

EDICIÓN ESPECIAL

DRAGÓN UNIVERSITARIO

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez

Innovación y Transformación Digital
Sostenibilidad y Medio Ambiente
Gestión, Economía y Social
Ciencia y Tecnología
Salud y Bienestar



EDITORES

Rafael Adolfo Núñez González
Giovanni García Domínguez
María Elena Sánchez Vergara
Leon Hamui Balas



Sostenibilidad y Medio Ambiente

La publicación de artículos sobre sostenibilidad y medio ambiente en esta edición especial de *+Ciencia* cumple con ayudar a reconocer necesidades científicas, sociales y hasta éticas. En un contexto marcado por el cambio climático, la contaminación ambiental y el agotamiento de recursos naturales para la obtención de materiales y combustibles, la divulgación del conocimiento permite acercar soluciones innovadoras y fomentar una cultura de responsabilidad ambiental. Temas como la economía circular, el reciclaje de materiales, la química verde, el tratamiento de aguas residuales, la agricultura sostenible y el uso de microorganismos benéficos, por mencionar algunos de los presentados en esta sección, muestran cómo la ciencia y la tecnología pueden contribuir a la protección de los ecosistemas y al bienestar humano.





Economía circular en acción. PET reciclado para el desarrollo de nuevos materiales

GIOVANNI GARCÍA DOMÍNGUEZ,¹ ARISTEO GARRIDO HERNANDEZ²

¹ Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Emiliano Zapata s/n, El Tráfico, Ciudad Nicolás Romero, Estado de México, 54400, Mexico.

² Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Materiales, 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, México.

Resumen

El uso masivo de plásticos ha generado uno de los mayores retos ambientales a nivel global. Entre estos materiales, el polietileno tereftalato (PET) destaca por su amplio consumo en envases y botellas, así como por su baja tasa de reciclaje efectivo. Frente a este escenario, la economía circular propone estrategias para reincorporar los residuos al ciclo productivo, transformándolos en recursos con mayor valor. Este artículo aborda el problema ambiental del PET desde una perspectiva global y presenta cómo la modificación de sus propiedades permite el desarrollo de nuevos materiales compuestos con mejores características mecánicas, contribuyendo a soluciones sostenibles.

El reto global del plástico

En las últimas décadas, la producción mundial de plásticos ha superado los 400 millones de toneladas anuales, de las cuales una proporción significativa corresponde a productos de un solo uso [1]. El PET es uno de los polímeros más utilizados debido a su bajo costo, ligereza y resistencia, especialmente en envases para bebidas. No obstante, se estima que menos del 30 % del PET es reciclado de manera efectiva a nivel global, mientras que el resto se acumula en rellenos sanitarios o en ecosistemas naturales [2]. Este problema ha generado impactos severos en el ambiente, particularmente en cuerpos de agua y suelos.

Economía circular: más allá del reciclaje

La economía circular surge como una alternativa al modelo lineal tradicional de “extraer–

producir–desechar”, proponiendo un sistema donde los materiales se mantengan en uso durante el mayor tiempo posible [3]. Este enfoque busca reducir la generación de residuos, optimizar el uso de recursos y disminuir la presión sobre materias primas vírgenes.

Reciclar no implica únicamente reprocesar materiales, sino mejorar sus propiedades para ampliar su vida útil y sus aplicaciones. Transformar residuos plásticos en materiales con mayor desempeño mecánico representa una estrategia clave para cerrar el ciclo de los materiales y avanzar hacia modelos productivos más sostenibles [4].

Cuando la ciencia mejora los residuos

Para superar estas limitaciones, la ciencia de materiales ha desarrollado tratamientos quí-



Figura 1. Reto global del plástico. Fuente: Elaboración propia

micos que modifican la superficie del PET reciclado. Estos procesos generan cambios controlados en la estructura superficial del material, incrementando su rugosidad y creando sitios activos que favorecen la unión con la matriz del material compuesto [5].

Desde una perspectiva sencilla, una superficie más rugosa facilita una mejor unión con otros materiales, lo que se traduce en una mayor resistencia mecánica. Este proceso general de mejora del PET reciclado se ilustra en la Figura 2.

Nuevos materiales a partir de residuos plásticos

El uso de PET reciclado tratado en materiales compuestos abre la posibilidad de desarrollar nuevos productos para aplicaciones estructurales ligeras, elementos constructivos, paneles y componentes industriales [5, 6]. Estos materiales no solo aprovechan residuos existentes, sino que también reducen la demanda de polímeros vírgenes y la huella ambiental asociada a su producción.



Figura 2. Proceso general de modificación de PET reciclado. Fuente: Elaboración propia



Además, mejorar las propiedades del PET reciclado contribuye a la viabilidad técnica y económica de soluciones basadas en economía circular, favoreciendo su adopción a mayor escala [7].

Impacto social y ambiental

El desarrollo de nuevos materiales a partir de PET reciclado tiene un impacto directo en la reducción de residuos plásticos, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la mitigación de la contaminación ambiental [8].

Desde una perspectiva social, estas estrategias impulsan modelos productivos más responsables y fomentan la creación de cadenas de valor alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente aquellos relacionados con producción responsable, acción climática y protección de ecosistemas [9].

Reflexión final

El problema del plástico no puede resolverse únicamente mediante campañas de reciclaje. Es necesario replantear el valor de los residuos y aprovechar el conocimiento científico para transformarlos en soluciones funcionales. La economía circular ofrece un marco sólido para este cambio, donde materiales como el PET reciclado pueden convertirse en recursos estratégicos.

Transformar residuos en nuevos materiales no solo representa una alternativa técnica viable,

sino también una oportunidad para avanzar hacia un modelo de desarrollo más sostenible, en el que la innovación y la responsabilidad ambiental convergen.

Referencias

1. Plastics Europe. Plastics – The fast facts 2023. Bruselas: Plastics Europe; 2023.
2. United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2023. Nueva York: United Nations; 2023.
3. Ellen MacArthur Foundation. Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. Nueva York: Ellen MacArthur Foundation; 2020.
4. United Nations Environment Programme (UNEP). From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nueva York: UNEP; 2021.
5. Garrido-Hernández A, Sánchez-Ramírez E, Chávez-Gerónimo L, García-Domínguez G. Fibras poliméricas recicladas en la construcción de viviendas. *Mexican Journal of Technology and Engineering*, 2025;4(2): 5–14.
6. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017;3(7): e1700782.
7. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. París: OECD; 2022.
8. Asumani OML, Reid RG, Paskaramoorthy R. The effects of alkali-silane treatment on the tensile and flexural properties of short fibre non-woven kenaf reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012;43(9): 1431–1440.
9. Azimi M, Asselin E. Improving surface functionality, hydrophilicity, and interfacial adhesion properties of polyethylene with activated peroxides. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022;14(2): 3601–3609.



La huella ambiental del caucho y cómo podemos reducirla

GIOVANNI GARCÍA DOMÍNGUEZ,¹ ARISTEO GARRIDO HERNANDEZ²

¹ Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Emiliano Zapata s/n, El Tráfico, Ciudad Nicolás Romero, Estado de México, 54400, Mexico.

² Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Materiales, 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, México.



Figura 1. Ciclo de vida del caucho: producción, uso, desecho y acumulación de neumáticos fuera de uso como problema ambiental. Fuente: Elaborada con DALL-E

El caucho es un material indispensable en la vida moderna, especialmente en la fabricación de neumáticos, productos industriales y elementos de uso cotidiano. Sin embargo, su elevada durabilidad y el volumen de residuos que genera representan un reto ambiental significativo a escala global. Millones de neumáticos fuera de uso se acumulan cada año, convirtiéndose en una fuente de contaminación persistente. Este artículo aborda la huella ambiental del caucho, analiza su impacto social y ecológico y explora cómo el aprovechamiento del caucho reciclado puede contribuir a reducir este problema desde una perspectiva de economía circular.

Cada año se generan más de 1000 millones de neumáticos fuera de uso a nivel mundial, lo que equivale a millones de toneladas de residuos de caucho [1]. Debido a su resistencia al desgaste y a la degradación natural, estos residuos pueden permanecer durante décadas en rellenos sanitarios o acumularse en espacios abiertos.

La Figura 1 muestra el ciclo de vida del caucho, desde su producción hasta su disposición final, evidenciando los puntos donde se concentra el mayor impacto ambiental. La acumulación de neumáticos desechados no solo ocupa grandes extensiones de terreno, sino que también representa un riesgo de incendios, liberación de



Figura 2. Impacto de la contaminación ambiental por el uso de caucho. Fuente: Elaborada con DALL-E

sustancias tóxicas y proliferación de vectores de enfermedades [2].

La huella del caucho no se limita a su etapa de desecho. Su producción implica el consumo intensivo de energía, recursos naturales y procesos industriales que generan emisiones de gases de efecto invernadero [3]. A lo largo de su vida útil, el desgaste de neumáticos también libera partículas microscópicas que contribuyen a la contaminación del aire y agua. Como se observa en la Figura 2, la huella ambiental del caucho se manifiesta en diferentes etapas del ciclo de vida del producto, lo que refuerza la necesidad de adoptar estrategias integrales para reducir su impacto.

Frente a este escenario, la economía circular propone cambiar el enfoque tradicional de usar y desechar, por uno que priorice la reutilización y el aprovechamiento de materiales. En lugar de considerar los neumáticos fuera de uso como residuos, este modelo los reconoce como recursos con potencial de transformación [4].

El caucho reciclado puede emplearse en múltiples aplicaciones, como mezclas asfálticas, superficies deportivas, materiales compuestos, aislantes acústicos y elementos constructivos. Estas alternativas permiten aprovechar un residuo problemático y convertirlo en un insumo útil para distintos sectores. Además, el uso de caucho reciclado contribuye a reducir el volumen de residuos destinados a rellenos sanitarios y a disminuir la demanda de caucho virgen, generando beneficios tanto ambientales como económicos [5].

Reducir la huella ambiental del caucho no depende únicamente de la industria. También requiere la participación de gobiernos, comunidades y consumidores mediante políticas públicas, innovación tecnológica y una gestión responsable de los residuos.

El aprovechamiento del caucho reciclado no solo reduce la contaminación ambiental, sino que también genera oportunidades sociales, como la creación de empleos en cadenas de



reciclaje y el desarrollo de soluciones locales para la gestión de residuos [6].

Reflexión final

Desde una perspectiva ambiental, estas estrategias contribuyen a la mitigación del cambio climático, la protección de ecosistemas y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente aquellos relacionados con producción responsable y acción climática [7].

La huella del caucho es un desafío ambiental que requiere soluciones innovadoras y sostenibles. Transformar neumáticos fuera de uso en nuevos materiales no solo reduce la acumulación de residuos, sino que también permite avanzar hacia un modelo de desarrollo más responsable.

Adoptar enfoques basados en economía circular representa una oportunidad para reducir el impacto ambiental del caucho y promover una relación más equilibrada entre la sociedad, la industria y el entorno natural.

Referencias

1. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Global ELT Management. A Global State of Knowledge on Collection Rates, Recovery Routes, and Management Methods. Ginebra: WBCSD; 2020.
2. United States Environmental Protection Agency (EPA). Scrap Tires: Handbook on Recycling Applications and Management. Washington, D. C.: EPA; 2021.
3. European Tyre and Rubber Manufacturers' Association (ETRMA). The Carbon Footprint of Tyres. Bruselas: ETRMA; 2022.
4. Ellen MacArthur Foundation. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. Cowes: Ellen MacArthur Foundation; 2020.
5. Thomas BS, Gupta RC. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;54:1323–1333.
6. OECD. Global Plastics Outlook. París: OECD; 2022.
7. United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2023. Nueva York: United Nations; 2023.



¿Conoces a Vermi?

