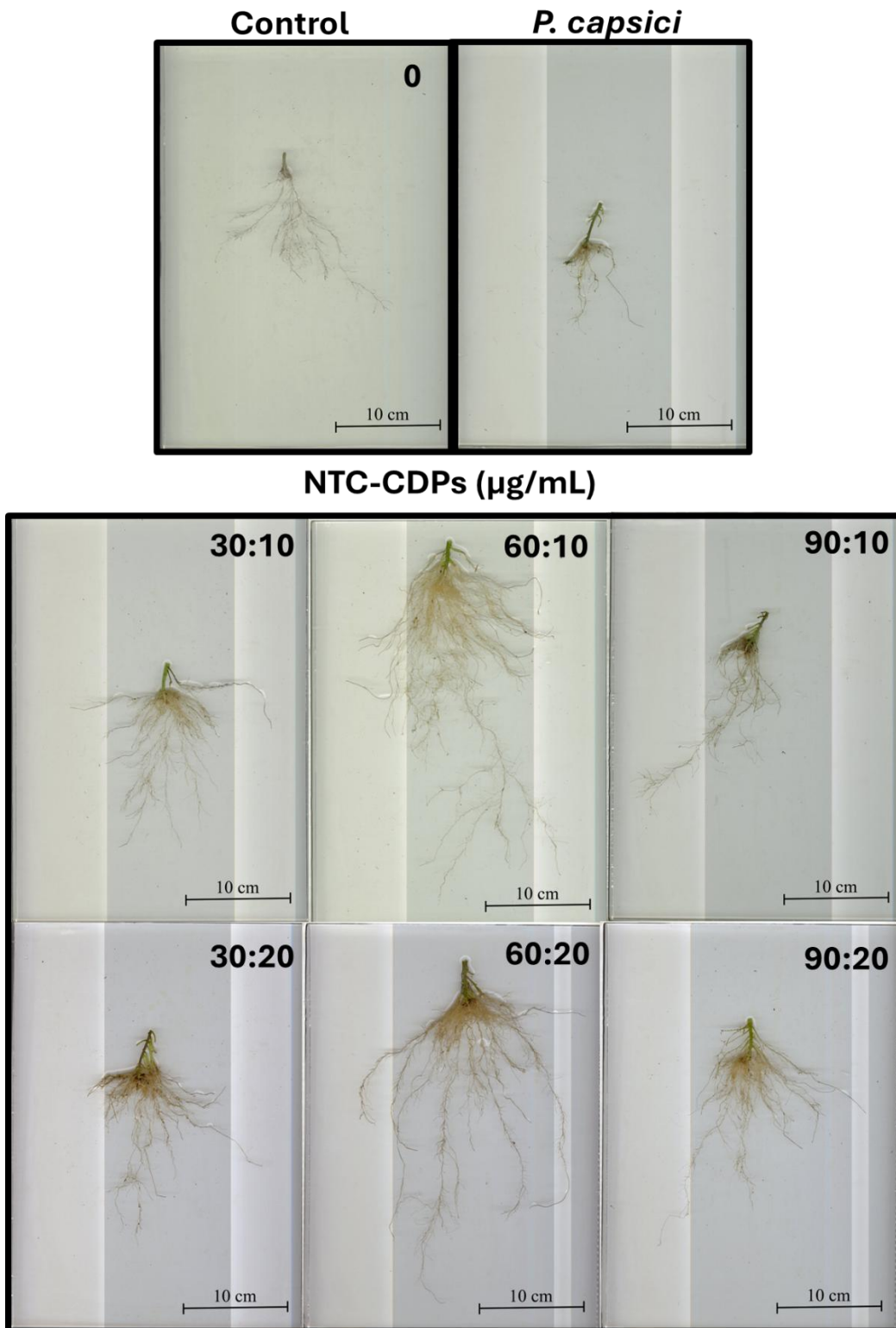


Figura 47. Imágenes que muestran el efecto de los NTC prístinos sobre la arquitectura radical de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra. Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

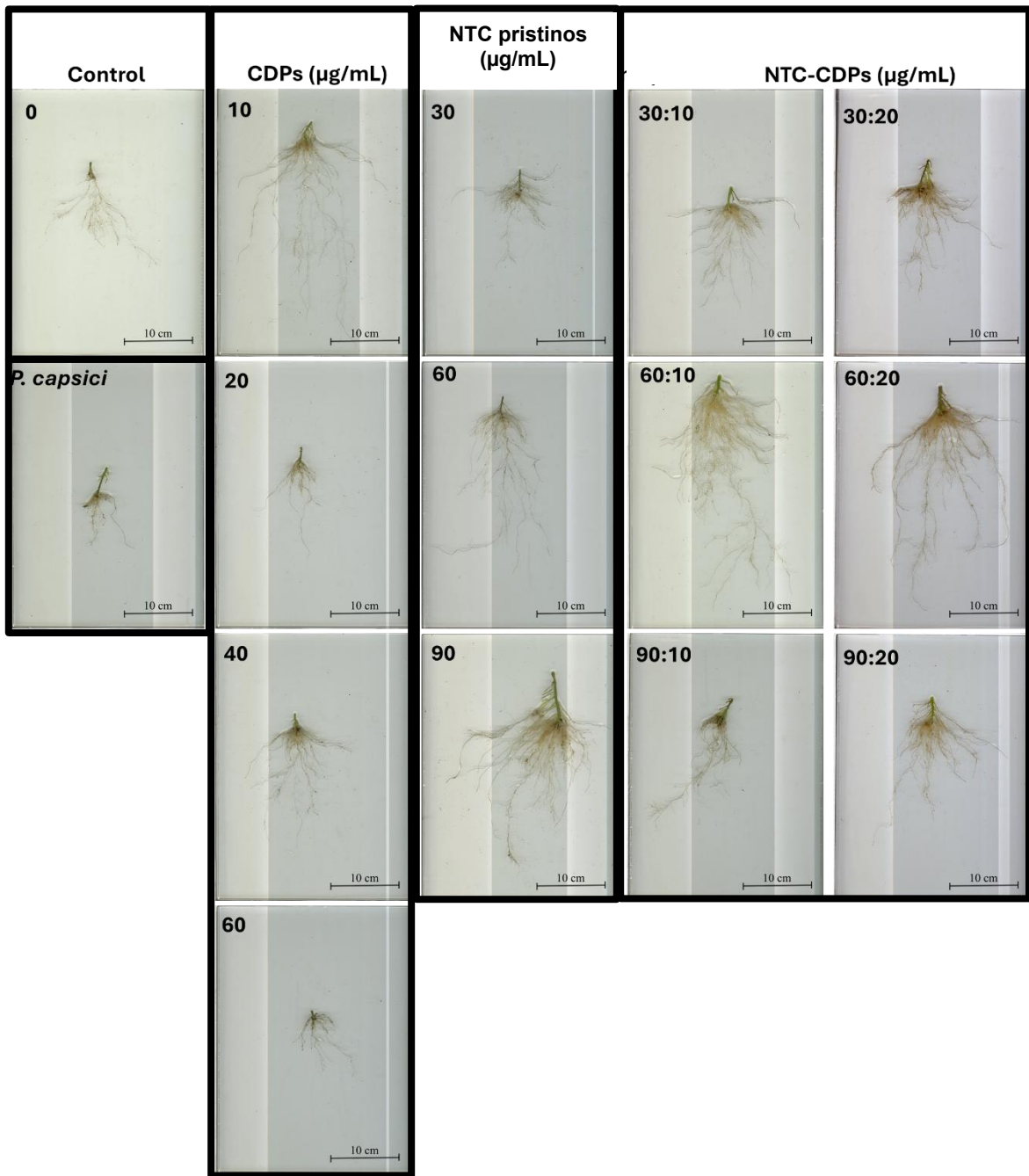


Fig. 48. Imágenes que muestran el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con CDPs sobre la arquitectura radical de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici* a los 70 días después de la siembra.

Las imágenes fueron obtenidas en escáner Epson Expression 11000XL.

6.9 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre la biomasa de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*

La figura 49 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre el peso fresco de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluado 70 días después de la siembra. Los resultados indicaron que el tratamiento con NTC-CDPs 60:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ presentó el mayor peso fresco en comparación con el control y el resto de los tratamientos evaluados. En contraste, las plantas tratadas con *P. capsici*, CDPs 60 $\mu\text{g}/\text{mL}$ NTC prístinos 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y 60 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y NTC-CDPs 90:10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ mostraron pesos frescos muy similar entre sí. Finalmente, los tratamientos con CDPs 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y NTC-CDPs 90:10 tuvieron un efecto inferior a todos los tratamientos.

