

**Residuos sólidos municipales
en exvertederos clandestinos
de la Sierra de Guadalupe:
en búsqueda de
microorganismos
degradadores de plástico**

Biól. Ana Paula Romero Calderón

Maestría en Ecología Aplicada, UAM-Xochimilco

Biól. Fernando Basilio González

Maestría en Ecología Aplicada, UAM-Xochimilco

Dra. Aída V. Rodríguez Tovar

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN

M. E. A. Alejandra García Mares

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dr. José Roberto Ángeles Vázquez

Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

Dra. Patricia Castilla Hernández

Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

M. E. A. Luis Gerardo Hernández Fernández

Centro de Educación Ambiental Integral Sierra de Guadalupe,
Tlalnepantla de Baz

Dr. Facundo Rivera Becerril

Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

Abstract

Currently, plastic is the most abundant material among solid waste deposited in landfills. The metropolitan area of Mexico City does not escape this reality. As an example, in the Sierra de Guadalupe, different solid waste landfills operated for decades but they were closed a few years ago. Our work team develops research focused on the microorganisms linked to the degradation of plastic in three old landfills, with the aim of determining the diversity, as well as the fungal and bacterial behavior towards plastic. The purpose is to constitute a collection of microbial isolates with the potential to be used in biotechnological processes for plastic management.

Keywords: Biodegradation, Biotechnology, Polyethylene

Resumen

En la actualidad, el plástico es el material más abundante entre los residuos sólidos depositados en los vertederos (“*basureros*”). El área metropolitana de la Ciudad de México no escapa a esta realidad; como ejemplo, en la Sierra de Guadalupe funcionaron durante décadas diferentes vertederos de residuos sólidos municipales que fueron clausurados hace algunos años. Nuestro equipo de trabajo desarrolla una investigación enfocada en los microorganismos vinculados con la degradación de plástico en tres antiguos vertederos, con el objetivo de determinar la diversidad, así como el comportamiento fúngico y bacteriano frente al plástico. La finalidad es de constituir una colección de aislados microbianos con el potencial de ser utilizados en procesos biotecnológicos de gestión de plásticos.

Palabras clave: Biodegradación, Biotecnología, Polietileno

Sierra de Guadalupe

La Sierra de Guadalupe (SG) es una cadena montañosa que se extiende principalmente en el Estado de México y en una pequeña fracción en el norte de la Ciudad de México; es un oasis de vida, una isla verde que sobresale de la mancha urbana de la megalópolis (Figs. 1 y 2). Alrededor de la SG viven aproximadamente cuatro millones de personas en los municipios mexiquenses de Tlalnepantla, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec, así como en la alcaldía Gustavo A. Madero (Paniagua Fuentes, 2016). Esta Sierra es una de las áreas naturales protegidas (ANP) menos conocidas del centro de México.

Los primeros vestigios humanos descubiertos en la SG se remontan al año 1,500 a.C. en Zacatenco y Ticomán, que fueron sitios habitados por Tepanecas, y centros ceremoniales y estratégicos de importancia cosmogónica (Paniagua Fuentes, 2016). La agricultura practicada por los pueblos originarios mexicanos era respetuosa con el entorno; el paisaje estaba dominado por bosques de encino, zonas agrícolas y pequeñas zonas habitacionales en forma de terrazas. Con la llegada de los conquistadores europeos, la SG comenzó a experimentar una sobreexplotación del suelo y de otros recursos; se introdujo el ganado vacuno y ovino, y se crearon aserraderos que estuvieron activos hasta finales del siglo XIX. Desde la década de 1960 ocurrió una explosión poblacional en la periferia de la Sierra que condujo a un uso de suelo preferentemente habitacional, tendencia que sigue vigente (Secretaría de Ecología, 1999).