BRITHANY ANDREA DE NOVA MARTÍNEZ, MARÍA TERESA FUENTES ROMERO,
MANUEL MEDINA MENDOZA

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez

24304028@utfv.edu.mx

Resumen

El manejo inadecuado de los residuos orgánicos constituye uno de los principales problemas ambientales de la actualidad, debido a su acumulación en rellenos sanitarios y a la generación de contaminantes que afectan suelo, agua y atmósfera.¹

A escala global, se ha estimado que una fracción significativa de los residuos sólidos urbanos es de naturaleza orgánica (frecuentemente reportada en el rango de 40–55 %), lo que evidencia el potencial de valorización de esta corriente, mediante estrategias de aprovechamiento.²

En este contexto, el *vermicompostaje* surge como una alternativa sustentable que permite transformar residuos orgánicos en un abono natural de alto valor nutricional, mediante la acción biológica de lombrices y microorganismos.³

En este artículo se introduce “Vermi” como un recurso didáctico que representa a la lombriz protagonista de este proceso, con el objetivo de facilitar la comprensión y difusión del vermicompostaje. Se analiza la importancia de esta técnica en la gestión de residuos orgánicos, destacando su relevancia ambiental, social y agrícola, así como sus beneficios, aplicaciones y consideraciones para su implementación.

Palabras clave: vermicompostaje, residuos orgánicos, sostenibilidad, gestión ambiental, lombrices.



Introducción

¿Conoces a Vermi? Aunque su nombre puede parecer sencillo, esta figura representa a uno de los organismos más importantes en los procesos naturales de reciclaje: la lombriz. A través de su actividad biológica, las lombrices participan en la transformación de residuos orgánicos que comúnmente se consideran desechos, convirtiéndolos en un recurso valioso para el suelo y la agricultura.³

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional y el aumento del consumo han provocado una generación creciente de residuos sólidos urbanos, de los cuales una proporción considerable corresponde a residuos orgánicos. Cuando estos residuos no son manejados adecuadamente, se convierten en una fuente de contaminación y en un problema ambiental de gran escala.^{1,2}

El vermicompostaje es una técnica biológica que emplea lombrices para acelerar la descomposición de residuos orgánicos y producir vermicompost (véase Figura 1), un fertilizante natural rico en nutrientes y microorganismos benéficos. En divulgación científica, una personificación como “Vermi” ayuda a acercar este conocimiento a públicos no especializados, promoviendo la educación ambiental y fomentando una cultura de responsabilidad ecológica.^{3,4}

Antecedentes del vermicompostaje

El uso de organismos vivos para la descomposición de materia orgánica ha sido observado desde tiempos antiguos; sin embargo, el vermicompostaje comenzó a estudiarse de manera sistemática cuando se reconoció el papel fundamental de las lombrices en la mejora de la fertilidad del suelo.³



Figura 1. Proceso de vermicompostaje (esquema). Fuente: Elaborada con ChatGPT.

Frente a esta situación, se han desarrollado diversas estrategias orientadas al aprovechamiento de la materia orgánica. Entre ellas, el vermicompostaje destaca por su eficiencia, bajo costo relativo y potencial de aplicación en contextos domésticos, escolares, comunitarios e industriales.

Diversos estudios han demostrado que las lombrices no solo fragmentan la materia orgánica, sino que también favorecen la actividad microbiana, acelerando los procesos de mineralización y modificando propiedades bioquímicas del sustrato durante su procesamiento.⁴



Entre las especies más utilizadas destaca la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*, Figura 2), conocida por su alta tasa de reproducción, resistencia y capacidad de consumo de residuos orgánicos. El producto final del proceso suele mostrar una estructura más estable y una mayor disponibilidad de nutrientes en comparación con el compost tradicional^{3,4} (véase Figura 3).

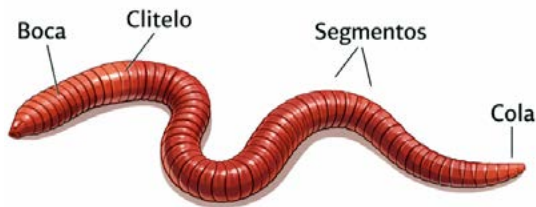


Figura 2. Lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*). Fuente: Elaborada con ChatGPT.

Importancia ambiental del vermicompostaje

Desde una perspectiva ambiental, el vermicompostaje representa una estrategia clave para la reducción de residuos orgánicos enviados a rellenos sanitarios. Al disminuir el volumen de estos residuos, se reduce también la producción de lixiviados y la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano.¹ El vermicompost mejora la estructura del suelo, incrementa la retención de humedad y favorece la biodiversidad microbiana. Además, al sustituir parcial o totalmente el uso de fertilizantes químicos, se disminuye la contaminación de cuerpos de agua y se promueve una producción agrícola más limpia.^{3,4}

Impacto social y educativo

El vermicompostaje no solo tiene beneficios ambientales, sino también un impacto social



Figura 3. Comparación visual: residuo orgánico vs. Vermicompost. Fuente: Elaborada con ChatGPT.



significativo. Su implementación en hogares, escuelas y comunidades permite involucrar a la población en prácticas sustentables, fortaleciendo la conciencia ambiental y la participación ciudadana.³

La utilización de un recurso didáctico como “Vermi” facilita la comprensión del proceso, especialmente en programas educativos donde se busca despertar el interés por el cuidado del medio ambiente desde edades tempranas. De esta manera, la técnica se convierte en una herramienta educativa que promueve valores como la responsabilidad, el reciclaje y el respeto por la naturaleza.

Aplicaciones agrícolas y económicas

El vermicompost producido mediante esta técnica se utiliza en agricultura, jardinería, viveros y producción orgánica. Sus propiedades contribuyen a mejorar el crecimiento de las plantas, incrementar la productividad de los cultivos y reducir la dependencia de insumos químicos.³

Desde el punto de vista económico, el vermicompostaje representa una alternativa de bajo costo, ya que aprovecha residuos orgánicos disponibles localmente y reduce gastos asociados al manejo de residuos y a la compra de fertilizantes. Esto lo convierte en una opción accesible para pequeños productores y comunidades rurales.³

Consideraciones para su implementación

Para asegurar el éxito del vermicompostaje, es fundamental mantener condiciones adecuadas de humedad, temperatura y alimentación de las lombrices. Un manejo inadecuado puede provocar malos olores, proliferación de plagas o disminución de la población de lombrices, afectando el rendimiento del proceso.³

Con capacitación básica y seguimiento, estas dificultades pueden controlarse. Como recomendación práctica para proyectos escolares o comunitarios, es útil registrar semanalmente variables simples (humedad percibida, temperatura del lecho, tipo de residuo incorporado y presencia de insectos), con la finalidad de ajustar el manejo de manera temprana.

Conclusiones

El vermicompostaje se consolida como una alternativa sustentable, eficiente y ecológica para la gestión de residuos orgánicos. Su aplicación contribuye a la reducción de la contaminación ambiental, al fortalecimiento de prácticas agrícolas sostenibles y a la promoción de la educación ambiental.^{1,3} Incorporar esta técnica en distintos ámbitos de la sociedad permite avanzar hacia modelos de desarrollo más responsables con el medio ambiente, donde los residuos dejan de ser un problema para convertirse en una oportunidad.

Referencias

1. Ministerio del Medio Ambiente. Vermicompostaje: técnica de manejo de residuos orgánicos para combatir el cambio climático [Internet]. Santiago de Chile: MMA; 2024 [citado 2026 feb 16]. Disponible en: <https://mma.gob.cl/vermicompostaje-tecnica-de-manejo-de-residuos-organicos-para-combatir-el-cambio-climatico/>
2. Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P, Van Woerden, F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, D. C.: World Bank; 2018.
3. Nogales R. Vermicompostaje: una alternativa para el reciclado de residuos orgánicos [Internet]. Compostando Ciencia Lab. 2016 [citado 2026 feb 16]. Disponible en: <https://www.compostandociencia.com/2016/12/vermicompostaje-una-alternativa-reciclado-residuos-organicos-dr-rogelio-nogales/>
4. Atiyeh RM, Domínguez J, Subler S, Edwards CA. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*). *Biore-sour Technol.* 2000;75(2):149-156.



Los amigos invisibles: microorganismos que cuidan (y restauran) nuestros ecosistemas

MTRO. JOSÉ TRINIDAD RAZO PAREDES, MTRO. RODRIGO SALAZAR SALAZAR,
DR. JOSÉ DOMINGO RAFAEL CASTAÑEDA OLVERA, DR. JESÚS NICOLÁS BERMÚDEZ,
DR. FERNANDO GÓMEZ FLORES

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez – División Académica de Tecnología Ambiental

Una ciudad microscópica en cada gota

Cuando miramos un río o un lago solemos describirlo por lo visible: el color del agua, la vegetación de la orilla o el olor tras la lluvia. Sin embargo, debajo de esa superficie existe un universo determinante: los microorganismos que habitan el agua, el suelo, las rocas y los sedimentos. Son tan abundantes que constituyen una fracción significativa de la vida en la Tierra y participan en la regulación del carbono y otros elementos a escala planetaria.¹

A estos seres les llamamos aquí los amigos invisibles debido a que, sin pedir reconocimiento, sostienen procesos que mantienen en funcionamiento a los ecosistemas: transforman materia orgánica, reciclan nutrientes y realizan reacciones químicas fundamentales para la vida. En microbiología ambiental, esta idea se resume así: gran parte de los ciclos del carbono, nitrógeno, azufre y oxígeno depende de reacciones catalizadas por microorganismos.²

¿Sabías que...?

En una sola cucharadita de suelo puede haber ya sea millones o miles de millones de microorganismos. Esa diversidad es una de las razones por las que los ecosistemas pueden reciclar nutrientes y recuperarse tras perturbaciones.^{1,2}

¿Qué hacen los microorganismos por el ambiente?

De manera general, los microorganismos contribuyen a la estabilidad ambiental en tres planos complementarios:

- *Reciclaje de materia orgánica*: convierten restos vegetales y compuestos orgánicos en moléculas más simples, evitando la acumulación de desechos en el ambiente.
- *Ciclos de nutrientes*: transforman formas químicas del nitrógeno, fósforo y azufre, habilitando su disponibilidad para plantas y otros organismos.
- *Depuración natural del agua*: degradan compuestos orgánicos y transforman ciertos contaminantes, especialmente cuando se organizan como comunidades adheridas a superficies.

La mayoría de estas funciones se intensifican en particular cuando los microorganismos se organizan en comunidades. En vez de actuar de forma aislada, se adhieren a superficies y producen una matriz protectora que los mantiene unidos. Esto les permite comunicarse, repartirse tareas metabólicas y resistir cambios bruscos del entorno. Por eso, estas comunidades pueden entenderse como sistemas ecológicos a microescala: sistemas ecológicos sostenibles a pequeña escala.^{3,4}

“Se protegen de ambientes adversos, se comunican entre sí y aumentan su resistencia.”⁵



Del fenómeno natural a una solución tecnológica: nuestro proyecto en la UTFV

En la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, como equipo colaborativo, nos propusimos responder a un problema urgente: el incremento de contaminantes en cuerpos de agua (ríos, arroyos, lagos, lagunas y presas) asociado a actividades antropogénicas y descargas con alto contenido de materia orgánica. Además, gran número de enfoques convencionales de saneamiento pueden implicar altos costos, elevada demanda de energía e infraestructura significativa.⁵ En México, por ejemplo, en el año 2023 solo 67 % de las aguas residuales municipales fueron tratadas, lo que evidencia brechas entre cobertura e infraestructura operativa de saneamiento.¹²

Nuestra propuesta parte de una idea sencilla: si las comunidades de microorganismos realizan depuración de forma natural, entonces podemos diseñar superficies que faciliten su establecimiento y aumenten el contacto entre el agua contaminada y esas superficies ecológicamente activas. Para lograrlo, integramos comunidades microbianas con materiales mesoporosos basados en óxido de silicio (SiO_2).^{6,7}

Los materiales mesoporosos se caracterizan por estar constituidos de una red de poros en el rango aproximado de 2 a 50 nm y, por ello, ofrecen una gran área superficial. Esta área superficial incrementa los puntos de contacto disponibles: favorece la fijación de biomasa y

acercas los contaminantes a los sitios donde pueden ser adsorbidos y transformados.^{8,9}

¿Qué es el óxido de silicio (SiO_2) y por qué importa aquí?