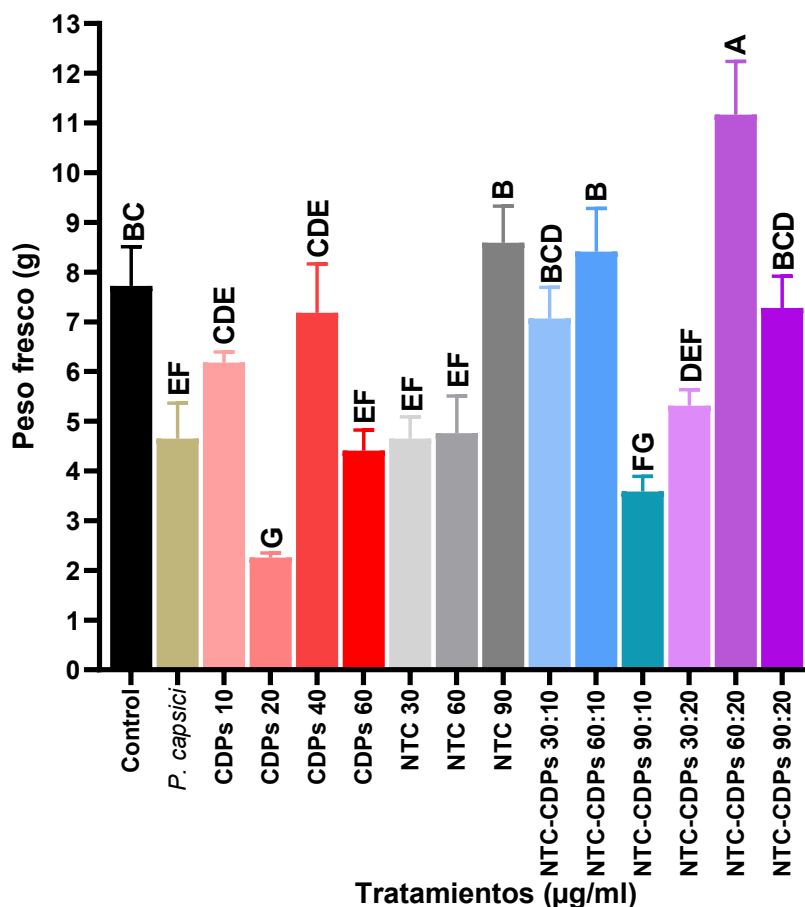


Figura 49. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el peso fresco, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 50 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre el peso seco de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluado 70 días después de la siembra. Los resultados mostraron que el tratamiento con NTC-CDPs 60:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ presentó el mayor peso seco, seguido por las plantas control. Por otro lado, los tratamientos con CDPs 10 y 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$, NTC prístinos 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y 60 $\mu\text{g}/\text{mL}$, así como los tratamientos con NTC-CDPs 90:10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y 30:20 $\mu\text{g}/\text{mL}$, mostraron pesos secos menores que el control, con valores similares a los observados en las plantas tratadas únicamente con *P. capsici*. Finalmente, el tratamiento con CDPs 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ presentó el menor peso seco entre todos los tratamientos.

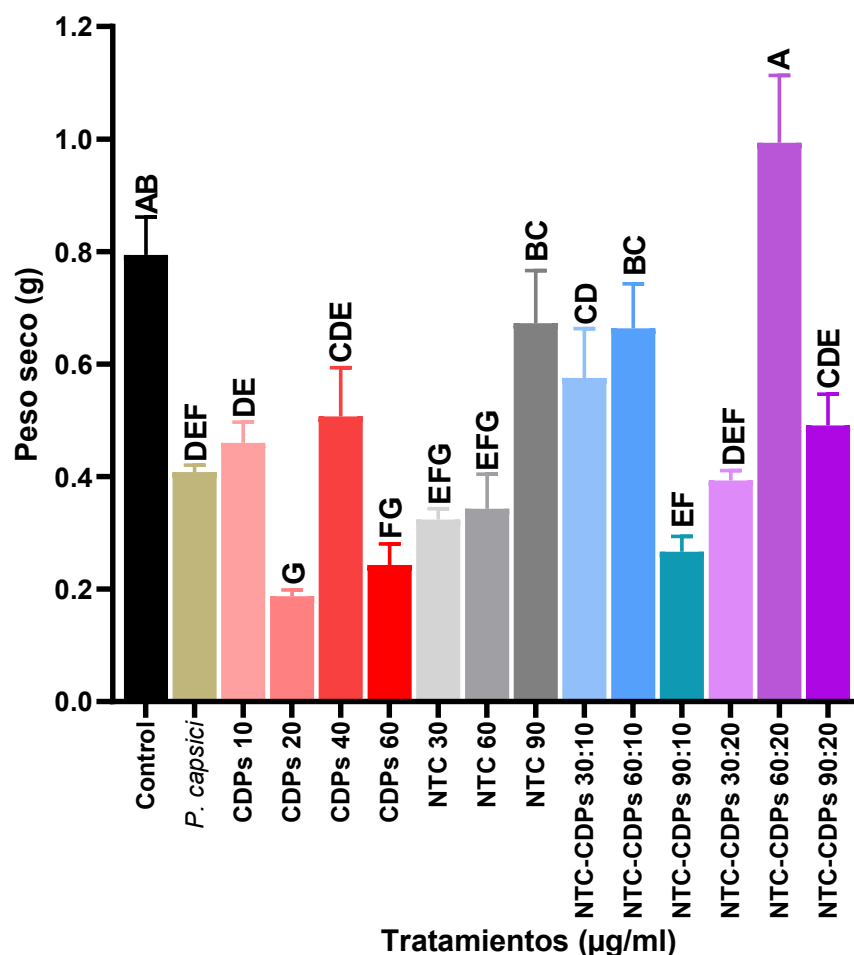


Figura 50. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs en el peso seco, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

6.10 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre las ROS de *S. lycopersicum*

La figura 51 muestra la intensidad de O_2^- , los resultados indican que *P. capsici* presenta un aumento significativo en la producción de O_2^- en comparación con el control, mientras que el tratamiento con CDPs a 10 y 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ mantiene valores elevados, pero ligeramente menores. En contraste, la aplicación de NTC reduce significativamente la producción de O_2^- respecto a *P. capsici*. Por otro lado, los tratamientos con NTC-CDPs a las diferentes concentraciones presentan una reducción general en la producción de O_2^- en comparación con *P. capsici* acercándose en algunos casos a los valores del control o incluso inferiores. Esto sugiere que los NTC-CDPs podrían mitigar el estrés oxidativo inducido por *P. capsici*.

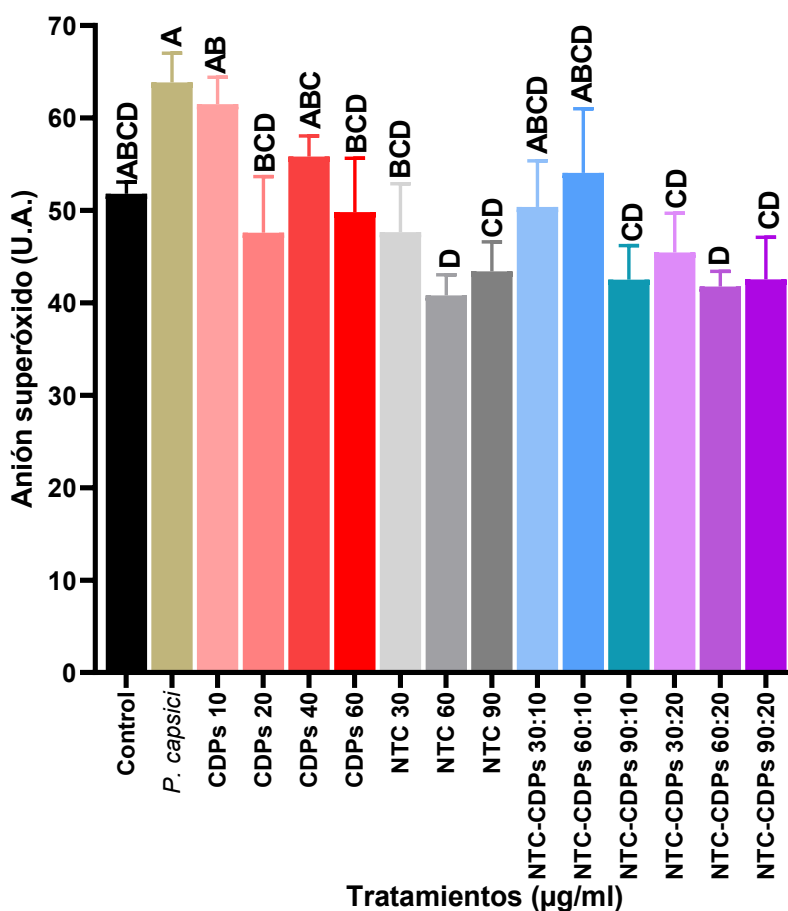


Figura 51. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el anión superóxido, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 52 muestra la intensidad de H₂O₂ donde se observa que *P. capsici* incrementa la producción de H₂O₂ respecto al control, mientras que las plantas suministradas con las distintas concentraciones de CDPs como los NTC prístinos a 30 µg/mL generan un aumento aún mayor en la producción del peróxido de hidrógeno, alcanzando los valores más altos. Por otro lado, los tratamientos con NTC-CDPs a las diferentes concentraciones presentan una reducción general en la producción de H₂O₂ en comparación con *P. capsici* y los CDPs individuales, manteniéndose en valores cercanos al control.