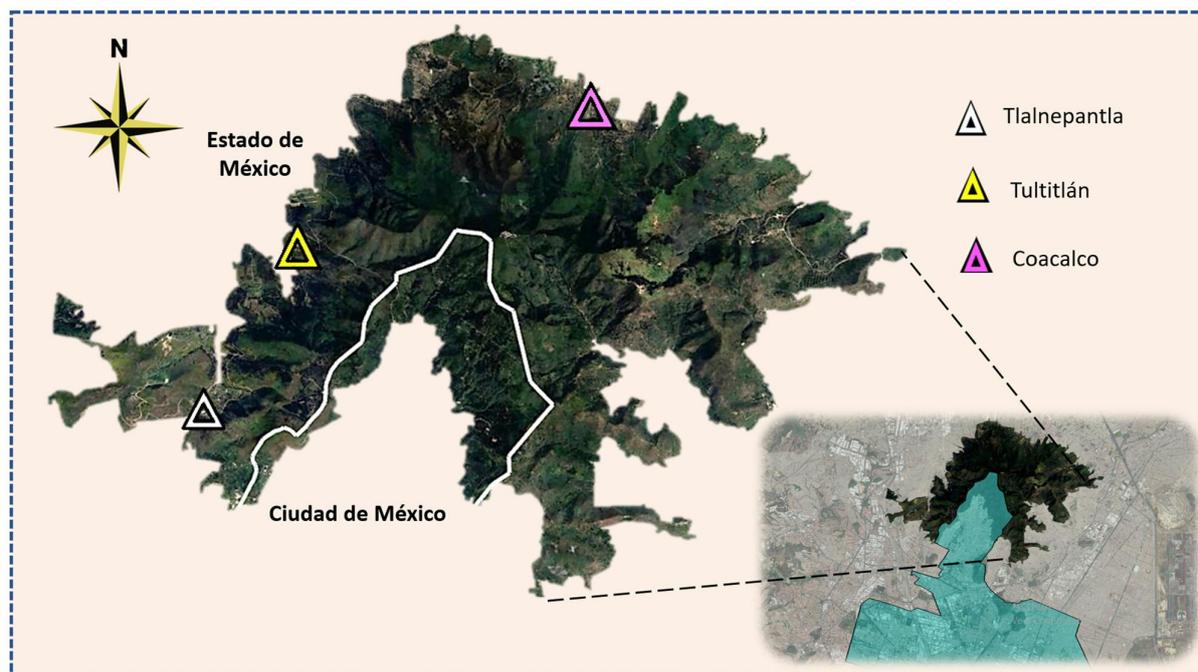


Figura 1: Ubicación de la Sierra de Guadalupe; al sur colinda con la Ciudad de México, al este con Ecatepec, al norte con Coacalco y al oeste con Tultitlán y Tlalnepantla. Las ubicaciones de tres exvertederos clandestinos de residuos sólidos en Tlalnepantla, Tultitlán y Coacalco aparecen señaladas.



Figura 2: Vista parcial de la Sierra de Guadalupe, con sitios de vegetación herbácea y bosques de eucalipto y encino.

La SG fue declarada Zona de Protección Forestal en 1923. Debido a la constante presión que enfrentaba, en 1976 se le designó como Parque Estatal con una extensión de 5,306.75 ha en el Estado de México (Secretaría de Ecología, 1999). La extensión de la SG en la Ciudad de México abarca en la actualidad 633 ha (Ortega de la Sancha, 2024). Esta es una de las pocas ANP situadas en el norte de la Ciudad de México; tiene una gran importancia ecológica y social que se centra en los siguientes aspectos (Secretaría de Ecología, 1999; Paniagua Fuentes, 2016; Ortega de la Sancha, 2024):

a) *Refugio de biodiversidad*: es hábitat para plantas, animales, hongos macroscópicos y microorganismos, algunos de ellos endémicos o en peligro de extinción. Al ser una de las últimas áreas de bosque y matorral del Valle de México, se convierte en un sitio crucial para la conservación de la biodiversidad.

