



PÁG.

CONTENIDO

- 1 Diversidad florística asociada a *Clinopodium macrostemon* y *Litsea glaucescens* en un bosque de encino-pino en Oaxaca, México
Floristic diversity associated to *Clinopodium macrostemon* and *Litsea glaucescens* in an oak-pine forest in Oaxaca, México
Jarquin-Rosales Domitila | Campos Angeles Gisela Virginia | Reyes-Hernández Valentín José | Lozano-Trejo Salvador | Alpuche-Orsorno Juan José | Rodríguez-Ortiz Gerardo
- 15 Diversidad morfológica de *Vitis tiliifolia* Humb. & Bonpl. ex Roem. & Schult. (Vitaceae) en poblaciones silvestres de cuatro localidades del estado de Veracruz, México
Morphological diversity of *Vitis tiliifolia* Humb. & Bonpl. ex Roem. & Schult. (Vitaceae) in wild populations from four locations in the state of Veracruz, Mexico
Mata Alejandro Humberto | Castañeda-Chávez María Del Refugio | Aguilar Pérez Luis Alfonso | Mójica-Zárate Héctor Tecumshé | Cruz-Castillo Juan Guillermo
- 27 Regeneración natural arbórea e influencia de factores edáficos de un bosque templado en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México
Natural tree regeneration and influence of edaphic factors in a temperate forest in Guadalupe y Calvo, Chihuahua, Mexico
Mateo-García Mario Francisco | Alanís-Rodríguez Eduardo | García-García Samuel Alberto | Cuellar-Rodríguez Luis Gerardo | Yerena-Yamallel José Israel | Aguirre-Calderón Oscar Alberto
- 47 Estructura, diversidad y captura de carbono del arbolado urbano de un complejo industrial en el noreste de México
Structure, diversity, and carbon sequestration of urban trees in an industrial complex in northeastern Mexico
Alcalá Rojas Alejandro | Alanís Rodríguez Eduardo | Aguirre Calderón Oscar Alberto | Cuellar Rodríguez Gerardo | Yerena Yamallel José Israel | Sandoval García Rufino
- 59 Evaluación de la infestación de *Phoradendron bolleanum* (Seem.) Eichler en *Quercus convallata* Trel. y *Quercus edwardii* Trel. en Durango, México
Evaluation of *Phoradendron bolleanum* (Seem.) Eichler infestation in *Quercus convallata* Trel. and *Quercus edwardii* Trel. in Durango, Mexico
Dominguez-Amaya Mesias Edwin | Briseño Reyes Jaime | Vega-Nieva Daniel José | Corral-Rivas José Javier | Tinoco-Orozco Diana Aime
- 77 Efecto de prácticas agroecológicas basadas en fertilizantes orgánicos en agroecosistemas monocultivo y milpa en la Sierra de Zongolica, Veracruz, México
Effect of agroecological practices based on organic fertilization in monoculture and milpa agroecosystems in the Sierra de Zongolica, Veracruz, Mexico
De La Cruz-De Jesus Mayra Yaneth | Hernández-Vásquez Luis Alfredo | Tecpile Cortes Jaime | Reyes-Rosas Sergio | Armida-Lozano Jorge | Ramírez-Rivera Emmanuel de Jesús | Sánchez-Zavalegui Romeo Alejandro | Del Rosario-Arellano José Luis | Purroy-Vásquez Rubén | Hernández-Salinas Gregorio
- 95 Evaluación de la eficiencia de dos esquemas de fertilización y bioherbicidas en maíz (*Zea mays* L.) en el Valle del Yaqui bajo condiciones de casa sombra y riego localizado
Evaluation of the efficiency of two fertilization schemes and bioherbicides in corn (*Zea mays* L.) in the Yaqui Valley under greenhouse conditions and localized irrigation
Arellano Gil Maritza | Estrella Osuna Luis Enrique | Verdugo Fuentes Abel Alberto | Rodríguez Ramírez Roberto | Villa Lerma Alma Guadalupe | Valdez Mendoza Brissa Jeaneth | Mungarro Ibarra Catalina | Portillo García Luis Enrique
- 107 Viabilidad y germinación del polen de *Agave durangensis*
Viability and germination of *Agave durangensis* Gentry pollen
Salazar Palacios Diana Laura | Delgado Alvarado Eli Amanda | Torres Ricario Rene | Uribe Soto José Natividad | Avila Reyes Jose Antonio | Hernández Vargas Vicente | Pérez Salinas Shaila Nayeli | Chavez Aguilar Fernanda Yoana | Gutiérrez Velázquez Marcela Verónica
- 121 Florivoría por *Euphoria basalis* (Coleoptera: Scarabaeidae: Cetoniinae) y su efecto en la eficiencia reproductiva de *Ipomoea stans* (Convolvulaceae) en el volcán Teuhtli, México
Floral herbivory by *Euphoria basalis* (Coleoptera: Scarabaeidae: Cetoniinae) and its effect on the reproductive success of *Ipomoea stans* (Convolvulaceae) in the Teuhtli Volcano, Mexico
Martínez Cárdenas María de Lourdes | Vargas Miranda Bárbara | Emiliano-Juárez Alejandro A.
- 135 Influencia de la composición del medio de cultivo en la germinación asimbiótica de *Cyrtopodium macrobulbon* (Lex.) G.A. Romero & Carnevali (Orchidaceae)
Influence of the culture medium composition on the asymbiotic germination of *Cyrtopodium macrobulbon* (Lex.) G.A. Romero & Carnevali (Orchidaceae)
Olvera-Casanova Diego Alfredo | Sánchez-Contreras Angeles | Qui-Zapata Joaquín Alejandro | Herrera-Cool Gilbert José | Cob-Uicab José Vidal | López-Puc Guadalupe
- 149 Caracterización polínica en mieles de tres subespecies de *Apis mellifera* L. en Alvarado, Veracruz, México
Pollen characterization in honeys of three subspecies of *Apis mellifera* L. in Alvarado, Veracruz, Mexico
Alemán López Viridiana | López Mata Lauro | Medina Pérez Gabriela | Luna Rodríguez Lorena | Vargas Romero Juan Manuel | Galván Escobedo Iris Grisel

PÁG.

CONTENIDO

- 169 Análisis palinológico y fisicoquímico de mieles de *Apis mellifera* L. en la localidad los Cerritos, Hidalgo, México
Palynological and physicochemical analysis of honey of *Apis mellifera* L. from los Cerritos, Hidalgo, Mexico
Navarrete López Sandra Joceline | Quiroz García David Leonor | Fernández Nava Rafael
- 187 Desarrollo de un protocolo de micropropagación para *Lupinus campestris* Cham. & Schltl. como base para la domesticación y conservación
Development of a micropropagation protocol for *Lupinus campestris* Cham. & Schltl. as a basis for domestication and conservation
Rodríguez Sías Daniela | Pérez Álvarez Sandra | Sánchez-Chávez Esteban | Leyva-Hernández Héctor A. | Uranga-Valencia Luisa Patricia
- 203 Efecto de la meta-topolina sobre la multiplicación y la hiperhidricidad *in vitro* en maguey plateado (*Agave guiengola* Gentry)
Effect of meta-topolin on *in vitro* multiplication and hyperhydricity in silver maguey (*Agave guiengola* Gentry)
Ramírez Mosqueda Marco Antonio | Cadena-Zamudio Jorge David | Cruz-Gutiérrez Esmeralda J. | Sandoval-Cansino Gabriela | Delgado-Aceves María de Lourdes | Gutiérrez-Mora Antonia
- 215 Evaluación de la toxicidad del aceite esencial de *Monarda fistulosa* L. en ratones C57BL/6
Evaluation of the toxicity of the essential oil of *Monarda fistulosa* L. in C57BL/6 Mice.
Delgadillo Puga Claudia | Cariño-Cervantes Yonatan Y. | Cruz-Martínez Yesica R. | Torre-Villalvazo Iván
- 231 Respostas fotossintéticas de espécie fitorremediadora à elevação de salinidade no meio aquático.
Photosynthetic responses of phytoremediating species to increased salinity in aquatic environments
da Silva Bastos Guimarães Alice | Moll Hüther Cristina | Jimenez de Almeida Rigueira Roberta | Soares de Melo Pedro | Martins Corrêa Gabriela | Amado Garcia Silva Rodrigo | Oswald Silveiras Kircher Doris
- 251 Actividad antifúngica y tripanocida *in vitro* de extractos de *Dysphania ambrosioides* (L.) Mosyakin y clemants
In vitro antifungal and trypanocidal activity of extracts of *Dysphania ambrosioides* (L.) Mosyakin y clemants
Santiago Martínez Angeles | Riley Saldaña Christian Anabí | Moreno Rodríguez Adriana | De Fuentes Vicente José Antonio | de la Cruz Chacón Iván
- 271 Efecto de nanotubos de carbono sobre la germinación y desarrollo de *Agave salmiana* de diversos períodos de colecta
Effect of carbon nanotube on the germination and development of *Agave salmiana* of various collection periods
Gómez-Pelayo Berenice | García-Nuñez Hilda Guadalupe | Arzate-Fernández Amaury Martín | Reyes-Díaz Jesús Ignacio
- 289 Crecimiento micelial *in vitro* de *Auricularia nigricans* en residuos lignocelulósicos disponibles en el estado de Campeche, México
In vitro mycelial growth of *Auricularia nigricans* in available lignocellulosic waste from the state of Campeche, Mexico
De la Cruz Blanco Geydi Mariela | Gaitán Hernández Rigoberto | Flota Bañuelos Carolina | Casanova Pérez Lorena | Sierra Sigfrido | Rosales Martinez Veronica
- 305 *Sesuvium portulacastrum* en la fitorremediación para suelos salinos como estrategia ambiental sostenible
Sesuvium portulacastrum in phytoremediation of saline soils as a sustainable environmental strategy
Gómez Peraza Rosa Luz | Valenzuela Quiñónez Wenceslao | Espinosa Alonso Laura Gabriela | Galaviz Julian Alberto | Medina Gogoy Sergio | Hernández Armenta Jesús Uriel
- 317 Patogenicidad de *Corynespora cassiicola* y su control *in vitro* con *Bacillus subtilis* CBCK47 y extracto acuoso de *Croton chichenensis*
Pathogenicity of *Corynespora cassiicola* and its *in vitro* control with *Bacillus subtilis* CBCK47 and aqueous extract of *Croton chichenensis*
Rivero Uribe Adriana Rubi | Moo Koh Felicia Amalia | Cristóbal Alejo Jairo | Reyes Ramírez Arturo | Tun Suárez José María | Gamboa Angulo María Marcela
- 333 Plantas medicinales utilizadas para enfermedades respiratorias en habitantes de Pisaflores, Hidalgo, México
Medicinal plants used for respiratory diseases among inhabitants of Pisaflores, Hidalgo, Mexico
Lara Reimers Eduardo Alberto | Montesinos Adan Leonel Rosario | Mora Olivo Arturo | García Martínez José Eduardo | Cruz García Francisco | González Fuentes José Antonio | Encinas Domínguez Juan Antonio | Preciado Rangel Pablo
- 353 Análisis etnobotánico de variedades locales de maguey pulquero en el noreste del Estado de México
Ethnobotanical analysis of local varieties of maguey pulquero in the northeast of the Estado de México
Cruz Vasconcelos Sonia Teresa | Ramírez Herrera Carlos | Cruz Huerta Nicacio | Reyes Hernández Valentín José | Gómez Guerrero Armando
- 369 Bioculturalidad a través de los hongos comestibles silvestres y cultivados en San Pedro Benito Juárez, Atlixco, Puebla
Bioculturality through wild and cultivated edible mushrooms in San Pedro Benito Juarez, Atlixco, Puebla
Segura Ruiz Karla Elaine | Casiano Ventura Miguel Angel | Sobal Cruz Mercedes | Morales Almora Porfirio
- 381 Las plantas medicinales utilizadas en la cabecera municipal de San Antonio Cañada, Puebla, México
Medicinal plants used in the municipal seat of San Antonio Cañada, Puebla, Mexico
De la luz-González Andrea | Martínez-Moreno David | Reyes-Matamoros Jenaro | Andrés-Hernández Agustina Rosa | Reyes-Azcárate Yessica
- 401 Arvenses asociadas al cajete de maguey pulquero, en Lerma, México: énfasis en el uso de especies de Asteraceae
Weed species associated with the pulque agave basin in Lerma, Mexico: emphasis on the use of Asteraceae species
González Estrada Teresa de Jesús | Sánchez-Nava Susana | Franco-Mora Omar | Sánchez-Pale Jesús Ricardo

POLIBOTÁNICA

Núm. 62

ISSN electrónico: 2395-9525

Julio 2026

Portada



El proceso comunitario de aprendizaje y aprovechamiento sustentable de hongos comestibles a partir de residuos agrícolas, como rastrojo de maíz y frijol, representa una alternativa agroecológica que fortalece la soberanía alimentaria, promueve el uso responsable de recursos locales y contribuye a la revitalización del conocimiento etnomicológico tradicional. La participación comunitaria, el intercambio gastronómico y la transmisión intergeneracional de saberes reflejan la estrecha relación entre patrimonio biocultural, innovación tecnológica y resiliencia social en contextos rurales indígenas.