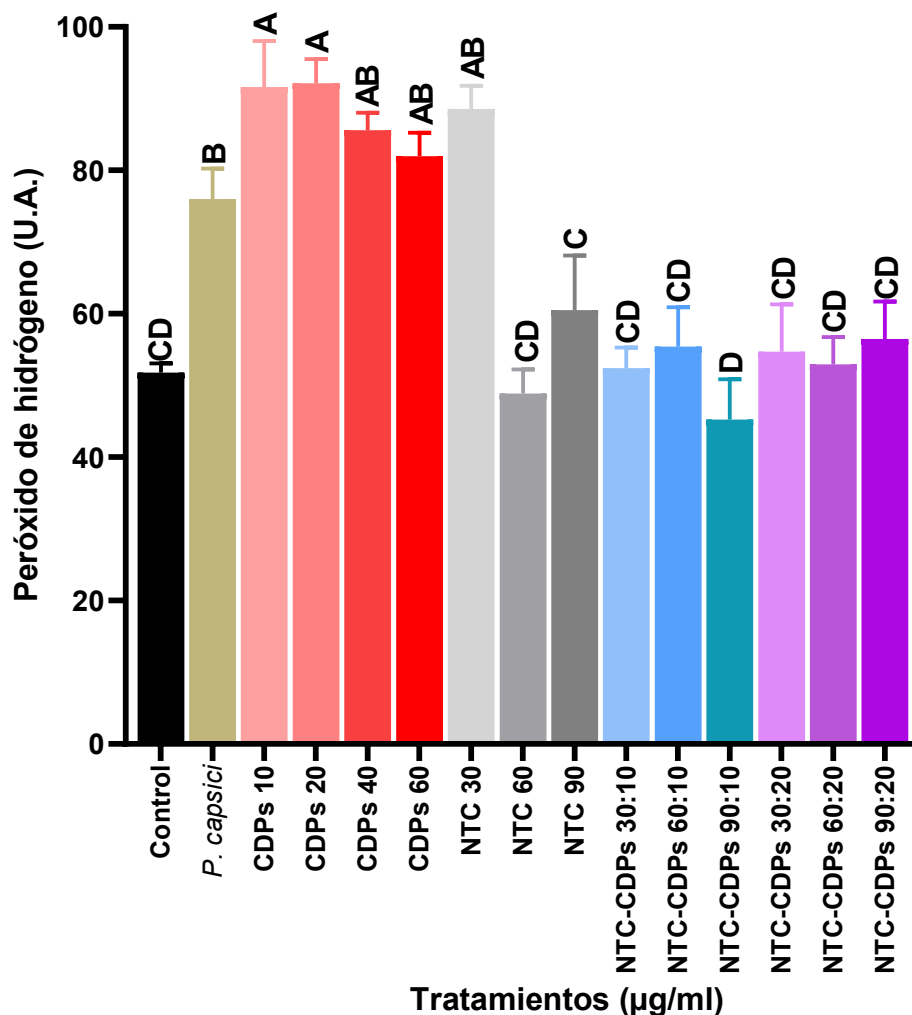


Figura 52. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el peróxido de hidrógeno, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

La figura 53 muestra la intensidad de las deshidrogenasas, se observa que *P. capsici* y CDPs 10 $\mu\text{g/mL}$ induce un aumento significativo en la actividad de las deshidrogenasas respecto al control. Por otro lado, el resto de los tratamientos presentan una reducción más pronunciada en la actividad de las deshidrogenasas en comparación con *P. capsici* y CDPs a 20 $\mu\text{g/mL}$, con valores más bajos siendo algunos similares al control.

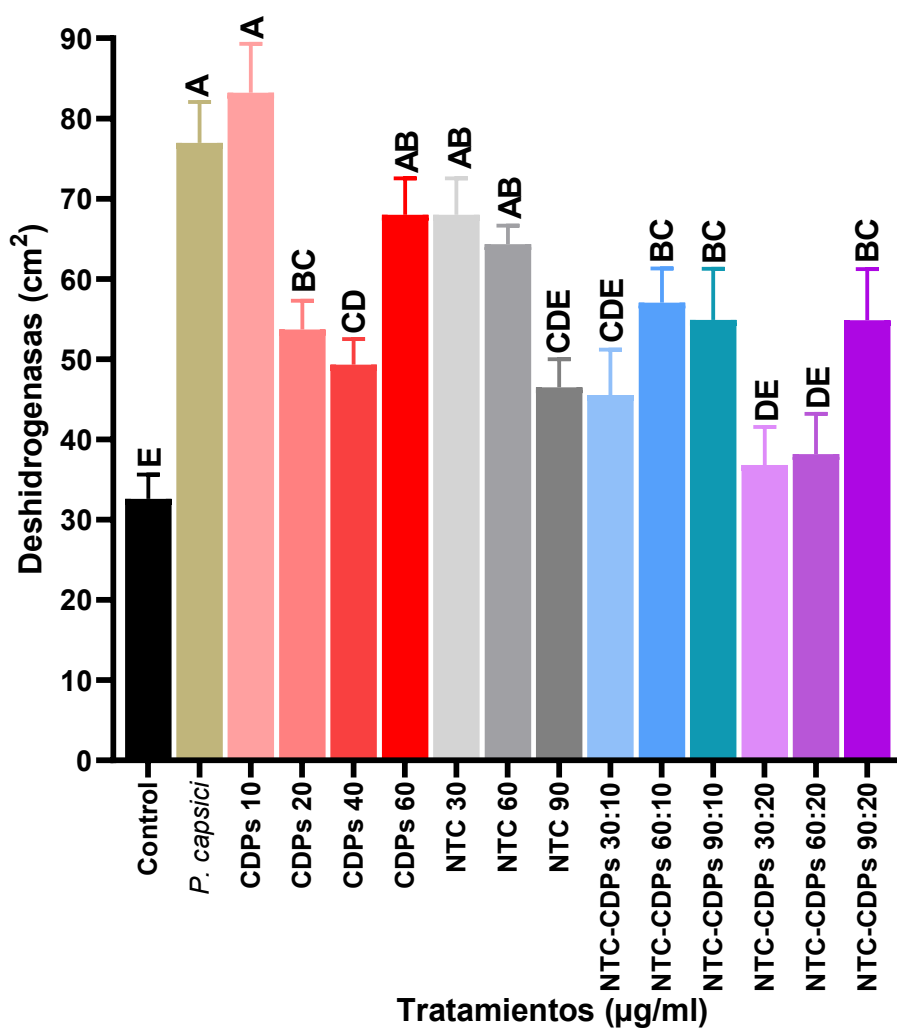


Figura 53. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre las deshidrogenasas, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

6.11 Efecto de los NTC funcionalizados con CDPs sobre el daño en *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*

La figura 54 muestra el efecto de los NTC prístinos, CDPs y NTC funcionalizados con CDPs sobre el daño en hojas de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*, evaluado 70 días después de la siembra. Los resultados mostraron que las plantas con CDPs 40µg/mL presentaron el mayor porcentaje de daño foliar incluso superando a las plantas tratadas solo con el patógeno. En contraste, los tratamientos con NTC 60 µg/mL y NTC-CDPs 60:10 µg/mL mostraron el menor daño foliar, destacándose como los tratamientos más efectivos para mitigar el daño causado por el fitopatógeno.

