

Las enzimas, una herramienta para resolver la contaminación por plásticos

AZUCENA LÓPEZ LÓPEZ Y MARCELA AYALA ACEVES.

La Dra. López estudió la maestría y el doctorado en biotecnología en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). Es investigadora posdoctoral SECIHTI en el Departamento de Ingeniería Celular y Biotatálisis del Instituto de Biotecnología UNAM (IBT-UNAM), donde investiga la capacidad de algunas enzimas redox para la remoción de microcontaminantes. La Dra. Ayala estudió ingeniería química en la Facultad de Química de la UNAM y el doctorado en ciencias bioquímicas, conjuntando dos pasiones: la química y la biotecnología. Es investigadora titular B en el Departamento de Ingeniería Celular y Biotatálisis del IBT-UNAM, donde dirige un grupo de investigación enfocado a entender los mecanismos de un grupo de enzimas redox, así como en la aplicación de herramientas moleculares para crear mejores catalizadores. Es integrante de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Los plásticos han cambiado la manera de vivir en nuestra sociedad. Un producto del ingenio humano, de uso relativamente reciente, se encuentran prácticamente en todo lo que empleamos, facilitando nuestras vidas. Pero es precisamente su estabilidad y durabilidad la que ha terminado por generar uno de los mayores retos ambientales en nuestro tiempo. Veamos juntos cuál es el reto y cómo podríamos resolverlo.

¿Qué son los plásticos?

Los plásticos son polímeros sintéticos, es decir, no son moléculas naturales, sino que los hemos fabricado los humanos para que cumplan diferentes funciones. Los plásticos son *macromoléculas*, es decir, están formados por muchísimas moléculas pequeñas (*monómeros*) unidos entre sí mediante enlaces químicos para formar cadenas largas, o *polímeros*. Podemos imaginar a un polímero como un collar larguísimo, compuesto por miles de cuentas, y las cuentas que conforman ese collar, son los monómeros. Debido a que los enlaces químicos que unen a los monómeros pueden ser muy fuertes, los plásticos no se degradan fácilmente, por lo que una vez que son liberados al medio ambiente, se convierten en contaminantes persistentes. Los polímeros sintéticos más utilizados son el tereftalato de polietileno (PET), los polietilenos de alta (HDPE) y baja densidad (LDPE), el cloruro de polivinilo (PVC), el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS), entre otros. En la Figura 1 se muestran los monómeros que componen a algunos de estos plásticos. Esto significa que cuando decimos plásticos, no podemos ponerlos a todos en la misma canasta, por

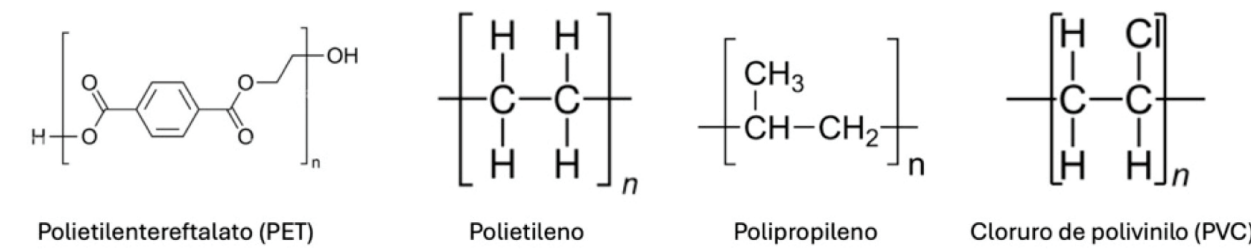


FIGURA 1. ESTRUCTURA química de los diferentes monómeros que componen a los plásticos de uso masivo.

así decirlo, porque en realidad estamos hablando de macromoléculas muy diferentes entre sí a nivel químico (1).

Los plásticos forman parte de productos que utilizamos diariamente, como botellas de agua, contenedores de alimentos, bolsas de supermercado, contenedores para champú, tuberías de plástico, muebles de jardín, componentes de computadoras...y un larguísimo etcétera. Las mismas propiedades que hacen a los plásticos materiales muy útiles, los convierten en un problema ambiental importante. Por ejemplo, algunos plásticos son bastante resistentes al rompimiento, son impermeables, resisten bien la exposición al frío y al calor, y no se contaminan con hongos o bacterias. Es muy común ver suelos y cuerpos de agua con grandes cantidades de plásticos, lo cual es una tristeza porque muchos de los problemas ambientales que causan los plásticos podrían evitarse si los recicláramos, en lugar de tirarlos a la basura. Los plásticos reciclables se identifican con un código, como se muestra en la Figura 2. Todos podríamos contribuir a reducir la contaminación por plásticos si en lugar de tirarlos a la basura, los llevamos a un centro de acopio. De acuerdo con datos recientes, entre 1950 y 2015 se generaron aproximadamente 6.3 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales el 60-80% se convirtió en basura, siendo enterrado o dispersado en