The community-based process of learning and sustainable use of edible mushrooms through agricultural residues, such as maize and bean straw, represents an agroecological alternative that strengthens food sovereignty, promotes the responsible use of local resources, and contributes to the revitalization of traditional ethnomycological knowledge. Community participation, gastronomic exchange, and the intergenerational transmission of knowledge reflect the close relationship between biocultural heritage, technological innovation, and social resilience in indigenous rural contexts.

por/by
Rafael Fernández Nava

REVISTA BOTÁNICA INTERNACIONAL DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

EQUIPO EDITORIAL

Angela Catalina Mendoza González,
Instituto Politécnico Nacional, México

Ricardo Valenzuela Garza,
Instituto Politécnico Nacional, México

Carlos Fabián Vargas Mendoza,
Instituto Politécnico Nacional, México

Rafael Fernández Nava,
Instituto Politécnico Nacional, México

EDITORES ASOCIADOS

Xitlali Aguirre Dugua,
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México

Fernando Alzate Guarín,
Universidad de Antioquia, Colombia

María de la Luz Arreguín Sánchez,
IPN, México

Itzel Becerra Absalón,
UNAM, México

Alexander Berrocal-Jiménez,
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

José Juan Blancas Vázquez,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

Mireya Burgos Hernández,
Colegio de Postgraduados, México

Alexandre Toshirrico Cardoso Taketa,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

Gustavo Cruz-Cárdenas,
IPN, México

Luis Enrique Eguarte Fruns,
UNAM, México

Adolfo Espejo Serna,
UAM Iztapalapa, México

Javier Carlos Estrada Sánchez,
Universidad de los Andes, Venezuela

María Teresa Fernández-Marrón,
Universidad Complutense de Madrid, España

Daniel Freitas Freire Martins,
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brazil

Roberto Garibay Orijel,
UNAM, México

Gregorio del Carmen Godoy Hernández,
CICY, A.C. México

Diódoro Granados Sánchez,
Universidad Autónoma Chapingo, México

Anahí N. Herrera Cano,
Universidad de Buenos Aires, Argentina

María de los Ángeles Herrera Campos,
UNAM, México

Omaira Hokche,
Universidad Central de Venezuela, Venezuela

Francisco Martín Huerta Martínez,
Universidad de Guadalajara, México

Blanca León,
University of Texas at Austin, USA

Hilda P. León Tejera,
UNAM, México

Victor M. Loyola Vargas,
CICY, A.C. México

Miguel Ángel Macías Rodríguez,
Universidad de Guadalajara, México

Tomás Martínez Trinidad,
Colegio de Postgraduados, México

Juan Luis Mata,
University of South Alabama, USA

Diana Miriam Mc Caughey Espinoza,
Universidad de Sonora

Natalia Mesa Sierra,
USDA Forest Service, USA

Demetria Martha Mondragón Chaparro,
IPN, México

María Eugenia Morales-Puentes,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Eberto Novelo Maldonado,
UNAM, México

Gilberto Alejandro Ocampo Acosta,
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

Neftalí Ochoa Alejo,
CINVESTAV, México

Ileana Ortegón Aznar,
Universidad Autónoma de Yucatán, México

María Lelia Pochettino,
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Francisco Reyes Zepeda,
Universidad Autónoma de Tamaulipas

Paz Alejandra Quintanar Isaías,
UAM-Iztapalapa, México

Beatriz Quiroz-González,
IPN, México

Carlos Ramírez Vargas,
Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

Juan Antonio Reyes-Agüero,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Valentín José Reyes Hernández,
Colegio de Postgraduados, México

Rafael Salgado Garciglia,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Primo Sánchez Morales,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Odilón Manuel Sánchez Sánchez,
Universidad Veracruzana, México

Thália do Socorro Serra Gama,
University of Sao Paulo, Brazil

Sigfrido Sierra Galván,
UNAM, México

Heike Vibrans,
Colegio de Postgraduados, México

Noemí Waksman de Torres,
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Juan Ramón Zapata Morales,
Universidad de Guanajuato. Guanajuato. México

CONSEJO EDITORIAL

Thomas F. Daniel
California Academy of Sciences San Francisco, California, USA

María del Socorro González Elizondo,
Instituto Politécnico Nacional, México

Dra. Silvia Evangelista Lozano,
Instituto Politécnico Nacional, México

Luis Gerardo Zepeda Vallejo,
Instituto Politécnico Nacional, México

DISEÑO Y FORMACIÓN ELECTRÓNICA

Luz Elena Tejeda Hernández

OPEN JOURNAL SYSTEM Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Pedro Aráoz Palomino

POLIBOTÁNICA, revista botánica internacional del Instituto Politécnico Nacional, incluye exclusivamente artículos que representen los resultados de investigaciones originales en el área. Tiene una periodicidad de dos números al año, con distribución y Comité Editorial Internacional.

Todos los artículos enviados a la revista para su posible publicación son sometidos por lo menos a un par de árbitros, reconocidos especialistas nacionales o internacionales que los revisan y evalúan y son los que finalmente recomiendan la pertinencia o no de la publicación del artículo, cabe destacar que este es el medio con que contamos para cuidar el nivel y la calidad de los trabajos publicados.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS

Se aceptarán aquellos originales que se ajusten a las prescripciones siguientes:

POLIBOTÁNICA incluye exclusivamente artículos que representen los resultados de investigaciones originales que no hayan sido publicados.

1. El autor deberá anexar una carta membretada y firmada dirigida al Editor, donde se presente el manuscrito, así como la indicación de que el trabajo es original e inédito, ya que no se aceptan trabajos publicados o presentados anterior o simultáneamente en otra revista, circunstancia que el autor(es) deberá declarar expresamente en la carta de presentación de su artículo.
2. Al quedar aceptado un trabajo, su autor no podrá ya enviarlo a ninguna otra revista nacional o extranjera.
3. Los artículos deberán estar escritos en español, inglés, francés o portugués. En el caso de estar escritos en otros idiomas diferentes al español, deberá incluirse un amplio resumen en este idioma.
4. Como parte de los requisitos del CONACYT, POLIBOTÁNICA ahora usa la plataforma del Open Journal System (OJS); para la gestión de los artículos sometidos a la misma. Así que le solicitamos de la manera más atenta sea tan amable de registrarse y enviar su artículo en la siguiente liga: www.polibotanica.mx/ojs/index.php/polibotanica
 - a) cargar el trabajo en archivo electrónico de office-word, no hay un máximo de páginas con las siguientes características:
 - b) en páginas tamaño carta, letra times new roman 12 puntos a doble espacio y 2 cm por margen
5. Las figuras, imágenes, gráficas del trabajo deben estar incluidas en el documento de Word original:
 - a) en formato jpg
 - b) con una resolución mínima de 300 dpi y un tamaño mínimo de 140 mm de ancho
 - c) las letras deben estar perfectamente legibles y contrastadas
6. Todo trabajo deberá ir encabezado por:
 - a) Un título tanto en español como en inglés que exprese claramente el problema a que se refiere. El formato para el título es: negritas, tamaño 14 y centrado;
 - b) El nombre del autor o autores, con sus iniciales correspondientes, sin expresión de títulos o grados académicos. El formato para los autores es: alineados a la izquierda, cada uno en un párrafo distinto y tamaño 12. Cada autor debe tener un número en formato superíndice indicando a qué afiliación pertenece;
 - c) La designación del laboratorio e institución donde se realizó el trabajo. La(s) afiliación(es) debe(n) estar abajo del grupo de autores. Cada afiliación deberá estar en un párrafo y tamaño

12. Al inicio de cada afiliación estará el número en superíndice que lo relaciona con uno o más autor/es.

d) El autor para correspondencia deberá estar en el siguiente párrafo, alineado a la izquierda, tamaño 12.

7. Todo trabajo deberá estar formado por los siguientes capítulos:

a) RESUMEN y ABSTRACT. Palabras clave y Key Words. El resumen debe venir después de la afiliación de los autores, alineado a la izquierda, tamaño 12. La palabra “Resumen: / Abstract:” debe venir en negritas y con dos puntos. El texto del resumen debe empezar en el párrafo siguiente, tamaño 12 y justificado. El texto “Palabras clave / Key Words:” debe venir en negritas seguido de dos puntos. Cada una de las palabras clave deben estar separadas por coma o punto y coma, finalizadas por punto.

b) INTRODUCCIÓN y MÉTODOS empleados. Cuando se trate de técnicas o métodos ya conocidos, solamente se les mencionará por la cita de la publicación original en la que se dieron a conocer. El formato para todas las secciones en esta lista es: negritas, tamaño 16 y centrado.

c) RESULTADOS obtenidos. Presentación acompañada del número necesario de gráficas, tablas, figuras o diagramas de tamaño muy cercano al que tendrá su reproducción impresa (19 x 14 cm).

d) DISCUSIÓN concisa de los resultados obtenidos, limitada a lo que sea original y a otros datos relacionados directamente y que se consideren nuevos.

e) CONCLUSIONES.

ESPECIFICACIONES DE FORMATO PARA EL CUERPO DEL TRABAJO

1. Secciones/Subtítulos de párrafo: Fuente tamaño 16, centrado, en negritas, con la primera letra en mayúscula.
2. Subsecciones/Subtítulos de párrafo secundarios : Fuente tamaño 14, centrado, en negritas, con la primera letra en mayúscula. Cuando existan subsecciones de subsección formatear en tamaño 13 negrita y centrado.
3. Cuerpo del texto: Fuente tamaño 12, justificado. NO debe haber saltos de línea entre párrafos.
4. Las notas de pie de página deben estar al final de cada página, fuente tamaño 12 justificadas.
5. Cita textual con mas de tres líneas: Fuente tamaño 12, margen izquierdo de 4 cm.
6. Título de imágenes: Fuente tamaño 12, centrado y en negritas, separado por dos puntos de su descripción. Descripción de las imágenes: tamaño 12.
7. Notas al pie de las imágenes: Fuente tamaño 12 y centradas con respecto a la imagen, la primera letra debe estar en mayúsculas.
8. Imágenes: deben estar en el cuerpo del texto, insertadas en formato png o jpg, a por lo menos 300 dpi de resolución y centradas. Las imagenes deben estar en línea con el texto. Se consideran imágenes: gráficos, cuadros, fotografías, diagramas y, en algunos casos, tablas y ecuaciones.
9. Tablas de tipo texto: El título de las columnas de las tablas debe estar en negritas y los datos del cuerpo de la tabla con fuente normal. Los nombres científicos deben estar en *italicas*. Se recomienda utilizar las Tablas como imágenes, estas deberán de ir centradas (a por lo menos 300 dpi de resolución).
10. Notas al pie de la tabla: Fuente tamaño 12 y centradas con respecto a la tabla, la primera letra debe estar en mayúsculas.
11. Ecuaciones pueden estar en Mathtype 1 o en imagen. En este último caso, seguir instrucciones del punto 8.
12. Citas del tipo autor y año deben estar entre paréntesis, con el apellido del autor seguido por el año (Souza, 2007), primera letra en mayúscula.

- 8. LITERATURA CITADA,** Se tomara como base el Estilo APA para las Referencias Bibliográficas, formada por las referencias mencionadas en el texto del trabajo y en orden alfabético. Es obligatorio utilizar Mendeley® (software bibliográfico). El propósito de utilizar este tipo de software es asegurar que los datos contenidos en las referencias están correctamente estructurados y corresponden a las citas del cuerpo del texto.

ESTRUCTURA Y FORMATO DE LOS AGRADECIMIENTOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Los Agradecimientos deberán estar después de la última sección del cuerpo del texto. Esta información debe tener como título la palabra “Agradecimientos”, o su equivalente en otro idioma, en negritas, tamaño 12 y centrado. El texto de esta información debe estar en tamaño 12 justificado.
2. Las Referencias bibliográficas deben estar en orden alfabético sin salto de línea de párrafo, alineados a la izquierda, en tamaño 12.
3. Apéndices, anexos, glosarios y otros materiales deben incluirse después de las referencias bibliográficas. En caso de que estos materiales sean extensos deberán ser creados como archivos PDF.

9. REVISIÓN Y PUBLICACIÓN

Todos los artículos enviados a la revista para su posible publicación serán sometidos a una revisión “doble ciego”, se enviarán por lo menos a un par de árbitros, reconocidos especialistas nacionales o internacionales que los revisarán y evaluarán y serán los que finalmente recomienden la pertinencia o no de la publicación del artículo, cabe destacar que este es el medio con que contamos para cuidar el nivel y la calidad de los trabajos publicados.