b) *Regulación del clima*: gracias a su vegetación, la SG actúa como un pulmón verde para el Valle de México, regula la temperatura y reduce los efectos de la contaminación atmosférica. Las áreas verdes capturan carbono y contribuyen con la mitigación del cambio climático.

c) *Recarga de acuíferos*: al estar conformada por un conjunto de cerros, la SG permite que el agua de lluvia escurra por las barrancas y forme cuerpos de agua superficiales estacionales. Una porción de esa agua se infiltra gracias a la porosidad de la roca volcánica, y recarga los mantos acuíferos que surten las colonias aledañas.

d) *Control de la erosión*: las formaciones montañosas y la vegetación ayudan a prevenir la erosión del suelo, en especial en una región urbanizada

donde la pérdida de suelo fértil es un problema crítico.

e) *Espacio para la recreación y la educación ambiental*: dentro de la SG se realizan actividades como senderismo, ciclismo de montaña, y observación de aves y hongos, por lo que es un espacio para la recreación. En Tlalnepantla, en Coacalco y en la alcaldía Gustavo A. Madero se encuentran instalados tres centros de educación ambiental donde se realizan actividades para informar y para sensibilizar a la población sobre la importancia de la conservación de este ecosistema. Asimismo, en Ecatepec existe un Jardín Botánico con las mismas finalidades.

f) *Cultural y social*: para las comunidades cercanas, la SG tiene un valor cultural significativo. Es un espacio de integración social donde se llevan a cabo actividades comunitarias que fortalecen el tejido social.

La problemática que implica el plástico en la Sierra de Guadalupe

En los años 1970-2000 la SG fue el sitio para el depósito final de residuos sólidos domiciliarios, comerciales, industriales e incluso hospitalarios de la zona metropolitana y de entidades cercanas (Ortega de la Sancha, 2024). Aún en el presente se liberan residuos sólidos en forma discreta, a pequeña escala, particularmente en la barda perimetral (Secretaría del Medio Ambiente, 2022; Ortega de la Sancha, 2024). En los exvertederos situados en los municipios de Tlalnepantla, Tultitlán y Coacalco, en su momento se depositaron toneladas de materiales; en la actualidad estos sitios se encuentran clausurados y están parcial o totalmente cubiertos por vegetación herbácea (Figura 3). Entre los materiales más abundantes, los plásticos en sus

diferentes presentaciones constituyen más del 50% de los volúmenes totales, según una exploración llevada a cabo. De los plásticos, el polietileno destaca por su elevada proporción en bolsas y envoltorios varios. Los plásticos contienen, además de su estructura básica, una diversidad de aditivos que incluyen metales, colorantes y bisfenoles con la finalidad de fortalecer su estructura, elasticidad, resistencia y apariencia.

La exposición de los residuos a las condiciones ambientales favorece la degradación biológica o abiótica

de los plásticos (Figura 4). Como consecuencia se liberan fragmentos minúsculos, llamados microplásticos cuando su tamaño es menor a 5 mm, o nanoplásticos si su dimensión es menor a un milímetro. Estas partículas pequeñas de plásticos, así como sus aditivos, son susceptibles de ser ingeridos o absorbidos por ciertos animales, plantas y microorganismos, y acumulados en tejidos y en células.

Los microplásticos y nanoplásticos se encuentran también presentes en los suelos interaccionando con las diferentes partículas que los conforman.



Figura 3: Exvertedero de la Sierra de Guadalupe a cielo abierto en el municipio de Tultitlán. En primer plano se aprecia un enorme montículo de residuos sólidos municipales, totalmente cubierto por vegetación herbácea. Este gran montículo está rodeado por un canal que concentra y por donde fluyen los lixiviados.



Figura 4: Exvertedero de la Sierra de Guadalupe a cielo abierto en el municipio de Tlalnepantla. Los residuos sólidos están presentes desde debajo de la cobertura vegetal hasta profundidades mayores.