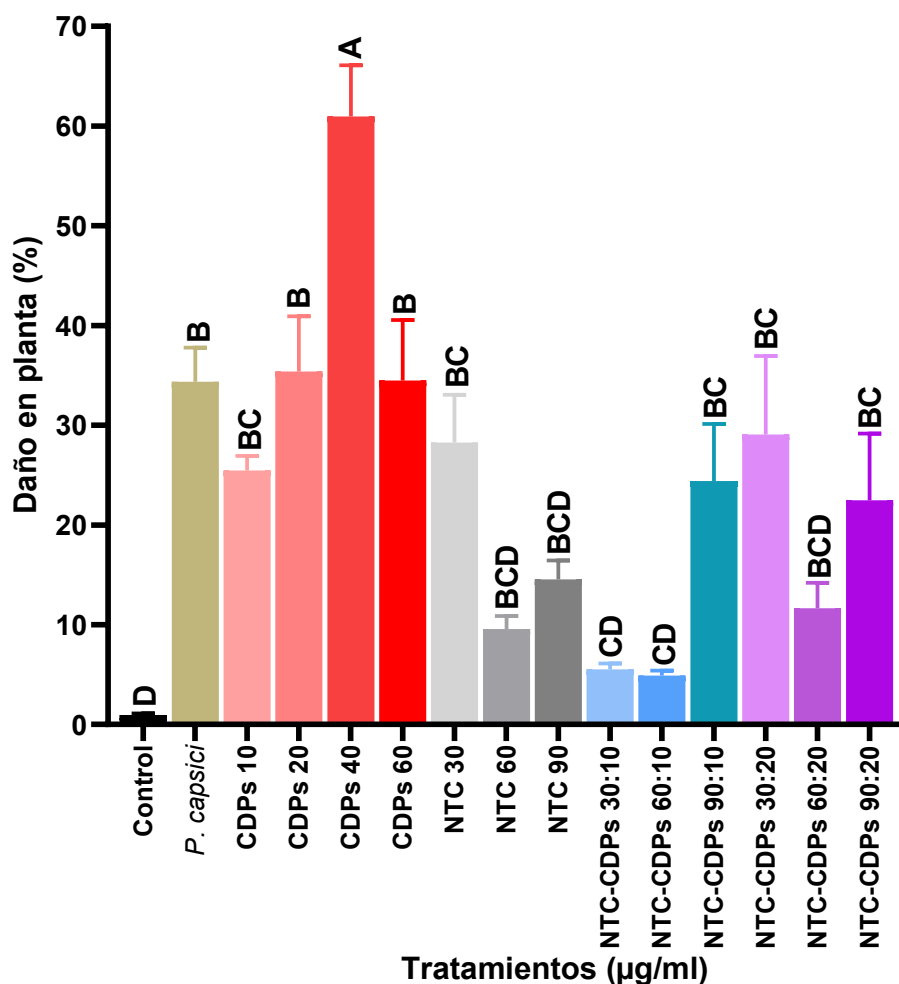


Figura 54. Efecto de los NTC con y sin funcionalizar con CDPs sobre el daño en plantas, 70 días después de la siembra de *S. lycopersicum* infectada con *P. capsici*.

Los datos fueron analizados con ANOVA-LSD con $p \leq 0.05$ la barra representa el error estándar. $n=5$. Las letras distintas representan diferencias significativas.

7. DISCUSIÓN

En este proyecto de investigación se comparó el efecto de los nanotubos de carbono (NTC), ciclodipéptidos (CDPs) y los nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos (NTC-CDPs), usando a los CDPs como elicitores para estimular la respuesta de defensa de *Solanum lycopersicum* ante la patogenicidad de *Phytophthora capsici*.

Para demostrar la funcionalización de los CDPs en los NTC, se utilizó la espectroscopía de Infrarrojo por transformada de Fourier, mediante esta técnica analítica se pudo observar en los espectros de los NTC prístinos grupos funcionales característicos de estas NPs [91]; mientras que en los espectros de los CDPs se observaron grupos funcionales representativos de estos, principalmente los grupos amino y carboxilo de los péptidos presentes [92]; mientras que en los NTC funcionalizados se logró observar grupos funcionales tanto de los NTC prístinos como de los CDPs, permitiéndonos de esta manera confirmar que sí se llevó a cabo correctamente la funcionalización. Finalmente, los análisis de los NTC-CDPs mostraron grupos funcionales tanto de los NTC prístinos como de los CDPs, permitiéndonos de esta manera confirmar que sí se llevó a cabo correctamente la funcionalización.

Al evaluar los resultados de las NPs y CDPs de forma individual o en sinergia sobre el jitomate, antes de ser inoculada con *Phytophthora*, los resultados que mostraron que al exponer la semilla previamente a su germinación, en contacto con los NTC prístinos o con los NTC -CDPs, la semilla en la mayoría de los tratamientos germinó más rápido, se obtuvo un porcentaje más alto de germinación y en el índice de vigor, comparado a las semillas que no se les aplicó ningún tratamiento. En contraste, se observó una respuesta opuesta al impregnar las semillas con CDPs. Los resultados obtenidos sobre los efectos de los NTC sobre la germinación ya se han documentado en estudios similares con otras plantas, atribuido a que poseen una estructura única que le confiere propiedades fisicoquímicas especiales, aunado a su tamaño que les permite interactuar con las membranas celulares, facilitando la entrada de agua y nutrientes en las semillas. En un estudio realizado por López *et al.*, (2020), observaron que la aplicación de NTC en semillas de jitomate resultó en una tasa de germinación mayor y un crecimiento acelerado de las plantas [93]. Esto se atribuye a la mejora en la penetración de agua y la absorción de nutrientes. Además, los NTC pueden funcionar como vehículo para la entrega controlada de compuestos como los CDPs. Algunos estudios han mostrado que los CDPs mejoran la tasa de germinación y el vigor de las

plántulas mediante la activación de sistemas de defensa endógenos en las semillas y la estimulación de fitorreguladores que actúan en este proceso de germinación [46]. Sobre los efectos de los CDPs sobre la respuesta en las semillas aún es muy escasa, sin embargo, se ha documentado que los CDPs actúan a nivel del balance de fitorreguladores, y es posible esto tenga un efecto en la disminución de la germinación que detectamos. Por otro lado, la funcionalización de los NTC con CDPs en este trabajo de investigación, es una estrategia emergente para mejorar y promover la germinación, sin embargo, a la fecha, no se han documentado resultados científicos equivalentes. En este contexto, nuestros hallazgos sugieren que la adición de CDPs a la superficie de los NTC puede mejorar la entrega de estos compuestos bioactivos directamente a las semillas, para favorecer el proceso de germinación. Aunado a esto, detectamos que al aplicar los NTC funcionalizados con CDPs, el efecto inicialmente negativo de los CDPs fue mitigado o incluso revertido al combinar los NTC con CDPs, lo que sugiere una sinergia entre estas nanopartículas que promueve un entorno más favorable para la germinación.

Al evaluar los efectos de los NTC y CDPs en las plántulas de jitomate, se pudo detectar que el desarrollo foliar y radical especialmente con los NTC funcionalizados con CDPs fue favorable, en las distintas variables respuestas analizadas, lo que sugiere que estas nanopartículas pueden influir en un crecimiento temprano más vigoroso y una arquitectura radical más desarrollada vegetal. Esto hace visible el potencial de los NTC funcionalizados no solo como agentes mitigadores de efectos adversos, sino como herramientas para optimizar el crecimiento vegetal. Estos resultados son similares a los documentados en distintas especies vegetales, donde se ha descrito que estos NTC mejoran el crecimiento vegetal, la biomasa, la longitud de los brotes y el desarrollo de las raíces en plantas como el jitomate y el maíz [94], [95], esta respuesta se ha atribuido a que los NTC pueden alterar los procesos fisiológicos, incluida la eficacia de la absorción de agua, el metabolismo del carbono y el nitrógeno y actuar sobre vías de señalización involucradas en regular los niveles de fitorreguladores [94], [95], [96], [97]. Por otro lado, si bien la información sobre los CDPs es escasa, se reportado que estos compuestos influyen en el crecimiento de las plantas y las respuestas al estrés a través de su papel en las vías de señalización. Cabe señalar que, en la respuesta de arquitectura radical, tanto en la longitud como en el volumen radical, la adición de CDPs 10 y 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y NTC-CDPs 90:10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ promovió el crecimiento radical, lo que

sugiere un posible efecto positivo en la actividad metabólica y absorción de agua. Además, se detectó un efecto contrario, al aplicar NTC prístinos 90 µg/mL y NTC-CDPs 30:10 µg/mL, que afectaron significativamente la raíz de la planta, la inhibición observada en estos tratamientos podría asociarse al estrés oxidativo provocado por la acumulación de nanopartículas no funcionalizadas, lo que interfiere en la elongación celular. Nuestros resultados a este nivel, mostraron que, en estos tratamientos con una disminución de la arquitectura radical, se generaron incrementos significativos en la producción de H₂O₂ y O₂, lo que sugiere esta estrecha relación de toxicidad y su efecto en la respuesta del sistema antioxidante.

