



Consortios microbianos y degradación de polietilentereftalato

Microbial consortia and polyethylene terephthalate degradation

DOI: 10.56238/isevmjv2n5-010

Recebimento dos originais: 24/08/2023

Aceitação para publicação: 15/09/2023

Leticia Guadalupe Navarro Moreno

Profesor Investigador de Tiempo Completo, Campus Tuxtepec - Oaxaca, México

E-mail: navarroleticia483@gmail.com

Andrea Rangel Cordero

Químico Analista del Departamento de Microbiología del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán en la Ciudad de México

Luis Felipe Collado

Luis Felipe Collado es Pasante de la Licenciatura en Ciencias Químicas de la Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec

Cirilo Nolasco Hipólito

El Dr Cirilo Nolasco Hipólito es experto en microbiología y trabaja en la Licenciatura en Alimentos de la Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec

RESUMEN

El mundo se encuentra, actualmente, frente a un fenómeno de contaminación muy grave, el cual ya forma parte de nuestro día a día. El plástico mal desechado, se convierte en toneladas de residuos que al no ser bien dispuestos generan graves problemas a nivel mundial. Como ejemplo se puede mencionar el daño a las especies marinas. Para disminuir la contaminación con plástico, especialmente el de las botellas de polietilentereftalato (PET), se han establecido técnicas de reciclamiento como la degradación química. En un degradado alcalino de PET, elaborado en el laboratorio de Bioquímica de la Universidad del Papaloapan, se observó crecimiento microbiano con aspecto de micelio. Se dejó crecer el conglomerado observado y a partir de este se aislaron e identificaron algunas cepas microbianas empleando metodologías microbiológicas y de biología molecular. Los resultados indicaron la presencia de varios tipos de microorganismos, en su mayoría hongos, que se encontraban formando parte de la agrupación formada en el residuo alcalino. Con estos organismos se han iniciado una serie de estudios con el objetivo de conocer como desarrollan capacidad para adaptarse al degradado de PET como única fuente de carbono. La importancia de los microorganismos aislados ha abierto una amplia gama de preguntas relacionadas con la bioquímica y la genética microbiana; la evolución y los fenómenos biológicos relacionados con la contaminación ambiental.

Palabras clave: Polietilentereftalato (PET), Contaminación, Microbiología, Microorganismos.

1 INTRODUCCIÓN

Vivimos rodeados de plástico, un material inventado hace 150 años que supuso una revolución por ser resistente, ligero y barato. Por esta y otras razones el polietileno, el poliéster, el

polipropileno o el cloruro de polivinilo, entre otros plásticos, se encuentran primordialmente presentes en nuestra vida, día a día, más de lo que se podría imaginar. Estos materiales se usan como pilares de la construcción de diversos objetos de uso diario. De la misma manera se encuentran presentes en los vehículos, en el procesado de alimentos y su embalaje, en teléfonos móviles, en la ropa, en la composición de muchos cosméticos e incluso en los utensilios que usamos para comer (Libera, 2019). Debido a lo anterior, actualmente, en todo el mundo, existe una problemática importante por la contaminación del agua, el aire y el suelo, ocasionada en gran medida, por los grandes volúmenes de residuos que se generan diariamente y que reciben escaso o nulo tratamiento adecuado. Esta situación se ha agravado debido a que la basura, que está conformada por residuos de composición muy variada, generalmente se junta y se mezcla durante las labores de recolección lo que dificulta su manejo final. Son numerosos los países que han informado lo anterior y que se han percatado de los problemas que puede generar este fenómeno, uno de ellos es Perú, país en donde han estudiado la contaminación de las aguas como consecuencia de la contaminación por varios factores, entre ellos los residuos sólidos (Bendezu-Bendezu & Bendezu-Hernández, 2021).

A nivel mundial se sabe que el 75% de los plásticos que se producen son desperdiciados. Lo anterior ha sido dado a conocer por el informe *Solving Plastic Pollution Through Accountability*. Se ha estimado que, en promedio, cada año 8 millones de toneladas de estos residuos llegan a los diversos mares del mundo trayendo consigo problemas a más de 270 especies marinas, muchas de las cuales terminan enredadas en estos desechos; además de que más de 240 especies han ingerido estos plásticos a través de su alimentación y el agua (WWF, 2019). El grupo de estudio liderado por Rivera-Garibay indicó que la industria de los plásticos es un ejemplo del sobreconsumo, debido al uso de múltiples empaques, cada uno de un solo uso en donde los productores enganchan a los consumidores con la idea del reciclaje, pero no indican el procedimiento a seguir o una estrategia de recolección de los envases ya utilizados. Esto genera que las personas se conviertan en los responsables del destino final de los desechos. Erradicar el patrón cultural de “usar y tirar” es el principal objetivo de la campaña “Océanos Libres de Plásticos” de Greenpeace (Rivera-Garibay et al., 2020).

Otro problema de la contaminación con desechos plásticos vertidos en el mar se relaciona con su fragmentación. Cuando eso sucede, se pueden generar varios fenómenos, el primero es su rompimiento y el segundo su acumulación en el fondo marino. De esta forma podrían ser confundidos por los peces quienes los utilizarán como alimento incluyéndolos, de esta forma, en la cadena alimenticia (Barboza et al., 2018). Se estima que solo en el océano atlántico, en el agua

suspendida y en los 200 metros superiores se encuentran entre 11.6 a 21.1 millones de toneladas de microplásticos de polietileno, poliestireno y polipropileno (Pabortsava & Lampitt, 2020).

El *Gyres Institute*, órgano consultivo para el United Nations Economic and Social Council, afirmó que existen zonas de acumulación de plástico en cada uno de los cinco giros subtropicales ubicados en el Pacífico Norte y Sur, el Atlántico Norte y Sur y el Océano Índico (Eriksen et al., 2014). Estas zonas se conocen comúnmente como “islas de plástico”, entre ellas la más grande y conocida es la Gran Mancha de Basura del Pacífico. En 2013 se fundó la organización *The Ocean Cleanup* cuyo principal objetivo se centra en limpiar, cada 5 años, el 50% de la Gran Mancha de Basura del Pacífico basándose en las corrientes oceánicas (Boyan Slat, 2013; The Ocean Cleanup, 2012). Este sistema solo ha conseguido capturar 2 toneladas métricas de redes de pesca desechadas, pero no se han obtenido cantidades significantes de otros materiales plásticos ya que el plástico capturado por este sistema solo se retiene por unos pocos días. Este es un ejemplo del desarrollo de proyectos a escala grande para tratar de resolver este problema, aunque incluye algunos inconvenientes como que, este sistema puede capturar algas, medusas y huevos de peces que se encuentran en la superficie del agua, pudiendo afectar así a la dieta y poblaciones de ciertas especies.