Hongos y bacterias con potencial de degradación de plástico

Los exvertederos constituyen una oportunidad para aislar microorganismos del suelo adaptados a la elevada presencia de residuos plásticos, y con capacidades enzimáticas para degradarlos. Esta acción transforma los plásticos en compuestos menos tóxicos algunas veces, y más fáciles de metabolizar por los seres vivos, proceso particularmente prometedor para ofrecer una vía para la biodegradación y el reciclaje biológico.

Los hongos pertenecientes a los grupos Basidiomycota y Ascomycota han sido identificados como los más eficaces en este proceso, debido a que sintetizan enzimas de actividad extracelular (lacasas y lignocelulasas, por ejemplo) que hidrolizan los enlaces poliméricos presentes en diferentes tipos de plásticos, como el polietileno tereftalato (PET), el polietileno (PE) y el poliuretano (PU).

Los hongos degradadores de plásticos están presentes en ecosistemas diversos

(Fig. 5), desde suelos contaminados hasta ambientes extremos, lo que demuestra su adaptabilidad y la variedad de sus mecanismos enzimáticos.

Este amplio intervalo ecológico sugiere que podrían existir especies fúngicas con potencial degradador, especialmente en hábitats poco explorados o sometidos a presión ambiental.

La identificación y caracterización de la diversidad fúngica es esencial para descubrir nuevas enzimas y sus rutas metabólicas involucradas en la descomposición plástica de manera eficiente y sostenible.

Como indica el Cuadro 1, los hongos con capacidad de degradación de plástico pertenecen a diversos géneros. Por nuestra parte, *Marasmius*, *Xylaria* y *Penicillium* se identificaron en forma preliminar en el suelo contaminado por residuos plásticos en la Sierra de Guadalupe.

Cuadro 1: Hongos con potencial de degradación de plásticos y sus enzimas involucradas.

Hongo	Polímero	Referencia
<i>Aspergillus tubingensis</i>	Poliuretano	Khan <i>et al.</i> (2017)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Polietileno tereftalato, poliéster	Kim y Rhee (2016)
<i>Penicillium chrysogenum</i>	Polietileno	Saranraj y Naidu (2020)

Diferentes géneros bacterianos (Fig. 6, *Streptomyces*, *Saccharomonospora*, Cuadro 2), entre ellos *Pseudomonas*, *Thermoactinomyces* y *Pseudonocardia*, y están siendo evaluados por su capacidad su potencial para degradar polipropileno de degradación de polímeros plásticos. (PP), uno de los polímeros más estables Boenel *et al.* (2021) estudiaron y de uso común. las actinobacterias *Actinomadura*,



Figura 5: Hongos con diferentes morfologías macroscópicas, cultivados en medio papa-dextrosa-agar. Los organismos fueron aislados a partir de fragmentos de plástico con signos de degradación en los exvertederos de residuos sólidos de la Sierra de Guadalupe.

Cuadro 2: Bacterias con potencial de degradación de diferentes plásticos.

Bacteria	Polímero	Referencia
<i>Bacillus megaterium</i>	Polihidroxicanoato	Segura <i>et al.</i> (2007)
<i>Arthrobacter sp.</i>	Polietileno alta densidad	Balasubramanian <i>et al.</i> (2010)
<i>Pseudomonas sp.</i>	Polietileno alta densidad	Balasubramanian <i>et al.</i> (2010)
<i>Ideonella sakaiensis</i>	Tereftalato de polietileno	Yoshida <i>et al.</i> (2016)
<i>Actinomadura sp.</i>	Polipropileno	Boenel <i>et al.</i> (2021)
<i>Streptomyces sp.</i>	Polipropileno	Boenel <i>et al.</i> (2021)
<i>Rhodococcus sp.</i>	Polietileno baja densidad	Cao <i>et al.</i> (2022)