El óxido de silicio (SiO_2) es un material muy común en la naturaleza: está presente en arenas y minerales. Cuando se fabrica en forma "mesoporosa", significa que contiene una red de poros extremadamente pequeños (a escala nanométrica). Esa estructura le da una gran área superficial, como si fuera una esponja microscópica: ofrece muchos puntos de contacto donde pueden fijarse comunidades de microorganismos y donde los contaminantes pueden acercarse para ser adsorbidos y transformados.^{3,4}

¿Qué diseñamos? Matrices, barreras e islas

El diseño desarrollado contempla tres componentes principales:

1) Matriz polimérica con SiO_2 mesoporoso

Diseñamos una matriz polimérica en la que se incorpora SiO_2 mesoporoso, funcionando como soporte y acarreador para favorecer el establecimiento de biomasa microbiana. La matriz puede elaborarse con materiales reciclables como polietileno y poliuretano de alta densidad, como se muestra en la Figura 1.

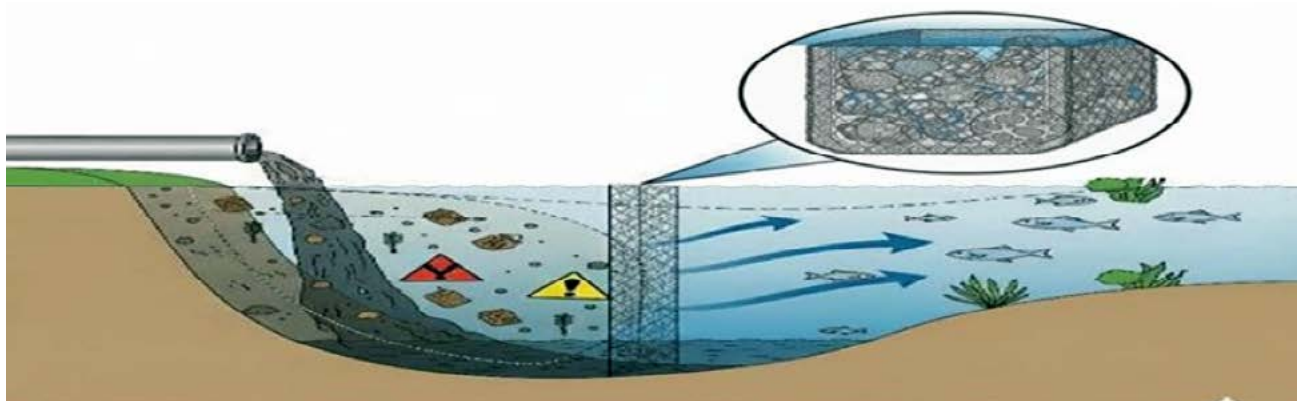


Figura 1. Esquema de la matriz polimérica con SiO_2 mesoporoso como soporte para el establecimiento de biomasa microbiana. Fuente: Elaboración propia con base en [5].



2) Barreras para ríos y afluentes

En ambientes con flujo, las matrices se colocan dentro de mallas metálicas formando una barrera que acumula unidades. Al pasar el agua, aumenta el tiempo y área de contacto con la superficie activa, promoviendo la degradación de contaminantes por contacto, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Barrera en malla metálica para ríos: la acumulación de matrices incrementa el tiempo de contacto agua-superficie activa, favorece la colonización por comunidades de microorganismos y promueve la degradación de contaminantes por contacto. Fuente: Elaboración propia con base en [5].

3) Islas para lagos o lagunas

En ambientes con menor flujo, se propone una estructura tipo isla (cónica) construida con malla metálica que acumula matrices. El objetivo es mantener superficies activas de contacto donde las comunidades de microorganismos puedan establecerse y sostener procesos de transformación de contaminantes, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Isla cónica para lagos/lagunas: concentra matrices y mantiene superficies activas en la zona de intercambio, facilitando colonización microbiana y procesos de transformación de contaminantes en sistemas de bajo flujo. Fuente: Elaboración propia con base en [5].

Conclusión: nuestra postura profesional

La microbiología ambiental ofrece una ruta poderosa para el saneamiento: no siempre se trata de “más maquinaria”, sino de comprender cómo funciona la naturaleza y diseñar con ella. Los microorganismos ya realizan depuración; nuestro reto es crear condiciones para que ese trabajo microscópico sea más eficiente, estable y aprovechable en escenarios reales. Por ello, proponemos las matrices con SiO_2 mesoporoso y su aplicación en barreras e islas como una alternativa nanobiotecnológica con enfoque sostenible, con potencial de bajo costo y alta eficiencia, para remover y degradar contaminantes orgánicos en cuerpos de agua. En síntesis: cuidar el ambiente también significa reconocer y potenciar a nuestros amigos invisibles.^{5, 10}

Referencias

1. Whitman WB, Coleman DC, Wiebe WJ. Prokaryotes: the unseen majority. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1998;95(12):6578-6583. doi:10.1073/pnas.95.12.6578.
2. Falkowski PG, Fenchel T, DeLong EF. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*. 2008;320(5879):1034-1039. doi:10.1126/science.1153213.
3. Flemming HC, Wingender J. The biofilm matrix. *Nat Rev Microbiol*. 2010;8(9):623-633. doi:10.1038/nrmicro2415.
4. Costerton JW, Stewart PS, Greenberg EP. Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections. *Science*. 1999;284(5418):1318-1322. doi:10.1126/science.284.5418.1318.



5. Universidad Tecnológica Fidel Velázquez (UTFV). Barreras e islas de SiO_2 : propuesta nanobiotecnológica para saneamiento de cuerpos de agua. Presentación institucional (archivo PPTX). 2026.
6. Vetrivel S, Chen CT, Kao HM. The ultrafast sonochemical synthesis of mesoporous silica MCM-41. *New J Chem.* 2010;34(10):2109-2112. doi:10.1039/C0N-J00379D.
7. Carraro PM, Elías VR, García Blanco AA, Sapag MK, Eimer GA, Oliva MI. Study of hydrogen adsorption properties on MCM-41 mesoporous materials modified with nickel. *Int J Hydrogen Energy.* 2014;39(16):8749-8756.
8. Zhang L, Xing Z, Zhang H, Li Z, Wu X, Zhang X, Zhang Y, Zhou W. High thermostable ordered mesoporous SiO_2 - TiO_2 coated circulating-bed biofilm reactor for unpredictable photocatalytic and biocatalytic performance. *Appl Catal B Environ.* 2016;180:521-529. doi:10.1016/j.apcatb.2015.07.002.
9. Mangwani N, Kumari S, Das S. Bacterial biofilms and quorum sensing: fidelity in bioremediation technology. *Biotechnol Genet Eng Rev.* 2016;32(1-2):43-73. doi:10.1080/02648725.2016.1196554.
10. González-Hernández Y, *et al.* Utilización de un biorreactor con membranas sumergidas para el tratamiento de aguas residuales procedentes de un hospital oncológico. *Rev Int Contam Ambient.* 2020;36(4):945-956. doi:10.20937/rica.53855



Evaluación de la eficacia de productos químicos y extractos aplicando química verde en el control de *Phytophthora infestans*

ELOY PÉREZ VALERA,¹ JORGE ALBERTO GRANADOS OLVERA,¹ KARELIA LILIANA RANGEL RUIZ²

¹ Universidad Tecnológica Fidel Velázquez ² Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli
eloy.perez@utfv.edu.mx; alberto.granados@utfv.edu.mx; kareliailiana.rr@upci.edu.mx

Resumen

Phytophthora infestans (Mont.) de Bary es uno de los principales patógenos agrícolas, responsable del tizón tardío en papa (*Solanum tuberosum*) y jitomate (*Solanum lycopersicum*). Este oomiceto ocasiona pérdidas económicas globales estimadas en miles de millones de dólares, debido a su alta capacidad de infección y rápida propagación en condiciones ambientales favorables [1].

El presente estudio comparó la eficacia de fungicidas convencionales (Mancozeb y Sultrón) y extractos vegetales de *Allium sativum* (ajo), *Origanum vulgare* (orégano) y *Azadirachta indica* (neem), aplicando principios de química verde orientados a la reducción del uso de agroquímicos sintéticos. Los resultados mostraron que el extracto acuoso de ajo presentó el mayor efecto inhibitorio frente al patógeno, con una concentración mínima inhibitoria (CMI) de 40 $\mu\text{g/mL}$. Estos resultados coinciden con estudios previos que han demostrado la actividad antifúngica de compuestos derivados del ajo contra diversos hongos fitopatógenos [2].

Palabras clave: poder patogénico, efecto inhibitorio, efecto antifúngico, extractos vegetales, química verde, jitomate.

Introducción

El jitomate es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica en México, con producción tanto en sistemas de agricultura protegida como a campo abierto. No obstante, su productividad se ve limitada por diversas enfermedades fitopatológicas, entre las cuales destaca el tizón tardío causado por *Phytophthora infestans*, un patógeno altamen-

te agresivo capaz de destruir cultivos completos en periodos relativamente cortos [1].

Este oomiceto posee una gran capacidad adaptativa y mecanismos complejos de interacción con las plantas hospedantes, los cuales involucran procesos inmunológicos como la inmunidad desencadenada por patrones (PTI) y la inmunidad desencadenada por efec-



tores (ETI) [3]. Estas interacciones permiten al patógeno evadir los sistemas de defensa de la planta y colonizar rápidamente los tejidos vegetales.

La enfermedad se desarrolla principalmente en ambientes con alta humedad relativa (mayor al 70 %) y temperaturas moderadas inferiores a 22 °C, condiciones que favorecen la germinación de esporangios y la dispersión del patógeno a través del viento, el agua o la condensación en el follaje [1].

Tradicionalmente, el control del tizón tardío se basa en el uso intensivo de fungicidas químicos; sin embargo, el uso continuo de estos compuestos puede generar resistencia en los patógenos, contaminación ambiental y efectos adversos en la salud humana [4]. Por esta razón, en los últimos años se ha incrementado el interés por el uso de compuestos naturales derivados de plantas como alternativas sostenibles dentro de estrategias de manejo integrado de enfermedades. Diversos estudios han demostrado que extractos vegetales y aceites esenciales poseen compuestos bioactivos con propiedades antifúngicas, capaces de inhibir el crecimiento de patógenos agrícolas [5, 6]. Entre estas plantas destacan el ajo (*Allium sativum*), el orégano (*Origanum vulgare*) y el neem (*Azadirachta indica*), las cuales contienen metabolitos secundarios con potencial actividad antimicrobiana.

Materiales y métodos

Se elaboraron extractos acuosos de ajo (*Allium sativum* L.), orégano (*Origanum vulgare* L.) y neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) mediante calentamiento en agua a 80 °C, seguido de un proceso de filtración para obtener soluciones homogéneas.

El patógeno *Phytophthora infestans* se cultivó en medio SDCA y luego se inoculó en un total de 64 placas Petri, las cuales fueron distribuidas conforme al diseño experimental.

Los tratamientos evaluados fueron:

- Control (sin aplicación de sustancia)
- Mancozeb
- Sultrón
- Extracto de *Azadirachta indica*
- Extracto de *Allium sativum*
- Extracto de *Origanum vulgare*

Cada tratamiento se aplicó en tres concentraciones: 20, 40 y 60 µg/mL, además de un grupo control sin tratamiento.

El experimento se estableció bajo un *diseño completamente al azar*, con cinco tratamientos activos y cuatro repeticiones por tratamiento, garantizando la distribución uniforme de las unidades experimentales y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Se evaluaron tres variables principales:

Velocidad de crecimiento (VC): incremento diario del diámetro de las colonias.
Porcentaje de inhibición (%I): reducción del crecimiento en comparación con el control.
Porcentaje de crecimiento (%C): proporción del crecimiento observado respecto al control.

Contextualización social y económica

El tizón tardío es una de las enfermedades más devastadoras para los cultivos de papa y jitomate en diversas regiones del mundo. En México, estados como Sinaloa, Puebla y Michoacán presentan condiciones ambientales que favorecen el desarrollo del patógeno, lo que puede ocasionar pérdidas de hasta el 100 % de la producción en temporadas con alta humedad [4]. Estas pérdidas impactan no solo a los productores agrícolas, sino también a toda la cadena de valor del sector alimentario. La disminución en la producción provoca incrementos en los costos de producción, reducción de ingresos para pequeños agricultores y posibles afectaciones en la disponibilidad de alimentos básicos. Además, el uso excesivo de fungicidas sintéticos



puede generar problemas ambientales y resistencia en los patógenos, lo que dificulta su control a largo plazo [6]. Por ello, el desarrollo de alternativas sostenibles, como el uso de extractos vegetales con propiedades antifúngicas, representa una estrategia prometedora para fortalecer la resiliencia agrícola y promover prácticas compatibles con los principios de la química verde.