Una vez aceptado el trabajo, se cobrarán al autor(es) \$299 por página más IVA, independientemente del número de fotografías que contenga.

PUBLICATION GUIDELINES

POLIBOTÁNICA, an international botanical journal supported by the National Polytechnic Institute, only publishes material resulting of original research in the botanic area. It has a periodicity of two issues per year with international distribution and an international Editorial Committee.

All articles submitted to POLIBOTÁNICA for publication are reviewed by at least a couple of referees. National or international recognized experts will evaluate all submitted materials in order to recommend the appropriateness or otherwise of a publication. Therefore, the quality of published papers in POLIBOTÁNICA is of the highest international standards.

FOR PUBLICATION OF ARTICLES

Originals that comply with the following requirements will be accepted:

1. POLIBOTÁNICA includes only items that represent the results of original research which have not been published. The author should attach an official and signed letter to Editor stating that the work is original and unpublished. We do not accept articles published or presented before or simultaneously in another journal, a fact that the author (s) must expressly declare in the letter.
2. When an article has been accepted, the author can no longer send it to a different national or foreign journal.
3. Articles should be written in Spanish, English, French or Portuguese. In the case of be written in

languages other than Spanish, it should include an abstract in English.

4. The article ought to be sent to the POLIBOTÁNICA's Open Journal System <http://www.polibotanica.mx/ojs> in an office-word file without a maximum number of pages with the following features:

a) on letter-size pages, Times New Roman font type, 12-point font size, double-spaced and 2 cm margin

5. The figures, images, graphics in the article must be attached as follows:

a) in jpg format

b) with a minimum resolution of 300 dpi and a minimum size of 140 mm wide

c) all characters must be legible and contrasted

6. All articles must include:

a) a title in both Spanish and English that clearly express the problem referred to. The format for this section is: bold, font size 14 and centered.;

b) the name of the author or authors, with their initials, no titles and no academic degrees. The format for this section is: font size 12, aligned to the left, each name in a different paragraph but without spaces in-between and a superscript number indicating the affiliation;

c) complete affiliations of all authors (including laboratory or research institution). The format for this section is: font size 12, aligned to the left, each name in a different paragraph but without spaces in-between and a superscript number at the beginning of the affiliation;

d) correspondence author should be in the next paragraph, font size 12 and aligned to the left.

7. All work should be composed of the following chapters:

a) RESUMEN and ABSTRACT. Palabras clave y Key Words. The format for this section is: bold, font size 12 and centered. Both words (RESUMEN: and ABSTRACT:) must include a colon, be in bold and aligned to the left. The body of the abstract must be justified and in font size 12. Both palabras clave: and keywords: must include a colon, be in bold and aligned to the left. Keywords must be separated by a comma or semicolon, must be justified and in font size 12.

b) INTRODUCTION y METHODS. In the case of techniques or methods that are already known, they were mentioned only by appointment of the original publication in which they were released.

c) RESULTS. Accompanied with presentation of the required number of graphs, tables, figures or diagrams very close to the size which will be printed (19 x 14 cm).

d) DISCUSSION. A concise discussion of the results obtained, limited to what is original and other related directly and considered new data.

e) CONCLUSIONS. The format for sections Introduction, Results, Discussion and Conclusions is: bold, font size 16 and centered.

FORMAT SPECIFICATIONS FOR THE BODY OF WORK

1. Sections: Font size 16, centered, bold, with the first letter capitalized.
2. Subsections / Secondary Subtitles: Font size 14, centered, bold, with the first letter capitalized. When there are second grade subsections format in size 13 bold and centered.
3. Body: Font size 12, justified. There should NOT be line breaks between paragraphs.
4. Footnotes should be at the bottom of each page, font size 12 and justified.
5. Textual quotation with more than three lines: Source size 12, left margin of 4 cm.
6. Image Title: Font size 12, centered and bold, separated by two points from its description. Description of the images: size 12.
7. Images Footnotes: Font size 12 and centered with respect to the image, the first letter must be in capital letters.
8. Images: must be in the body of the text, inserted in png or jpg format, at least 300 dpi resolution and centered. Images should be in line with the text. Graphs, charts, photographs, diagrams and, in some cases, tables and equations are considered images.
9. Text Tables: Only The title of the columns of the tables must be in bold. Scientific names must be in italics. It is recommended to use the Tables as images, they should be centered (at least 300 dpi resolution).
10. Footnotes: Font size 12 and centered with respect to the table, the first letter must be in upper case.
11. Equations can be in Mathtype 1 or in image. In the latter case, follow the instructions in point 8.
12. Quotations of the author and year type must be in parentheses, with the author's last name followed by the year (Souza, 2007), first letter in capital letters.

8. LITERATURE CITED. All references must be cited using the APA stile. POLIBOTÁNICA requires the use of Mendeley® (free reference manager) for the entire bibliography.

STRUCTURE AND FORMAT OF ACKNOWLEDGMENTS AND BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

1. Acknowledgments must be after the last section of the body of the text. This information should be titled the word "Acknowledgments", or its equivalent in another language, in bold, size 12 and centered. The text of this information must be in size 12 justified.
2. Bibliographical references should be in alphabetical order without paragraph line jump, aligned to the left, in size 12.
3. Appendices, annexes, glossaries and other materials should be included after the bibliographic references. If these materials are extensive they should be created as PDF files.

9. REVIEW AND PUBLICATION

All articles submitted to the journal for publication will undergo a review "double-blind", they will be sent at least a couple of referees, recognized national or international experts that reviewed and evaluated and will be finally recommended the relevance or the publication of the article, it is noteworthy that this is the means that we have to take care of the level and quality of published articles.

Once accepted the article, the author will be charged \$15 USD per text page, regardless of how many pictures it contains.

Toda correspondencia relacionada con la revista deberá ser dirigida a:

Dr. Rafael Fernández Nava
Editor en Jefe de

POLIBOTÁNICA

Departamento de Botánica
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional
Apdo. Postal 17-564, CP 11410, Ciudad de México

Correo electrónico:
polibotanica@gmail.com
rfernand@ipn.mx

Dirección Web
http://www.polibotanica.mx

POLIBOTÁNICA es una revista indexada en:

CRMICYT - Sistema de Clasificación de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología

SciELO - Scientific Electronic Library Online.

Google Académico - Google Scholar.

DOAJ, Directorio de Revistas de Acceso Público.

Dialnet portal de difusión de la producción científica hispana.

REDIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico.

LATINDEX, Sistema regional de información en línea para revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

PERIODICA, Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Director General: *Dr. Arturo Reyes Sandoval*

Secretario General: *M en C. Ismael Jaidar Monter*

Secretario Académico: *M en E N A María Isabel Rojas Ruizb*

Secretario de Innovación e Integración Social: *M.C.E. Yessica Gasca Castillo*

Secretario de Investigación y Posgrado: *Dra. Martha Leticia Vázquez González*

Secretario de Servicios Educativos: *Dr. Marco Antonio Sosa Palacios*

Secretario de Administración: *Mtra. Ana María Arrona González*

Director de Educación Superior: *Lic. Tomás Huerta Hernández*

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Director

Dr. Mario Alberto Rodríguez Casas

Subdirectora Académica:

Biol. Elizabeth Guarneros Banuelos

Jefe de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación:

Dr. Edgar Gregorio Cárcamo Villalobos

Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social:

Biól. Gonzalo Galindo Becerril

POLIBOTÁNICA, Año 30, No. 62, Julio 2026, es una publicación semestral editada por el Instituto Politécnico Nacional, a través de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas C.P. 11340 Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. Teléfono 57296000 ext. 62331. <http://www.herbario.encb.ipn.mx/>, Editor responsable: Rafael Fernández Nava. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-011309001300-203. ISSN impreso: 1405-2768, ISSN digital: 2395-9525, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de informática de la ENCB del IPN, Rafael Fernández Nava, Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas CP 11340 Delegación Miguel Hidalgo México, D.F.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.



Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EFFECTO DE NANOTUBOS DE CARBONO SOBRE LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO DE *Agave salmiana* DE DIVERSOS PERÍODOS DE COLECTA

EFFECT OF CARBON NANOTUBE ON THE GERMINATION AND DEVELOPMENT OF *Agave salmiana* OF VARIOUS COLLECTION PERIODS

Gómez-Pelayo, Berenice; García-Núñez, Hilda Guadalupe; Arzate-Fernández, Amaury Martín; Reyes-Díaz, Jesús Ignacio

EFFECTO DE NANOTUBOS DE CARBONO SOBRE LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO DE *Agave salmiana* DE DIVERSOS PERÍODOS DE COLECTA

EFFECT OF CARBON NANOTUBE ON THE GERMINATION AND DEVELOPMENT OF *Agave salmiana* OF VARIOUS COLLECTION PERIODS

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 62: 271-288 México. Julio 2026

DOI: 10.18387/polibotanica.62.18



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Efecto de nanotubos de carbono sobre la germinación y desarrollo de *Agave salmiana* de diversos períodos de colecta

Effect of carbon nanotube on the germination and development of *Agave salmiana* of various collection periods

Gómez-Pelayo, Berenice;
García-Núñez, Hilda
Guadalupe; Arzate-Fernández,
Amaury Martín; Reyes-Díaz,
Jesús Ignacio

EFFECTO DE NANOTUBOS
DE CARBONO SOBRE LA
GERMINACIÓN Y
DESARROLLO DE *Agave
salmiana* DE DIVERSOS
PERÍODOS DE COLECTA

EFFECT OF CARBON
NANOTUBE ON THE
GERMINATION AND
DEVELOPMENT OF *Agave
salmiana* OF VARIOUS
COLLECTION PERIODS

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 62: 271-288. Juli 2026

DOI:
10.18387/polibotanica.62.18

Gómez-Pelayo, Berenice / <https://orcid.org/0009-0003-9544-5079>
García-Núñez, Hilda Guadalupe / <http://orcid.org/0000-0002-3758-8114>
Arzate-Fernández, Amaury Martín / <http://orcid.org/0000-0001-8603-0099>
Autor de correspondencia: amaury1963@yahoo.com.mx
Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento,
Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, C.P.
50200 Toluca, México.

Reyes-Díaz, Jesús Ignacio / <http://orcid.org/0000-0001-9234-6575>
Autor de correspondencia: jird.rd@gmail.com
Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento,
Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México,
C.P. 50200 Toluca, México.
Unidad Académica de Capulhuac, Universidad Tecnológica del Valle de Toluca,
C. P. 52044 Capulhuac de Mirafuentes, México.

RESUMEN: Los nanotubos de carbono han emergido como nanoestimulantes prometedores para mejorar la germinación y el desarrollo temprano en diversas especies cultivadas, pero su efecto en plantas con metabolismo CAM, particularmente en el género *Agave*, permanece inexplorado. *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck es una especie de gran relevancia ecológica, cultural y económica en México, cuya propagación por semilla enfrenta limitaciones asociadas a la baja germinación y al deterioro progresivo durante el almacenamiento. En este estudio se evaluó el efecto de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) sobre la germinación, el desarrollo inicial y la supervivencia en invernadero de *A. salmiana*, considerando la interacción con el tiempo de almacenamiento de las semillas. Se utilizaron cuatro lotes con diferentes años de colecta (2015, 2016, 2022 y 2024). En una primera fase, semillas del lote más reciente (2024) se expusieron a siete concentraciones de MWCNT (0, 25, 50, 75, 100, 125 y 150 mg L⁻¹) durante 24 y 48 h para seleccionar dosis representativas. En una segunda fase, las concentraciones seleccionadas (50, 125 y 150 mg L⁻¹) se aplicaron a los cuatro lotes durante 24 h, evaluándose germinación, longitud de hoja y raíz, viabilidad (tetrazolio), morfometría, supervivencia y crecimiento en invernadero. Los resultados mostraron un claro patrón dosis-dependiente: la concentración de 50 mg L⁻¹ incrementó significativamente la germinación (hasta 88% en semillas recientes) y estimuló el crecimiento de plántulas, particularmente en longitud radicular. Concentraciones superiores (125–150 mg L⁻¹) generaron respuestas contrastantes, promoviendo el desarrollo radicular en algunos lotes, pero reduciendo la supervivencia en invernadero en otros. El tiempo de almacenamiento resultó crítico: el lote de 2015 presentó germinación y viabilidad casi nulas (<10%), mientras que los lotes de 2022 y 2024 alcanzaron porcentajes de germinación cercanos al 90% y supervivencia en invernadero superior al 85%. Sorprendentemente, el lote de 2024, a pesar de presentar las semillas de mayor tamaño y peso, mostró baja viabilidad en la prueba de tetrazolio (14.7%), indicando que la morfometría no es un predictor fiable de la calidad fisiológica. En conjunto, estos resultados demuestran que los MWCNT pueden actuar como bioestimulantes efectivos en *A. salmiana* cuando se aplican en concentraciones moderadas (50 mg L⁻¹) sobre semillas con calidad fisiológica adecuada (<3 años de

almacenamiento), pero su efecto se ve anulado o se torna inhibitorio en lotes con deterioro avanzado o con dosis elevadas. Este estudio proporciona la primera evidencia sobre nano-bio-interacciones en agaves y establece bases metodológicas para incorporar nanotecnología en programas de propagación y conservación de germoplasma de especies con metabolismo CAM. **Palabras clave:** *Agave salmiana*, germinación, tiempo de almacenamiento, nanoestimulantes.