Adicionalmente, la contaminación de los plásticos en el medio ambiente ha dado lugar a la producción de microplásticos como efecto secundario. Los microplásticos se definen como fragmentos de plástico de menos de 5 mm. Los nano plásticos son incluso más pequeños, con un diámetro de menos de 0.05 mm. La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) plantea, además del tamaño, algunos criterios de identificación de los microplásticos. 1) Tipo (materiales poliméricos sintéticos, biopolímeros modificados químicamente), 2) estado (sólido, semisólido) y 3) morfología (esferas, fibras, láminas). Las fuentes de microplásticos pueden ser de tipo primario, en donde el microplástico es producido tal cual en la industria cosmética (en la formulación de exfoliantes, pasta de dientes, etc.) o como materia prima para la producción de plásticos (granza). Las fuentes secundarias incluyen su producción como consecuencia de la degradación física o química de plásticos o fibras de mayor tamaño, que llegan al medio ambiente por una mala gestión de los residuos. Los plásticos, además de las consecuencias sobre el medio ambiente, tienen un efecto directo evidente sobre los seres vivos, ya sea por ingestión, estrangulamiento, atrapamiento o toxicidad (Bollaín-Pastor & Vicente-Agulló, 2019).

Se ha reportado que los microplásticos no están compuestos únicamente de polímeros estructurales (macromoléculas), sino que se pueden considerar como una especie de cocteles complejos de contaminantes, debido a que se ha comprobado que pueden interactuar y sorber

fácilmente sustancias tóxicas en su superficie, para luego liberarlos (Campanale et al., 2020). Entre ellas se encuentran aditivos químicos (ftalatos), monómeros residuales y sustancias como retardadores de flama, biosidas e hidrocarburos poliaromáticos.

Estudios recientes han detectado la presencia de microplásticos en humanos. Lo anterior se basó en un estudio de 47 muestras de tejido humano (corporal, cerebrales, pulmonar, de hígado, de tejido adiposo, de bazo y de riñones) por espectrometría de masas, dando como resultado la presencia de monómeros de diferentes polímeros sintéticos (ACS, 2020; Dalberg & WWF, 2019).

2 PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN CON POLIETILENTEREFALATO (PET) EN MÉXICO Y EN EL ESTADO DE OAXACA

En México el Anuario Estadístico de la Industria Química (ANIQ) reportó la producción, la importación, la exportación y el consumo aparente del polietilentereftalato (PET) entre los años 2010 y 2019 (ANIQ, 2021). Desde 2010, la producción se mantuvo de manera constante en 1 000 000 de toneladas, mientras que la importación tuvo un aumento de 91 000 toneladas en 2019. La exportación aumentó 135 000 toneladas y en relación con el consumo aparente hubo una disminución de 112 000 toneladas en el año 2019 con respecto al 2010. Estos datos ilustran el papel que ha adquirido este material en nuestras vidas y por ello los problemas ambientales que se han ocasionado a lo largo de su aparición en el mercado mexicano. A nivel mundial México se encuentra entre los países que más desechos de PET producen, principalmente por el alto consumo de refrescos y agua embotellada. En el año 2017 México se colocó a nivel mundial en la segunda posición en consumo de botellas de PET, en promedio se generan 200 botellas de PET por cada habitante en el país, hoy en día se producen 300 000 000 de toneladas de plástico de las cuales solo se llega a reciclar el 3% (Cristán-Frías et al., 2003; El-Trochillero, 2005; Santillán, 2018).

Aun siendo México un país en donde se llevan a cabo actividades como acopio y reciclaje de PET, en todo el país solo se recicla el 56% de las botellas generadas, con excepción de la ciudad de México en donde se recicla el 90% (López-Casarín, 2019). Ello indica que el resto de PET se encuentra disperso sin tener un procesamiento pos consumo, y que a su vez al llegar a los mares podría generar la formación de microplásticos por fragmentación mecánica en los mares. Como consecuencia de ello se ha reportado su existencia en el estómago de peces en las regiones del Golfo de Baja California Sur, el Golfo de México, Veracruz y en la región del mar Caribe en el Puerto de Morelos (Reyes-Bonilla & Alvarez-Filip, 2019). Se han reportado de igual forma en Playa Azul, playa Capolita, Zipolite en los estados de Michoacán y Oaxaca (Beltrán-Villavicencio et al., 2016;

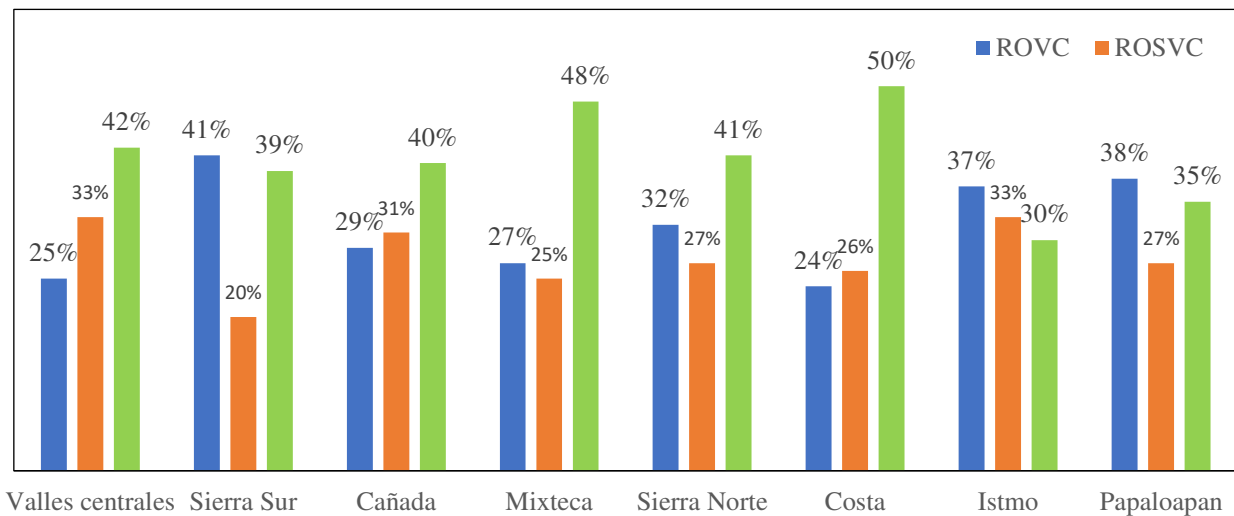
Cruz-Salas et al., 2020). De la misma forma científicos del Instituto Politécnico Nacional han realizado estudios de investigación referentes a la contaminación con microplásticos en Huatulco (Oaxaca), la Paz (Baja California), en las playas de Cancún y Tulum y han comenzado estudios en Chetumal (Quintana Roo), Acapulco (Guerrero) y Tecolutla (Veracruz). Lo anterior se ha realizado para obtener información sobre este problema ambiental y así determinar la afectación a la salud de las personas (IPN, 2020). Lo anterior indica que en México se produce más plástico del necesario y como consecuencia se generan toneladas de basura, que se convierten en un grave problema de contaminación al no poseer nuestro país, un buen sistema de manejo de residuos, tal como lo reportó la Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCyTU, 2019a, 2019b).