Resultados

El extracto de ajo presentó los menores valores de crecimiento en todas las concentraciones evaluadas (Tabla 1).

Los datos muestran que el extracto de *Allium sativum* fue el más eficaz en la reducción del crecimiento de *Phytophthora infestans*, con diámetros de colonia significativamente menores en todas las concentraciones evaluadas. En contraste, el fungicida Mancozeb no presentó efecto inhibitorio notable, mientras que Sultrón solo redujo ligeramente el crecimiento del patógeno. Los extractos de *Origanum vulgare* y *Azadirachta indica* mostraron una actividad antifúngica moderada (Tabla 2). Estos resultados coinciden con investigaciones previas que reportan el potencial de compuestos derivados de plantas para inhibir el desarrollo de patógenos agrícolas [5, 6].

Tabla 1. Diámetro de colonias (cm) al tercer día.

Tratamiento	20 $\mu\text{g/mL}$	40 $\mu\text{g/mL}$	60 $\mu\text{g/mL}$
Control	5.0	-	-
Mancozeb	5.0	5.0	5.0
Sultrón	4.4	4.25	4.175
<i>Azadirachta indica</i> ; A. Juss. (40 $\mu\text{g/mL}$)	3.7	4.15	4.175
<i>Allium sativum</i> ; L (40 $\mu\text{g/mL}$)	3.1	3.0	3.15
<i>Origanum vulgare</i> ; L (40 $\mu\text{g/mL}$)	3.65	3.8	3.575

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Tabla 2. Métricas de crecimiento e inhibición

Tratamiento	VC (mm/día)	%I	%C
Control	13.5	-	-
Mancozeb (40 $\mu\text{g/mL}$)	15.5	0	100
Sultrón (40 $\mu\text{g/mL}$)	10.88	14	86
<i>Azadirachta indica</i> ; A. Juss. (40 $\mu\text{g/mL}$)	0.25	16	84
<i>Allium sativum</i> ; L (40 $\mu\text{g/mL}$)	7.5	40	60
<i>Origanum vulgare</i> ; L (40 $\mu\text{g/mL}$)	8.8	24	76

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.



Los resultados evidencian que el extracto de *Allium sativum* presentó la mayor capacidad inhibitoria frente a *Phytophthora infestans*, con un 40 % de inhibición y una reducción significativa en la velocidad de crecimiento. Por otro lado, el Mancozeb no mostró efecto antifúngico significativo, mientras que Sultrón y el extracto de *Azadirachta indica* presentaron inhibiciones moderadas. El extracto de *Origanum vulgare* también redujo parcialmente el crecimiento del patógeno.

En la Figura 1 se observa una reducción notable del crecimiento micelial en el tratamiento con *Allium sativum*, el cual presentó el mayor efecto antifúngico. Esta actividad se atribuye a compuestos azufrados como la alicina, el dialil disulfuro y el dialil sulfuro. Estudios previos han documentado su eficacia frente a hongos fitopatógenos como *Aspergillus* spp. y *Alternaria tenuissima*. La persistencia de su actividad en extractos acuosos resalta su potencial como alternativa viable, económica y compatible con principios de química verde.

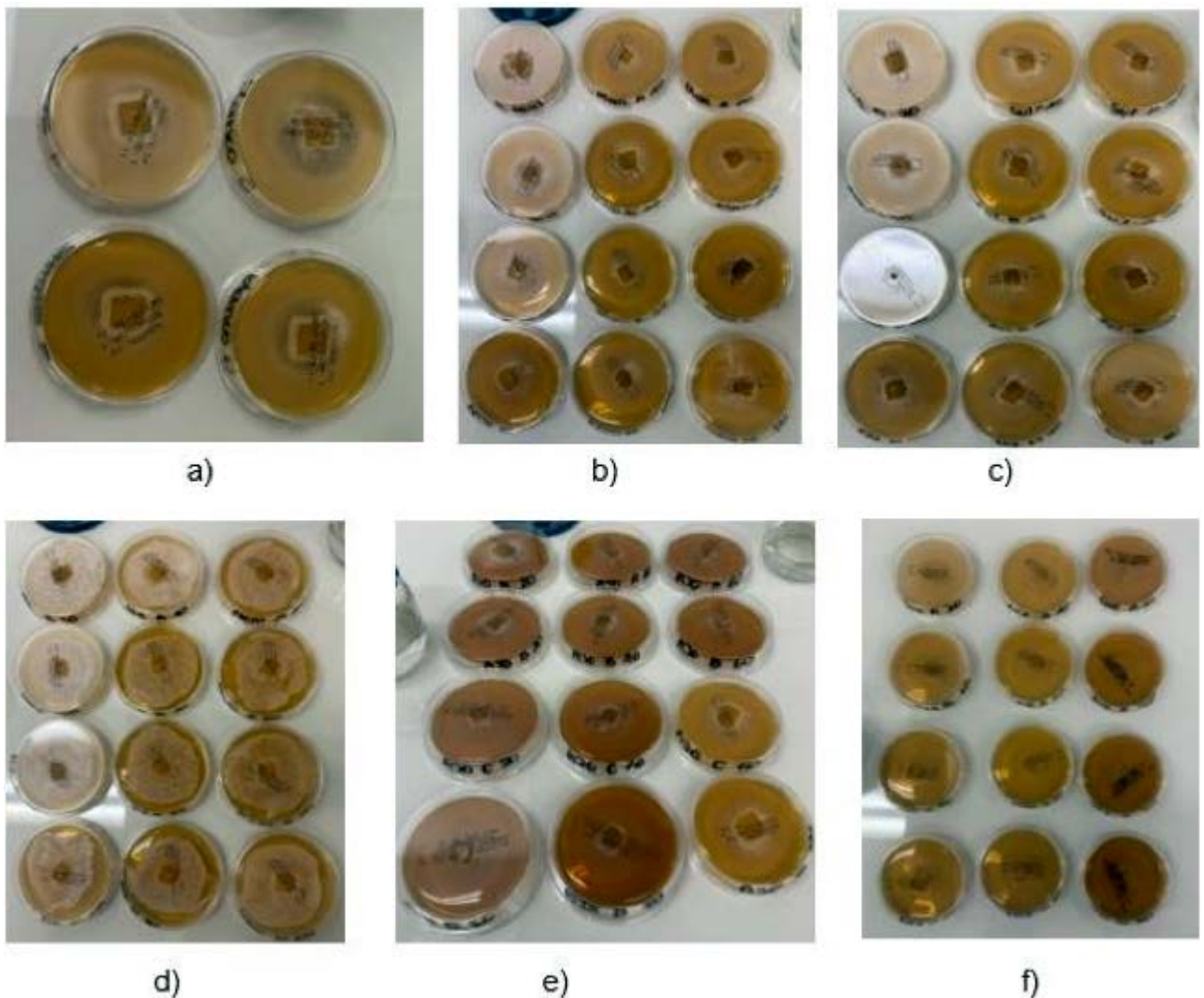


Figura 1. Crecimiento *in vitro* de *Phytophthora infestans* bajo diferentes tratamientos: a) control sin tratamiento (blanco); b) Mancozeb; c) Sultrón; d) extracto de *Azadirachta indica* A. Juss. (neem); e) extracto de *Allium sativum* L. (ajo); f) extracto de *Origanum vulgare* L. (orégano). Fuente: Elaboración propia.



Discusión

La actividad antifúngica observada en el extracto de ajo puede atribuirse a la presencia de compuestos azufrados como la *alicina*, el *dialil disulfuro* y el *dialil sulfuro*, los cuales han demostrado poseer propiedades antimicrobianas contra diversos microorganismos [2].

Estudios previos han documentado que estos compuestos pueden interferir con procesos metabólicos esenciales de los hongos, inhibiendo la síntesis de proteínas y alterando la integridad de la membrana celular. Esto explica la reducción significativa del crecimiento micelial observada en este estudio.

Asimismo, investigaciones recientes han señalado que los aceites esenciales y extractos vegetales pueden actuar como agentes de biocontrol contra enfermedades del tomate en condiciones experimentales y de invernadero [7].

Conclusiones

El extracto acuoso de ajo (*Allium sativum*) inhibe eficazmente el crecimiento de *Phytophthora infestans*, presentando una concentración mínima inhibitoria de 40 $\mu\text{g/mL}$.

Este extracto mostró mayor eficacia que los fungicidas Mancozeb y Sultrón, así como que los extractos de orégano y neem evaluados en el estudio.

Los resultados sugieren que el ajo puede representar una *alternativa ecológica viable dentro de estrategias de manejo sostenible del tizón tardío*, por lo que se recomienda realizar evaluaciones adicionales en condiciones de campo para confirmar su efectividad a escala agrícola.

Referencias

1. Ivanov AA. *Phytophthora infestans*: Overview of methods and attempts to combat late blight. Journal of Fungi. 2021;7(12):1071. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jof7121071>
2. Muy S, Hernández M, Torres R. Actividad antifúngica in vitro del aceite esencial de ajo (*Allium sativum* L.) contra *Alternaria tenuissima*. Revista Mexicana de Fitopatología. 2018;36(1):1-10. Disponible en: <https://rmf.smf.org.mx/RevistaMexicana/articulo-hdoi.php?clave=RMF1708-3>
3. Afzal A, Kamoun S. L. Potencial antifúngico de extractos de plantas y aceites esenciales contra *Fusarium incarnatum*. Polo del Conocimiento. 2023;8(10):85-98. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9205920>
6. Neda M, Petropoulos SA, Fernandes Â. Biocidal activity of plant-derived compounds against *Phytophthora infestans*: An alternative approach for late blight management. Crop Protection. 2020;138:105315. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105315>
7. Lydia M, Karthik L, Kumar G. Essential oils as biocontrol agents against early and late blight of tomato under greenhouse conditions. International Journal of Agronomy. 2021;2021:5719091. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2021/5719091>



La oxidación química: un aliado en el tratamiento de agua residual industrial

FERNANDO GÓMEZ FLORES, RODRIGO SALAZAR SALAZAR, JOSÉ DOMINGO RAFAEL CASTAÑEDA OLVERA, JESÚS NICOLÁS BERMÚDEZ, JOSÉ TRINIDAD RAZO PAREDES

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez – División Académica de Tecnología Ambiental

El tratamiento de aguas residuales industriales constituye uno de los principales desafíos para la ingeniería ambiental contemporánea debido a la complejidad química, toxicidad y persistencia de numerosos contaminantes orgánicos presentes en los efluentes industriales.¹ En respuesta a esta problemática, los procesos de oxidación avanzada (POA) han surgido como alternativas tecnológicas capaces de degradar compuestos refractarios mediante la generación de especies altamente oxidantes, principalmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$).²

El crecimiento industrial ha incrementado significativamente el consumo de agua y la generación de grandes volúmenes de aguas residuales industriales (ARI), cuya composición suele ser variable y compleja.³ Estos efluentes pueden contener compuestos orgánicos persistentes, colorantes, solventes, pesticidas, fármacos y otras sustancias tóxicas que representan un riesgo considerable para los ecosistemas acuáticos y la salud humana si no reciben un tratamiento adecuado.⁴

Los sistemas convencionales de tratamiento, basados en procesos físicos, químicos y biológicos, presentan limitaciones para eliminar contaminantes de baja biodegradabilidad o elevada estabilidad química.³ En particular, los tratamientos biológicos pueden verse inhibidos por la toxicidad de ciertos compuestos industriales, lo que reduce su eficiencia y estabilidad operativa.⁵

Frente a este escenario, los POA han cobrado relevancia como tecnologías capaces de trans-

formar contaminantes complejos en compuestos más simples o incluso mineralizarlos completamente.¹ Desde el punto de vista ingenieril, estos procesos representan una herramienta estratégica para cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas y promover un manejo sostenible del recurso hídrico.⁶

Fundamentos de los procesos de oxidación avanzada

El principio central de los POA es la generación de radicales altamente reactivos, especialmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$). Esta especie posee un elevado potencial de oxidación, lo que le permite reaccionar rápidamente con una amplia gama de contaminantes orgánicos. Aunque su vida media es muy corta, su alta reactividad posibilita la degradación eficiente de moléculas complejas, transformándolas en sustancias menos peligrosas o incluso en productos finales como agua y dióxido de carbono.

