

AGE El reciclaje químico tiene un gran aliado en la naturaleza, donde existen compuestos que pueden degradar esos recalcitrantes envases usados que invaden el planeta.



EL SUEÑO DE LAS COMEPPLÁSTICOS

Una economía circular que reduzca al máximo los residuos, manteniendo los materiales en uso continuo, podría ser la solución al problema de los plásticos. Uno de los caminos para lograrlo son las enzimas de origen bacteriano, que "trocean" las largas moléculas de polímeros en pedazos biodegradables o, incluso, en compuestos de más valor que el plástico original.

Texto de **LAURA G. DE RIVERA**



sa botellita de agua que acabas de tirar al contenedor amarillo nunca volverá a ser la misma. Si tiene la suerte de no acabar en el vertedero, en su próxima vida será un material más basto que el original, pero llegará un momento en que no se podrá seguir reciclando y acabará en un basurero de todas formas. Para cambiar las tornas, el ingeniero químico Gregg T. Beckham se propone "crear valor añadido en vez de reciclar en un subproducto de menos calidad", tal y como nos cuenta en una entrevista para

MUY desde el Laboratorio de Energías Renovables del Centro Nacional de Bioenergía de EE. UU. Este investigador defiende que la solución al problema global de los residuos de plástico está en "una economía circular que minimice los desechos, al mantener los materiales en uso continuo". Esto significa que "vuelvan al medio ambiente, o que vuelvan a su estado original para hacer nuevos plásticos", apunta por su parte Rebeca Hernández Velasco, científica titular del Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, dentro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

¿Pero no es eso lo que hacen los sistemas de reciclado que tenemos hoy? En absoluto. Se recicla menos de la mitad –el 32.5%– de los 29 millones de toneladas de basura plástica que se recogen solo en Europa, según los últimos datos de Plastic Europe. Un estudio de la

Universidad de Georgia estima que, en 2050, la masa de plásticos en el océano será mayor que la de peces. Y que de los 8300 millones de toneladas que hemos producido los seres humanos desde los años 1950, todavía existen en forma de basura 6300 millones por el mundo, tal y como escriben en *Science Advances*. "Hasta el 40 por ciento de los plásticos que son usados durante unos minutos o unos días, como un envoltorio de un solo uso, acaban en vertederos. Y el tiempo estimado para su degradación en la naturaleza lleva siglos o milenios", nos recuerda Beckham.

POR OTRA PARTE, MIENTRAS SEGUIMOS FABRICANDO 350 MILLONES DE TONELADAS DE PLÁSTICOS NUEVOS AL AÑO EN EL MUNDO, el abastecimiento de reciclados no es capaz de satisfacer las necesidades del mercado, ni de lejos. En Estados Unidos, la cifra crecerá de 2.5 a 7.5 millones de toneladas métricas para 2030, algo que, sin embargo, solo cubrirá el 6 por ciento de la demanda. Eso significa que la industria del reciclado se está perdiendo una oportunidad de beneficios de 120 000

España es uno de los países que más plásticos manda al vertedero, con una tasa que supera casi en 15 puntos la media europea, según datos de PlasticsEurope.



SHUTTERSTOCK

millones de dólares, y eso solo en EE. UU., según datos de GreenBiz. ¿Qué es lo que está fallando? Por una parte, el método mecánico convencional de reciclaje solo funciona con envases PET –polietileno de tereftalato– y HDPE –polietileno de alta densidad–. Pero no puede con la avalancha de envoltorios, bolsas, films, fibras sintéticas y otros plásticos que inundan las basuras, porque contienen colorantes y otros aditivos que dificultan el proceso. Por otra, aun cuando algunos polímeros sí se pueden reciclar, el problema es que el valor de mercado del material resultante es significativamente menor que el del original. “Por ejemplo, una botella de agua común –casi siempre hecha de PET– es separada del resto de envases hechos de otros tipos de plástico, se le quita el tapón y la etiqueta, se lava y se corta en pedacitos. Luego, se calienta, se funde y se crea un nuevo material PET que, con suerte, podrá usarse para ropas o alfombras de poliéster, pero de ninguna manera volverá a servir como envase alimentario”, explica Beckham.