En Oaxaca, el problema de la contaminación por plásticos no es menor que en muchos estados de la República Mexicana. En este estado se generan alrededor de 3,804.09 toneladas por día (ton/día) de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, de los cuales se disponen adecuadamente 1,062 ton/día. Esto implica que más del 70% de los residuos generados (2741,09 ton/día) no son sometidos a un tratamiento adecuado o a confinamiento. Existen más de 209,926 tiraderos a cielo abierto ubicados principalmente en cañadas, riberas, orillas de carreteras y terrenos baldíos, los cuales contaminan aguas superficiales y subterráneas, así como el suelo y las áreas naturales aledañas. Lo anterior ha generado un gran impacto sobre la salud humana y en los ecosistemas. La secretaria del medio ambiente del estado posicionó los residuos de PET dentro de los inorgánicos con valor comercial.

La Fig. 1 muestra los porcentajes de la composición física de los residuos que se han recolectado en diferentes regiones del estado de Oaxaca (Hernández B et al., 2008; SEMARNAT, 2013). La generación de residuos en la región del Papaloapan ha representado el índice más alto de generación de residuos inorgánicos sólidos de valor comercial después de la región de la sierra sur, y el cuarto lugar en la generación de residuos inorgánicos sólidos sin valor comercial junto con la región de la sierra norte. De estos residuos que son generados en la región del Papaloapan, solo el 30% de ellos tiene una adecuada disposición final.

(Adaptado de Hernández B et al., 2008; SEMARNAT, 2013)

Figura 1. Composición física porcentual de residuos generados en las ocho regiones de Oaxaca. ROVC: Residuos Orgánicos con valor commercial; ROSVC: Residuos orgánicos con valor commercial; RO: Resiusos orgánicos.



En la Tabla 1 se reporta la composición de los diferentes residuos con valor comercial y la cantidad de toneladas que se generan diariamente. En ella se indica que la cantidad de PET que se recolecta en la región del Papaloapan representa el segundo residuo generado en este territorio. Los residuos que se han recolectado han llegado a representar el 68% de las 1062 toneladas que son recolectados diariamente en el estado de Oaxaca. En relación con el PET, se ha observado que, a medida que han pasados los años, se ha comprobado que los desechos conformados por botellas de refresco, de cloro, detergentes, aceites (comestibles y de coches), yogurt bebible, gelatinas, cosméticos, entre otros, se pueden observar comúnmente en zonas urbanas de Oaxaca. A modo de ilustración de lo anterior, la Figura 2 muestra fotografías de los desechos sólidos que se pueden encontrar en algunas zonas de la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. Se distinguen diferentes plásticos como bolsas de polietileno, botellas de agua, refrescos, etiquetas de alimentos procesados, cartón, empaques de botanas, pañales, adhesivos y ropa, además de diversos desechos orgánicos.

Tabla 1:

Toneladas por Día									
Sub-productos	Valles Centrales	Sierra Sur	Cañada	Mixteca	Sierra Norte	Costa	Istmo	Papaloapan	Total
Aluminio	6.81					0.39	2.26	0.17	9.63
Cartón	11.56	6.94	2.68	13.07	1.35	9.12	6.68	0.72	52.14
Cuero	9.95	1.31	0.60	0.36	1.39	0.05	2.26	1.52	17.44
Envases de cartón encerado	57.09	3.98	1.64	1.36	0.98	5.06	9.93	5.42	85.45
Lata	41.90	6.35	1.08	2.46	1.35	2.32	6.02	3.25	64.73
Material ferroso	10.48	2.22	0.39	0.23	0.66	0.08	2.55	...	16.59
Papel	21.75	11.76	5.50	7.44	4.38	10.79	21.87	14.35	97.54
Plástico de película	23.18	6.14	3.95	13.71	5.02	3.91	12.67	9.74	78.33
Plástico rígido	44.52	2.66	...	9.23	6.81	4.94	68.16
PET	81.71	14.25	4.56	8.31	3.08	8.52	9.80	8.69	138.93
Trapo	18.28	2.02	1.68	2.58	2.25	1.07	5.00	2.57	35.45
Vidrio	17.91	8.39	2.87	11.03	2.36	8.39	9.20	7.10	67.25
Total	345.14	63.36	24.95	63.22	22.82	58.93	95.05	58.47	731.94

Adaptado de Hernández B et al., 2008; SEMARNAT, 2013

Figura 2. Tiraderos de basura revuelta con plástico en varios sitios de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca



Fuente: Abad, 2021

3 RECICLAMIENTO Y DEGRADACIÓN DEL PET

La degradación resulta un proceso generalmente irreversible que ocasiona un cambio (aunque sea mínimo) en la estructura de un material y que se caracteriza por la pérdida de sus propiedades. Esto puede ocurrir mediante la acción de diversos fenómenos como el calor, la

humedad, la radiación solar o de manera enzimática. La degradación de un material sintético como el plástico es un proceso complejo causado por el rompimiento de determinados enlaces químicos originando variaciones tanto físicas como químicas, mismas que se traducen en cambios característicos que se pueden observar a simple vista (Gutiérrez-Pescador, 2013; Madrigal-Cardiel et al., 2022).

En el caso de la degradación de polímeros sintéticos como el PET, esta consiste en romper las cadenas del polímero y formar derivados más cortos que puedan descomponerse o desecharse de manera más fácil. Cuando los fragmentos son degradados y usados como fuente de carbono para la producción de energía por microorganismos, el proceso se denomina biodegradación y el material se considera biodegradable (Yepes-Aguirre, 2014).

La degradación química es un proceso originado por las reacciones que pueden llevarse a cabo entre algunos reactivos químicos y los polímeros dando como productos diversos compuestos originales o cadenas más cortas del mismo polímero (Posada-Bustamante, 2012). Dentro de estas reacciones se encuentra: a) la hidrólisis, que puede ser ácida, neutra o básica, generando ácido tereftálico y etilenglicol, b) la glicolisis, en donde se generan oligómeros, y c) metanólisis en la que los productos son etilenglicol y dimetiltereftalato.