el ambiente; entre el 10-25 % se incineró y solamente el 10-18 % fue reciclado (2, 3). Se estima que para el año 2060 la producción de plásticos alcanzará los 1,200 millones de toneladas...o sea, que la contaminación por plásticos sin duda continuará afectando a generaciones futuras. La acumulación de estos residuos plásticos es un problema que se ve reflejado en la formación de islas de plástico, que son el resultado del transporte y convergencia en los océanos de los desechos plásticos vertidos hacia las corrientes de agua. Se han identificado cinco principales islas distribuidas en el océano Atlántico, Índico y Pacífico donde las corrientes se encuentran. El peso de la mayor isla ubicada en el Pacífico norte sería de unas 80 mil toneladas de residuos plásticos, los cuales pueden desprender productos químicos como bisfenoles y ftalatos que se sabe pueden tener diferentes efectos negativos en la vida de organismos acuáticos y también en la salud humana (4, 5).

Los plásticos al partirse, triturarse y fragmentarse durante su uso o al ser desechados pueden formar *microplásticos*. Este es un término que se utilizó por primera vez en 2004 para referirse a fragmentos de plásticos con un tamaño inferior a 5 mm (Figura 3). Los microplásticos se han encontrado prácticamente en todos lados. Se encuentran en cuerpos de agua dulce, en el mar, en aguas subterráneas, en sedimentos, en



FIGURA 2. TIPOS de plásticos reciclables, el número que los identifica y ejemplos de los productos donde podemos encontrarlos. Figura elaborada a partir de imágenes provenientes de <https://www.flaticon.com/> y <https://www.pexels.com/es-es/>

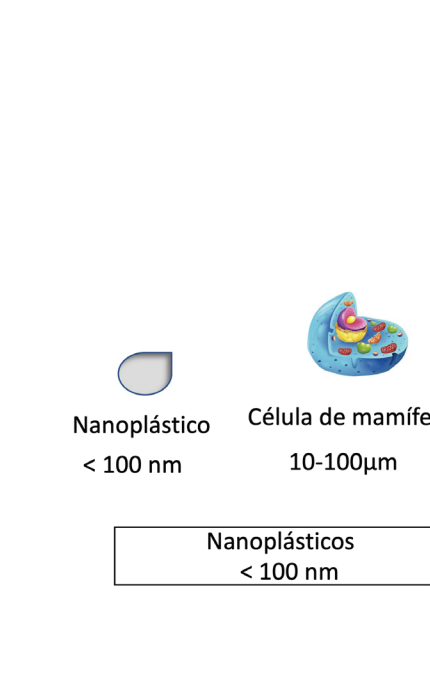


FIGURA 3. ESCALA comparativa para entender el tamaño de los micro- y nanoplasticos. Figura elaborada a partir de imágenes tomadas de <https://www.pexels.com/es-es/> y una generada por la inteligencia artificial Gemini de Google (<https://gemini.google.com/app?hl=es>)

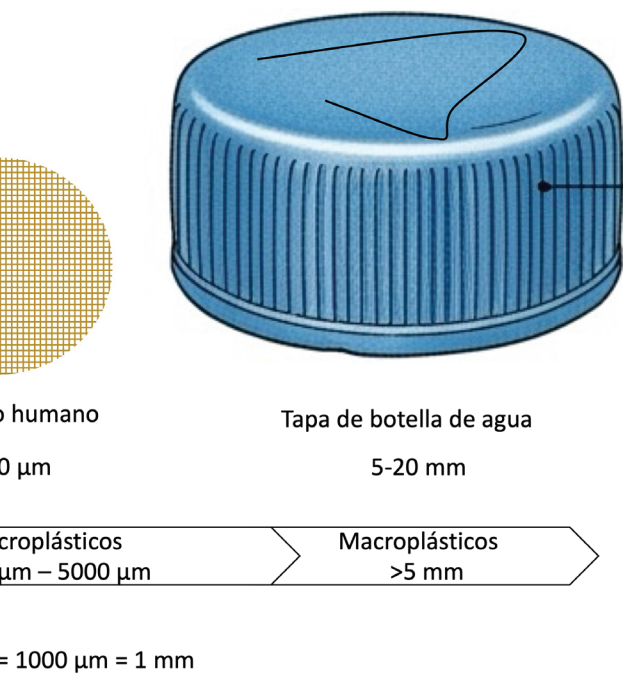
suelos y hasta en la atmósfera...incluso se han detectado microplásticos en la nieve reciente caída en la Antártida. Se ha detectado la presencia de microplásticos en diferentes seres vivos (animales, plantas, hongos) incluso en el humano, tanto en heces, en sangre, en la placenta, en el hígado y recientemente en el cerebro, urgiendo la investigación en torno a los efectos de estos microplásticos en nuestra salud. Por último, se ha revelado también la existencia de *nanoplasticos*, es decir partículas de plásticos en la escala nanométrica (millonésimas de mm), que son mucho más abundantes que los microplásticos y potencialmente más peligrosos. Por su tamaño, tienen una mayor facilidad para penetrar las células y tejidos de diferentes organismos (3). Es relevante mencionar la enorme exposición que tenemos hacia estos materiales, mediante la ingestión en forma de alimentos, mediante la inhalación, al encontrarse en el aire, y a través del contacto con la piel.