¿UN PROBLEMA CON SOLUCIÓN? TODOS LOS EXPERTOS CON LOS QUE HEMOS HABLADO APUNTAN AL RECICLAJE QUÍMICO, en el que empresas y gobiernos cada vez están invirtiendo más dinero e investigación. En palabras de Beckham, consiste en “descomponer los polímeros mediante reactivos, para crear materiales nuevos y vírgenes, lo que ofrece una oportunidad más sostenible y rentable”.

Primero, tenemos que saber que los plásticos son polímeros, macromoléculas de largas cadenas formadas por monómeros que se van repitiendo. Y se trata de romper los enlaces de esas cadenas para trabajar de nuevas a partir de sus componentes elementales –los monómeros–. Igual que un niño rompe y separa las partes de una figura hecha con piezas de Lego. Es todo un mundo, donde se pueden usar como reactivos enzimas o microbios genéticamente manipulados. La idea apareció publicada por primera vez en 2016, en la revista *Science*: un equipo liderado por el biólogo molecular Kenji

Miyamoto, de la Universidad de Keio, en Tokio, había descubierto una bacteria que se comía el PET. La *Ideonella sakainensis*, que vive a sus anchas en los envases amontonados en las plantas de reciclaje de la ciudad japonesa de Sakai, era capaz de usar este tipo de plástico como fuente de energía –es decir, digerirlo–. Con ayuda de una comunidad microbiana de protozoos y levaduras que prosperan a costa de los restos de comida y suciedad en los envases, esta bacteria puede transformar los elementos resultantes en dióxido de carbono. No hablamos de un bichito liándose a mordiscos con una botella. Lo que hace es producir una enzima, que Miyamoto bautizó como PETasa, capaz de romper las cadenas de polímeros y descomponerlas en monómeros.

El hallazgo abría nuevas perspectivas de investigación, aunque todavía no presenta una solución práctica a escala industrial: la *Ideonella* necesita seis semanas solo para agujerear un film de PET. Por no hablar de lo poco ecológico que sería lanzar a la atmósfera más CO₂ al por mayor. Por eso, para atajar este inconveniente, lo que Beckham propone es usar esos monómeros para producir materiales nuevos, en vez de dejar que sigan alimentando a la comunidad microbiana y acaben convertidos en gas contaminante. Partiendo de esta base, ¿sería posible armar un microbio con ingeniería genética que

Una bacteria hallada en 2016 en un vertedero japonés es capaz de digereir el PET y transformarlo en dióxido de carbono

Las plantas de reciclado mecánico no sirven para todos los tipos de plástico, por eso, deben separarlos antes de molerlos, lavarlos y fundirlos. El polietileno es el más producido en el mundo y el más difícil de degradar.



fuera más eficiente que la Ideonella? Su equipo se lanzó a la aventura de intentarlo. Primero, sintetizaron el gen que produce la enzima PETasa con algunas modificaciones a medida, luego, lo introdujeron en la socorrida *E. coli*, una bacteria fácil de cultivar en el laboratorio. El resultado: una enzima que “comía” un 30 % más de plástico que la producida por la Ideonella, tal y como publicaron en 2018 en *PNAS*. Aun así, “seis días para disolver una botella”, como indica Beckham, no es lo bastante eficiente para la industria del reciclaje.

MIENTRAS, EXPERIMENTOS COMO EL DE MIRANDA WANG BUSCAN NUEVAS FORMAS DE RECONVERTIR EL PLÁSTICO MEDIANTE CATALIZADORES QUÍMICOS.

Desde el centro de investigación del que es fundadora, BioCollection, Wang emplea un reactivo líquido para romper las cadenas de polímeros. En su diana está el polietileno, un material extremadamente barato y el que más se produce en países como EE. UU., por delante incluso del PET. Se usa para todo tipo de films plásticos: es lo que envuelve la bandeja de tomates del supermercado o el bocata de tu merienda. Y más del 97 % no es reciclado, primero porque es un proceso costoso, ya que la grasa y la suciedad se le adhieren con fuerza y es difícil de lavar –paso previo obligatorio en el reciclaje mecánico–. Y, segundo, porque sale mucho más barato comprarlo nuevo. Se ha probado a descomponerlo con bacterias, pero hoy por hoy es una estrategia “demasiado lenta: tardan más de 24 horas en hacer su trabajo con un par de miligramos de polietileno”, apunta Wang.