¿Cómo actúan estos procesos sobre los contaminantes?

Cuando el radical hidroxilo interactúa con un contaminante, provoca la ruptura de enlaces químicos, generando compuestos intermedios de menor tamaño. Estos continúan reaccionando hasta alcanzar productos finales con menor impacto ambiental. En términos generales, el proceso permite:

- Fragmentar moléculas complejas.
- Reducir la toxicidad de los compuestos.
- Alcanzar, en ciertos casos, la mineralización completa del contaminante.



¿Cómo se generan los radicales hidroxilo en el proceso Fenton?

El proceso Fenton es una de las tecnologías más estudiadas, combina peróxido de hidrógeno, sales de hierro y un medio ligeramente ácido. En estas condiciones el hierro actúa como catalizador y facilita la formación de ($\bullet\text{OH}$), lo cual oxida los contaminantes presentes en el agua.

¿Qué tan rápido funciona?

En general, la eliminación de contaminantes sigue un comportamiento sencillo: a mayor cantidad de contaminante, más rápida es su eliminación al inicio. Con el tiempo, a medida que el contaminante se reduce, la velocidad del proceso disminuye. Este comportamiento facilita el diseño de los sistemas de tratamiento y la estimación del tiempo necesario para limpiar el agua (véase Figura 1). Esta oxidación química avanzada se aplica principalmente para eliminar contaminantes de difícil degradación, ofreciendo una alternativa eficaz en efluentes industriales complejos.

¿Qué se está haciendo?

En la actualidad, la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez cuenta con el capital humano especializado y con la infraestructura necesaria en sus laboratorios para poder estudiar a profundidad el tratamiento de agua y agua residual de origen municipal y/o industrial mediante diversas técnicas de tratamiento convencional y tratamientos avanzados como el de oxidación química avanzada, con el propósito de coadyuvar en la solución del problema que representa la contaminación ambiental por agua residual, ofreciendo a quien lo solicite soluciones en función de las características particulares del agua residual que genere.

Uno de los proyectos en los que se está trabajando actualmente consiste en el diseño de un reactor de oxidación química avanzada por Foto-Fenton con el fin de dar tratamiento a agua residual de la industria de las artes gráficas, la cual contiene residuos de tintas provenientes del lavado de maquinaria y herramientas. Estas tintas tienen compuestos orgánicos

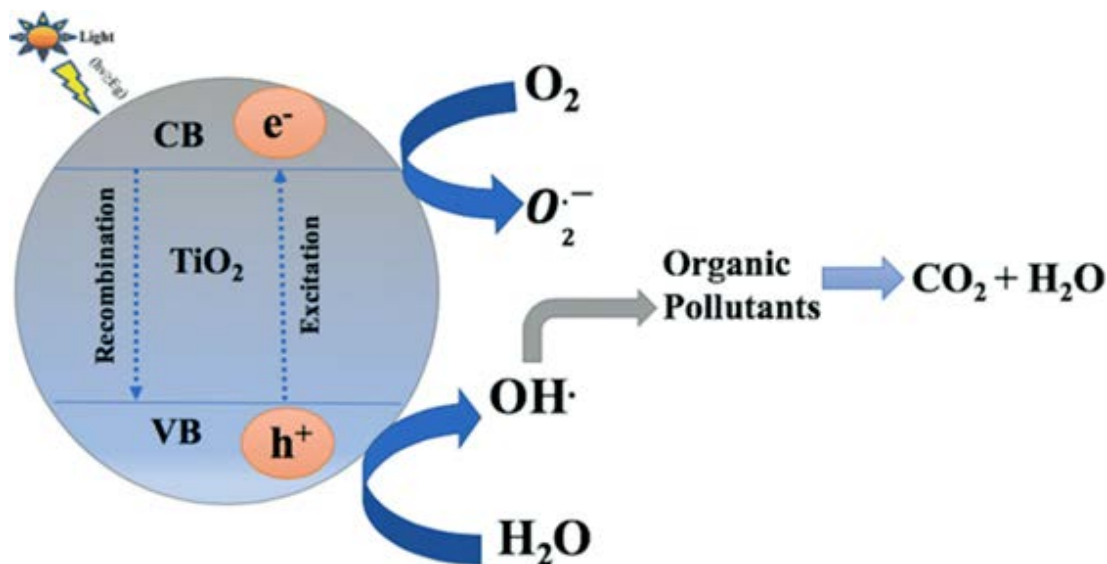


Figura 1. Mecanismo general de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , donde la absorción de luz ultravioleta genera pares electrón-hueco (e^-/h^+) que promueven la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y otras especies oxidantes responsables de la degradación de contaminantes orgánicos en agua⁷.

Fuente: Adaptada de Zhang Y, Heo J, Shi F, et al. ACS Energy Lett. 2016;1(2):356–359.⁷



complejos y a menudo incluyen sustancias no biodegradables y persistentes en el medio ambiente, tales como pigmentos orgánicos e inorgánicos y metales pesados.

En resumen, la importancia de este proyecto radica en el potencial que ofrece para:

- ✓ Proteger ríos, lagos y ecosistemas.
- ✓ Evitar riesgos a la salud humana.
- ✓ Reducir contaminación persistente.
- ✓ Cumplir con la legislación ambiental.
- ✓ Permitir reutilizar el agua.
- ✓ Prevenir daños a sistemas de saneamiento.

Conclusión

Los procesos de oxidación química avanzada constituyen una de las herramientas más robustas para enfrentar la complejidad de las aguas residuales industriales modernas, aunque su implementación requiere un análisis cuidadoso de costos y condiciones operativas, su capacidad para degradar contaminantes persistentes los convierte en una alternativa clave para la ingeniería.

Consideramos que actualmente la formación de profesionales debe incorporar el estudio detallado de estos procesos, no solo como tecnologías de tratamiento, sino como parte de una visión integral orientada a la sostenibilidad, la protección del recurso hídrico y la responsabilidad ambiental.

Referencias

1. Glaze WH, Kang JW, Chapin DH. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone Sci Eng.* 1987;9(4):335–352.
2. Pignatello JJ, Oliveros E, MacKay A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Crit Rev Environ Sci Technol.* 2006;36(1):1–84.
3. Metcalf & Eddy. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery.* 5a. ed. Nueva York: McGraw-Hill; 2014.
4. Parsons S. *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment.* Londres: IWA; 2004.
5. Neyens E, Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *J Hazard Mater.* 2003;98(1–3):33–50.
6. Andreozzi R, Caprio V, Insola A, Marotta R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catal Today.* 1999;53(1):51–59.
7. Zhang Y, Heo J, Shi F, et al. Photocatalytic materials for energy and environmental applications. *ACS Energy Lett.* 2016;1(2):356–359.



Plantas superpoderosas. ¿Superhéroes y supervillanos?

PERLA RODRÍGUEZ SALINAS

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez

perla.rodriguez@utfv.edu.mx

La existencia de seres con alguna característica “sobrenatural” que les confiere superioridad frente al resto de la población humana ha sido explotada ampliamente por la industria del entretenimiento, en la cultura pop contemporánea con los llamados superhéroes y supervillanos. Estos seres sobrenaturales son producto de la ficción. Sin embargo, si observamos un poco, podríamos descubrir que existen especies reales, producto de la evolución, con características que podrían ser consideradas como “superpoderes”, ya que les confieren superioridad frente a otras especies y les permiten sobrevivir en condiciones ambientales adversas.

Al pensar en plantas superpoderosas, tal vez piensen en especies exóticas como las plantas carnívoras o plantas consideradas mágicas, como la mandrágora de Harry Potter. Sin embargo, las que se mencionan a continuación son plantas bastante comunes que solo han evolucionado adaptándose al medio ambiente. Con el objetivo de recuperar la cubierta vegetal que ha sido sustituida por concreto y asfalto en las ciudades, he buscado especies vegetales capaces de sobrevivir en ambientes urbanos, en condiciones de sequía, contaminación atmosférica, suelos erosionados, riego con agua residual, etcétera.

Prácticamente todas las especies tienen alguna característica que pudiera ser considerada como un superpoder, por ejemplo, ¿acaso no es un superpoder controlar el clima? Pues las especies vegetales, en especial los bosques, son responsables de que llueva, por tal moti-

vo se les considera fábricas de lluvia. También controlan la temperatura y la humedad de un sitio, solo basta con permanecer unos minutos caminado sobre la carpeta asfáltica a las 12:00 de algún día de mayo en la Ciudad de México y luego llegar a descansar debajo de la sombra de algún árbol para comprobarlo. Otro ejemplo son los ecosistemas de manglar que actúan como barrera biológica contra tormentas y huracanes [1]. Las especies vegetales tienen otros superpoderes que desafortunadamente pasan desapercibidos ante nuestros ojos, peor aún es que algunas veces estos superpoderes son mal entendidos, por lo que las especies son consideradas malignas, invasoras o plagas, y se les ataca con la finalidad de destruirlas a toda costa, es decir, se convierten en supervillanos, sin pensar que algunas de estas especies vegetales pueden ayudar a solucionar la actual problemática ambiental.

Conozcamos dos de estas plantas superpoderosas

En la categoría de superhéroes, está la *siempreviva*, esta planta hasta tiene nombre de superhéroe. Este proviene de su gran capacidad para sobrevivir a las inclemencias del tiempo, es prácticamente inmortal. La siempreviva pertenece a la familia de las *Crassulaceae*, también conocidas como suculentas, una de sus principales características es que sus hojas son carnosas, de color verde y tienen forma de espátula que le permiten almacenar agua para sobrevivir cuando este recurso escasea. Durante el verano (temporada de lluvias), la siempreviva almacena agua en sus hojas; posteriormente, en la temporada de estiaje



(cuando no llueve) utiliza toda esa agua almacenada. Esta es la estrategia que utiliza para mantenerse siempre con vida.

Al reflexionar sobre este superpoder de la siempreviva, se puede decir que es muy inteligente, porque en tiempos de abundancia es capaz de prevenir y ahorrar para cuando vengan tiempos de escasez. Creo que es algo que la especie humana debería aprender respecto al uso de los recursos.

Al segundo superpoder de la siempreviva se le puede llamar “automultiplicación”. En caricaturas, películas, cómics, etc., superhéroes o supervillanos se automultiplican. En el caso de la siempreviva, este superpoder se relaciona con su capacidad de propagación mediante esquejes. ¿En qué consiste el método de esquejes? Es de conocimiento público que las plantas se reproducen mediante las semillas, sin embargo, esta no es la única forma por la cual podemos obtener individuos nuevos.

La reproducción de esquejes consiste simplemente en extraer una parte de la planta, normalmente el tallo o la rama, pero también las hojas, las raíces o algunos órganos particulares, para que, manteniéndola en las condiciones adecuadas o incluso sometiéndola a ciertos tratamientos, desarrolle las partes que le faltan y forme una nueva planta [2]. La mayoría de las especies vegetales pueden ser propagadas por esquejes, sin embargo, hay algunas que son más fáciles de propagar que otras. La siempreviva es de las más fáciles, por ejemplo, si por accidente se le rompe una rama y cae al suelo, se puede quedar por mucho tiempo tirada, sin que nadie la entierre, pero como tiene “reservas de fuerza superior”, no se muere, poco a poco va formando raíces y al cabo de un tiempo no muy largo, se convierte en una planta completa.

Además de estos superpoderes, la siempreviva es una especie “nativa” del Estado de

México, es decir, es originaria del ecosistema de bosque de pino-encino, presente originalmente en algunos de los municipios de esta entidad, la ventaja de esto radica en que las especies nativas son las mejor adaptadas a las condiciones ambientales del lugar, por lo que les será mucho más fácil sobrevivir. De acuerdo con Alvarado-García [3], el uso de especies nativas de herbáceas y arbustos como estrategia de restauración ecológica y forestal urbana permite mejorar las condiciones mecánicas, hidráulicas y ambientales del sitio y actúa como barrera viva contra la erosión.



Figura 1. Ejemplar de siempreviva de aproximadamente 30 años de antigüedad en un jardín particular. Fuente: Imagen cortesía de la autora.

Sin embargo, la razón más importante para utilizar a la siempreviva es, sin duda, que se puede obtener prácticamente de manera “gratuita”, es decir, mediante una colecta urbana. En otras palabras, es posible podar los ejemplares de siempreviva en jardines urbanos tanto particulares como públicos a fin de obtener el material necesario para realizar una plantación.