ABSTRACT: Carbon nanotubes have emerged as promising nanostimulants to enhance germination and early development in various cultivated species, but their effect on plants with CAM metabolism, particularly in the genus *Agave*, remains unexplored. *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck is a species of great ecological, cultural, and economic relevance in Mexico, whose seed propagation faces limitations associated with low germination and progressive deterioration during storage. This study evaluated the effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) on germination, early development, and greenhouse survival of *A. salmiana*, considering the interaction with seed storage time. Four seed lots with different collection years (2015, 2016, 2022, and 2024) were used. In the first phase, seeds from the most recent lot (2024) were exposed to seven MWCNT concentrations (0, 25, 50, 75, 100, 125, and 150 mg L⁻¹) for 24 and 48 h to select representative doses. In a second phase, the selected concentrations (50, 125, and 150 mg L⁻¹) were applied to all four lots for 24 h, evaluating germination, leaf and root length, viability (tetrazolium test), seed morphometry, survival, and greenhouse growth. Results showed a clear dose-dependent pattern: the 50 mg L⁻¹ concentration significantly increased germination (up to 88% in recent seeds) and stimulated seedling growth, particularly in root length. Higher concentrations (125–150 mg L⁻¹) generated contrasting responses, promoting root development in some lots but reducing greenhouse survival in others. Storage time proved critical: the 2015 lot showed nearly null germination and viability (<10%), while the 2022 and 2024 lots achieved germination percentages close to 90% and greenhouse survival above 85%. Surprisingly, the 2024 lot, despite having the largest and heaviest seeds, showed low viability in the tetrazolium test (14.7%), indicating that morphometry is not a reliable predictor of physiological quality. Together, these results demonstrate that MWCNT can act as effective biostimulants in *A. salmiana* when applied at moderate concentrations (50 mg L⁻¹) to seeds with adequate physiological quality (<3 years of storage), but their effect is nullified or becomes inhibitory in lots with advanced deterioration or at high doses. This study provides the first evidence of nano-bio-interactions in agaves and establishes methodological bases for incorporating nanotechnology into propagation and germplasm conservation programs for species with CAM metabolism.

Key words: *Agave salmiana*, germination, storage time, nanostimulants,

INTRODUCCIÓN

Las plantas del género *Agave*, conocidas comúnmente como magueyes, han sido fundamentales para las sociedades de Mesoamérica desde hace aproximadamente 10,000 años (Gentry, 2004; Zizumbo-Villarreal *et al.*, 2009). Este género, endémico del continente americano, comprende más de 200 especies, de las cuales México es centro de origen y diversificación con aproximadamente el 75% de ellas (García-Mendoza, 2002). Entre estas, *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck destaca por su importancia cultural, ecológica y económica, siendo utilizada tradicionalmente para la producción de bebidas fermentadas (pulque), obtención de fibras (ixtle), forraje y, más recientemente, para la producción de bioenergéticos y compuestos de interés industrial (Álvarez-Duarte *et al.*, 2018; Servin *et al.*, 2015).

El ciclo de vida de *A. salmiana*, característico de una especie semélpara, puede extenderse entre 15 y 25 años, iniciando con la germinación de la semilla y culminando con una única fase reproductiva que produce entre 250 y 350 semillas por fruto (García-Mendoza, 2002; Ramírez-Tobías & Peña-Valdivia, s/f). Sin embargo, solo una fracción mínima de estas semillas logra germinar y establecerse en condiciones silvestres debido a múltiples factores limitantes: escasez de humedad edáfica, depredación por herbívoros, incidencia de patógenos y competencia con

especies vegetales establecidas (Aguirre-Dugua & Eguiarte, 2013). Esta baja eficiencia en el reclutamiento natural representa un cuello de botella crítico para la conservación de las poblaciones silvestres y para el establecimiento de cultivos comerciales.

Las semillas que no germinan inmediatamente después de su dispersión pueden permanecer viables en el banco de suelo por períodos variables, o bien deteriorarse progresivamente cuando las condiciones ambientales no son favorables (Bewley *et al.*, 2013). El deterioro fisiológico durante el almacenamiento se manifiesta en pérdida de viabilidad, reducción del vigor y disminución de la capacidad germinativa, atributos que determinan el potencial de establecimiento y el rendimiento posterior de las plántulas (Ellis & Roberts, 1980; Hampton, 2002). La longevidad de las semillas depende de una compleja interacción entre factores intrínsecos, como la composición genética, el contenido de humedad y el estado de madurez al momento de la cosecha, y factores extrínsecos, principalmente la temperatura y la humedad relativa durante el almacenamiento (ISTA, 2023; Walters *et al.*, 2005). En este contexto, la evaluación de la calidad fisiológica mediante pruebas estandarizadas de viabilidad (tetrazolio) y germinación resulta fundamental para predecir el comportamiento de los lotes de semillas y optimizar su uso en programas de propagación y conservación (Velázquez Reyes & Ruíz Torres, 2014).

Paralelamente, en las últimas dos décadas, la nanotecnología ha emergido como una herramienta innovadora con aplicaciones crecientes en el sector agrícola. La agro-nanotecnología se define como la disciplina dedicada a la producción y aplicación de nanopartículas (NPs) y nanoelementos para desarrollar productos y tecnologías de nueva generación que mejoren la eficiencia de los insumos agrícolas, reduzcan el impacto ambiental y aumenten la productividad (Servin, 2015). Dentro del amplio espectro de nanomateriales, los nanotubos de carbono (NTC) han captado especial atención debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas: elevada relación superficie/volumen, conductividad eléctrica, resistencia mecánica y capacidad para interactuar con membranas biológicas y estructuras celulares (Torres-García *et al.*, 2019; Khodakovskaya *et al.*, 2012; Mukherjee *et al.*, 2016).

La primera evidencia documentada del efecto positivo de los nanotubos de carbono en plantas cultivadas fue reportada por Khodakovskaya *et al.* (2009), quienes demostraron que soluciones de riego con NTC de pared múltiple (MWCNT) en concentraciones de 10 a 40 mg L⁻¹ podían penetrar la testa de semillas de tomate, incrementando significativamente las tasas de germinación y estimulando el crecimiento de plántulas jóvenes. Este efecto promotor fue atribuido a la capacidad de los MWCNT para facilitar la imbibición mediante la creación de poros o canales en la cubierta seminal, así como a la activación de genes clave involucrados en la división celular, la expansión de la pared celular y el transporte de agua (acuaporinas) (Khodakovskaya *et al.*, 2011, 2012). Estudios posteriores reforzaron estos hallazgos en un espectro diverso de especies: la aplicación de concentraciones adecuadas de MWCNT estimuló el crecimiento radicular en *Brassica juncea* (Ghodake *et al.*, 2010), promovió la elongación de raíces en cebolla y pepino (Cañas *et al.*, 2008), mejoró la germinación y el vigor en trigo y maíz (Lahiani *et al.*, 2017), e incrementó el rendimiento de frutos en tomate bajo condiciones de invernadero (Khodakovskaya *et al.*, 2013).

Sin embargo, la literatura también ha documentado que los efectos de los MWCNT son estrictamente dosis-dependientes y pueden transitar de bioestimulantes a fitotóxicos cuando se supera un umbral crítico de concentración (Villagarcía *et al.*, 2012). Este comportamiento hormético ha sido asociado con la inducción de estrés oxidativo por acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), peroxidación lipídica y daño a membranas celulares a dosis elevadas (Begum & Fugetsu, 2012; Ghodake *et al.*, 2010; R. Wang *et al.*, 2017). La ventana óptima de concentración parece variar entre especies, órganos y condiciones experimentales, lo que subraya la necesidad de establecer protocolos específicos para cada sistema biológico de interés.

A pesar de los avances documentados en modelos agrícolas convencionales, la aplicación de nanotubos de carbono en especies de importancia ecológica, cultural y económica como los agaves permanece prácticamente inexplorada. Considerando los desafíos asociados a la germinación natural de *Agave salmiana* (baja eficiencia de reclutamiento, pérdida progresiva de viabilidad durante el almacenamiento y limitada capacidad de establecimiento en condiciones adversas), resulta fundamental evaluar si los MWCNT pueden actuar como nanoestimulantes que

mejoren el desempeño germinativo y el desarrollo temprano de esta especie. Adicionalmente, es necesario comprender cómo interactúan dos factores críticos: (i) la concentración de los MWCNT y (ii) el estado fisiológico basal de las semillas (determinado por su tiempo de almacenamiento), ya que ambos podrían modular la dirección y magnitud de la respuesta, determinando si los nanotubos actúan como promotores del crecimiento o como agentes de estrés.

Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivos: (1) evaluar el efecto de diferentes concentraciones de MWCNT (0–150 mg L⁻¹) y tiempos de imbibición (24 y 48 h) sobre la germinación y el desarrollo inicial de *A. salmiana* en un lote de semillas reciente; (2) seleccionar concentraciones representativas (baja, media y alta) para analizar su interacción con el tiempo de almacenamiento en lotes de cuatro años distintos (2015, 2016, 2022 y 2024); y (3) determinar si los MWCNT pueden mitigar parcialmente los efectos del deterioro asociado al almacenamiento prolongado, mejorando la supervivencia y el crecimiento en invernadero. Los resultados de esta investigación buscan contribuir al desarrollo de protocolos nanotecnológicos para la propagación y conservación de germoplasma de agaves, así como al conocimiento fundamental sobre nano-bio-interacciones en plantas con metabolismo CAM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se utilizaron semillas de *A. salmiana* provenientes de cuatro lotes con diferentes años de colecta (2015, 2016, 2022 y 2024). Las colectas se realizaron de manera independiente en cada año señalado, en poblaciones silvestres del Estado de México, México. Todo el material fue almacenado bajo condiciones controladas de 4 a 6 °C, en completa oscuridad y con sílica gel como desecante, dentro de contenedores herméticos en el Laboratorio de Biología Molecular Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrícolas (Universidad Autónoma del Estado de México, UAEMex). Estas condiciones se mantuvieron para minimizar el deterioro fisiológico previo a las evaluaciones.

Nanomateriales de carbono

El nanomaterial empleado correspondió a nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, por sus siglas en inglés) con una pureza del 95 % y un diámetro de 10-30 nm (número de catálogo: 773840, Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EE. UU.). Este material se utilizó en todas las soluciones experimentales preparadas para las fases I y II.

Caracterización inicial de los lotes de semillas

Morfometría de semillas

Se evaluaron las variables morfométricas: longitud, ancho y grosor (mm), así como peso (mg). Las dimensiones lineales se registraron con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, Jilotepec, México), mientras que el peso se determinó en una balanza analítica (Sartorius, ENTRIS224-1S, Gotinga, Alemania). Para cada lote se analizaron 100 semillas, distribuidas en cuatro repeticiones de 25 semillas como unidad de observación. Los resultados se expresaron como la media ± error estándar.

Viabilidad: prueba de tetrazolio

La viabilidad fisiológica se determinó mediante la prueba de tetrazolio (cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio) al 1%, siguiendo las normas vigentes de la ISTA (Asociación Internacional de Pruebas de Semillas). Se utilizaron 100 semillas por lote, con cuatro repeticiones de 25 semillas. Cada semilla se perforó lateralmente con un punzón evitando dañar el embrión. Posteriormente, las semillas se colocaron en frascos de vidrio ámbar con la solución de tetrazolio al 1%, se cubrieron con papel aluminio y se incubaron a 25 °C durante 72 h en oscuridad. Transcurrido el tiempo de incubación, los embriones se extrajeron cuidadosamente con pinzas y bisturí y se colocaron en cajas de Petri para su evaluación bajo un microscopio estereoscópico (BOECO,

NST-606, Alemania). Se consideraron como viables aquellas semillas cuyo embrión presentó una coloración roja o rosada intensa y homogénea, mientras que las semillas con embrión sin teñir o con tejidos no teñidos se clasificaron como no viables. Adicionalmente, se registró el número de semillas que carecían físicamente de embrión, expresando este valor como porcentaje del total de semillas analizadas por lote.

Desinfección de semillas

La desinfección se llevó a cabo siguiendo el protocolo descrito por (Alvarez-Aragón *et al.*, 2020). En total, se desinfectaron 800 semillas para la Fase I y 800 para la Fase II, que posteriormente se utilizaron en los tratamientos correspondientes. Brevemente, las semillas se sumergieron en una solución de etanol al 70% durante 2 minutos, seguido de una inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 2% (v/v) con dos gotas de Tween 20 durante 10 minutos en agitación constante. Finalmente, se realizaron cinco enjuagues con agua destilada estéril para eliminar residuos del desinfectante.