Su invento propone una alternativa: “convertir los envoltorios sucios directamente, para transformarlos en una combinación de cuatro tipos de diferentes de químicos, llamados ácidos orgánicos”, asegura la científica en la revista *Wired*. El proceso consiste en “añadir el catalizador al plástico, a una temperatura de 120 °C, sin necesidad de presión añadida. La larga cadena de carbono del polímero reacciona, se desestabiliza y se rompe para crear otros compuestos que tienen de cuatro a siete carbonos en su cadena. Luego, el catalizador se puede recuperar por evaporación, para volver a usar cuantas veces se quiera”, explica. Una de las moléculas resultantes de la descomposición es el ácido adípico, precursor de materiales como el nylon y otras poliamidas que se usan para hacer ropa o partes de coches. Lo que pretende Wang es matar dos pájaros de un tiro: “Transformar el polietileno, que ahora mismo solo sirve

¿Qué tipos de plásticos se pueden reciclar?

Cada tipo de plástico tiene una estructura molecular diferente y requiere un proceso distinto para reciclarse. Estos son los más empleados, ordenados por su facilidad para ser tratados por los métodos mecánicos convencionales:

PET. Tereftalato de polietileno, muy empleado en envases de bebidas. Es uno de los más fáciles de reciclar mecánicamente, aunque el mayor escollo es que tiene que estar perfectamente limpio antes de ser reducido a escamas y fundido.

HDPE. El polietileno de alta densidad se usa en botellas de detergente y envases de comida, juguetes... Reciclado, se emplea para tuberías, envases, artículos para el hogar, impermeabilización de terrenos.

LDPE. El polietileno de baja densidad es uno de los plásticos más utilizados –se producen unos 80 millones de toneladas al año en el mundo–, pues es muy fácil y muy barato de fabricar. Está en bolsas de todo tipo y en el omnipresente film transparente. No es fácil de reciclar.

PP. El polipropileno sirve para hacer tapones de botellas, pajitas, fiambreras, pañales. Su reciclado es factible, pero no fácil.

PS. El poliestireno se usa en las carcasas de televisiones, interior de frigoríficos, juguetes, carcasas de CDs, perchas. Es de producción muy barata y difícil de reciclar.

PVC. El policloruro de vinilo, presente en tarjetas de crédito, marcos de ventanas o la piel sintética, es muy difícil de reciclar.

Fuente: Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA) y National Geographic.