En la Figura 1 se muestra un ejemplar de siempreviva que tiene aproximadamente 30 años de edad y se encuentra en un jardín privado en la localidad de Loma del Río en el municipio de Nicolás Romero. Dicho ejemplar se utilizó como donante de material biológico cuando se realizó un proyecto de recuperación de cubierta vegetal y control de la erosión en el Campus de la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez (Figura 2).



Figura 2. Jardín de la UTFV, setos de siempreviva usados como barrera viva para evitar la erosión de suelos. Fuente: Imagen cortesía de la autora.

Gracias a estos tres superpoderes (inmortalidad, automultiplicación y potencialmente gratuita), esta especie podría ser usada para recuperar vegetación urbana (camellones, parques públicos, jardineras, patios privados, etc.) con requerimientos materiales y económicos mínimos tanto para realizar plantaciones como para su mantenimiento.

Por el bando de los supervillanos encontramos al carrizo (nombre científico: *Arundo donax*), que es considerado como una especie invasora. Desecar cuerpos de agua y desplazar especies nativas son los principales crímenes cometidos por este supervillano. Sin embargo, en mi opinión, no es posible que existan especies “buenas” y “malas”, solo hay especies mejor adaptadas que otras, especies con mejores estrategias para sobrevivir que les permiten competir y ganar; ese es el caso del *Arundo donax*.

El carrizo es una especie del grupo de las gramíneas, es un pasto, pero no un pasto cualquiera, es un pasto gigante, ya que sus tallos pueden alcanzar una altura de 9 m si encuentra las condiciones ambientales ideales. Que un árbol alcance esta altura no es motivo de sorpresa, sin embargo, pensar que una “hierba” pueda crecer tanto, sin duda es un superpoder. Se ha registrado que bajo condiciones óptimas crece hasta 5 cm por día, generando una biomasa de al menos 3.4 toneladas de peso seco por hectárea [4], casi es posible verlos crecer si te quedas observando por algún tiempo. En las películas de ficción hay plantas que invaden todo en cuestión de minutos, el carrizo no lo hace de esa manera, pero sí puede cubrir grandes extensiones de terreno en unos cuantos meses. Es por esta razón que tiene una muy mala reputación como invasora, y existen muchos esfuerzos para erradicarla de ambientes cercanos a cuerpos de agua. Esta impresionante velocidad de crecimiento la ubica como una de las especies con mayor producción de biomasa en el mundo. En otras palabras, esta especie vegetal convierte el CO_2 de la atmósfera en compuestos orgánicos (principalmente celulosa) a gran velocidad, captura este gas de efecto invernadero, lo elimina del aire y lo transforma en plantas.

Aunado a esto, una de las características más importante de los carrizos es su resistencia a cargas contaminantes elevadas, que, en el caso de nitrógeno y fósforo, incluso incrementan su crecimiento, por tal motivo resulta ideal usarlo en humedales artificiales para tratamiento de agua residual doméstica (Figura 3). Frente a la sequía, no se mueren, solo se secan sus hojas, las cuales envuelven sus tallos y actúan como protección de los mismos para evitar que se sequen, los tallos permanecen vivos esperando nuevamente la llegada del agua, también son capaces de resistir periodos largos de sequía, debido a que sus raíces tienen forma de “camote” que les permite almacenar agua y nu-



trientes, para usarlos durante los periodos de sequía. Todas estas características los hacen superresistentes, prácticamente inmortales. El superpoder de la multiplicación es incluso mayor que el de la siempreviva, puede clonarse, es más, la clonación es prácticamente su única forma de reproducción, porque solo produce semillas en algunas regiones del mundo.



Figura 3. Ejemplares de carrizo en un humedal doméstico que también tiene la función de cerca viva. Fuente: Imagen cortesía de la autora.

El carrizo tiene una forma de reproducción que consiste en “soltar hijos”. Cuando los tallos de carrizo alcanzan una altura de 4 m aproximadamente, como son muy delgados, no tienen la suficiente fuerza para permanecer completamente verticales, así que se empiezan a doblar. Por otra parte, cuando alcanzan

alrededor de dos años de edad, se puede considerar que son maduros, incluso podríamos decir que son “viejos”, la mayor parte de las hojas inferiores se han secado y solo les quedan unas pocas en la punta. En este momento les empiezan a brotar retoños a lo largo del tallo. Esos retoños tienen el potencial para convertirse en una planta completa, empiezan a desarrollar raíces, de tal forma que, si el tallo se dobla lo suficiente para que esos retoños con pequeñas raíces alcancen el suelo, pues, literalmente, ¡ya la hicieron! Otra forma es, por el clima o acción del hombre, si los tallos son cortados o tirados por el viento y lluvia cuando están en contacto con el suelo potencialmente darán origen a nuevas plantas.

Los carrizos tienen otro mecanismo de clonación. Consiste en la fragmentación de pequeños “rizomas” (raíces con forma de camote), los cuales son arrastrados por las corrientes de agua y se establecen en donde el agua los deposita. Esta estrategia es la que lo convirtió en cosmopolita, es decir que se encuentra distribuido por todo el mundo, porque esta especie, a diferencia de otras invasoras, no necesitó que la especie humana la introdujera en ambientes ajenos a su sitio de origen. La última, y tal vez la más efectiva, estrategia de clonación del carrizo es mediante rizomas, los cuales crecen de manera subterránea y dan origen a nuevos tallos de carrizos, de forma similar a como lo hace el pasto común. Este sistema de reproducción también ha contribuido a incrementar su fama de invasora y desecadora de cuerpos de agua, ya que sus raíces crecen buscando la humedad, y donde la encuentran, pues la aprovechan para crecer. Si están cercanos a una tubería de agua, sus raíces se introducen en los tubos, causando taponamientos indeseables a los cuales las personas responden de manera agresiva, tratando de erradicarlos. Las características descritas pueden ser vistas como superpoderes de supervillano, o superpoderes de superhéroe.



Todas las especies vegetales son capaces de limpiar el aire, capturando el CO_2 y liberando O_2 , pero no todas lo hacen a la supervelocidad que lo hace el carrizo, además de que no todas pueden vivir solo de agua contaminada y en suelos infértiles. Es posible usar el carrizo en las ciudades, donde es muy difícil que las plantas crezcan porque no hay suelo suficiente, tampoco hay agua limpia suficiente para regar las plantas, solo hay agua contaminada. Se podrían aprovechar todas sus características y desarrollar estrategias que nos permitan tener bajo control el crecimiento, por ejemplo, plantarlos solo en contenedores alimentados por agua residual, de tal forma que se evite la propagación descontrolada.

Referencias

1. Jiménez HG, Elías BC, Salinas SV. Huracán Otis en Acapulco Guerrero: Vulnerabilidad socioeconómica y ambiental ante los impactos del fenómeno hidrometeorológico. Ciudad de México: Ediciones Comunicación Científica. 2024.
2. Colombo A. La reproducción por esquejes. Dublín: De Vecchi. 2018.
3. Alvarado-García V, Zúñiga-Amador MA. Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica. *La Cadera*, 2018;18(30): 39–47.
4. Flores Maldonado JJ, Navarro A, Orozco AL, Mendoza R, González Martínez AI. El carrizo gigante, especie invasora de ecosistemas riparios. *CONABIO Biodiversitas*. 2008;81:6–10.



Tizón tardío en jitomate: una enfermedad silenciosa de alto impacto agrícola

ALONDRA NEREIDA ABONCE MÉNDEZ,¹ ZAIRA VARGAS SOLANO,¹
JORGE ALBERTO GRANADOS OLVERA,¹ HUGO YURIEL VERGARA REYES²

¹ Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, ² Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli

alondra.abonce@utfv.edu.mx, zaira.vargas@utfv.edu.mx, alberto.granados@utfv.edu.mx, y8085314@gmail.com

Las enfermedades provocadas por microorganismos que afectan a las plantas constituyen uno de los principales desafíos para la producción agrícola mundial, ya que influyen directamente en el desarrollo, el rendimiento y la calidad de los cultivos. Uno de los cultivos con mayor importancia económica y nutricional es el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), una de las hortalizas más cultivadas, consumidas y comercializadas en el mundo. Su relevancia se debe tanto a su valor nutricional y versatilidad en la dieta humana como a su impacto económico, especialmente en países en desarrollo.

El objetivo de este trabajo es analizar los mecanismos de infección y dispersión del tizón tardío en el cultivo de jitomate, así como destacar su impacto en la producción y la importancia de implementar estrategias integrales de manejo que permitan reducir sus efectos negativos en la agricultura nacional.

En México el cultivo de jitomate ocupa un lugar estratégico dentro del sector agrícola, ya que representa una de las hortalizas con mayor participación en el mercado interno y una importante

fuerza de divisas por exportación. Sin embargo, este crecimiento productivo enfrenta diversas limitantes, entre ellas las enfermedades de origen microbiano, que continúan siendo uno de los principales factores que reducen la productividad y calidad del cultivo, tanto en sistemas a cielo abierto como en agricultura protegida [1].

Aunque en México no existen cifras oficiales sobre las toneladas de hortalizas perdidas por esta enfermedad, se sabe que a nivel global las pérdidas económicas y de producción son enormes, representando miles de millones de dólares y pérdidas de producción significativas en cultivos gran relevancia económica y nutricional [2].

Entre los fitopatógenos que afectan al jitomate, los hongos y oomicetos destacan por su alta frecuencia y agresividad. El tizón tardío, causado por *Phytophthora infestans*, es una de las enfermedades más devastadoras, ya que infecta hojas, tallos y frutos, provocando pudriciones severas y, en casos extremos, la muerte total de la planta, como se muestra en la Figura 1 [3, 4].



Figura 1. Infección en planta de jitomate. Fuente: Elaboración propia.



El *Phytophthora infestans* se propaga con gran facilidad cuando existen condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas, pudiendo destruir completamente una planta en un periodo de siete a diez días si no se aplican medidas de control oportunas. El patógeno se dispersa a través de estructuras llamadas esporangios, que pueden transportarse fácilmente por el viento y la lluvia, lo que permite reiniciar rápidamente el ciclo de infección en el cultivo, como se observa en la Figura 2 [5].

El tizón tardío continúa siendo una de las principales amenazas para la producción sostenible de jitomate debido a su elevada agresividad, rápida dispersión y capacidad de persistencia en el ambiente. Resulta fundamental fomentar la investigación aplicada, el monitoreo oportuno y la capacitación continua de los productores como pilares para enfrentar esta problemática. Asimismo, el desarrollo y adopción de estrategias de manejo más sostenibles e innovadoras será clave



Figura 2. Ciclo de vida de *Phytophthora infestans* en jitomate. Fuente: Elaboración propia con IA.

Tabla 1. Síntomas del tizón tardío en jitomate

Síntomas iniciales	Síntomas avanzados
Pequeñas manchas irregulares en hojas	Manchas extensas de color marrón oscuro o negruzco
Lesiones de apariencia acuosa	Bordes cloróticos y aspecto húmedo
Difícil detección visual inicial	Pudrición de tallos y frutos
Ligero cambio de coloración en el follaje	Colapso total de la planta



para reducir la dependencia de agroquímicos convencionales, fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos y garantizar la seguridad alimentaria y económica asociada a este cultivo estratégico.

Ante estos desafíos, el principal reto radica en desarrollar alternativas sostenibles que permitan reducir o sustituir el uso de agroquímicos sintéticos, sin comprometer la eficacia en el control de este fitopatógeno. En este contexto, la División Académica de Tecnología Ambiental de la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez desarrolla una línea de investigación centrada en el uso de la nanobiotecnología para el combate de *P. infestans* y mitigar tanto las pérdidas productivas como los efectos ambientales asociados al control del tizón tardío.

Referencias

1. Panthee DR, Chen F. Epidemiology and management of tomato diseases caused by fungal and oomycete pathogens. *Plant Pathol.* 2024;73(1):15–32.
2. Zamora Vargas DD. Manejo integrado de *Phytophthora infestans* en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en Ecuador [tesis de licenciatura]. Babahoyo: UTB; 2023.
3. Fry WE. *Phytophthora infestans*: the plant (and R gene) destroyer. *Mol Plant Pathol.* 2008;9(3):385–402.
4. Nowicki M, Foolad MR, Nowakowska M, Kozik EU. Potato and tomato late blight caused by *Phytophthora infestans*: an overview of pathology and resistance breeding. *Plant Dis.* 2012;96(1):4–17.
5. Agrios GN. *Plant pathology*. 5a. ed. Burlington (MA): Elsevier Academic Press; 2005.