Teniendo en cuenta que el PET se ha reportado como un material no biodegradable, el hecho de encontrar microorganismos capaces de crecer en presencia de degradados alcalinos de este tipo de plástico puede sugerir que los organismos podrían generar mecanismos de resistencia que les permitan adaptarse al medio en el cual crecieron. Lo anterior ha impulsado la identificación y el estudio de los diferentes hongos y levaduras aislados a partir de un conglomerado microbiano crecido en un degradado químico de PET.

4 METODOLOGÍA

Degradación alcalina de polietilentereftalato (PET): Se llevó a cabo una degradación alcalina generando como producto principal el tereftalato de potasio con un pH de 12 ((Ramírez-Duran et al., 2006; Ramírez-Hernández et al., 2010; Ramírez-Hernández & Navarro-Moreno, 2010). Esa degradación se guardó en un frasco de cristal por varios meses, al cabo de los cuales se observó el crecimiento de algunas formas características del crecimiento de los hongos.

Aislamiento de hongos crecidos en el degradado químico de PET: Se tomó una muestra del conglomerado de la solución del degradado de PET y se sembró en el medio Agar Papa Dextrosa (PDA). Se incubó a 37°C y se observó su crecimiento cada 24 horas registrando sus características de crecimiento. Posteriormente, se seleccionaron colonias aisladas sin

contaminación con otros microorganismos y se sembraron en medios por separado hasta obtener cultivos axénicos.

Identificación de los microorganismos: La primera identificación consistió en el análisis de las características macroscópicas (coloración, morfología, pigmentación, tipo de micelio) y microscópicas (tipo de esporas, hifas y coloración) que presentó cada hongo obtenido. La segunda identificación se llevó a cabo sembrando las muestras aisladas en cajas Petri en medio sólido SDA 4% y dejándolas incubar a 30°C por un lapso de 48 h. Cuando crecieron, se tomaron muestras y se analizaron microscópicamente y las observaciones fueron comparadas con la información contenida en la literatura especializada. La tercera identificación se realizó por el método de Sanger para determinar la secuencia de DNA. La cuantificación fue llevada a cabo en el equipo NanoDrop; (Gauthier, 2008; Sanger et al., 1977; Sikkema-Raddatz et al., 2013).

5 RESULTADOS

La figura 3 muestra el conglomerado microbiano identificado en el medio alcalino que contenía al tereftalato de potasio (producto de degradación alcalina del polietilentereftalato; PET). El aspecto del conglomerado fue algodonoso, presentando color oscuro en el centro y blanco en los bordes. Microscópicamente se encontraron estructuras de forma algodonosa típicas del crecimiento de los hongos. Se pensó que, posiblemente se trataba de una contaminación del degradado, por lo cual se realizó una primera observación microscópica en la que se observaron estructuras típicas de los hongos microscópicos (hifas y esporas). Debido a ello, el siguiente paso consistió en realizar siembras en medios diseñados para el cultivo de hongos. Se identificaron varios tipos coloniales correspondientes a diferentes hongos y estos fueron aislados para posteriormente ser identificados.

Figura 3. Conglomerado de microorganismos crecidos en un medio compuesto por un degradado alcalino de polietilentereftalato.



(Acervo personal Dra. Leticia Navarro, 2019).

6 AISLAMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE HONGOS PROVENIENTES DEL CONGLOMERADO MICROBIANO

Los hongos fueron aislados mediante la utilización de técnicas microbiológicas de siembra y resiembra, así como del análisis de sus estructuras macro y microscópicas. Los microorganismos fueron etiquetados como: a) hongo café, b) hongo rojo (debido al pigmento con el que teñía al medio de cultivo), c) hongo blanco y d) hongo negro. Después del análisis microbiológico y empleando técnicas de biología molecular se pudo identificar el género y la especie de cada uno de ellos. Para la identificación morfológica de los hongos se realizó una siembra de los mismos en medio de cultivo SDA más 4% de glucosa que constituye un medio más selectivo para el cultivo y aislamiento de levaduras y mohos y que, por su alta concentración de dextrosa y un bajo pH, favorece el crecimiento, la formación de esporas y la formación de pigmentos, además de inhibir el crecimiento de las bacterias (Cercenado, 2006). Las características macro y microscópicas que presentaron las 4 cepas aisladas se presentan junto con su descripción. Se utilizó el libro “Medical Important fungi: A guide to identification” 5ta Edición. Davise H. Larone y el “Atlas micológico” del Laboratorio de Microbiología Clínica del Instituto Nacional De Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán para su identificación. La tabla 2 muestra el nombre de los microorganismos identificados. La descripción de cada uno se muestra a continuación. Todas las fotografías mostradas pertenecen al acervo personal de Luis Felipe Collado.

Tabla 2. Microorganismos identificados mediante las técnicas microbiológicas y de biología molecular.

Nomenclatura de los microorganismos	Género y especie identificados
Hongo blanco	Acremonium sp
Hongo café	Fusarium Proliferatum/Verticillioides
Hongo rojo	Talaromyces Verruculosus
Hongo negro	Aspergillus Niger

6.1 ACREMONIUM SP

Morfológicamente se observaron colonias de color blanco tenue con micelio de consistencia algodonosa sin generación de pigmentos. Microscópicamente se presentaron esporas en forma de conidios e hifas hialinas no septadas.

La literatura menciona que los hongos del género *Acremonium sp* son ascomicetos pertenecientes al grupo de los hialohifomicetos quienes pueden ser aislados a partir de muestras de suelo, restos vegetales, heno y de algunos materiales de construcción de interiores como son la fibra de vidrio o los materiales térmicos usados para la calefacción. Se han identificado dos especies oportunistas: *A. recifei* y *A. alabamense*, las cuales pueden ocasionar padecimientos como micetomas, queratitis y onicomycosis. Lo anterior indica su gran capacidad de adaptación a

diferentes ambientes (Rodríguez, 2016). La figura 2 muestra las características de *Acremonium* sp aislado a partir del conglomerado.

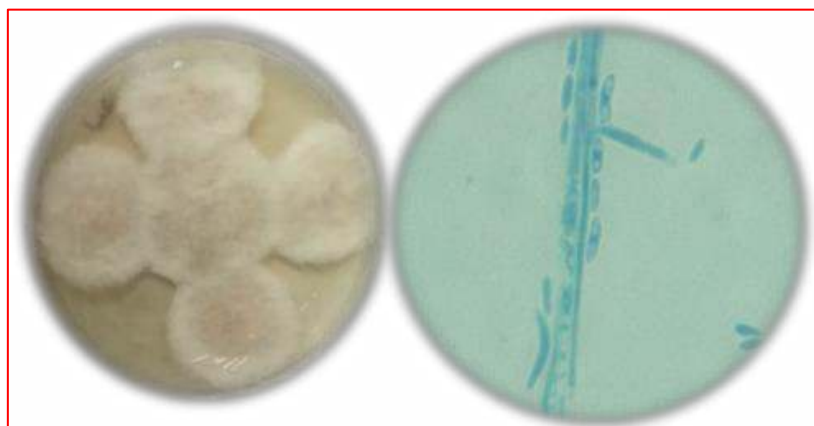
Figura 4. Características macro y microscópicas de *Acremonium* aislado a partir de un conglomerado crecido en presencia de tereftalato de potasio (degradado de PET).