Diseño experimental general

El estudio se desarrolló en dos fases experimentales secuenciales. En la Fase I se evaluó el efecto de siete concentraciones de MWCNT y dos tiempos de imbibición sobre la germinación y desarrollo inicial del lote de semillas más reciente (2024), con el objetivo de seleccionar concentraciones representativas. En la Fase II se evaluaron las concentraciones seleccionadas en los cuatro lotes con diferente tiempo de almacenamiento (2015, 2016, 2022 y 2024), utilizando el tiempo de imbibición que mostró los efectos más pronunciados en la fase previa.

Preparación de soluciones con nanotubos de carbono

Fase I. Efecto de MWCNT en germinación y desarrollo inicial (lote 2024)

Se evaluaron siete concentraciones de MWCNT: 0 (testigo), 25, 50, 75, 100, 125 y 150 mg L⁻¹. Las cantidades requeridas se pesaron en una balanza analítica (Sartorius, ENTRIS224-1S, Gotinga, Alemania), se colocaron en tubos Falcon de 50 mL y se aforaron a 50 mL con agua destilada. Cada solución se sometió a sonicación durante 15 min a 130 W de potencia en un sonicador ultrasónico (Sonics, VCX-130PB, Newtown, Connecticut, EE. UU.) para favorecer la dispersión homogénea del nanomaterial.

Las semillas desinfectadas del lote 2024 se colocaron en tubos Eppendorf de 1.5 mL (10 semillas por tubo) y se agregó 1 mL de cada una de las soluciones preparadas. Cada concentración se manejó con cinco repeticiones, totalizando 50 semillas por tratamiento. Los tubos se colocaron en frascos de vidrio protegidos con papel aluminio y se mantuvieron en un agitador orbital (Lab Companion, OS-100, Daejeon, Corea del Sur) a 200 rpm durante 24 y 48 h para evaluar el efecto del tiempo de imbibición.

Fase II. Efecto de MWCNT según el tiempo de almacenamiento (lotes 2015, 2016, 2022 y 2024)

Con base en los resultados de la Fase I (Tabla 1), se seleccionaron tres concentraciones de MWCNT que representaron diferentes tipos de respuesta: 50 mg L⁻¹ (efecto promotor consistente), 125 mg L⁻¹ (efecto intermedio) y 150 mg L⁻¹ (efecto contrastante). Se incluyó además el tratamiento testigo (0 mg L⁻¹). El tiempo de imbibición seleccionado fue de 24 h, por ser el que mostró los efectos más pronunciados sobre el crecimiento de plántulas en la Fase I.

La preparación de las soluciones y la exposición de las semillas siguió el protocolo descrito en la Fase I, aplicándose de manera independiente a cada uno de los cuatro lotes de semillas (2015, 2016, 2022 y 2024). Para cada lote y concentración se utilizaron cinco repeticiones de 10 semillas, totalizando 50 semillas por tratamiento por lote.

Germinación y desarrollo en condiciones controladas

Tras la exposición a los MWCNT, las semillas se transfirieron a cajas Petri de 90 mm de diámetro (cinco por tratamiento), colocando 10 semillas por caja sobre papel filtro Whatman No. 1 previamente hidratado con 3 mL de agua destilada estéril. El experimento se mantuvo durante 28 días en una cuarto de incubación a 25 ± 2 °C con un fotoperiodo de 12 h luz/12 h oscuridad. Se hidrató cada caja cada tercer día con 1 mL de agua destilada estéril y se registraron los eventos de germinación diariamente, considerando como germinada la semilla que presentó una radícula de al menos 2 mm de longitud.

Porcentaje de germinación

El porcentaje final de germinación se determinó mediante el conteo total de semillas germinadas por tratamiento y por lote al día 28, expresándose como porcentaje respecto al total de semillas evaluadas.

Medición de plántulas a los 28 días

A los 28 días después de la siembra, se midió la longitud de la raíz principal y de la hoja más larga (mm) en todas las plántulas germinadas, utilizando un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, Jilotepec, México). Estos datos permitieron evaluar el efecto del nanomaterial en el desarrollo inicial de las plántulas.

Adaptación en invernadero

Las plántulas obtenidas de cada tratamiento se trasplantaron a charolas de germinación de 200 cavidades (con un volumen de 30 mL por cavidad) con espuma fenólica estéril a 121 °C durante 20 min. Se trasladaron a condiciones de invernadero (temperatura promedio de 28 °C y humedad relativa del $60 \pm 10\%$), donde permanecieron durante dos meses para su aclimatación, con riegos cada tercer día mediante microaspersión. El porcentaje de supervivencia se calculó al final del período mediante la fórmula: $(\text{Número de plántulas vivas} / \text{Número de plántulas trasplantadas}) \times 100$.

Morfometría de plántulas adaptadas

Después de 2 meses en invernadero, se registraron las variables morfológicas de las plántulas sobrevivientes: longitud de la hoja más larga y longitud de la raíz principal (mm), utilizando un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, Jilotepec, México). El lote 2015 no se incluyó en este análisis por la nula supervivencia de sus plántulas.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Levene) para verificar los supuestos de parametricidad. Para determinar el efecto de los tratamientos con MWCNT y el año de colecta (lote) sobre las variables evaluadas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, incluyendo la interacción entre ambos factores. En los casos donde los datos no cumplieron los supuestos paramétricos, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Cuando se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizó una prueba de comparación de medias *post hoc* de Tukey. Todos los análisis se ejecutaron utilizando el software estadístico R (versión 4.3.1, R Core Team, 2023). Los resultados se presentan como la media $\pm$ error estándar, y las diferencias significativas se indican mediante letras distintas (Tukey, $p < 0.05$).

RESULTADOS

Fase I. Lote 2024: Selección de concentraciones de MWCNT

Con el objetivo de identificar concentraciones representativas (baja, media y alta) de MWCNT para evaluar en lotes con diferente tiempo de almacenamiento, se realizó un primer experimento utilizando semillas del lote más reciente (2024). Se evaluaron siete concentraciones (0, 25, 50, 75, 100, 125 y 150 mg L⁻¹) y dos tiempos de imbibición (24 y 48 h). La Tabla 1 resume el efecto de estos tratamientos sobre la germinación, el desarrollo inicial y la supervivencia en invernadero.

Tabla 1. Efecto de la concentración de MWCNT y el tiempo de imbibición sobre la germinación y el desarrollo inicial de *Agave salmiana* (lote 2024).

Table 1. Effect of MWCNT concentration and imbibition time on germination and early development of *Agave salmiana* (2024 seed lot).

Concentración (mg L ⁻¹)	Tiempo (h)	Germinación (%)	Longitud de hoja (mm)	Longitud de raíz (mm)	Supervivencia en invernadero (%)
0 (Testigo)	24	72.0 ± 2.0 bc	19.4 ± 0.9 cd	7.0 ± 0.4 c	95.0 ± 2.9 a
	48	70.0 ± 3.2 bc	13.9 ± 0.6 e	5.3 ± 0.5 cd	78.0 ± 3.7 bcd
25	24	78.0 ± 2.0 ab	18.6 ± 0.8 cd	6.3 ± 0.4 cd	84.0 ± 2.4 abc
	48	80.0 ± 3.2 ab	12.8 ± 0.5 e	2.9 ± 0.3 e	70.0 ± 4.5 cd
50	24	88.0 ± 3.7 a	29.2 ± 1.2 a	13.6 ± 0.9 a	94.0 ± 2.4 a
	48	86.0 ± 2.4 a	16.1 ± 0.7 de	4.6 ± 0.4 d	90.0 ± 3.2 ab
75	24	84.0 ± 2.4 ab	17.1 ± 0.8 cde	5.7 ± 0.4 cd	82.0 ± 3.7 abc
	48	66.0 ± 4.0 c	16.5 ± 0.7 cde	4.8 ± 0.4 d	78.0 ± 3.7 bcd
100	24	66.0 ± 4.0 c	17.8 ± 0.8 cde	7.3 ± 0.5 c	82.0 ± 3.7 abc
	48	86.0 ± 2.4 a	15.5 ± 0.7 de	3.7 ± 0.3 de	91.0 ± 3.3 ab
125	24	78.0 ± 3.7 ab	26.5 ± 1.1 ab	8.1 ± 0.5 bc	85.0 ± 2.9 abc
	48	82.0 ± 2.0 ab	18.7 ± 0.8 cd	11.5 ± 0.9 ab	97.0 ± 2.0 a
150	24	82.0 ± 2.0 ab	26.5 ± 1.1 ab	8.1 ± 0.5 bc	91.0 ± 2.4 ab
	48	76.0 ± 2.4 b	19.9 ± 0.8 bc	6.2 ± 0.5 cd	68.0 ± 4.9 d

Los valores representan la media ± error estándar (n=5 repeticiones de 10 semillas cada una). Medias con la misma letra dentro de cada columna no son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

Los resultados mostraron un comportamiento diferencial dependiente de la concentración y el tiempo de exposición. La concentración de 50 mg L⁻¹ con 24 h de imbibición destacó significativamente ($p < 0.05$) sobre el resto de los tratamientos, registrando los valores más altos en germinación (88%), longitud de hoja (29.2 mm) y longitud de raíz (13.6 mm). Este efecto promotor fue consistente también a 48 h de exposición, aunque con menor magnitud en el crecimiento de plántulas.

Las concentraciones de 125 y 150 mg L⁻¹ mostraron efectos positivos, particularmente en el desarrollo radicular a 48 h, donde se observaron longitudes de raíz de 11.5 mm y 6.2 mm, respectivamente. Sin embargo, estos valores fueron inferiores a los alcanzados con 50 mg L⁻¹. En contraste, concentraciones intermedias como 75 y 100 mg L⁻¹ mostraron comportamientos erráticos, con disminuciones en la germinación a 48 h (66% en ambos casos) y un crecimiento de plántulas por debajo del testigo en algunas variables.

En cuanto a la supervivencia en invernadero, todos los tratamientos mantuvieron porcentajes superiores al 68%, siendo particularmente altos (>90%) en los tratamientos con 50 mg L⁻¹ (24 h), 100 mg L⁻¹ (48 h) y 125 mg L⁻¹ (48 h). El valor más bajo (68%) se registró en la concentración de 150 mg L⁻¹ a 48 h.

Con base en estos resultados, se seleccionaron tres concentraciones para la Fase II: 50 mg L⁻¹ (por su claro efecto promotor), 125 mg L⁻¹ (por representar un efecto intermedio consistente) y 150 mg L⁻¹ (por su efecto contrastante, especialmente a 48 h). El tiempo de imbibición seleccionado fue de 24 h, por mostrar los efectos más pronunciados en las variables de crecimiento.

Fase II. Efecto del tiempo de almacenamiento y los MWCNT

Una vez seleccionadas las concentraciones representativas en el lote más reciente, se procedió a evaluar su efecto en lotes con diferentes tiempos de almacenamiento (2015, 2016, 2022 y 2024), con el fin de determinar si la respuesta a los MWCNT está modulada por el deterioro asociado al almacenamiento prolongado.

Caracterización inicial de los lotes de semillas

Antes de aplicar los tratamientos, se caracterizó el estado basal de cada lote mediante análisis morfométricos y pruebas de viabilidad. La Tabla 2 presenta esta caracterización inicial, que permite interpretar las respuestas posteriores a los MWCNT.

Tabla 2. Caracterización morfométrica y viabilidad inicial de cuatro lotes de semillas de *Agave salmiana* con diferente tiempo de almacenamiento.

Table 2. Morphometric characterization and initial viability of four seed lots of *Agave salmiana* with different storage times.

Lote	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Peso (mg)	Viabilidad TTC (%)	Semillas sin embrión (%)
2015	6.8 ± 0.1 c	4.8 ± 0.1 b	0.5 ± 0.02 b	7.8 ± 0.2 c	18.5 ± 2.1 c	8.0 ± 1.6 b
2016	8.3 ± 0.1 a	5.2 ± 0.1 ab	0.4 ± 0.02 b	8.6 ± 0.2 bc	64.9 ± 3.5 b	28.0 ± 2.9 a
2022	7.1 ± 0.1 b	5.1 ± 0.1 ab	0.5 ± 0.02 b	9.1 ± 0.2 b	78.0 ± 2.9 a	6.0 ± 1.6 b
2024	8.2 ± 0.1 a	5.9 ± 0.2 a	0.6 ± 0.03 a	11.0 ± 0.3 a	14.7 ± 2.4 c	6.8 ± 1.8 b

Los valores representan la media ± error estándar (n=4 repeticiones de 25 semillas). Medias con la misma letra dentro de cada columna no son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

El análisis morfométrico reveló diferencias significativas entre lotes. El lote 2024 presentó las semillas con mayor grosor y peso ($p < 0.05$), indicando un mejor estado de llenado y mayor reserva de nutrientes. En contraste, el lote más antiguo (2015) mostró las semillas con menor longitud y peso, lo que sugiere un posible deterioro o menor calidad inicial.