Por otro lado, cuando evaluamos la respuesta de las plantas de jitomate que fueron infectadas con *P. capsici*, se observó que las plantas en donde se aplicaron los tratamientos tanto con los NTC prístinos como con los NTC- funcionalizados con CDPs, el desarrollo foliar y radical fue muy parecido a las plantas control, lo que sugiere que estos tratamientos contrarrestaron los efectos negativos del patógeno en la planta generando un efecto protector. Cabe destacar, que, en algunos tratamientos, en especial donde se realizó la sinergia entre los NTC -CDPs, no solo no se observaron daños por el patógeno, sino que además se estimuló el crecimiento de la planta, tanto en el área foliar como en la raíz. Este efecto positivo podría estar asociado con una mayor disponibilidad de nutrientes o una mejor regulación del crecimiento vegetal facilitada por la interacción entre los NTC y los CDPs, se ha demostrado que los NTC promueven el crecimiento de las plantas al mejorar la biomasa de raíces y brotes, así como al aumentar el número de flores y frutos en plantas como jitomate [98], [99]. También pueden mejorar la absorción de agua y la absorción de nutrientes, que son cruciales para la acumulación de biomasa [100]. El efecto positivo en el desarrollo vegetal y los incrementos en biomasa, también se han atribuido a la participación de estas nanopartículas en vías de señalización clave como la vía de la Target of Rapamicine (TOR), o sobre la estimulación de fitorreguladores que actúan directamente sobre la división celular.

Además de estimular el desarrollo vegetal, se ha documentado que las NPs tienen un rol significativa en la respuesta de defensa de las plantas, al poseer propiedades antimicrobianas y estimular la producción de metabolitos de respuesta al estrés, como el ácido jasmónico, el ácido salicílico y el ABA, que están estrechamente relacionados con la defensa de la planta ante el estrés biótico y abiótico, que además está estrechamente relacionado con el sistema

antioxidante y la formación de especies reactivas de oxígeno. Se ha reportado que los NTC pueden disminuir el impacto negativo de patógenos como *Alternaria solani* en los cultivos de jitomate al mejorar el sistema de defensa antioxidante de la planta y la capacidad fotosintética, lo que conduce a un mayor rendimiento de la fruta y la biomasa seca [100].

La producción de anión superóxido (O_2^-) en plantas no infectadas con *P. capsici*, los CDPs a 20, 40 y 60 $\mu\text{g/mL}$ incrementaron la producción de O_2^- , mientras que los NTC-CDPs redujeron notablemente su intensidad, con los valores más bajos en 30:10 y 90:20 $\mu\text{g/mL}$, sugiriendo que los NTC-CDPs muestran un efecto protector contra el estrés oxidativo. En contraste, en las plantas infectadas con *P. capsici*, se observó un incremento significativo en la producción de O_2^- , indicando una respuesta de defensa ante el patógeno. Los CDPs a 10 $\mu\text{g/mL}$ tienen niveles elevados de O_2^- , mientras que los tratamientos de NTC lograron reducirlo de manera significativa. Sin embargo, los NTC-CDPs mostraron una reducción significativa estando por debajo de las plantas control sin el fitopatógeno, sugiriendo que al llevar la funcionalización de los NTC con los CDPs están mitigando el daño oxidativo causado por la infección de este patógeno. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que reportan como el estrés biótico incrementa la producción de ROS, y que ciertos compuestos modulan el efecto. Torres *et al.*, (2006) explican que la producción de ROS es una respuesta clave en la señalización de defensa [102], mientras que Apel & Hirt (2004) destacan que su acumulación puede generar daño celular si no se regula adecuadamente [103].

La producción del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en plantas sin infección con el fitopatógeno, los NTC prístinos redujeron la producción de H_2O_2 especialmente a 60 $\mu\text{g/mL}$, mientras que los NTC-CDPs mostraron respuestas variables con un aumento en 60:10 $\mu\text{g/mL}$ y una reducción 30:10 y 60:20. En plantas infectadas, *P. capsici* incrementó significativamente la producción de H_2O_2 . Los CDPs a 10 y 20 $\mu\text{g/mL}$ intensificaron aún más esta producción, al igual que los NTC a 30 $\mu\text{g/mL}$. Sin embargo, los NTC a 60 $\mu\text{g/mL}$ y los tratamientos con NTC-CDPs lograron reducir la producción de H_2O_2 , alcanzando valores similares al control. El aumento de H_2O_2 en plantas infectadas coincide con lo reportado por Foyer & Noctor (2005), quienes mencionan que este compuesto juega un papel dual como señalizador de defensa y como inductor de estrés oxidativo [104]. La reducción observada con NTC-CDPs sugiere que este tratamiento podría ayudar a regular los niveles de ROS, minimizando el daño

celular.

La actividad de las deshidrogenasas en plantas sin presencia de *P. capsici* los CDPs incrementaron significativamente la actividad de las deshidrogenasas, especialmente a 20 µg/mL. Los NTC también promovieron un aumento, pero sin diferencias significativas entre concentraciones. En cambio, los NTC-CDPs mostraron valores similares al control, excepto 60:20 µg/mL, que presentó un ligero aumento. En plantas infectadas con *P. capsici* indujo un incremento significativo en la actividad de estas enzimas. Los CDPs a 10 y 20 µg/mL también mostraron valores elevados, pero menores en comparación con la infección. Los NTC a 90 µg/mL redujeron la actividad de las deshidrogenasas, acercándose al control. Los NTC-CDPs a 30:20 y 60:20 µg/mL presentaron una disminución más pronunciada en comparación con *P. capsici* y los CDPs individuales. Estos resultados sugieren que los NTC-CDPs podrían ayudar a regular la actividad metabólica en condiciones de estrés biótico, evitando una sobrecarga enzimática. Benezzer-Benezzer *et al.*, (2008), mencionan que la modulación de la actividad enzimática es clave para la homeostasis celular en situaciones de estrés [105].

El análisis de los datos revela que las plantas tratadas únicamente con CDPs a 40 µg/mL están estimulando la infección de *P. capsici*, sin embargo, las concentraciones de CDPs en general produciendo este estímulo. Este resultado sugiere que, aunque las CDPs pueden poseer propiedades beneficiosas en otros contextos, en la concentración evaluada no ofrecen protección frente al daño provocado por el patógeno. Es posible que esta baja efectividad se deba a una limitada interacción de las CDPs con los mecanismos de defensa de la planta o a una dosificación insuficiente para inducir una respuesta positiva. Por otro lado, los tratamientos con NTC funcionalizados con CDPs a concentraciones de 60:10 µg/mL resultaron ser los más efectivos para reducir el daño foliar, lo que nos indica una sinergia positiva entre los NTC y las CDPs.

8. CONCLUSIÓN

La funcionalización de los nanotubos de carbono con los ciclodipéptidos modificó distintas etapas del desarrollo de *Solanum lycopersicum*, desde la germinación, o en plántulas afectando el sistema radical-foliar aumentando la biomasa y fortalecimiento de la planta al incrementar la radícula lo que contribuye a un incremento en la longitud y el diámetro del tallo. Por otra parte, los NTC-CDPs provocaron que ante la presencia de *P. capsici* estas plantas tuvieran una disminución del anión superóxido, peróxido de hidrógeno y las deshidrogenasas, de esta manera las plantas reforzaron su capacidad de adaptación y resistencia a la presencia de este fitopatógeno disminuyendo significativamente el daño en *S. lycopersicum*. Los resultados evidencian que los CDPs como elicitores funcionalizados con NTC, tienen un potencial como agentes promotores de crecimiento además de servir como moduladores del estrés oxidativo en *S. lycopersicum* ante la patogenicidad de *P. capsici*.

10. REFERENCIAS

- [1] S. Bayda, M. Adeel, T. Tuccinardi, M. Cordani, and F. Rizzolio, “The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine,” 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/molecules25010112.
- [2] R. Prasad, A. Bhattacharyya, and Q. D. Nguyen, “Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives,” Jun. 20, 2017, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fmicb.2017.01014.
- [3] R. Liu and R. Lal, “Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions,” May 01, 2015, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.104.
- [4] C. An *et al.*, “Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture,” Dec. 01, 2022, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s12951-021-01214-7.
- [5] O. S. Alimi, J. Farner Budarz, L. M. Hernandez, and N. Tufenkji, “Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport,” Feb. 20, 2018, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acs.est.7b05559.
- [6] C. M. Rico, S. Majumdar, M. Duarte-Gardea, J. R. Peralta-Videa, and J. L. Gardea-Torresdey, “Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain,” Apr. 27, 2011. doi: 10.1021/jf104517j.
- [7] R. Grillo, B. D. Mattos, D. R. Antunes, M. M. L. Forini, F. A. Monikh, and O. J. Rojas, “Foliage adhesion and interactions with particulate delivery systems for plant nanobionics and intelligent agriculture,” Apr. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.nantod.2021.101078.
- [8] P. Vega-Vásquez, N. S. Mosier, and J. Irudayaraj, “Nanoscale Drug Delivery Systems: From Medicine to Agriculture,” Feb. 18, 2020, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fbioe.2020.00079.
- [9] S. Ali, A. Mehmood, and N. Khan, “Uptake, Translocation, and Consequences of Nanomaterials on Plant Growth and Stress Adaptation,” 2021, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2021/6677616.
- [10] E. Navarro *et al.*, “Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi,” Jul. 2008. doi: 10.1007/s10646-008-0214-0.
- [11] C. M. Rico, S. Majumdar, M. Duarte-Gardea, J. R. Peralta-Videa, and J. L. Gardea-Torresdey, “Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain,” Apr. 27, 2011. doi: 10.1021/jf104517j.
- [12] S. Ali, A. Mehmood, and N. Khan, “Uptake, Translocation, and Consequences of Nanomaterials on Plant Growth and Stress Adaptation,” 2021, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2021/6677616.
- [13] G. V. Lowry, A. Avellan, and L. M. Gilbertson, “Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution,” *Nat Nanotechnol*, vol. 14, no. 6, pp. 517–522, Jun. 2019, doi: 10.1038/s41565-019-0461-7.
- [14] M. Kah, R. S. Kookana, A. Gogos, and T. D. Bucheli, “A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues,” *Nat*