Made in Abyss. Cuando la ciencia cambia la bata por el casco

ALFREDO RICARDO PÉREZ FERNÁNDEZ

Profesor de Tecnología Ambiental en la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez y Miembro de la Asociación de Excursionismo y Montañismo del Instituto Politécnico Nacional

alfredo.perez@utfv.edu.mx

La ciencia no siempre ocurre en laboratorios blancos ni se escribe con una bata puesta. En México, parte del conocimiento se construye bajo tierra, con casco, lámpara, baterías, cuerdas y mosquetones mediante una disciplina llamada espeleología. Dicha disciplina no es turismo ni deporte extremo. Es como reza el lema de nuestra escuela: “ciencia y deporte bajo Tierra”, practicada en uno de los ambientes más frágiles, menos comprendidos e inhóspitos del planeta (Fernández y Ruiz, 2024). Explorar cuevas hoy es repetir un gesto antiguo del espíritu humano. Cada descenso a la oscuridad tiene algo de las travesías oceánicas de Fernando de Magallanes, del arroyo vikingo hacia tierras desconocidas, de la marcha silenciosa de Roald Amundsen sobre el hielo polar o del salto de la humanidad hacia el espacio. Explorar es dialogar con el miedo. Es aceptar que lo desconocido no desaparece ignorándolo. Las cuevas son nuestros mares interiores, nuestros polos subterráneos: territorios que no se revelan desde la superficie y que exigen técnica, disciplina y carácter.

Desde la prehistoria, las cavernas fueron más que refugios. Se asociaron con el vientre de la Tierra, con puertas al inframundo, con espacios de transformación. La oscuridad absoluta y el silencio profundo reforzaron la idea de que ahí habitaban fuerzas invisibles. Hoy sabemos que no son puertas míticas, pero sí portales al tiempo profundo cuya exploración sistemática comenzó relativamente tarde. A finales del siglo XIX, el francés Édouard-Alfred Martel convirtió la curiosidad en método: incorporó mediciones, cartografía, observaciones geológicas

e hidrológicas. En 1895 fundó la Société de Spéléologie, considerada la primera organización formal dedicada a esta disciplina.



Figura 1. Equipo empleado en espeleología. Fotografía: cortesía de Alfredo Pérez Fernández

En pocas décadas la espeleología pasó de emplear equipo adaptado del alpinismo, a contar con materiales y sistemas diseñados específicamente para progresión vertical subterránea. Muchas empresas impulsaron esta transformación mediante investigación aplicada en resistencia de materiales, ergonomía y dinámica de cargas. El desarrollo de arneses de suspensión prolongada, descensores autofrenantes, bloqueadores de alta eficiencia y cascos con iluminación integrada (véase Figura 1) responde a ensayos mecánicos, modelación de esfuerzos y protocolos de certificación internacionales.



En ambientes hipogeos, donde la humedad, la abrasión y la caída de rocas son constantes, una falla no es un accidente menor sino potencialmente letal; por ello, los procesos de diseño incorporan factores de seguridad elevados, pruebas destructivas sistemáticas y trazabilidad total de componentes. La excelencia técnica no es mercadotecnia: es condición indispensable para la supervivencia en entornos donde el error humano y la fatiga del material no admiten margen.

Con el desarrollo de equipo especializado, las cuevas dejaron de ser únicamente misterio para convertirse en archivo. En sus formaciones —los espeleotemas— se conservan registros químicos que narran miles de años de cambios climáticos (Fairchild y Baker, 2012). En sus sedimentos se encuentran fósiles que hablan de megafaunas extinguidas. En sus ecosistemas sobreviven organismos adaptados a la oscuridad total, donde la energía es escasa y el tiempo parece suspendido.

En México, esta historia tiene un capítulo particular. En 1939, los refugiados españoles Cándido Luis Bolívar y Federico Bonet, integrados a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, iniciaron exploraciones sistemáticas en cavernas de Guerrero. Décadas después, Jorge de Urquijo Tovar estructuró los primeros cursos formales, y en 1981 se consolidó su enseñanza. Sin embargo, la espeleología mexicana es una disciplina joven, en plena evolución, con pocos grupos activos frente a la vastedad del territorio y, como todo proceso geológico, su avance ha sido gradual; no obstante, el país posee un enorme potencial subterráneo que demanda más investigadores, técnicos y entusiastas dispuestos a explorar, documentar y conservar este mundo.

Se estima que cerca del 20 % del territorio nacional presenta condiciones favorables para la formación de cuevas debido a la abundancia de

calizas y dolomías. Aun así, menos del 10 % de las cavidades conocidas han sido exploradas en detalle, lo que revela un vasto territorio científicamente prometedor, todavía en gran medida inédito (Rojo, 2005). Por ejemplo, la península de Yucatán alberga sistemas como Sac Actun y Ox Bel Ha, las cuevas inundadas más extensas del planeta: ríos subterráneos que conservan registros climáticos y vestigios de ocupación humana antigua (Coke, 2019). En San Luis Potosí, el Sótano de las Golondrinas desciende 512 metros en vertical, revelando la dimensión abismal del karst mexicano. En Chihuahua, la Cueva de los Cristales de Naica mostró al mundo formaciones minerales únicas, gigantes de yeso que crecieron en condiciones termales irrepetibles (García-Ruiz et al., 2007). En la Sierra Juárez de Oaxaca, el Sistema Cheve representa la frontera de la exploración profunda. Durante más de dos décadas, equipos internacionales han descendido por este sistema cuya profundidad supera el kilómetro y continúa en exploración. Entre ellos, el ingeniero y explorador Bill Stone ha utilizado Cheve como laboratorio natural a fin de probar tecnologías diseñadas para la búsqueda de vida extraterrestre (Wei-Haas, 2022). La lógica es contundente: si la vida puede persistir en cuevas profundas, pobres en nutrientes y energía, también podría hacerlo en Marte o en lunas heladas de otros planetas. La frontera entre espeleología e ingeniería espacial ya no es imaginaria. El futuro no solo está hacia arriba. También está hacia abajo, hacia lo profundo.

Pero esta exploración hacia el inframundo no inicia con un GPS, con un dron ni con un paper indexado, sino que lo hace de la manera más sencilla... con una historia. Comienza con alguien que hace un comentario: “Dicen que por ese cerro hay una cueva...”.

Tal vez fue un campesino que sintió aire frío salir de la roca al amanecer. Tal vez un abuelo que habló de un túnel donde el eco responde distinto, quizás una nota perdida en un periód-



co local. Así nacen las expediciones: del rumor al método, de la leyenda a la hipótesis. Porque explorar no es improvisar. Es verificar. Revisamos archivos, entrevistamos a la gente mayor del lugar, analizamos mapas geológicos, identificamos formaciones calizas, fallas, fracturas, antiguos cauces. Donde hubo agua circulando durante millones de años, puede haber una cueva esperando. Aquí empieza la ciencia. Pero no la de laboratorio con bata blanca y aire acondicionado. Es la ciencia que camina, que pregunta, que escucha. Confirmada la posibilidad, viene la parte más humana del proceso: pedir permiso. Hablar con los dueños del terreno. Explicar a las autoridades qué es la espeleología. Responder la pregunta inevitable:

—¿Y para qué quieren meterse ahí?

Porque en la conciencia colectiva, la cueva no es un objeto de estudio; es el inframundo. Es peligro. Es lo desconocido. Hay un miedo ancestral que todavía habita en nosotros. Y convencer no siempre es posible. Muchas veces no se obtiene autorización, y cuando eso ocurre, se respeta. La ética está antes que la aventura. Además, no olvidemos la realidad: muchas cuevas están en regiones remotas, de difícil acceso, donde la logística es compleja y la seguridad no siempre está garantizada. Explorar implica también evaluar riesgos con responsabilidad.

Cuando el permiso llega y la región es segura, la expedición se transforma en comunidad. Entonces se compra comida local, se contratan guías, se agradece la confianza. Quienes viven ahí conocen mejor que nadie el territorio: saben dónde el terreno cambia de sonido bajo las botas, dónde el agua desaparece en temporada seca, dónde la montaña “respira”. La exploración no puede ser unilateral ni ajena al contexto que la sostiene; debe construirse desde el respeto, la colaboración y el reconocimiento mutuo, entendiendo que el conocimiento verdadero se teje junto con quienes habitan las inmediaciones de la cueva y no al

margen de ellos. Y entonces, finalmente, se llega al umbral. Antes de entrar a una caverna, hago algo sencillo: le pido permiso. No a una entidad mística necesariamente, sino al lugar mismo. Es un acto de conciencia. Vamos a penetrar un espacio que se formó millones de años antes de que existiera cualquier país, cualquier ciudad, cualquier universidad. Se evalúa el entorno inmediato: estabilidad de la roca, posible caída de fragmentos, flujo de agua, calidad del aire. Se instalan y anclan las cuerdas en puntos seguros; cada nudo se revisa dos veces.



Figura 2. Configuración de equipo según escuela francesa de espeleología. Fotografía: cortesía de Alfredo Pérez Fernández

En la Figura 2, puede observarse: el arnés, el descenso, bloqueadores de pecho y mano, cabos de anclaje, mosquetones, casco con iluminación redundante y cuerdas estáticas de alta resistencia que son el equipamiento estándar derivado de la escuela francesa de espeleología —técnica predominante en México por su eficiencia y confiabilidad—. Es un sistema depurado por décadas de práctica y ensayo técnico, diseñado para maximizar control, reducir desgaste físico y mantener márgenes de seguridad amplios en entornos donde cada maniobra debe ser predecible y verificable.



Todo pasa por una última inspección cruzada. No hay prisa. La seguridad no es un trámite, es una disciplina. Solo entonces, cuando todo está verificado, inicia el ingreso. Encendemos las lámparas. Y el mundo cambia. Apenas unos metros dentro, la temperatura y la humedad se estabilizan. Desaparecen el ruido, los insectos, el viento y el cielo, desde luego no hay internet. Solo oscuridad total, tan absoluta que, si apagas la luz, desapareces. No ves tu mano frente al rostro. No ves el tiempo, pero lo sientes avanzar en cada metro recorrido.

Avanzamos metro a metro. Cada galería es el resultado de agua fluyendo con una paciencia que ningún ser humano posee. Gota a gota, durante millones de años, disolviendo la roca, ampliando fracturas microscópicas hasta convertirlas en pasajes transitables. La cueva es una escultura del tiempo. Y aquí ocurre algo transformador. La escala humana se rompe. Una vida completa —estudiar, trabajar, enamorarse, formar una familia— es, en términos geológicos, casi nada. El surgimiento y caída de una civilización entera apenas equivaldría a unos centímetros de disolución en una pared calcárea. En la cueva entiendes que el tiempo profundo no es una metáfora académica, sino que es tangible en la estratificación mineral y en las tasas de crecimiento milimétrico anual.

Como en toda exploración prolongada, llega el momento de acampar. Pero hacerlo dentro de una cueva no es simplemente instalar una tienda: es una experiencia física y geológica. Se duerme suspendido o recostado sobre roca cuya edad se mide en millones de años, superficies que comenzaron a formarse cuando continentes enteros tenían otra configuración y cuya historia quedó escrita en capas minerales, en vetas, en cristales. Dormir en ese entorno es descansar dentro de un archivo natural que ha presenciado extinciones masivas, levantamientos tectónicos y transiciones climáticas. No es solo pernoctar: es habitar, por unas horas, la memoria profunda de la Tierra.