6.2 FUSARIUM PROLIFERATUM/VERTICILLIOIDES

Como características morfológicas se observaron colonias de color blanco tenue y consistencia algodonosa, no se produjo pigmento en el medio de cultivo. Al paso del tiempo, las colonias mostraron coloración rosa oscuro y la superficie se tornó algodonosa, en el medio de cultivo se observó un pigmento de tono rosa a rojizo. Esta característica fue la que se utilizó como información adicional para su identificación. Microscópicamente se encontraron hifas hialinas macro sifonadas no septadas y abundantes macroconidias.

Figura 5. Características macro y microscópicas de *Fusarium Proliferatum/Verticillioides* aislado a partir de un conglomerado crecido en presencia de tereftalato de potasio (degradado de PET).



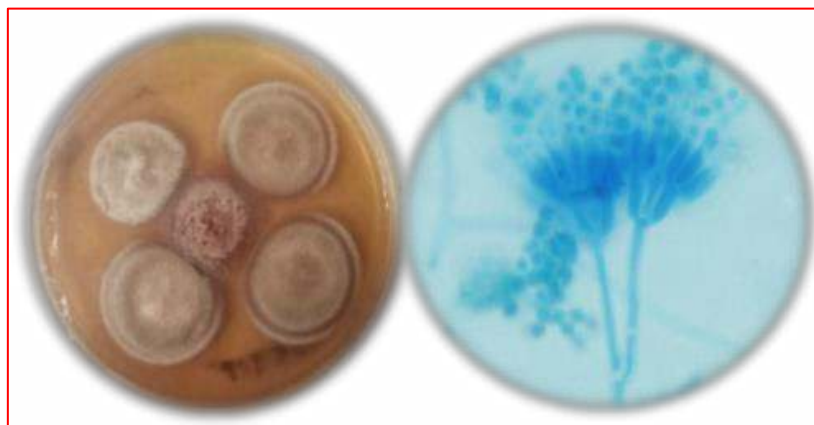
La literatura indica que este microorganismo es un ascomiceto que forma parte de la subdivisión Deuteromycota, lo que indica que no presenta una fase sexual o, en algunos casos, es

muy rara. *Fusarium verticillioides* pertenece a esta última categoría ya que presenta una fase sexual llamada teleomorfo, o forma perfecta, muy difícil de encontrar en la naturaleza. Se requieren condiciones especiales para observarla in vitro. Se ha reportado como la especie que más daña al maíz de cualquier parte del mundo. Se sabe que constituye el principal patógeno del cultivo y que ocasiona pérdidas cuantiosas que varían año con año. Se le conoce como un patógeno necrótrofo por la capacidad que tiene de causar la muerte del tejido hospedero y, luego, sobrevive como saprofito en el rastrojo. Es productor de mucotoxinas como la fumosina, que es una neurotoxina, la cual daña a los animales (Torres-Toledano et al., 2016).

6.3 TALAROMYCES VERRUCULOSUS

Se obtuvieron colonias color crema en la superficie con puntos de color rojo y verde. Se observó, al reverso, un pigmento rojo en el medio de cultivo. El análisis microscópico reveló hifas hialinas ramificadas septadas, conidios y esporas en cadena. Por las características macro y microscópicas que el hongo presentó se identificó en un principio como *Penicillium sp.* Sin embargo, según lo reportado en la bibliografía, y después de hacer la identificación por la técnica de secuenciación de Sanger, el organismo se identificó como *Talaromyces verruculosus*. La Figura 4 muestra el microorganismo obtenido.

Figura 6. Características macro y microscópicas de *Talaromyces verruculosus* aislado a partir de un conglomerado crecido en presencia de tereftalato de potasio (degradado de PET).



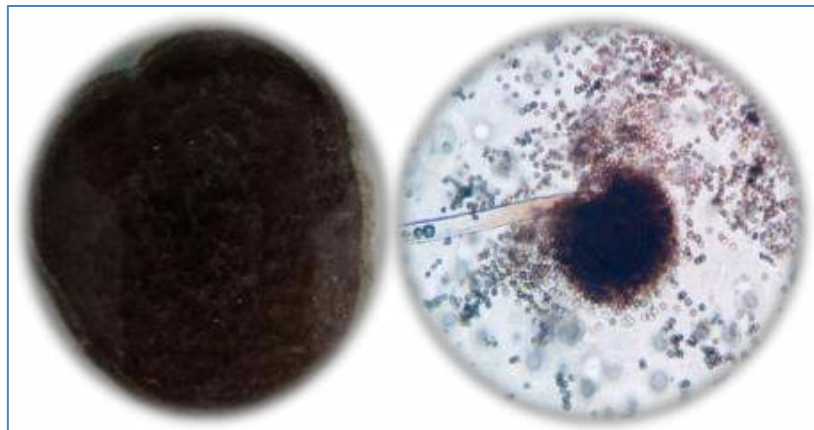
Se ha reportado que los géneros *Penicillium* y *Talaromyces* pertenecen a los hongos filamentosos que tienen importancia medioambiental y biotecnológica importante. Ellos poseen requerimientos nutricionales bajos y cuentan con un contenido enzimático amplio e importante. Estas características han permitido que ambas especies se hayan aislado de suelos de ecosistemas tropicales, en donde participan activamente en los ciclos biogeoquímicos. Debido a su gran

parecido, la taxonomía de ambos géneros se revisa constantemente mediante varias técnicas de identificación (Sousa-Ramos et al., 2018).

6.4 ASPERGILLUS NIGER

El análisis morfológico demostró colonias que inicialmente presentaron crecimiento tipo micelio de color amarillo-blanco con el borde negro, al pasar el tiempo de crecimiento se observaron esporas de color negro sobre toda la caja. Al reverso de la caja Petri, las colonias formaron anillos de verde-amarillento. La estructura de los hongos presentó hifas hialinas septadas, conidióforos de cabeza radial con extremos ramificados y septados, conidios y esporas en cadena. Empleando MALDI-TOF se identificó al hongo como *Aspergillus Niger*.

Figura 7. Características macro y microscópicas de *Aspergillus niger* aislado a partir de un conglomerado crecido en presencia de tereftalato de potasio (degradado de PET).