¿Qué son las enzimas y qué tienen que ver con los plásticos?

Las *enzimas* son proteínas cuya función en las células es incrementar la velocidad de reacciones químicas. Es decir, son los catalizadores de la vida (6). Las enzimas

son muy eficientes en su labor, y son capaces de acelerar una reacción química hasta 10²⁷ veces.... es decir, ¡millones de trillones de veces! Como mencionamos antes, los plásticos no son compuestos naturales. Quiere decir que los seres vivos no están adaptados para degradarlos. Los principales degradadores en nuestro planeta son las bacterias y los hongos...pues bien, ni

las enzimas que ya se conocen, para que aceleren reacciones diferentes a las que normalmente catalizan en la naturaleza. El conjunto de estrategias que permite hacer esto se llama *ingeniería de proteínas*. Y si imaginamos a la ingeniería de proteínas como una caja de herramientas, veríamos que cuenta con diferentes enfoques como el diseño racional, la evolución dirigida,



quiera ellos están “naturalmente” bien equipados para degradar a los plásticos. Sin embargo, algunos microorganismos, principalmente bacterias, cuentan con enzimas que tienen la capacidad de romper los enlaces químicos que conforman a algunos de los plásticos más utilizados, como el PET. En la jerga científica, a estas enzimas se les llama PETasas, y son proteínas que en la naturaleza catalizan reacciones químicas sobre moléculas que más o menos se parecen al PET, pues tienen enlaces químicos similares. Por ejemplo, algunas enzimas llamadas *lipasas* y *cutinasas*, cuya función natural es degradar *lípidos* (moléculas de cadena larga e hidrofóbicas con enlaces tipo éster) son capaces de degradar también al PET. En 2005 se descubrió la primera enzima que podía despolimerizar al PET, una cutinasa de la bacteria *Thermobifida fusca*. Este ejemplo ilustra la importancia de apoyar la investigación científica que explora la biodiversidad de bacterias y hongos ya que hay mucho por descubrir, por ejemplo, enzimas con capacidades nuevas o inesperadas. Pero no es la única vía para tener enzimas que nos pueden ser útiles. También en el laboratorio los científicos podemos modificar a

el diseño computacional e incluso en los últimos años, la inteligencia artificial. Todas estas herramientas, en conjunto o por separado, se utilizan para modificar a las enzimas, y crear nuevas variantes de ellas que catalicen reacciones químicas que nos interesan, como la degradación de plásticos

Afortunadamente las enzimas como solución a éste y otros problemas de contaminación son ya una realidad. El caso más avanzado, como mencionamos, es el de las PETasas. Existen compañías que tienen planes de realizar la depolimerización enzimática de PET a gran escala. Por ejemplo, la empresa Carbios ha anunciado el despliegue de una unidad industrial en Francia con este propósito y que debería comenzar su operación el próximo año (7, 8). Estos bioprocesos son muy importantes pues el PET puede despolimerizarse enzimáticamente y descomponerse en sus monómeros, los cuales a su vez pueden utilizarse para sintetizar otros materiales o compuestos químicos útiles para los humanos (Figura 4). Es decir, el uso de estas enzimas permite la práctica de una economía circular en torno al PET.