- Nanotechnol*, vol. 13, no. 8, pp. 677–684, Aug. 2018, doi: 10.1038/s41565-018-0131-1.
- [15] S. Afsheen, H. Naseer, T. Iqbal, M. Abrar, A. Bashir, and M. Ijaz, “Synthesis and characterization of metal sulphide nanoparticles to investigate the effect of nanoparticles on germination of soybean and wheat seeds,” *Mater Chem Phys*, vol. 252, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123216.
- [16] S. Afzal, D. Sharma, and N. K. Singh, “Eco-friendly synthesis of phytochemical-capped iron oxide nanoparticles as nano-priming agent for boosting seed germination in rice (*Oryza sativa* L.),” 2021, doi: 10.1007/s11356-020-12056-5/Published.
- [17] D. Sardella, R. Gatt, and V. P. Valdramidis, “Physiological effects and mode of action of ZnO nanoparticles against postharvest fungal contaminants,” *Food Research International*, vol. 101, pp. 274–279, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.foodres.2017.08.019.
- [18] A. A. AlHarethi, Q. Y. Abdullah, H. J. AlJobory, A. R. M. Anam, R. A. Arafa, and K. Y. Farroh, “Zinc oxide and copper oxide nanoparticles as a potential solution for controlling *Phytophthora infestans*, the late blight disease of potatoes,” *Discover Nano*, vol. 19, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1186/s11671-024-04040-6.
- [19] M. R. Khan and T. F. Rizvi, “Nanotechnology: Scope and Application in Plant Disease Management,” *Plant Pathol J (Faisalabad)*, vol. 13, no. 3, pp. 214–231, Jun. 2014, doi: 10.3923/ppj.2014.214.231.
- [20] M.-F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli, and R. S. Ruoff, “Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties,” 2000.
- [21] M. F. L. De Volder, S. H. Tawfick, R. H. Baughman, and A. J. Hart, “Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications.” [Online]. Available: <http://science.sciencemag.org/>
- [22] S. Anandhi, V. R. Saminathan, P. Yasotha, P. T. Saravanan, and V. Rajanbabu, “Nanopesticides in pest management,” ~ 685 ~ *Journal of Entomology and Zoology Studies*, vol. 8, no. 4, pp. 685–690, 2020, [Online]. Available: <http://www.entomoljournal.com>
- [23] D. R. Katti, A. Sharma, S. M. Pradhan, and K. S. Katti, “Carbon nanotube proximity influences rice DNA,” *Chem Phys*, vol. 455, pp. 17–22, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.chemphys.2015.03.015.
- [24] M. Khodakovskaya *et al.*, “Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth,” *ACS Nano*, vol. 3, no. 10, pp. 3221–3227, Oct. 2009, doi: 10.1021/nn900887m.
- [25] M. V. Khodakovskaya, K. De Silva, A. S. Biris, E. Dervishi, and H. Villagarcia, “Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells,” *ACS Nano*, vol. 6, no. 3, pp. 2128–2135, Mar. 2012, doi: 10.1021/nn204643g.
- [26] M. V. Khodakovskaya *et al.*, “Carbon nanotubes as plant growth regulators: Effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community,” *Small*, vol. 9, no. 1, pp. 115–123, Jan. 2013, doi: 10.1002/sml.201201225.
- [27] M. C. Martínez-Ballesta, L. Zapata, N. Chalbi, and M. Carvajal, “Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity,” *J Nanobiotechnology*, vol. 14, no. 1, Jun. 2016, doi: 10.1186/s12951-016-0199-4.
- [28] D. F. Rodrigues and M. Elimelech, “Toxic effects of single-walled carbon nanotubes in the development of *E. Coli* biofilm,” *Environ Sci Technol*, vol. 44, no. 12, pp. 4583–4589, Jun. 2010, doi: 10.1021/es1005785.
- [29] J. E. Cañas *et al.*, “Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled

- carbon nanotubes on root elongation of select crop species,” *Environ Toxicol Chem*, vol. 27, no. 9, pp. 1922–1931, 2008, doi: 10.1897/08-117.1.
- [30] H. Chen *et al.*, “Broad-spectrum antibacterial activity of carbon nanotubes to human gut bacteria,” *Small*, vol. 9, no. 16, pp. 2735–2746, Aug. 2013, doi: 10.1002/sml.201202792.
- [31] S. Kang, M. S. Mauter, and M. Elimelech, “Physicochemical determinants of multiwalled carbon nanotube bacterial cytotoxicity,” *Environ Sci Technol*, vol. 42, no. 19, pp. 7528–7534, Oct. 2008, doi: 10.1021/es8010173.
- [32] M. Azizi-Lalabadi, H. Hashemi, J. Feng, and S. M. Jafari, “Carbon nanomaterials against pathogens; the antimicrobial activity of carbon nanotubes, graphene/graphene oxide, fullerenes, and their nanocomposites,” Oct. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cis.2020.102250.
- [33] M. A. Saleemi, M. H. Fouladi, P. V. C. Yong, and E. H. Wong, “Elucidation of antimicrobial activity of non-covalently dispersed carbon nanotubes,” *Materials*, vol. 13, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13071676.
- [34] J. Deb, D. Paul, U. Sarkar, and P. W. Ayers, “Characterizing the sensitivity of bonds to the curvature of carbon nanotubes,” *J Mol Model*, vol. 24, no. 9, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00894-018-3793-6.
- [35] J. E. Can˜as *et al.*, “EFFECTS OF FUNCTIONALIZED AND NONFUNCTIONALIZED SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES ON ROOT ELONGATION OF SELECT CROP SPECIES,” 2008.
- [36] P. Liu, “Modifications of carbon nanotubes with polymers,” *Eur Polym J*, vol. 41, no. 11, pp. 2693–2703, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.05.017.
- [37] A. Hirsch, “Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes,” 2002.
- [38] J. Liu, A. G. Rinzler, and H. Dai, “Fullerene Pipes,” *Earth Planet. Sci. Lett*, vol. 376, p. 37, 1995, [Online]. Available: www.sciencemag.org
- [39] C. Gao, Z. Guo, J. H. Liu, and X. J. Huang, “The new age of carbon nanotubes: An updated review of functionalized carbon nanotubes in electrochemical sensors,” *Nanoscale*, vol. 4, no. 6, pp. 1948–1963, Mar. 2012, doi: 10.1039/c2nr11757f.
- [40] X. Lu, Z. Chen, and P. V. R. Schleyer, “Are stone-wales defect sites always more reactive than perfect sites in the sidewalls of single-wall carbon nanotubes?,” *J Am Chem Soc*, vol. 127, no. 1, pp. 20–21, Jan. 2005, doi: 10.1021/ja0447053.
- [41] K. Suzuki, “Elicitor Signal Transduction That Leads to Hypersensitive Reaction in Cultured Tobacco Cells,” 1999.
- [42] N. Benhamou, “Elicitor-induced plant defence pathways oooo,” 1996.
- [43] N. Canu *et al.*, “Incorporation of Non-canonical Amino Acids into 2,5-Diketopiperazines by Cyclodipeptide Synthases,” *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 57, no. 12, pp. 3118–3122, Mar. 2018, doi: 10.1002/anie.201712536.
- [44] A. K. Mishra, J. Choi, S. J. Choi, and K. H. Baek, “Cyclodipeptides: An overview of their biosynthesis and biological activity,” Oct. 01, 2017, *MDPI AG*. doi: 10.3390/molecules22101796.
- [45] J. E. González and N. D. Keshavan, “Messing with Bacterial Quorum Sensing,” *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 70, no. 4, pp. 859–875, Dec. 2006, doi: 10.1128/mmbr.00002-06.
- [46] R. Ortiz-Castro, C. Díaz-Pérez, M. Martínez-Trujillo, R. E. Del Río, J. Campos-García, and J. López-Bucio, “Transkingdom signaling based on bacterial cyclodipeptides with auxin activity in plants,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 108, no.