Este microorganismo resulta o no patógeno para el humano. Lo anterior depende de la especie y de las características de cada una de ellas. Este género fue descrito por P. A. Micheli en 1729 y se trata de un hongo filamentoso hialino ubicuo el cual puede ocasionar enfermedades de distribución universal. Se sabe que existen unas 900 especies de *Aspergillus*, las cuales han sido clasificadas en 18 grupos por Rapper y Fennell; de ellas solo 12 se relacionan con algunas enfermedades humanas (Raper & Fennell, 1977). *Aspergillus niger* representa del 2 al 3% de ellas. Un reporte emitido por Alcalá y su grupo de investigación indica que este hongo es un buen ejemplo de lo que se denomina “patógeno oportunista” ya que suele afectar a pacientes comprometidos en su estado de salud. *Aspergillus* debe su patogenicidad a las siguientes características: a) el tamaño pequeño de sus conidios lo cual permite que puedan ser aspiradas y causar enfermedades pulmonares; b) su capacidad de crecer a 37 °C, lo cual lo convierte en patógeno para el ser humano; c) su capacidad de adherencia a las superficies epiteliales y a veces

a las endoteliales, así como su gran capacidad de invadir los vasos sanguíneos y d) la gran capacidad que tiene para producir sustancias tóxicas extracelulares como enzimas y citosinas que pueden dañar a los mamíferos (Alcalá et al., 1997). otras investigaciones han indicado que algunas cepas de *Aspergillus niger* aisladas de tierras mineras presentan alta tolerancia a concentraciones de 1 a 5 mm de los metales mercurio, plomo, plata, zinc, cromo, cadmio y cobre en medios de cultivo artificiales (Villalba-Villalba et al., 2018).

Actualmente se tiene el conocimiento de que cualquier compuesto puede resultar tóxico en función de sus características fisicoquímicas y de concentración, y que muchos organismos no pueden vivir a valores de pH extremos. De la misma manera, se ha reportado la existencia de organismos extremófilos u organismos capaces de adaptarse a condiciones adversas del medio (Ramírez-Duran et al., 2006; Velásquez-Emiliani et al., 2018).

En este trabajo se han relacionado dos aspectos importantes que juegan un papel primordial en nuestros tiempos: la contaminación por plásticos y la capacidad de los hongos microscópicos para crecer en degradados de materiales como el polietilentereftalato. Se partió de un consorcio microbiano formado por al menos cuatro hongos y una levadura (la cual no fue mostrada en este trabajo).

La literatura muestra que los consorcios microbianos son comunes en la naturaleza y que tienen papeles importantes dentro de la misma. Los consorcios pueden estar integrados por microorganismos de la misma especie o de especies diferentes como bacterias y hongos, por ejemplo. Una de las aplicaciones de los consorcios microbianos es la biorremediación.

A este respecto el grupo de Tirado-Torres en 2015 menciona que en el suelo los microorganismos que se encuentran en poblaciones mixtas pueden ser identificados mediante el estudio de cepas o consorcios aislados y cultivados. Para su identificación se pueden utilizar técnicas microbiológicas o moleculares. Ellos mencionan que, una vez aislados e identificados los microorganismos, la técnica que se usa para adaptar a la biota edáfica a los contaminantes es el medio enriquecido. En el caso de los microorganismos aislados de muestras de tierra, la metodología consiste en agregar una muestra de suelo a un medio enriquecido que contiene los nutrientes y factores de crecimiento necesarios para los microorganismos. Las concentraciones y tipos de nutrientes pueden variar en esta técnica y el contaminante a degradar se añade como fuente de carbono.

Dentro de la industria petrolera también se han utilizado los consorcios microbianos, los cuales son formados dependiendo de las características de los microorganismos a elegir. En relación con lo anterior, el grupo de Toledo-León menciona que los consorcios microbianos

presentan ventajas para lograr una biorremediación eficaz debido a que pueden crear, muchas veces, redes con diferentes niveles de interacción mostrando mejor adaptación, supervivencia y permanencia. Estas características les permiten soportar los entornos fluctuantes, otorgándoles solidez ante los cambios ambientales (Toledo-León, Heidi et al., 2022).

En relación con la biodegradación de plásticos, el grupo RECOVER ha desarrollado estrategias sostenibles para reducir la contaminación por plásticos, enfocándose en la investigación de organismos biológicos que permitan la degradación y transformación de los plásticos. Según sus investigaciones, el uso de consorcios microbianos ha demostrado mejorar la biodegradación de plásticos como el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE). Lo anterior lo han logrado utilizando la selección inducida y la proliferación de microorganismos degradadores de plástico en microcosmos contaminados artificialmente, como muestras de suelo en donde se ha enterrado plástico. Se ha verificado la eficiencia de la degradación y se ha trabajado en la identificación de los microorganismos y en el estudio de su perfil enzimático. Ellos han demostrado que el plástico en polvo favorece el crecimiento microbiano (Residuos Profesionales, 2023).

Un grupo de investigación mexicano han reportado a *Penicillium pinophilum* y *Aspergillus niger* como posibles microorganismos degradadores de polietileno de baja densidad (Volke-Sepúlveda et al., 2002). También se ha publicado que *Aspergillus nomius strain* JAPE1 y *Streptomyces sp. strain* AJ1 pueden degradar este tipo de plástico (Abraham et al., 2017). Priyanka y Archana establecieron condiciones aerobias y anaerobias para biodegradar plásticos basándose en la recolección de microorganismos de diferentes sitios (Priyanka & Archana, 2011). Una vez establecidos los protocolos de degradación, este grupo de científicos, han aislado e identificado varios organismos con potencial para la biodegradación. Experimentos similares se han llevado a cabo encontrándose una gran variedad de bacterias que podrían utilizarse como potenciales agentes biodegradables de polietileno (Nowak et al., 2011).

En relación con el PET, no existen reportes sobre microorganismos que lo puedan degradar en su forma comercial, debido a la naturaleza química de este polímero o a que las especies microbianas no han desarrollado la maquinaria enzimática para poder romper la matriz polimérica de dichos materiales.

En este trabajo no se formaron consorcios microbianos de forma artificial, sino de forma natural ya que los microorganismos que se aislaron fueron obtenidos a partir de un residuo de la degradación de un tipo de plástico reportado como no biodegradable, utilizando un método químico desarrollado con base en la hidrólisis alcalina del PET (Ramírez-Duran et al., 2006; Ramírez-Hernández et al., 2010; Ramírez-Hernández & Navarro-Moreno, 2010). Los productos



de degradación del plástico fueron etilenglicol y polietilentereftalato de potasio con un pH final de 12. El degradado se colocó en un recipiente de vidrio y se cerró, no de forma hermética. Al paso del tiempo se detectó el crecimiento de formas miceliales, las cuales fueron identificadas como un consorcio microbiano formado por hongos y levaduras. Se aislaron e identificaron cuatro hongos y dos cepas de levaduras. Los diferentes estudios realizados con estos hongos han demostrado que dos de ellos no pueden crecer en medios de cultivo si no son sembrados junto con los otros microorganismos que forman el consorcio microbiano además de que, al ser sembrados en medios de cultivo enriquecidos con concentraciones variables de los productos de degradación de PET a diferentes valores de pH, los hongos presentan crecimiento distinto y algunos son menos tolerantes que otros. Esto demuestra la posible simbiosis que se debió haber establecido como requerimiento para la sobrevivencia de las especies en las condiciones originales de degradación del polímero.