Sin embargo, la prueba de viabilidad con tetrazolio (Figura 1) mostró un patrón inesperado y relevante. Los lotes 2022 y 2016 presentaron la viabilidad más alta (78% y 64.9%, respectivamente), con diferencias significativas entre ellos y respecto a los demás. Sorprendentemente, el lote 2024, a pesar de su mayor tamaño y peso, mostró una viabilidad significativamente baja (14.7%), comparable con el lote más antiguo de 2015 (18.5%). Este resultado sugiere que, en *A. salmiana*, el tamaño de la semilla no es un predictor directo de su viabilidad fisiológica.

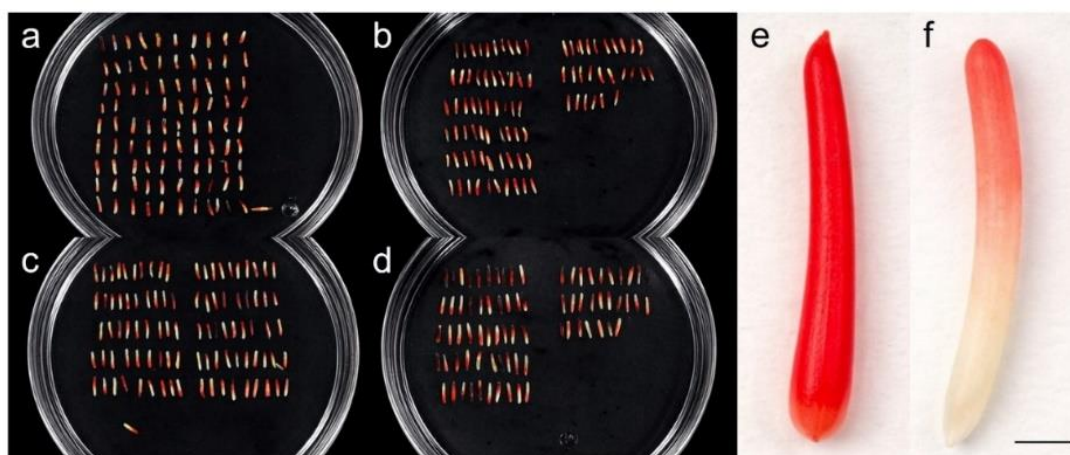


Figura 1. Prueba de tetrazolio (TTC) en embriones cigóticos de *Agave salmiana* provenientes de cuatro lotes de almacenamiento. a) Lote 2015, b) Lote 2016, c) Lote 2022, d) Lote 2024, e) embrión viable y f) embrión no viable. Barra = 1 mm.

Figure 1. Tetrazolium test (TTC) in *Agave salmiana* embryos from four storage lots. a) 2015 lot, b) 2016 lot, c) 2022 lot, d) 2024 lot, e) viable embryo, f) non-viable embryo.

Los embriones viables presentaron coloración roja intensa y homogénea, indicando actividad deshidrogenasa mitocondrial; mientras que los embriones no viables se caracterizan por coloración parcial o ausencia de tinción (incoloros) (ISTA, 2023). Barra = 1 mm

Adicionalmente, el lote 2016 destacó por presentar un alto porcentaje de semillas sin embrión (28%), significativamente superior al de los otros lotes (6-8%). Esta característica morfoanatómica constituye un factor limitante determinante en su potencial germinativo, independientemente de los tratamientos aplicados.

Germinación y desarrollo inicial (28 días)

La Figura 2 muestra el porcentaje de germinación acumulada a los 28 días para los cuatro lotes de semillas, tratados con las concentraciones seleccionadas de MWCNT (0, 50, 125 y 150 mg L⁻¹) durante 24 h de imbibición.

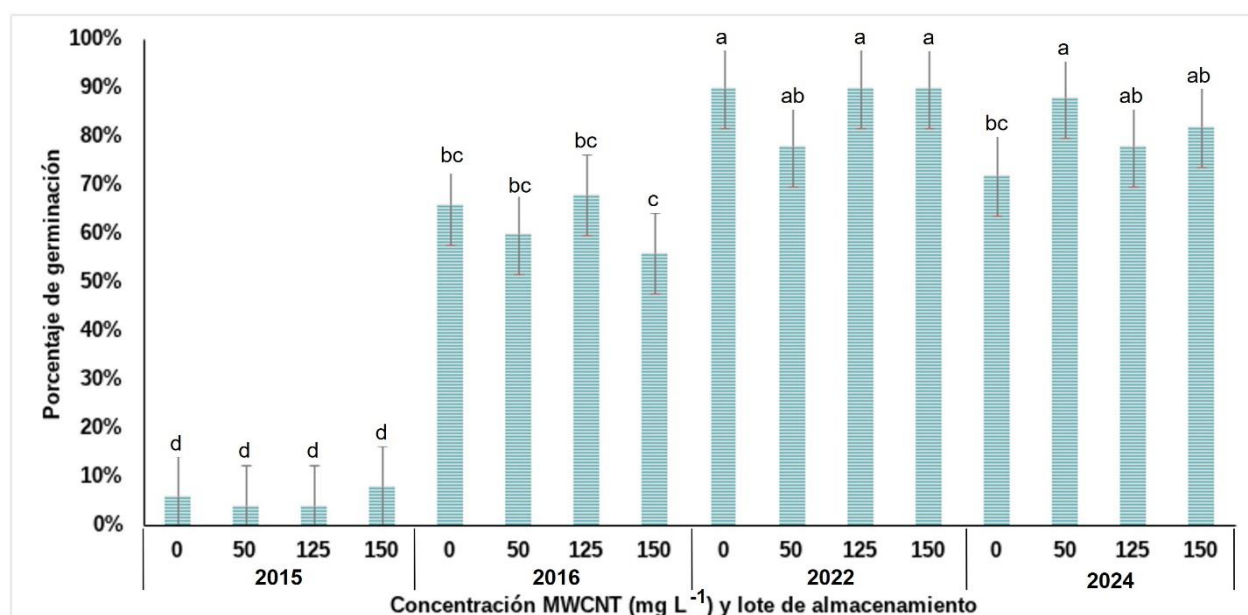


Figura 2. Porcentaje de germinación acumulada a 28 días de semillas de *Agave salmiana* de cuatro lotes de almacenamiento (2015, 2016, 2022, 2024), tratadas con cuatro concentraciones de MWCNT (0, 50, 125, 150 mg L⁻¹) durante 24 h de imbibición.

Figure 2. Cumulative germination percentage at 28 days of *Agave salmiana* seeds from four storage lots (2015, 2016, 2022, 2024), treated with four MWCNT concentrations (0, 50, 125, 150 mg L⁻¹) for 24 h.

Los valores son la media $\pm$ error estándar (n=5). Barras con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$). La comparación es válida entre todos los tratamientos y lotes.

El análisis de varianza reveló un efecto significativo ($p < 0.05$) tanto del lote (tiempo de almacenamiento) como de la concentración de MWCNT, así como de su interacción. Esto indica que la respuesta a los nanotubos depende del estado fisiológico basal de las semillas.

Los lotes más recientes (2022 y 2024) presentaron los porcentajes de germinación más altos, aunque con patrones de respuesta distintos. El lote 2022 alcanzó su máxima germinación (90%) con el tratamiento testigo (0 mg L⁻¹), y los tratamientos con MWCNT no lograron superar este valor, manteniéndose en un rango de 82-86%. En contraste, el lote 2024 respondió positivamente a los MWCNT, incrementando significativamente su germinación del 72% (testigo) al 88% con 50 mg L⁻¹. Las concentraciones de 125 y 150 mg L⁻¹ también mejoraron la germinación (78% y 82%, respectivamente), aunque sin alcanzar la significancia estadística respecto al testigo.

El lote 2016 mostró una germinación moderada, con valores entre 58% y 68%. El tratamiento con 125 mg L⁻¹ (68%) superó ligeramente al testigo (66%), aunque las diferencias no fueron

estadísticamente significativas. Finalmente, el lote 2015 presentó una germinación prácticamente nula ($\leq 2\%$) en todos los tratamientos, evidenciando una pérdida irreversible de viabilidad asociada al almacenamiento prolongado.

La Figura 3 complementa estos resultados mostrando el desarrollo de las plántulas a los 28 días, evaluado mediante la longitud de hoja y raíz.

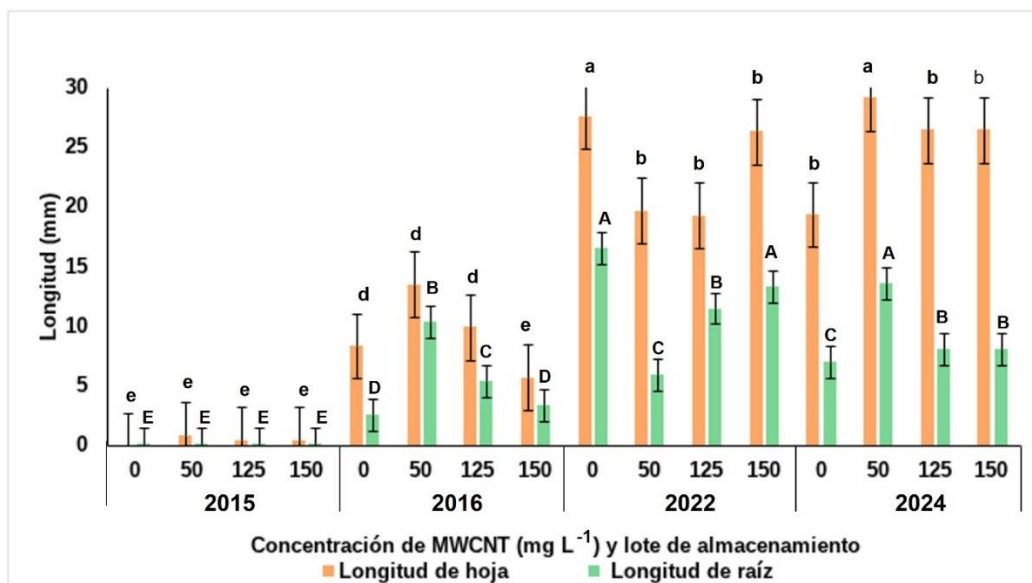


Figura 3. Longitud de hoja y raíz (mm) a los 28 días después de *Agave salmiana* provenientes de cuatro lotes de almacenamiento (2015, 2016, 2022, 2024), tratadas con cuatro concentraciones de MWCNT (0, 50, 125, 150 mg L⁻¹) durante 24 h de imbibición.

Figure 3. Leaf and root length (mm) at 28 days after sowing in *Agave salmiana* seedlings from four storage lots (2015, 2016, 2022, 2024), treated with four MWCNT concentrations (0, 50, 125, 150 mg L⁻¹) for 24 h.

Los valores son la media $\pm$ error estándar. Barras con la misma letra (minúsculas para hoja, mayúsculas para raíz) no son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$). La comparación es válida entre todos los tratamientos y lotes para cada variable.

El desarrollo de las plántulas reflejó el mismo patrón observado en germinación, pero con matices importantes. El lote 2022 produjo las plántulas con mayor longitud de hoja y raíz, destacando el tratamiento testigo (27.6 mm y 16.6 mm, respectivamente) y el de 150 mg L⁻¹ (26.3 mm y 13.4 mm), sin diferencias significativas entre ellos.

En el lote 2024, el tratamiento con 50 mg L⁻¹ estimuló significativamente el crecimiento, alcanzando 19.7 mm de longitud de hoja y 15.9 mm de raíz, valores que superaron ampliamente al testigo (8.4 mm y 2.7 mm, respectivamente). Este resultado es particularmente relevante, ya que las plántulas del testigo mostraron un desarrollo muy limitado, mientras que las tratadas con 50 mg L⁻¹ alcanzaron un vigor comparable al de los mejores tratamientos del lote 2022.

El lote 2016 mostró una respuesta positiva a la concentración de 50 mg L⁻¹, alcanzando los mayores valores de su lote (13.6 mm de hoja y 10.4 mm de raíz), con diferencias significativas respecto al testigo (8.4 mm y 2.7 mm). Las concentraciones más altas (125 y 150 mg L⁻¹) produjeron un crecimiento intermedio. El lote 2015, coherente con su nula germinación, presentó un crecimiento prácticamente nulo en las escasas plántulas obtenidas.

Adaptación y crecimiento en invernadero

La Tabla 3 muestra la capacidad de adaptación y el crecimiento de las plántulas tras 2 meses de aclimatación en condiciones de invernadero. El lote 2015 no presentó supervivencia en ninguna condición, por lo que fue excluido del análisis.

Tabla 3. Supervivencia (%) y morfometría de plántulas de *Agave salmiana* provenientes de tres lotes de almacenamiento (2016, 2022, 2024) después de 2 meses de adaptación en invernadero.