Recuerdo una vez, a más de trescientos metros bajo tierra y a más de un día de camino para salir a la superficie, el eco dejó de regresar. Habíamos avanzado por una galería estrecha y, de pronto, el silencio se volvió distinto, más denso. Apagué la lámpara por un segundo para ajustar la batería... y desaparecí. No veía mi mano, no veía a mis compañeros, no veía nada. Solo escuchaba mi respiración amplificadas dentro del casco. Fue un instante mínimo, pero suficiente para que el miedo ancestral despertara: ahí abajo sin cielo ni horizonte, no hay salida evidente. Y, sin embargo, en lugar de retroceder, encendimos de nuevo las luces, revisamos el equipo, analizamos la ruta y seguimos avanzando. Porque el miedo no cancela la curiosidad; la afina. En esa oscuridad absoluta entendí que el impulso humano no es evitar lo desconocido, sino iluminarlo. Así es la ciencia: no promete certezas absolutas, sino claridad progresiva. No niega la complejidad del mundo, pero la enfrenta con método, comunidad académica y responsabilidad ética. Como en la caverna profunda, no avanzamos porque todo esté resuelto, sino porque contamos con instrumentos, protocolos y un marco teórico que nos permiten movernos con prudencia en medio de la incertidumbre. Y en esa tarea, cada artículo científico publicado es una lámpara encendida que ensancha, aunque sea unos metros más, el territorio del conocimiento humano.

Explorar sistemas subterráneos complejos es aprender a pensar en términos de interdependencia. Una cueva no es un vacío aislado: es en realidad un nodo dentro de una red hidrológica, química y biológica que se enlaza con la superficie, con los acuíferos que abastecen ciudades, con los bosques que regulan la infiltración y con los ciclos climáticos que modelan el planeta (Goldscheider, 2019). Comprender estos entramados exige abandonar la mirada fragmentada. El goteo que esculpe una estalactita responde a lluvias ocurridas meses, años y hasta siglos atrás; el pulso de



un sifón refleja la recarga regional; la química del agua guarda la memoria geoquímica de toda una cuenca.

La exploración, entonces, es más que aventura y cartografía: es una herramienta para descifrar sistemas cuya comprensión resulta crucial para la gestión del agua, la conservación y la adaptación al cambio climático. Descender es entender. Y en un siglo marcado por crisis hídricas y transformaciones climáticas aceleradas, entender estos sistemas es esencial para anticipar el futuro ambiental del planeta. Es divulgación y ciencia viva. No descendemos por adrenalina, sino por conocimiento, para estudiar procesos geomorfológicos, hidrológicos y biogeoquímicos; para analizar espeleotemas que registran paleoclimas; para mapear redes que influyen en acuíferos; para documentar biodiversidad adaptada a la oscuridad absoluta. También es una responsabilidad ética: para quienes nos dedicamos a las ciencias ambientales, explorar estos entornos no es una extravagancia técnica, sino una obligación profesional. No podemos aspirar a comprender integralmente la Tierra si ignoramos lo que ocurre bajo su superficie.

La espeleología explora un inframundo real, no mitológico. Es ciencia sin bata, pero con casco, arnés y cuerda. Es geología que se toca, hidrología que se escucha, tiempo que se recorre paso a paso. Y cuando se regresa a la superficie, tras horas o días bajo tierra, algo se transforma. No porque se haya conquistado nada —las cuevas no se conquistan— sino porque se comprende la escala verdadera del planeta y, en ella, la nuestra. Explorar una cueva no es descender al vacío: es entrar en la historia profunda de la Tierra.

Para cualquier mente inquieta —ingenieros, biólogos, geólogos, programadores, comunicadores— el mundo subterráneo es un punto de encuentro donde convergen ciencia, técnica y espíritu explorador. Exige rigor, trabajo

en equipo y la humildad de reconocer que la Tierra es más antigua, más compleja e interdependiente de lo que solemos imaginar. Porque la ciencia no nace en la comodidad de la certeza, sino en el valor de encender una luz donde nadie antes había mirado. Y allá abajo, en el silencio absoluto de la roca, comprendemos que cada lámpara encendida —cada medición, cada mapa, cada artículo publicado— no solo ilumina un pasaje subterráneo: amplía los límites del conocimiento humano y nos permite tomar decisiones más responsables sobre el futuro ambiental que compartimos.

Referencias

- Coke, J. G. (2019). Underwater caves of the Yucatan peninsula. En *Encyclopedia of caves* (pp. 1089-1095). Academic Press.
- Fairchild, I. J., y Baker, A. (2012). *Speleothem science: from process to past environments*. John Wiley & Sons.
- Fernández, T. P., y Ruiz, A. P. (2024). La importancia documental en las investigaciones subterráneas. 45 años de exploraciones espeleológicas Grupo de Espeleología de Villacarrillo (GEV). En *V Congreso virtual Archivos, Historia y Patrimonio Documental* (pp. 317-334). Asociación de Amigos del Archivo Histórico Diocesano de Jaén.
- García-Ruiz, J. M., Villasuso, R., Ayora, C., Canals, A., y Otálora, F. (2007). Formation of natural gypsum megacrystals in Naica, Mexico. *Geology*, 35(4), 327-330.
- Goldscheider, N. (2019). A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. *Carbonates and Evaporites*, 34(4), 1241-1249.
- Wei-Haas, M. (2022). Going Ever Deeper: For decades, highly skilled cavers have come to Mexico to explore a labyrinth within a mountain: Cheve, which may (or may not) be the deepest cave on earth. *National Geographic*, 241(6), 28-30.
- Rojo, R. (2005). Las cuevas de México. *CONABIO. Biodiversitas*, 62, 8-11.



Defensa invisible en la agricultura: biofungicida de nanopartículas de plata para prevenir y tratar enfermedades

JORGE ALBERTO GRANADOS OLVERA,¹ HUGO YURIEL VERGARA REYES,²
ELOY PÉREZ VALERA,¹ ALONDRA NEREIDA ABONCE MÉNDEZ¹

¹ Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, ² Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli

alberto.granados@utfv.edu.mx, 122202049@upci.edu.mx, eloy.perez@utfv.edu.mx, alondra.abonce@utfv.edu.mx

La agricultura en México constituye una actividad esencial para la economía nacional, sustentando la producción de cultivos básicos como el maíz (*Zea mays*), jitomate (*Solanum lycopersicum*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y diversas hortalizas. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos constantes derivados de plagas y enfermedades fitopatógenas que afectan el desarrollo, el rendimiento y la calidad de los productos. Entre los agentes más relevantes se encuentran los hongos fitopatógenos, responsables de enfermedades como pudriciones de raíz y tallo, roya, tizones y marchiteces vasculares, que impactan negativamente la productividad y competitividad del sector agroalimentario. Tradicionalmente, el control de estas enfermedades ha dependido de la aplicación de fungicidas químicos convencionales [1]. No obstante, su uso continuo ha generado problemas como la aparición de cepas resistentes (Figura 1), la acumulación de residuos tóxicos en el ambiente y riesgos potenciales para la salud humana y la biodiversidad. Ante estas limitaciones, ha surgido un creciente interés en el desarrollo de alternativas naturales, más efectivas y ambientalmente sostenibles.

En este contexto, la nanotecnología y la biotecnología ofrecen soluciones prometedoras [2]. En particular, las nanopartículas de plata (AgNP) han sido ampliamente estudiadas por sus propiedades antimicrobianas (Figura 2). Su tamaño nanométrico y elevada relación superficie-volumen les permite adherirse a las



Figura 1. Tizón tardío en cultivos de jitomate. Fuente: Elaboración propia

células fúngicas, alterar la permeabilidad de sus membranas e inducir estrés oxidativo, lo que inhibe el crecimiento del micelio y la formación de esporas, interrumpiendo así el ciclo de vida del patógeno [3].

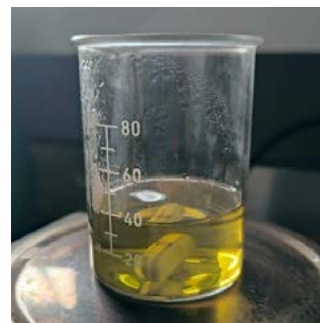


Figura 2. Muestras de nanopartículas de plata (AgNP). Fuente: Elaboración propia



Diversos estudios han demostrado que las AgNP sintetizadas mediante métodos verdes inhiben el crecimiento de hongos fitopatógenos de relevancia agrícola, como *Fusarium solani* [4], *Rhizopus stolonifer* [5] y *Alternaria alternata* [6], asociados con enfermedades en cultivos hortícolas y de grano. Asimismo, se ha documentado que las AgNP recubiertas con quitosano son eficaces en el control de la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* [7], reduciendo significativamente los síntomas y previniendo el desarrollo de la enfermedad.

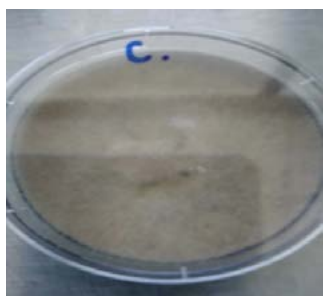


Figura 3. *Rhizopus stolonifer* en medio Agar Dextrosa Peptona de Caseína. Fuente: Elaboración propia

La síntesis biológica de nanopartículas, utilizando extractos de plantas o microorganismos, no solo disminuye el uso de agentes

químicos [8], sino que también contribuye al saneamiento de ambientes contaminados [9]. Esto posiciona a las AgNP como una alternativa ecológica, amigable y sostenible para la agricultura moderna. La comparación entre fungicidas convencionales y AgNP se muestra en la Tabla 1.

La evidencia científica respalda que las nanopartículas de plata representan una alternativa sólida, eficiente y ambientalmente responsable frente a los fungicidas químicos convencionales. Su mecanismo de acción, basado en la interacción directa con las células fúngicas y la inducción de estrés oxidativo, dificulta la generación de resistencia y permite un control más efectivo de los patógenos [1–9]. La incorporación de la síntesis verde fortalece aún más su potencial, al reducir la carga de residuos químicos en suelos y alimentos, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles. De esta manera, los biofungicidas basados en AgNP podrían convertirse en una herramienta clave para mejorar el control de enfermedades fúngicas en la agricultura mexicana, alineándose con las tendencias globales hacia una producción más limpia y sostenible.

Tabla 1. Comparación de fungicidas químicos convencionales y nanopartículas de plata (AgNP)

Criterio	Fungicidas químicos convencionales	Nanopartículas de plata (AgNP)
Eficacia	Funciona a dosis elevada	Funciona a dosis mínima
Mecanismo de acción	Actúa sobre rutas bioquímicas específicas	Daña a las membranas: causa estrés oxidativo
Espectro de acción	Específico	Amplio
Resistencia	Alta	Baja
Impacto ambiental	Alto, frecuentemente generando residuos	Bajo (síntesis verde)



Referencias

1. Kim SW, Jung JH, Lamsal K, et al. Antifungal effects of silver nanoparticles against various plant pathogenic fungi. *Mycobiology*. 2012;40(1):53–58.
2. Moreno-Vargas JM, Echeverry-Cardona LM, Moreno-Montoya LE, Restrepo-Parra E. Evaluation of antifungal activity of Ag nanoparticles synthesized by green chemistry against *Fusarium solani* and *Rhizopus stolonifer*. *Nanomaterials*. 2023;13(3):548.
3. Matras E, Gorczyca A, Przemieniecki SW, et al. Surface properties-dependent antifungal activity of silver nanoparticles. *Sci Rep*. 2022;12:18046.
4. Mikhailova EO, et al. Antifungal effect of engineered silver nanoparticles on phytopathogenic and toxigenic *Fusarium* spp. and their impact on mycotoxin accumulation. *Int J Food Microbiol*. 2019;306:108259.
5. Qureshi AK, Farooq U, Shakeel Q, et al. Green synthesis of silver nanoparticles from *Avena fatua* extract: antifungal activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Pathogens*. 2023;12(10):1247.
6. Chen J, et al. Antifungal mechanism of nanosilver biosynthesized with *Trichoderma longibrachiatum* and its potential to control muskmelon *Fusarium* wilt. *Sci Rep*. 2024.
7. Ahmad A, et al. Unveiling the antibacterial and antifungal potential of biosynthesized silver nanoparticles from *Chromolaena odorata* leaves. *Sci Rep*. 2024;14:7513.
8. Khan I, et al. Green-fabricated silver nanoparticles from *Quercus incana* leaf extract to control early blight of tomatoes caused by *Alternaria solani*. *BMC Plant Biol*. 2024.
9. Encinas-Basurto DA, Álvarez-Carvajal F, Armenta-Calderón A, et al. Silver nanoparticles coated with chitosan against *Fusarium oxysporum* in tomato seedlings. *Biotechnia*. 2020;22(3):73–80.