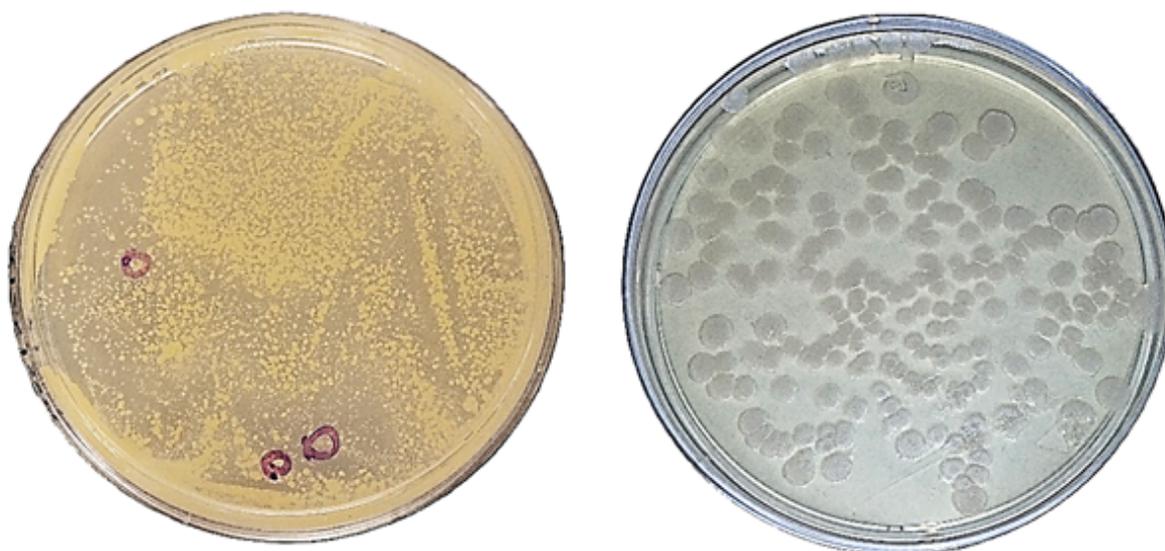


Figura 6: Aislamiento de bacterias en agar nutritivo a partir de segmentos de plástico con signos de degradación procedentes de los exvertederos de residuos sólidos de la Sierra de Guadalupe.

A futuro, la diversidad de hongos y bacterias degradadores de plástico podrá abrir el camino hacia innovaciones en el manejo de residuos sólidos y en el desarrollo de sistemas biotecnológicos para el reciclaje. La adaptación y evolución de los especímenes microbianos, impulsadas por la disponibilidad de plásticos en el ambiente, presenta una oportunidad valiosa para desarrollar estrategias específicas de biodegradación mediante la creación de consorcios microbianos.

Perspectivas y comentarios finales

Dentro de la gran zona conurbada del Valle de México, la Sierra de Guadalupe enfrenta una enorme presión humana por los asentamientos irregulares y el abandono de residuos sólidos, entre las problemáticas (Paniagua Fuentes, 2016; Secretaría del Medio Ambiente, 2022; Ortega de la Sancha, 2024). Esta

área natural protegida es un espacio verde, esencial principalmente para el Estado de México y en segundo término para la Ciudad de México; preserva la biodiversidad, además de que mitiga los efectos de la contaminación y la escasez de agua. Gracias a su belleza escénica la Sierra de Guadalupe es un sitio de esparcimiento para la población y una oportunidad para practicar deporte.

Los diferentes centros de educación ambiental promueven la conciencia ecológica al informar a la población de la riqueza natural y de la problemática que enfrenta este gran espacio verde, lo que se traduce en un beneficio para el bienestar humano. En pláticas informales, los visitantes, académicos y autoridades locales han mostrado gran interés en el proyecto de preservación de esta área natural protegida.