Table 3. Survival (%) and morphometry of *Agave salmiana* seedlings from three storage lots (2016, 2022, 2024) after two months of greenhouse acclimatization.

Lote	Concentración (mg L ⁻¹)	Supervivencia (%)	Longitud hoja (mm)	Longitud raíz (mm)
2016	0	0.0 ± 0.0 e	-	-
	50	72.0 ± 4.9 bc	21.3 ± 0.9 bc	15.9 ± 1.0 a
	125	42.0 ± 4.9 d	19.9 ± 0.8 c	9.4 ± 0.7 b
	150	64.0 ± 5.1 c	21.9 ± 0.9 b	13.0 ± 0.9 a
2022	0	97.0 ± 2.0 a	36.9 ± 1.5 a	17.9 ± 1.1 a
	50	91.0 ± 2.4 a	34.3 ± 1.3 a	17.3 ± 1.0 a
	125	90.0 ± 2.4 a	33.7 ± 1.3 a	16.1 ± 1.0 a
	150	97.0 ± 2.0 a	22.0 ± 1.0 bc	21.0 ± 1.2 a
2024	0	95.0 ± 2.9 a	42.4 ± 1.8 a	29.5 ± 1.5 a
	50	94.0 ± 2.4 a	39.8 ± 1.6 a	41.9 ± 2.1 b
	125	85.0 ± 2.9 ab	33.5 ± 1.4 a	30.1 ± 1.6 a
	150	91.0 ± 2.4 a	43.1 ± 1.8 a	37.3 ± 1.9 b

Los valores representan la media ± error estándar. Medias con la misma letra dentro de cada columna (y por lote, para supervivencia) no son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$). El lote 2015 no se incluye por nula supervivencia.

La fase de adaptación en invernadero evidenció contrastes notables entre lotes, tanto en supervivencia como en crecimiento.

En este sentido, los lotes 2022 y 2024 mantuvieron una supervivencia excepcionalmente alta (>85%) en todos los tratamientos, sin diferencias significativas entre concentraciones. Este resultado indica que, una vez superada la fase de germinación, las plántulas de estos lotes poseen una notable capacidad de aclimatación, independientemente del tratamiento previo con MWCNT. En contraste, el lote 2016 mostró una supervivencia moderada y dependiente del tratamiento. El valor más alto (72%) se registró con 50 mg L⁻¹, seguido de 150 mg L⁻¹ (64%) y 125 mg L⁻¹ (42%). El tratamiento testigo presentó supervivencia nula, lo que sugiere que, en este lote con deterioro intermedio, los MWCNT no solo promovieron la germinación, sino que fueron determinantes para la supervivencia posterior.

Respecto al crecimiento en invernadero, el análisis reveló efectos diferenciales según el lote y la concentración. En el lote 2024, se observó un efecto promotor específico de los MWCNT sobre el sistema radicular. Los tratamientos con 50 y 150 mg L⁻¹ incrementaron significativamente la longitud de la raíz (41.9 mm y 37.3 mm, respectivamente) en comparación con el testigo (29.5 mm), representando aumentos del 42% y 26%. La longitud de hoja, sin embargo, no mostró diferencias significativas entre tratamientos, oscilando entre 33.5 y 43.1 mm.

En el lote 2016, los tratamientos con 50 y 150 mg L⁻¹ también favorecieron un mayor desarrollo radicular (15.9 mm y 13.0 mm, respectivamente), aunque con valores absolutos inferiores a los del lote 2024. La longitud de hoja mostró un patrón similar, con los valores más altos en estos mismos tratamientos.

El lote 2022 presentó un comportamiento distinto: no se observaron diferencias significativas entre tratamientos para ninguna variable de crecimiento, con la excepción de una menor longitud de hoja en el tratamiento de 150 mg L⁻¹ (22.0 mm) respecto al testigo (36.9 mm). Este resultado sugiere que las semillas de este lote, con alta viabilidad inicial y excelente germinación, fueron menos sensibles al estímulo de los nanotubos en esta fase, posiblemente porque ya expresaban su máximo potencial fisiológico.

En conjunto, estos resultados indican que el efecto de los MWCNT sobre el crecimiento en invernadero es más pronunciado en lotes con cierto grado de deterioro (2016) o con viabilidad

inicial baja pero buen potencial de respuesta (2024), mientras que en lotes con alta calidad fisiológica basal (2022) el efecto es neutro o incluso ligeramente negativo a altas concentraciones.

DISCUSIÓN

Efecto dosis-dependiente de los MWCNT

Los resultados de la Fase I demostraron que los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) modulan la germinación y el desarrollo inicial de *A. salmiana* de manera dosis-dependiente, con un efecto promotor óptimo a 50 mg L⁻¹ y una transición hacia respuestas inhibitorias en concentraciones superiores a 100 mg L⁻¹. Este comportamiento bifásico, característico de una respuesta hormética, ha sido documentado en diversas especies vegetales expuestas a nanomateriales de carbono (Khodakovskaya *et al.*, 2012; Lahiani *et al.*, 2017; Mukherjee *et al.*, 2016).

El incremento significativo en germinación (88%), longitud de hoja (29.2 mm) y longitud de raíz (13.6 mm) observado con 50 mg L⁻¹ sugiere que los MWCNT, a dosis moderadas, actúan como nanoestimulantes capaces de penetrar la testa seminal y modificar positivamente los microambientes celulares. Mecanismos propuestos incluyen: (i) la creación de poros o canales que facilitan la imbibición y el intercambio gaseoso (Khodakovskaya *et al.*, 2009); (ii) la activación de acuaporinas y genes relacionados con la división celular (Khodakovskaya *et al.*, 2012); y (iii) la modulación del balance hormonal, particularmente de auxinas y citoquininas, que regulan la elongación radicular y foliar (Lahiani *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2025).

En contraste, las concentraciones de 125 y 150 mg L⁻¹ produjeron respuestas erráticas y, en algunos casos, inhibitorias. A 48 h de exposición, la germinación con 150 mg L⁻¹ descendió a 76% y la supervivencia en invernadero se redujo drásticamente a 68%, el valor más bajo registrado. Este patrón es consistente con estudios que reportan fitotoxicidad por MWCNT a dosis elevadas, atribuida a estrés oxidativo generado por la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), peroxidación lipídica y daño a membranas celulares (Begum & Fugetsu, 2012; Ghodake *et al.*, 2010; R. Wang *et al.*, 2017). La transición entre estimulación y toxicidad observada en nuestro estudio refuerza la noción de que los MWCNT poseen una ventana óptima de concentración, más allá de la cual los efectos negativos predominan (Villagarcía *et al.*, 2012).

El tiempo de almacenamiento como modulador de la respuesta a MWCNT

Un hallazgo central de este trabajo es que el efecto de los MWCNT está fuertemente modulado por el estado fisiológico basal de las semillas, determinado por su tiempo de almacenamiento. La caracterización inicial de los lotes (Tabla 2) reveló diferencias profundas en viabilidad y calidad: mientras los lotes 2022 y 2016 presentaron alta viabilidad (78% y 64.9%, respectivamente), el lote 2024, a pesar de su mayor tamaño y peso, mostró una viabilidad sorprendentemente baja (14.7%), comparable con el lote más antiguo de 2015 (18.5%). Este resultado contradice la expectativa intuitiva de que semillas más recientes y de mayor tamaño poseen necesariamente mayor viabilidad, y subraya la importancia de evaluar directamente la calidad fisiológica más allá de caracteres morfométricos (Hampton, 2002; ISTA, 2023).

La respuesta a los MWCNT reflejó estas diferencias basales. El lote 2022, con alta viabilidad, mostró una germinación excelente incluso en el testigo (90%), y los MWCNT no lograron superar este valor, sugiriendo que semillas con calidad fisiológica óptima pueden haber alcanzado ya su máximo potencial germinativo, siendo menos sensibles a estímulos externos (Bewley *et al.*, 2013). En contraste, el lote 2024, con baja viabilidad, pero buen potencial de respuesta experimentó el beneficio más pronunciado: la germinación aumentó del 72% (testigo) al 88% con 50 mg L⁻¹, y el crecimiento de plántulas se multiplicó varias veces (de 8.4 a 19.7 mm en hoja; de 2.7 a 15.9 mm en raíz). Este patrón sugiere que los MWCNT pueden rescatar parcialmente el potencial fisiológico de semillas con cierto grado de deterioro, posiblemente activando vías metabólicas latentes o compensando deficiencias en la imbibición (Khodakovskaya *et al.*, 2011; Martínez-Ballesta *et al.*, 2016). El lote 2016, con viabilidad intermedia (64.9%) pero un alto porcentaje de semillas sin embrión (28%), mostró una respuesta moderada a los MWCNT. La

concentración de 50 mg L⁻¹ mejoró significativamente el crecimiento de plántulas, aunque la supervivencia en invernadero fue limitada (máximo 72%). Este resultado indica que, en lotes con problemas estructurales (ausencia de embrión), los beneficios de los MWCNT pueden verse restringidos por factores intrínsecos no modificables (Jimenez-Torres *et al.*, 2022). Finalmente, el lote 2015, con deterioro avanzado y viabilidad casi nula, no respondió a ningún tratamiento, confirmando que existe un umbral de deterioro más allá del cual ningún estímulo externo puede restaurar la capacidad germinativa (Ellis & Roberts, 1980; Walters *et al.*, 2005).

Efectos diferenciales sobre órganos y persistencia en invernadero

Un aspecto novedoso de este estudio es el seguimiento del efecto de los MWCNT hasta la fase de adaptación en invernadero (2 meses después de la germinación). En el lote 2024, los tratamientos con 50 y 150 mg L⁻¹ incrementaron significativamente la longitud radicular (41.9 mm y 37.3 mm, respectivamente) respecto al testigo (29.5 mm), representando aumentos del 42% y 26%. Este efecto persistente sugiere que los MWCNT no solo actúan durante la imbibición y germinación, sino que pueden inducir cambios duraderos en la arquitectura radicular, posiblemente a través de la modulación de genes involucrados en el desarrollo de raíces laterales y pelos absorbentes (F.-X. Wang *et al.*, 2022; Zuverza-Mena *et al.*, 2017).

La longitud de hoja, en cambio, no mostró diferencias significativas en este lote, indicando un efecto órgano-específico. Este patrón ha sido reportado previamente: los MWCNT tienden a favorecer el desarrollo radicular sobre el aéreo en dosis moderadas, posiblemente porque las raíces están en contacto directo con el nanomaterial durante más tiempo y porque las vías de señalización de auxinas, que regulan la elongación radicular, son particularmente sensibles a nanoestimulantes (Lahiani *et al.*, 2017; Syu *et al.*, 2014).

En contraste, el lote 2022 no mostró diferencias significativas entre tratamientos en invernadero, con la excepción de una menor longitud de hoja a 150 mg L⁻¹. Este resultado refuerza la idea de que lotes con alta calidad fisiológica basal pueden ser menos responsivos a estímulos externos, o incluso experimentar efectos negativos a dosis elevadas debido a un desbalance en la asignación de recursos (Hatami *et al.*, 2016). La supervivencia excepcionalmente alta (>90%) de este lote en todas las condiciones indica que, una vez superada la germinación, las plántulas de *A. salmiana* poseen una notable plasticidad y tolerancia fisiológica, como ha sido documentado en otras especies de agave (Alvarado Cepeda *et al.*, 2024; Álvarez-Duarte *et al.*, 2018).

Implicaciones para la nanotecnología agrícola y la conservación de germoplasma

Los resultados de este trabajo tienen implicaciones prácticas significativas. En primer lugar, demuestran que los MWCNT pueden ser herramientas valiosas para mejorar la germinación y el establecimiento temprano de *A. salmiana*, una especie de importancia ecológica, cultural y económica en México (Álvarez-Duarte *et al.*, 2018; Torres-García *et al.*, 2019). La concentración de 50 mg L⁻¹ emerge como una dosis de referencia para futuros estudios y aplicaciones, aunque se requiere validación en condiciones de campo y con un espectro más amplio de genotipos.

En segundo lugar, los hallazgos subrayan la necesidad de considerar la calidad fisiológica de las semillas como variable crítica en estudios de nanoestimulación. Investigaciones previas han reportado efectos positivos de MWCNT en especies como tomate, tabaco, trigo y maíz (Khodakovskaya *et al.*, 2009; Lahiani *et al.*, 2017; Mukherjee *et al.*, 2016), pero rara vez han considerado explícitamente la edad o el estado de deterioro del material seminal. Nuestros resultados indican que ignorar esta variable puede llevar a conclusiones sesgadas o inconsistentes. En tercer lugar, la persistencia del efecto radicular hasta 2 meses después del tratamiento abre preguntas sobre los mecanismos subyacentes y la posible transferencia de MWCNT a tejidos vegetales superiores. Estudios de trazado con isótopos o microscopía electrónica serían necesarios para determinar si los nanotubos son internalizados y translocados, o si sus efectos son puramente epigenéticos o mediados por señales hormonales (Lin *et al.*, 2009; Serag *et al.*, 2013). Finalmente, es importante señalar que, si bien los MWCNT mostraron efectos beneficiosos en dosis moderadas, también evidenciaron potencial fitotóxico a concentraciones elevadas. Esto subraya la importancia de desarrollar protocolos de aplicación seguros y de realizar evaluaciones de bioseguridad a mediano y largo plazo, particularmente si se contempla su uso en sistemas

agrícolas abiertos donde podrían acumularse en suelos o aguas (Gardea-Torresdey *et al.*, 2014; Rico *et al.*, 2011).