Los productos de degradación posiblemente sirvieron de fuente de carbono. Los resultados indican la importancia del estudio ya no de microorganismos aislados para la biodegradación, sino la importancia de las relaciones que los microorganismos pueden establecer entre ellos para poder utilizar diferentes fuentes de carbono generados en ambientes contaminados. Los procesos de tolerancia y resistencias resultan cruciales para poder establecer modelos de biodegradación de plásticos.

7 CONCLUSIONES

La contaminación ambiental es un tema que abarca muchos subtemas de gran interés. Uno de ellos lo constituye el estudio de los microorganismos como posibles agentes biodegradantes. Lo anterior se debe a que muchos microbios poseen características increíblemente fascinantes de crecimiento y adaptación a ambientes extremos constituidos por temperaturas, pH o concentraciones de sales y agentes tóxicos variables. Su estudio es cada vez más importante ya que la contaminación ambiental va en aumento día a día.

La base de la presente investigación fue el conocimiento de que los microorganismos poseen mecanismos de adaptación especiales que le ayudan a desarrollarse y crecer, en este caso, utilizando los productos de degradación del polietilentereftalato (PET): el tereftalato de potasio o el etilenglicol. El estudio de las cepas identificadas de *Talaromyces*, *Fusarium*, *Acremonium* y *Aspergillus* podrá proporcionar conocimientos relacionados con la biología, la bioquímica y la genética que les permiten adaptarse a un medio como en el que se desarrollaron. La comprensión de los mecanismos que ayudan a estos hongos a adaptarse podría ser importante para establecer,



en un futuro, posibles estrategias de biodegradación de varios compuestos plásticos que se encuentran contaminando el medio ambiente.



REFERENCIAS

- Abad, C. (2021). Que asco Tuxtepec servicio de recolección de basura. *El Piñero*. <https://www.elpinero.mx/que-asco-tuxtepec-amanecio-sin-servicio-de-recoleccion-de-basura/>
- Abraham, J., Ghosh, E., Mukherjee, P., & Gajendiran, A. (2017). Microbial degradation of low density polyethylene. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1), 147–154. <https://doi.org/10.1002/ep.12467>
- ACS. (2020, October 21). *Methods for microplastics, nanoplastics and plastic monomer detection and reporting in human tissues*. American Chemical Society. <https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2020/august/micro-and-nanoplastics-detectable-in-human-tissues.html>
- Alcalá, L., Muñoz, P., Peláez, T., & Bouza, E. (1997). Aspergillus y aspergilosis. *Control Calidad SEIMC*. <https://www.seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/micologia/asperguillus.pdf>
- ANIQ. (2021). *Volumen de Producción y Comercio Exterior*. Polietilén Tereftalato (PET). <https://aniq.org.mx/Anuario/2022/Capitulo10/polietilen-tereftalato.html>
- Barboza, L. G. A., Dick Vethaak, A., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A.-K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- Beltrán-Villavicencio, M., Vazquez, A., Carlos, J., & Zeferino, A. (2016). *Anaerobic digestion of used disposable diapers View project*. <https://www.researchgate.net/publication/329554229Separaciónycaracterizacióndemicroplásticosenplayasmexicanas>
- Bendezu-Bendezu, M. A., & Bendezu-Hernández, C. V. (2021). Efecto de los parámetros fisicoquímicos y biológicos sobre la calidad del agua del río pisco. *South Florida Journal of Development*, 2(4), 5606–5614. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n4-049>
- Bollaín-Pastor, C., & Vicente-Agulló, D. (2019). Presencia de Microplásticos en Aguas y su Potencial Impacto en la Salud Pública. In *Rev Esp Salud Pública* (Vol. 93). <https://scielosp.org/pdf/resp/2019.v93/e201908064/es>
- Boyan Slat. (2013, February). *The ocean clean up*. The Ocean Clean Up. <https://theoceancleanup.com/boyan-slat/>
- Campanale, Massarelli, Savino, Locaputo, & Uricchio. (2020). A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Cristán-Frías, A., Ize, I., & Gavilán, A. (2003). La situación de los envases de plástico en México. *Gaceta Ecológica*, 69, 67–82. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906905>
- Cruz-Salas, A. A., Alvarez-Zeferino, J. C., Martínez-Salvador, C., Enríquez-Rosado, M. del R., Gutiérrez-Ortiz, M. del R., Vázquez-Morillas, A., & Ojeda-Benitez, S. (2020). Cuantificación y



caracterización de microplásticos y residuos sólidos urbanos en playa Zipolite, Oaxaca. *Ciencia y Mar*, 71(3–21), 1–21.

Dalberg, & WWF. (2019). *Naturaleza sin Plástico: Evaluación de la ingestión humana de plásticos presentes en la naturaleza*. http://awsassets.panda.org/downloads/analisis_de_estudio_de_ingestion.pdf

El-Trochillero. (2005). El día Mundial del Medio Ambiente, #SinContaminaciónPorPlástico. <https://Eltrochillero.Com/Plastico-Recicla-Mexico/>.

Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

Gauthier, M. G. (2008). *Simulation of polymer translocation through small channels: A molecular dynamics study and a new Monte Carlo approach* [Ph. D.]. University of Ottawa (Canada).