- 17, pp. 7253–7258, Apr. 2011, doi: 10.1073/pnas.1006740108.
- [47] S. Dela Ahator and L. Zhang, “Small Is Mighty-Chemical Communication Systems in *Pseudomonas Aeruginosa*,” vol. 24, no. 1, 2019, doi: 10.1146/annurev-micro-020518.
- [48] K. Papenfort and B. L. Bassler, “Quorum sensing signal-response systems in Gram-negative bacteria,” Sep. 01, 2016, *Nature Publishing Group*. doi: 10.1038/nrmicro.2016.89.
- [49] R. S. Smith and B. H. Iglewski, “*P. aeruginosa* quorum-sensing systems and virulence,” 2003, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/S1369-5274(03)00008-0.
- [50] S. Lumba, S. Cutler, and P. McCourt, “Plant nuclear hormone receptors: A role for small molecules in protein-protein interactions,” Nov. 10, 2010. doi: 10.1146/annurev-cellbio-100109-103956.
- [51] V. G. Checker, H. R. Kushwaha, P. Kumari, and S. Yadav, “Role of phytohormones in plant defense: Signaling and cross talk,” in *Molecular Aspects of Plant-Pathogen Interaction*, Springer Singapore, 2018, pp. 159–184. doi: 10.1007/978-981-10-7371-7_7.
- [52] S. Fonseca, J. M. Chico, and R. Solano, “The jasmonate pathway: the ligand, the receptor and the core signalling module,” Oct. 01, 2009. doi: 10.1016/j.pbi.2009.07.013.
- [53] Y. H. Gao, Y. Yu, X. G. Hu, Y. J. Cao, and J. Z. Wu, “Imaging of jasmonic acid binding sites in tissue,” *Anal Biochem*, vol. 440, no. 2, pp. 205–211, 2013, doi: 10.1016/j.ab.2013.04.032.
- [54] J. G. Turner, C. Ellis, and A. Devoto, “The jasmonate signal pathway,” *Plant Cell*, vol. 14, no. SUPPL., 2002, doi: 10.1105/tpc.000679.
- [55] R. A. Creelman, M. L. Tierney, and J. E. Mullet, “Jasmonic acid/methyl jasmonate accumulate in wounded soybean hypocotyls and modulate wound gene expression (chalcone synthase/vegetative storage protein/prolne-rich cell wail protein),” 1992.
- [56] R. Lira, B. Méndez, and I. Vera, “Producción de Especies Reactivas de Oxígeno en Plantas Elicitadas con Nanopartículas,” *AGRONANOTECNOLOGIA*, pp. 80–85, 2012.
- [57] K. Apel and H. Hirt, “Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction,” 2004. doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701.
- [58] D. Lapin and G. Van den Ackerveken, “Susceptibility to plant disease: More than a failure of host immunity,” Oct. 2013. doi: 10.1016/j.tplants.2013.05.005.
- [59] P. Schulze-Lefert and R. Panstruga, “A molecular evolutionary concept connecting nonhost resistance, pathogen host range, and pathogen speciation,” Mar. 2011. doi: 10.1016/j.tplants.2011.01.001.
- [60] V. Bonardi and J. L. Dangl, “How complex are intracellular immune receptor signaling complexes?,” Oct. 23, 2012, *Frontiers Research Foundation*. doi: 10.3389/fpls.2012.00237.
- [61] M. Muthamilarasan and M. Prasad, “Plant innate immunity: An updated insight into defense mechanism,” Jun. 2013. doi: 10.1007/s12038-013-9302-2.
- [62] L. Pritchard and P. Birch, “A systems biology perspective on plant-microbe interactions: Biochemical and structural targets of pathogen effectors,” Apr. 2011. doi: 10.1016/j.plantsci.2010.12.008.
- [63] I. L. Boyd, P. H. Freer-Smith, C. A. Gilligan, and H. C. J. Godfray, “The consequence of tree pests and diseases for ecosystem services,” 2013. doi: 10.1126/science.1235773.

- [64] A. C. Kushalappa, K. N. Yogendra, and S. Karre, “Plant Innate Immune Response: Qualitative and Quantitative Resistance,” *CRC Crit Rev Plant Sci*, vol. 35, no. 1, pp. 38–55, Jan. 2016, doi: 10.1080/07352689.2016.1148980.
- [65] S. T. Smale, “Dimer-specific regulatory mechanisms within the NF- κ B family of transcription factors,” 2012. [Online]. Available: www.immunologicalreviews.com
- [66] J. Bigeard, J. Colcombet, and H. Hirt, “Signaling mechanisms in pattern-triggered immunity (PTI),” Apr. 06, 2015, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.molp.2014.12.022.
- [67] J. Wu and I. T. Baldwin, “New insights into plant responses to the attack from insect herbivores,” Dec. 01, 2010. doi: 10.1146/annurev-genet-102209-163500.
- [68] M. Guo, F. Tian, Y. Wamboldt, and J. R. Alfano, “The Majority of the Type III Effector Inventory of *Pseudomonas syringae* pv. tomato DC3000 Can Suppress Plant Immunity,” / *1069 MPMI*, vol. 22, no. 9, pp. 1069–1080, 2009, doi: 10.1094/MPMI.
- [69] J. D. G. Jones and J. L. Dangl, “The plant immune system,” Nov. 16, 2006. doi: 10.1038/nature05286.
- [70] J. D. G. Jones and J. L. Dangl, “The plant immune system,” Nov. 16, 2006. doi: 10.1038/nature05286.
- [71] J. A. Kuc and S. Tuzun, “Proposed Definitions Related to Induced Disease Resistance,” *Biocontrol Sci Technol*, vol. 2, no. 4, pp. 349–351, Jan. 1992, doi: 10.1080/09583159209355251.
- [72] A. F. Ross, “Systemic Acquired Resistance Induced by Localized Virus Infections in Plants’,” 1961.
- [73] U. Conrath *et al.*, “Priming: Getting Ready for Battle Prime-A-Plant Group,” *Mol Plant Microbe Interact*, vol. 19, no. 10, pp. 1062–1071, 2006, doi: 10.1094/MPMI.
- [74] A. Corina Vlot, D. A. Dempsey, and D. F. Klessig, “Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease,” *Annu Rev Phytopathol*, vol. 47, pp. 177–206, Sep. 2009, doi: 10.1146/annurev.phyto.050908.135202.
- [75] L. C. Van Loon, P. A. H. M. Bakker, and C. M. J. Pieterse, “SYSTEMIC RESISTANCE INDUCED BY RHIZOSPHERE BACTERIA,” 1998. [Online]. Available: www.annualreviews.org
- [76] S. Pandey *et al.*, “Early blight disease management by herbal nanoemulsion in *Solanum lycopersicum* with bio-protective manner,” *Ind Crops Prod*, vol. 150, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112421.
- [77] T. Mengiste, “Plant immunity to necrotrophs,” Sep. 2012. doi: 10.1146/annurev-phyto-081211-172955.
- [78] F. Runge *et al.*, “The inclusion of downy mildews in a multi-locus-dataset and its reanalysis reveals a high degree of paraphyly in *Phytophthora*,” *IMA Fungus*, vol. 2, no. 2, pp. 163–171, Dec. 2011, doi: 10.5598/imafungus.2011.02.02.07.
- [79] C. Brasier, B. Scanu, D. Cooke, and T. Jung, “*Phytophthora*: an ancient, historic, biologically and structurally cohesive and evolutionarily successful generic concept in need of preservation,” *IMA Fungus*, vol. 13, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s43008-022-00097-z.
- [80] S. Kamoun *et al.*, “The Top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology,” *Mol Plant Pathol*, vol. 16, no. 4, pp. 413–434, May 2015, doi: 10.1111/mpp.12190.
- [81] K. H. Lamour, R. Stam, J. Jupe, and E. Huitema, “The oomycete broad-host-range pathogen *Phytophthora capsici*,” *Mol Plant Pathol*, vol. 13, no. 4, pp. 329–337, May 2012, doi: 10.1111/j.1364-3703.2011.00754.x.
- [82] J. A. Ruiz-Chután, J. E. Berdúo-Sandoval, and A. Sánchez-Pérez, “Diversidad