Limitaciones del estudio y perspectivas futuras

Este estudio presenta limitaciones que deben reconocerse. La primera es que no se realizaron análisis bioquímicos o moleculares (e.g., actividad antioxidante, expresión génica, cuantificación de ROS) que permitieran corroborar directamente los mecanismos propuestos. Futuros trabajos deberían incorporar estas aproximaciones para validar las hipótesis sobre estrés oxidativo y activación génica.

La segunda limitación es que los experimentos se realizaron en condiciones controladas de laboratorio e invernadero. La traducción de estos resultados a condiciones de campo, donde las variables ambientales fluctúan y existen interacciones bióticas, requerirá estudios adicionales.

La tercera es que no se evaluó el posible efecto de los MWCNT sobre la microbiota del sustrato o sobre la salud del suelo, aspectos cruciales para una evaluación integral de su impacto ambiental.

A pesar de estas limitaciones, el trabajo aporta evidencia robusta sobre el potencial de los MWCNT como nanoestimulantes en *A. salmiana*, y establece una base metodológica para futuras investigaciones en la interfaz entre nanotecnología, fisiología de semillas y conservación de recursos fitogenéticos.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra, por primera vez en *A. salmiana*, que los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) actúan como nanoestimulantes dosis-dependientes, capaces de mejorar significativamente la germinación y el desarrollo temprano de plántulas cuando se aplican en concentraciones moderadas (25–50 mg L⁻¹). La concentración de 50 mg L⁻¹ emergió como la más efectiva, incrementando la germinación hasta en un 22% respecto al testigo y potenciando el crecimiento radicular y foliar en más de un 100% en lotes con calidad fisiológica adecuada. Este efecto promotor se atribuye a la capacidad de los MWCNT para facilitar la imbibición y activar rutas metabólicas clave durante las fases iniciales del desarrollo, aunque los mecanismos moleculares precisos requieren confirmación en estudios futuros.

Un hallazgo central y novedoso es que la respuesta a los MWCNT está fuertemente modulada por el estado fisiológico basal de las semillas, determinado por su tiempo de almacenamiento. Las semillas con menos de tres años de almacenamiento (lotes 2022–2024) mostraron la mayor capacidad de respuesta, mientras que lotes con deterioro avanzado (lote 2015) resultaron irresponsivos a cualquier concentración. Este patrón revela que la efectividad de la nanoestimulación no depende exclusivamente de la dosis, sino de una interacción compleja entre el nanomaterial y la integridad estructural y metabólica del embrión. Sorprendentemente, el tamaño de la semilla no resultó un predictor fiable de la viabilidad, como evidenció el lote 2024, que, a pesar de presentar las semillas de mayor peso y grosor, mostró una viabilidad excepcionalmente baja (14.7%), comparable al lote más antiguo.

Los resultados también confirman que los MWCNT presentan un comportamiento hormético: mientras que dosis moderadas (≤ 50 mg L⁻¹) produjeron efectos bioestimulantes consistentes, concentraciones elevadas (≥ 125 mg L⁻¹) indujeron respuestas erráticas o inhibitorias, particularmente en variables como supervivencia en invernadero y elongación radicular. Esta transición entre estimulación y toxicidad subraya la necesidad de establecer ventanas óptimas de aplicación y de evitar generalizaciones sobre la seguridad de los nanomateriales basadas únicamente en ensayos a corto plazo.

Desde una perspectiva aplicada, este trabajo proporciona bases metodológicas sólidas para incorporar nanotecnología en programas de propagación y conservación de germoplasma de agaves, un género de enorme relevancia ecológica, cultural y económica en México. La

concentración de 50 mg L⁻¹ con 24 h de imbibición emerge como un protocolo de referencia para futuras validaciones en condiciones de campo y para su posible escalamiento a otros sistemas de interés agronómico.

En síntesis, este trabajo establece que los MWCNT, utilizados en dosis adecuadas y sobre material seminal de calidad, constituyen una herramienta prometedora para mejorar la germinación y el establecimiento temprano de *A. salmiana*, pero enfatiza que su efectividad está indisolublemente ligada al estado fisiológico de las semillas y a un riguroso control de las condiciones de aplicación. Estos hallazgos contribuyen al creciente cuerpo de conocimiento sobre nano-bio-interacciones en plantas y abren nuevas perspectivas para la biotecnología de recursos fitogenéticos.

Fuentes de financiamiento

Esta investigación fue financiada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de México, a través del proyecto CBF-2025-I-463.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Dugua, X., & Eguiarte, L. E. (2013). Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*, 90, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Alvarado Cepeda, Y. A., Vega Chávez, J. L., Felipe Victoriano, M., & Reyes Arreozola, M. I. (2024). Evaluación de residuos agrícolas como sustratos en la emergencia y desarrollo de plántulas de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck. *Acta Universitaria*, 34, 1–8. <https://doi.org/10.15174/au.2024.4041>
- Alvarez-Aragón, C., Arzate-Fernandez, A.-M., Martínez-Martínez, S.-Y., & Martínez-Velasco, I. (2020). Regeneración de plantas de *Agave marmorata* Roezl, vía embriogénesis somática. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3117>
- Álvarez-Duarte, M. del C., García-Moya, E., Suarez-Espinosa, J., Luna-Cavazos, M., & Rodríguez-Acosta, M. (2018). Conocimiento tradicional, cultivo y aprovechamiento del maguey pulquero en los municipios de Puebla y Tlaxcala. *Polibotánica*, (45), 205–222.
- Begum, P., & Fugetsu, B. (2012). Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *Journal of Hazardous Materials*, 243, 212–222.
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of development, germination and dormancy, 3rd edition. *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy, 3rd Edition*, 9781461446934, 1–392. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4>
- Cañas, J. E., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., Lee, E. H., & Olszyk, D. (2008). Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental toxicology and chemistry*, 27(9), 1922–1931.
- Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1980). Improved equations for the prediction of seed longevity. *Annals of Botany*, 45(1), 13–30.
- García-Mendoza, A. (2002). *Distribution of agave (Agavaceae) in México*.
- Gardea-Torresdey, J. L., Rico, C. M., & White, J. C. (2014). Trophic transfer, transformation, and impact of engineered nanomaterials in terrestrial environments. *Environmental Science & Technology*, 48(5), 2526–2540.
- Gentry, H. S. (2004). *Agaves of continental north America*. University of Arizona Press.
- Ghodake, G., Seo, Y. D., Park, D., & Lee, D. S. (2010). Phytotoxicity of carbon nanotubes assessed by *Brassica juncea* and *Phaseolus mungo*. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 5(2), 157–160.

- Hampton, J. G. (2002). Producing quality seed: the problem of seed vigour. Special publication-agronomy society of new zealand, 53–62.
- Hatami, M., Kariman, K., & Ghorbanpour, M. (2016). Engineered nanomaterial-mediated changes in the metabolism of terrestrial plants. *Science of the total environment*, 571, 275–291.
- ISTA. (2023). Guidelines for the establishment and management of seed testing laboratories. En *Guidelines for the establishment and management of seed testing laboratories*. FAO; International Seed Testing Association (ISTA); <https://doi.org/10.4060/cc6103en>
- Jimenez-Torres, J. A., Monroy-Gonzalez, Z., Juarez-Muñoz, J., & Jørgensen, B. (2022). Evaluation of seed morphology, seedling genetic variation, and components for seed storage of *Agave* landraces of commercial interest. *Experimental Results*, 3, e25.
- Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z., Watanabe, F., & Biris, A. S. (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS nano*, 3(10), 3221–3227.
- Khodakovskaya, M. V., De Silva, K., Biris, A. S., Dervishi, E., & Villagarcia, H. (2012). Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS nano*, 6(3), 2128–2135.
- Khodakovskaya, M. V., de Silva, K., Nedosekin, D. A., Dervishi, E., Biris, A. S., Shashkov, E. V., Galanzha, E. I., & Zharov, V. P. (2011). Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(3), 1028–1033.
- Khodakovskaya, M. V., Kim, B., Kim, J. N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., & Cernigla, C. E. (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, 9(1), 115–123.
- Lahiani, M. H., Nima, Z. A., Villagarcia, H., Biris, A. S., & Khodakovskaya, M. V. (2017). Assessment of effects of the long-term exposure of agricultural crops to carbon nanotubes. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(26), 6654–6662.
- Lin, S., Reppert, J., Hu, Q., Hudson, J. S., Reid, M. L., Ratnikova, T. A., Rao, A. M., Luo, H., & Ke, P. C. (2009). Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants. *Small*, 5(10), 1128–1132.
- Martínez-Ballesta, M. C., Zapata, L., Chalbi, N., & Carvajal, M. (2016). Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of nanobiotechnology*, 14(1), 42.
- Mukherjee, A., Majumdar, S., Servin, A. D., Pagano, L., Dhankher, O. P., & White, J. C. (2016). Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in plant science*, 7, 172.
- Ramírez-Tobías, H. M., & Peña-Valdivia, C. B. (s/f). JR Aguirre R, JA Reyes-Aguero, AB Sánchez-Urdaneta, S Valle-Guadarrama (2011) Seed germination temperatures of eight Mexican Agave species with an extensive history of human use. *Plant Species Biol.* (in press). Doi, 10.
- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(8), 3485–3498.
- Serag, M. F., Kaji, N., Habuchi, S., Bianco, A., & Baba, Y. (2013). Nanobiotechnology meets plant cell biology: carbon nanotubes as organelle targeting nanocarriers. *RSC advances*, 3(15), 4856–4862.
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J. C., Bindraban, P., & Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17(2), 92.
- Syu, Y., Hung, J.-H., Chen, J.-C., & Chuang, H. (2014). Impacts of size and shape of silver nanoparticles on Arabidopsis plant growth and gene expression. *Plant physiology and biochemistry*, 83, 57–64.
- Torres-García, I., Rendón-Sandoval, F. J., Blancas, J., & Moreno-Calles, A. I. (2019). The genus *Agave* in agroforestry systems of Mexico. *Botanical Sciences*, 97(3), 263–290.
- Velázquez Reyes, H. H., & Ruiz Torres, N. A. (2014). Estudio fisiológico en familias prolíficas de un lote de producción de semilla de la variedad de maíz jaguan.

Recibido / Received:
10/diciembre/2025

**Recepción de versión
corregida / Revised
version received:**
26/marzo/2026

Aceptado / Accepted:
2/junio/2026

- Villagarcía, H., Dervishi, E., de Silva, K., Biris, A. S., & Khodakovskaya, M. V. (2012). Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small* (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 8(15), 2328–2334.
- Walters, C., Wheeler, L. M., & Grotenhuis, J. M. (2005). Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics. *Seed Science Research*, 15(1), 1–20.
- Wang, F.-X., Shang, G.-D., & Wang, J.-W. (2022). Towards a hierarchical gene regulatory network underlying somatic embryogenesis. *Trends in Plant Science*, 27(12), 1209–1217. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.06.002>
- Wang, R., Xue, Q., Wang, J., Tan, L., Zhang, Q., Zhao, Y., & Anderson, D. M. (2017). Effects of an allelochemical in *Phaeodactylum tricornutum* filtrate on *Heterosigma akashiwo*: morphological, physiological and growth effects. *Chemosphere*, 186, 527–534.
- Zhang, W., Zhang, L., Jiang, W., Yang, H., Yang, T., Zhao, Y., Zhang, Z., & Ma, Y. (2025). DNA methylation regulates somatic stress memory and mediates plasticity during acclimation to repeated sulfide stress in *Urechis unicinctus*. *Journal of Hazardous Materials*, 487, 137264. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2025.137264>
- Zizumbo-Villarreal, D., González-Zozaya, F., Olay-Barrientos, A., Platas-Ruiz, R., Cuevas-Sagardi, M., Almendros-López, L., & Colunga-GarcíaMarín, P. (2009). Archaeological evidence of the cultural importance of *Agave* spp. in Pre-Hispanic Colima, Mexico. *Economic Botany*, 63(3), 288–302. <https://doi.org/10.1007/s12231-009-9092-5>
- Zuverza-Mena, N., Martínez-Fernández, D., Du, W., Hernandez-Viezcas, J. A., Bonilla-Bird, N., López-Moreno, M. L., Komárek, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2017). Exposure of engineered nanomaterials to plants: Insights into the physiological and biochemical responses-A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 236–264.