Gutiérrez-Pescador, J. G. (2013). *Biodegradación de polietileno de baja densidad por consorcios microbianos*. Tesis de grado [B. Sc.]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández B, C. P., Katsurada H, M., Álvarez M, L., García-Torres, E., & Sosa M, P. (2008). *Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Gestión Integral de Residuos Urbanos y de manejo Especial del Estado de Oaxaca. Entrega final*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187442/Oaxaca.pdf>

INCyTU. (2019a). *Plásticos en los océanos*. https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-034.pdf

INCyTU. (2019b, November). Plásticos en los océanos Ilustración: Eduardo Balderas. *NOTA-INCyTU*, 34. https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-034.pdf

IPN. (2020). Realiza IPN estudios sobre contaminación por microplásticos en playas Mexicanas. In *Instituto Politécnico Nacional*. <https://www.ipn.mx/assets/files/ccs/docs/comunicados/2020/03/c-041.pdf>

Libera. (2019). *Impacto del abandono del plástico en la naturaleza*. https://proyectolibera.org/storage/otros/Impacto-de-los-plasticos-abandonados_LIBERA-def-1.pdf

López-Casarín, J. (2019, October 30). Reciclaje en México. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/opinion/Reciclaje-en-Mexico-20191030-0001.html>

Madrigal-Cardiel, M. Á., Velázquez-Roque Silvano, Maldonado-Paleo Jesús, Zurita-Luna, U., & Hernández-Damián, J. (2022). Diseño y simulación de un molino compacto para polietileno tereftalato. *South Florida Journal of Development*, 3(1), 232–244. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-018>



- Nowak, B., Pająk, J., Drozd-Bratkowicz, M., & Rymarz, G. (2011). Microorganisms participating in the biodegradation of modified polyethylene films in different soils under laboratory conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(6), 757–767. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.04.007>
- Pabortsava, K., & Lampitt, R. S. (2020). High concentrations of plastic hidden beneath the surface of the Atlantic Ocean. *Nature Communications*, 11(1), 4073. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17932-9>
- Posada-Bustamante, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 67–86. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.p>
- Priyanka, N., & Archana, T. (2011). Biodegradability of Polythene and Plastic By The Help of Microorganism: A Way for Brighter Future. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 01(02). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000111>
- Ramírez-Duran, N., Serrano, R. J. A., & Sandoval-Trujillo, H. (2006). Microorganismos extremófilos. Actinomicetos halófilos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(3), 56–71. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57937307>
- Ramírez-Hernández, A., & Navarro-Moreno, L. G. (2010). El polietileno, síntesis y degradación. *AlephZero-Comprendamos*, 57, 1–10. <http://www.comprendamos.org/alephzero/57/polietileno.html>
- Ramírez-Hernández, A., Navarro-Moreno, L. G., & Conde-Acevedo, J. (2010). Degradación química del poli(etilen tereftalato) Síntesis y degradación. *Revista Colombiana de Química*, 39(3), 321–331. <https://www.redalyc.org/pdf/3090/309026685002.pdf>
- Raper, K. B., & Fennell, D. I. (1977). *The Genus Aspergillus*. Krieger Publishing Company.
- Residuos Profesionales. (2023, June). *Avances significativos en la degradación de plásticos mediante consorcios microbianos*. Residuos Profesionales. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/483179-Avances-significativos-degradacion-plasticos-mediante-seleccion-inducida-microcosmos.html>
- Reyes-Bonilla, H., & Alvarez-Filip, L. (2019). *Estudio sobre el impacto de la contaminación por microplásticos en peces de México Population genomics of Octopus hubbsorum in northwestern Mexico View project Marine Protected Areas View project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31686.63049>
- Rivera-Garibay, O. O., Álvarez-Filip, L., Rivas, M., Garelli-Ríos, O., Pérez-Cervantes, E., & Estrada-Saldívar, N. (2020). *Impacto de la contaminación por plástico en áreas naturales protegidas mexicanas*. https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2020/09/12e508ed-estudio_impacto_contaminacion-plastico.pdf
- Rodríguez, B. (2016, June 22). *Acremonium sp.* Atlas de Identificación Micológica. <https://atlasdemicologia.wordpress.com/author/atlasdemicologia/>



Sanger, F., Nicklen, S., & Coulson, A. R. (1977). DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(12), 5463–5467. <https://doi.org/10.1073/pnas.74.12.5463>

Santillán, M. L. (2018). Una vida de plástico. *Ciencia UNAM*, 1–5. <https://ciencia.unam.mx/leer/766/una-vida-de-plastico>

SEMARNAT. (2013). Resumen Ejecutivo del Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el Estado de Oaxaca. <https://www.oaxaca.gob.mx/semaedes/wp-content/uploads/sites/59/2022/08/Resumen-Ejecutivo-PEPGIRSUME.pdf>

Sikkema-Raddatz, B., Johansson, L. F., de Boer, E. N., Almomani, R., Boven, L. G., van den Berg, M. P., van Spaendonck-Zwarts, K. Y., van Tintelen, J. P., Sijmons, R. H., Jongbloed, J. D. H., & Sinke, R. J. (2013). Targeted Next-Generation Sequencing can Replace Sanger Sequencing in Clinical Diagnostics. *Human Mutation*, 34(7), 1035–1042. <https://doi.org/10.1002/humu.22332>

Sousa-Ramos, S. M., Cruz, R., Barbosa, R. do N., Machado, A. R., Costa, A. F. da, Motta, C. M. de S., & de-Oliveira, N. T. (2018). Penicillium and Talaromyces Communities of Sugarcane Soils (*Saccharum officinarum* L.): Ecological and Phylogenetic Aspects. *Journal of Agricultural Science*, 10(4), 335. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p335>

The Ocean Cleanup. (2012). *The largest cleanup in history*. Cleaning up the Garbage Patches. <https://theoceancleanup.com/>

Toledo-León. Heidy, Barrios-San Martín, H., Plá-Pérez, A., Romero-Silva, R., & Acosta-Díaz, S. (2022). Diseño y caracterización de un consorcio bacteriano para la degradación de rípios de perforación base diésel. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 53(2), 102–112. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2221-24422022000200102&lng=es&tlng=es.

Torres-Toledano, M., Granados-García, V., Rafael López-Ocaña, L., & Torres Toledano, M. (2016). *Aportaciones originales Carga de la enfermedad renal crónica en México*. Intersistemas, S.A. de C.V. https://www.anmm.org.mx/publicaciones/ultimas_publicaciones/ENF-RENAL.pdf

Velásquez-Emiliani, A. V., Quintero-De La Hoz, M., Jiménez-Vergara, E. Y., Blandón-García, L. M., & Gómez-León, J. (2018). Microorganismos marinos extremófilos con potencial en bioprospección. *Revista de La Facultad de Ciencias*, 7(2), 9–43. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n2.67360>

Villalba-Villalba, A. G., Cruz-Campas, M. E., & Azuara-Gómez, G. V. (2018). *Aspergillus niger* Tiegh., isolated in Sonora, Mexico: metal tolerance evaluation. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 24(2), 131–146. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.03.023>

Volke-Sepúlveda, T., Saucedo-Castañeda, G., Gutiérrez-Rojas, M., Manzur, A., & Favela-Torres, E. (2002). Thermally treated low density polyethylene biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger*. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(2), 305–314. <https://doi.org/10.1002/app.2245>

WWF. (2019). *Solving PlaStic Pollution through accountability*. www.panda.org



Yepes-Aguirre, L. M. (2014). *Degradación de polietileno de baja densidad utilizando hongos. revisión sistemática de la literatura.*
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16184/YepesAguirreLauraMaria2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>