- genética de aislados de *Phytophthora infestans* colectados en zonas productoras de papa y tomate de Guatemala,” 2018.
- [83] J. Jupe *et al.*, “Phytophthora capsici-tomato interaction features dramatic shifts in gene expression associated with a hemi-biotrophic lifestyle,” *Genome Biol*, vol. 14, no. 6, Jun. 2013, doi: 10.1186/gb-2013-14-6-r63.
- [84] A. I. Raya-Hernández *et al.*, “Well known microbial plant growth promoters provoke plant growth suppression and increase chili pepper wilt caused by the root pathogen *Phytophthora capsici*,” *Eur J Plant Pathol*, vol. 167, no. 4, pp. 787–799, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10658-023-02711-1.
- [85] I. Matsiakh and A. Menkis, “An Overview of *Phytophthora* Species on Woody Plants in Sweden and Other Nordic Countries,” May 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/microorganisms11051309.
- [86] S. Kimura and N. Sinha, “Tomato (*Solanum lycopersicum*): A model fruit-bearing crop,” *Cold Spring Harb Protoc*, vol. 3, no. 11, Nov. 2008, doi: 10.1101/pdb.emo105.
- [87] S. Sato *et al.*, “The tomato genome sequence provides insights into fleshy fruit evolution,” *Nature*, vol. 485, no. 7400, pp. 635–641, 2012, doi: 10.1038/nature11119.
- [88] R. Lobato Ortiz, E. Rodríguez Guzmán, and J. L. Chavez Sirva, *Exploración, colecta y conservación de recursos genéticos de jitomate : avances en red de jitomate*. Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la alimentación y la Agricultura (SINAREFI), 2012.
- [89] SIAP, “Tomate rojo (jitomate),” Ciudad de México, Jun. 2023. [Online]. Available: www.gob.mx/siap
- [90] D. Vázquez-Rivera *et al.*, “Cytotoxicity of cyclodipeptides from *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 leads to apoptosis in human cancer cell lines,” *Biomed Res Int*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/197608.
- [91] A. Moosa, A. A. Moosa, A. M. Ridha, and I. N. Abdullha, “Chromium Ions Removal from Wastewater Using Carbon Nanotubes,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO)*, vol. 3297, no. 2, 2007, doi: 10.15680/IJIRSET.2015.0402057.
- [92] M. Z. Hansrot, “Detection of some aliphatic amino acids using MALDI-TOF MS and FTIR,” 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/258516824>
- [93] A. Juárez-Maldonado, “Seed Treatment with Carbon Nanomaterials Impacts Growth and Nutrient Absorption in Tomato Under Saline Stress.”
- [94] J. T. Jordan *et al.*, “Carbon nanotubes affect early growth, flowering time and phytohormones in tomato,” *Chemosphere*, vol. 256, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127042.
- [95] Y. Hu *et al.*, “Multi-Wall Carbon Nanotubes Promote the Growth of Maize (*Zea mays*) by Regulating Carbon and Nitrogen Metabolism in Leaves,” *J Agric Food Chem*, vol. 69, no. 17, pp. 4981–4991, May 2021, doi: 10.1021/acs.jafc.1c00733.
- [96] H. Villagarcía, E. Dervishi, K. De Silva, A. S. Biris, and M. V. Khodakovskaya, “Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants,” *Small*, vol. 8, no. 15, pp. 2328–2334, Aug. 2012, doi: 10.1002/smll.201102661.
- [97] M. Vithanage, M. Seneviratne, M. Ahmad, B. Sarkar, and Y. S. Ok, “Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: a review,” *Environ Geochem Health*, vol. 39, no. 6, pp. 1421–1439, Dec. 2017, doi: 10.1007/s10653-017-9957-y.

- [98] X. Chen *et al.*, “When nanoparticle and microbes meet: The effect of multi-walled carbon nanotubes on microbial community and nutrient cycling in hyperaccumulator system,” *J Hazard Mater*, vol. 423, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126947.
- [99] M. V. Khodakovskaya *et al.*, “Carbon nanotubes as plant growth regulators: Effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community,” *Small*, vol. 9, no. 1, pp. 115–123, Jan. 2013, doi: 10.1002/sml.201201225.
- [100] S. Samadi, B. Asgari Lajayer, E. Moghiseh, and S. Rodríguez-Couto, “Effect of carbon nanomaterials on cell toxicity, biomass production, nutritional and active compound accumulation in plants,” *Environ Technol Innov*, vol. 21, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.eti.2020.101323.
- [101] Y. González-García, G. Cadenas-Pliego, Á. G. Alpuche-Solís, R. I. Cabrera, and A. Juárez-Maldonado, “Carbon nanotubes decrease the negative impact of *alternaria solani* in tomato crop,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 5, 2021, doi: 10.3390/nano11051080.
- [102] M. A. Torres, J. D. G. Jones, and J. L. Dangl, “Reactive oxygen species signaling in response to pathogens,” 2006, *American Society of Plant Biologists*. doi: 10.1104/pp.106.079467.
- [103] K. Apel and H. Hirt, “Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction,” 2004. doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701.
- [104] C. H. Foyer and G. Noctor, “Redox Homeostasis and Antioxidant Signaling: A Metabolic Interface between Stress Perception and Physiological Responses,” Jun. 2005. [Online]. Available: www.plantcell.org
- [105] M. Benezzer-Benezzer, E. Castro-Mercado Ernesto García-Pineda, and E. García-Pineda, “La Producción de Especies Reactivas de Oxígeno Durante la Expresión de la Resistencia a Enfermedades en Plantas.”

CRONOGRAMA

Actividades	Semestre	Primer semestre						Segundo semestre						Tercer semestre						Cuarto semestre					
	Mes	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Revisión bibliográfica.		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Funcionalización de MWCNT.		■																							
Caracterización de MWCNT con ciclodipéptidos			■																						
Cebado de <i>Solanum lycopersicum</i> con MWCNT-CDPs.				■																					
Establecimiento de bioensayos dosis respuesta con <i>Solanum lycopersicum</i> -en interacción con <i>Fusarium</i> y <i>Phytophthora</i> MWCNT-CDPs en condiciones en fitotrón.					■																				
Evaluación de la germinación de semillas de <i>Solanum lycopersicum</i>						■																			
Infección de las plántulas de <i>Solanum lycopersicum</i> con <i>Fusarium sp</i> o <i>Phytophthora sp</i>							■																		
Evaluación de supervivencia de <i>Solanum lycopersicum</i>																									
Evaluación de										■															

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



A quien corresponda,

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

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

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Biología Experimental	
Título del trabajo	Efecto elicitor de los nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos sobre la respuesta de defensa de <i>Solanum lycopersicum</i> a la patogenicidad de <i>Phytophthora capsici</i> .	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Daniela Fernández Gómez	1341340b@umich.mx
Director	Hector Javier Anselmo Villegas Moreno	javier.villegas@umich.mx
Codirector	Gladys Juárez Cisneros	gladys.juarez@umich.mx
Coordinador del programa	Mauro Manuel Martínez Pacheco	mauro.martinez.pacheco@umich.mx

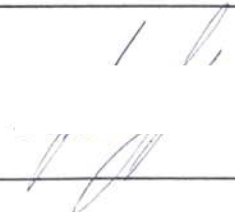
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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




Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Ayuda en la traducción del resumen.
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Sí	Revisión de la ortografía como errores gramaticales.
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Sí	Buscar información específica
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Daniela Fernández Gómez 
Lugar y fecha	06 de Junio de 2025

Daniela Fernández Gómez

Efecto elicitor de los nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos sobre la

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:465713860

Fecha de entrega

9 jun 2025, 8:39 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

9 jun 2025, 8:44 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

Efecto elicitor de los nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos sobr....pdf

Tamaño de archivo

4.2 MB

106 Páginas




24.070 Palabras

130.405 Caracteres

25% Similitud general



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

Fuentes principales

- 24%  Fuentes de Internet
- 15%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
110 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
90 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

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



Asunto: Reporte de similitud

Morelia, Michoacán. a 09 de junio del 2025

Dr. Mauro Manuel Martínez Pacheco
Coordinador de la Maestría en Ciencias en Biología Experimental
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

PRESENTE

Por este conducto, el que suscribe, me permito informar que el dictamen realizado tras una revisión exhaustiva del reporte de similitud generado por el programa iThenticate para la tesis desarrollada por la QFB. Daniela Fernández Gómez, adscrita al Programa de Maestría en Ciencias Biológicas opción Biología Experimental con matrícula 1341340B, la cual lleva el nombre de **"Efecto elicitor de los nanotubos de carbono funcionalizados con ciclodipéptidos bacterianos sobre el sistema de defensa de *Solanum lycopersicum* ante la patogenicidad de *Phytophthora capsici*"**, arrojó un 25% de coincidencia, se concluye que el porcentaje real de similitud es menor del 20%. Esta disminución considerando un 6% corresponde al apartado de bibliografía, y alrededor de un 7% que proviene de nombres científicos, nombres de reactivos y frases de uso común en el área, tales como "nanotubos de carbono", "*Solanum lycopersicum*", "*Phytophthora capsici*", "especies reactivas de oxígeno", "funcionalización", entre otras expresiones técnicas recurrentes en la literatura científica.

Por lo anterior, me permito solicitar de la manera más atenta la autorización para dar seguimiento al trámite de digitalización de tesis y llevar a cabo la revisión de expediente y titulación.

Sin otro particular, de antemano, agradezco su atención y espero contar con una respuesta favorable a esta petición. Reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE


Dr. Javier Villegas Moreno

Profesor Investigador
Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas
UMSNH

Recibido original
09/06/2025
J. Moreno
5