Los enormes volúmenes de residuos sólidos municipales que durante decenios fueron vertidos en la Sierra de Guadalupe representan un reto ambiental a enfrentar. Los exvertederos, a pesar de su cobertura vegetal, liberan biogás compuesto por metano y bióxido de carbono, perceptibles en el ambiente; a su vez, los lixiviados que se producen e infiltran en el suelo y subsuelo podrían alcanzar cuerpos subterráneos de agua (Cruz Rieva *et al.*, 2002). El plástico representa más de un 50% del volumen de los residuos y muestra frecuentemente signos de degradación donde seguramente están involucrados los grupos microbianos del suelo. Algunas bacterias y hongos han adaptado sus sistemas enzimáticos para degradar plásticos y utilizarlos como nutrimentos y energía para su estructura, funcionamiento celular y persistencia en el ambiente. Los estudios desarrollados por este grupo de investigación permitirán generar conocimiento de la diversidad y fisiología bacteriana y fúngica en presencia de plásticos. Las potencialidades microbianas de aislados individuales o consorcios podrán aprovecharse para degradar estos polímeros sintéticos. Los aislados microbianos también constituyen una oportunidad para explorar su producción de metabolitos secundarios diversos (antibióticos y factores de crecimiento vegetal, entre otros), con posibilidad de ser utilizados en ámbitos farmacéuticos y agronómicos.

Referencias

- [1] Balasubramanian, V., Natarajan, K., Hemambika, B., Ramesh, N., Sumathi, C. S., Kottaimuthu, R. y Rajesh Kannan, V., High-density polyethylene (HDPE)-degrading potential bacteria from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India, *Lett. Appl. Microbiol.*, 51, pp. 205-211, 2010.
- [2] Boenel, M., Vobis, G. y Solans, M., Actinobacterias degradadoras de polipropileno, *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 37, pp. 577-588, 2021.
- [3] Cao, Z., Yan, W., Ding, M. y Yuan, Y., Construction of microbial consortia for microbial degradation of complex compounds. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10, pp. 1051233, 2022.
- [4] Cruz Rieva, R., Orta Ledesma, M.T., Sánchez Gómez, J. y Rojas Valencia, M.N., *Cuantificación de efectos ambientales de un tiradero a cielo abierto, caso de estudio*, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002.
- [5] Khan, S., Nadir, S., Shah, Z.U., Shah, A.A., Karunarathna, S.C., Xu, J., Khan, A., Munir, S. y Hasan, F., Bioegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*, *Environ. Pollut.*, 225, pp. 469-480, 2017.
- [6] Kim, S. y Rhee, Y., Biodegradation of polyethylene terephthalate (PET)

- by *Phanerochaete chrysosporium*: insights into the enzymatic breakdown of plastics. *J. Environ. Sci.*, 34, pp. 129-135, 2016.
- [7] Ortega de la Sancha, J., Sierra de Guadalupe: el abandono de un Área Natural Protegida, Gatopardo, 21 enero 2024.
- [8] Paniagua Fuentes C.P., *Revisión bibliográfica del estado de conservación del área natural protegida "Parque Estatal Sierra de Guadalupe"*, Ensayo bibliográfico, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, 2016.
- [9] Saranraj, P. y Naidu, R., Fungal degradation of polyethylene plastic by *Penicillium chrysogenum*: a step towards sustainable bioremediation, *Environ. Res.*, 183, pp. 109168, 2020.
- [10] Secretaría de Ecología, *Programa de manejo del Parque Estatal "Sierra de Guadalupe"*, Gaceta del Gobierno del Estado de México, Tomo CLXVII, No. 26, pp. 1-36, 1999.
- [11] Secretaría del Medio Ambiente, *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*, Gobierno de la Ciudad de México, pp. 1-616, 2022.
- [12] Segura, D., Noguez, R. y Espín, G., Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables, *Biotecnología*, 14, pp. 361-371, 2007.
- [13] Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y. and Oda, K., A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351, pp. 1196-1199, 2016.