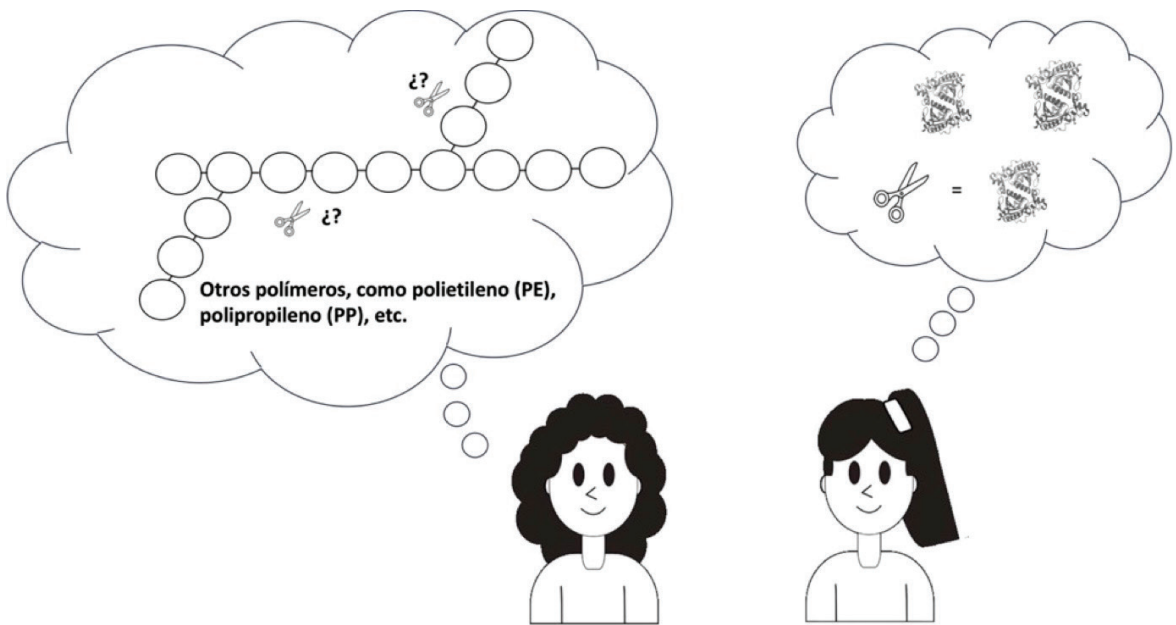


FIGURA 5. A través de la investigación científica se pueden descubrir o desarrollar enzimas que sean capaces de despolimerizar otro tipo de plásticos. Figura elaborada con la participación de Mitzi Reyes, estudiante de maestría en el IBT- UNAM.

¿Qué falta por hacer?

Sin duda, lo más conveniente a futuro sería utilizar otro tipo de materiales plásticos, quizás polímeros basados en monómeros empleados por los seres vivos (generados con materia prima renovable y/o con bioprocesos como los desarrollados por la biotecnología moderna), que tengan cierto grado de biodegradabilidad tal que se reduzca su carácter de contaminante persistente (9).

Mientras eso sucede, tenemos que seguir lidiando con el problema de la contaminación por los plásticos sintéticos actuales. Las PETasas son un extraordinario ejemplo y promesa de que con enzimas se puede aliviar el problema de contaminación con plásticos. Pero aún falta camino por recorrer. ¿Qué hacer con los otros plásticos, los que no son PET, para los cuales aún no hay alternativas de degradación enzimática? Hay que seguir investigando, porque algo que sabemos muy bien es que las enzimas tienen una cierta especificidad, es decir, no pueden romper todos los enlaces químicos. Las PETasas no pueden despolimerizar a plásticos con enlaces químicos diferentes a los del PET, que son de tipo éster. Los enlaces químicos presentes en el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) son de otro tipo, los enlaces C-C (ver la Figura 1), por lo que las PETasas no pueden romperlos. Por cierto, el PE y PP no solo tiene enlaces C-C que son químicamente más resistentes que el enlace éster, lo que los hace más difíciles de romper, sino que además son polímeros ramificados, lo cual

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

Pero justamente este es el tipo de problemas complejos que pueden resolver la ciencia y la tecnología. El objetivo es descubrir u obtener enzimas que puedan descomponer a los otros plásticos, de manera que dejen de ser un problema de contaminación, y cerremos un círculo virtuoso en el que nuestros residuos ya no sean basura y se aprovechen de otra manera. En países como Canadá existen proyectos donde las universidades unen esfuerzos con las compañías para lograr este ambicioso y urgente objetivo. Por ejemplo, el proyecto denominado “Open Plastic”, impulsado por la Queen’s University en Ontario, Canadá, con las empresas Carbios y Dupont como socios, se dedica a la búsqueda de nuevos microorganismos y enzimas que puedan despolimerizar otros plásticos, como las fibras de poliamidas. Este un caso a seguir, en donde queda claro que para tener éxito es mejor unir esfuerzos, que conjunen a actores del gobierno, la academia y el sector privado. Ojalá en nuestro país se dedicara atención y recursos a este tipo de iniciativas. Se vale soñar.

Bibliografía

1. Ecoembes. (2023). Tipos de plásticos: conoce sus propiedades y usos. <https://reducereutilizarecicla.org/tipos-de-plasticos/> consultado el 22 de septiembre de 2025.
2. Chamas, A. y col. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 8(9): 3494–3511 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
3. Chandra, S. y K. B. Walsh (2024). Microplastics in water: Occurrence,

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son más complejos que los polímeros lineales como el PET. Quiere decir que necesitamos enzimas, diferentes a las PETasas, si queremos despolimerizar al PE y al PP (Figura 5). A la fecha, no se ha encontrado ninguna enzima capaz de hacer esto.

significa que son