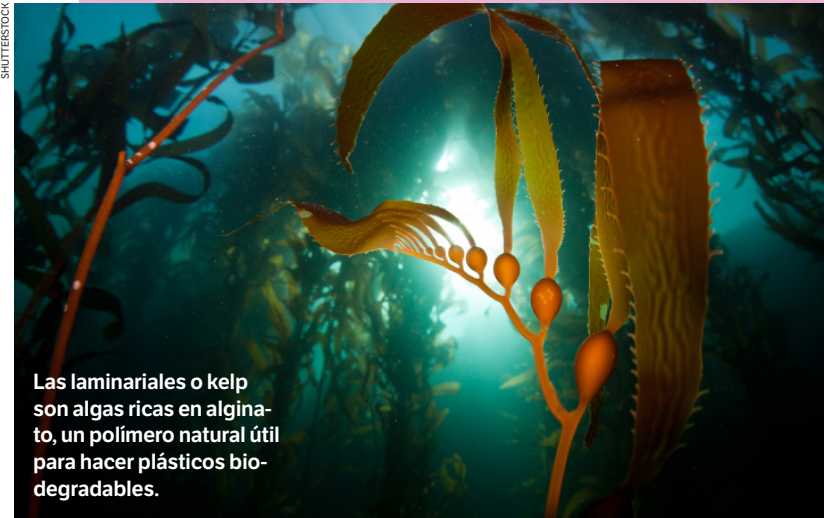
Biodegradables de nacimiento

Desde su puesto de investigadora en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros del CSIC, Rebeca Hernández se propone “aprovechar los polímeros de origen natural para sustituir a los de origen fósil, porque son más biodegradables”. Es decir, se descomponen por la acción del agua o por las bacterias que existen en el medio ambiente. Algunos, incluso, son compostables –en un plazo de 8 a 12 semanas, acaban convirtiéndose en abono o compost–. Principalmente, en su laboratorio, emplean polisacáridos, como alginato –que se extrae de algas–, fitosano –de caparazones de crustáceos– o almidón –de origen vegetal–. El primero sirve para fabricar filmes con aplicaciones biomédicas de alto valor añadido, como

los parches de liberación controlada y, también, se usa en la ingeniería de tejidos, para la impresión 3D. El fitosano es uno de los materiales que conforman las cápsulas de fármacos que se liberan en un punto concreto del organismo. Y el almidón se combina con otros plásticos para hacer bolsas biodegradables, “como las que vemos en el supermercado”. Estos envases, advierte la experta, tienen un porcentaje de material orgánico, por lo que se van a degradar más rápido que otros plásticos fósiles, pero ¡ajo!, eso no significa que podemos tirar las bolsas al campo: hay que seguir desechándolas en el contenedor amarillo.

Una segunda línea de investigación dentro de su laboratorio es la de recurrir a monómeros de origen natural, como el ácido poliláctico, “que es compostable y forma filmes que podrían ser usados en envases para alimentos”, nos explica la científica. Y una tercera vía son los “poliésteres biodegradables procedentes de síntesis biotecnológica”.

¿Estamos muy lejos de conseguir que el plástico que usamos provenga solo de estos componentes fáciles de digerir por la naturaleza? “Se está haciendo un gran esfuerzo en sustituir los polímeros procedentes del petróleo, aunque se está invirtiendo mucho más dinero en encontrar alternativas al reciclaje mecánico”, nos contesta. Se refiere al reciclaje químico, que, como hemos visto, “descompone los polímeros en monómeros en estado puro, con la misma calidad que los monómeros de origen. El objetivo es llegar a darles una vida circular”, apunta.



Las laminariales o kelp son algas ricas en alginato, un polímero natural útil para hacer plásticos biodegradables.

Para el año 2030, todos las botellas de plástico deberán ser reciclables y contener, al menos, un 30% de material reciclado

para contaminar porque no tiene ningún valor de mercado después de haber sido usado una sola vez, en ácido adípico. Y este puede emplearse en la industria para sustituir al petróleo en la fabricación de nuevos materiales que sean sostenibles”, señala.

Otro ejemplo de despolimerización –romper las cadenas de polímeros– es el que estudia Carbios, que ha diseñado una enzima capaz de deslavar el PET para convertirlo en ácido tereftálico –PTA, precursor del PET– y etilenglicol –se usa para hacer anticongelante, disolventes y tejidos de poliéster–. “Conceptualmente, permite reciclar el mismo material hasta el infinito”, asegura Martín Stephan, CEO de esta *start up* francesa. Como esta, “existen muchas iniciativas a nivel europeo en programas enfocados a la economía circular de plásticos”, cuenta a MUY Rebeca Hernández, que forma parte de la **plataforma de investigación e innovación SUSPLAST del CSIC**, volcada en este objetivo. Hay que actuar deprisa, si se quiere cumplir con la *Estrategia de plásticos* publicada por la Unión Europea en 2018: en 2030, todos los envases deben ser reciclables y las botellas de bebidas tendrán que estar hechas con, al menos, un 30% de materiales reciclados.

En esta misma línea trabaja IBM, que “ha desarrollado un proceso de reciclaje químico para descomponer el PET y reprocesarlo en botellas con propiedades similares al original, aptas para bebidas”, señala Beckham. Aquí el reciclado tendría la misma calidad que el material virgen. La cuestión es que, por el momento, el coste del proceso no merece la pena y no tiene demanda en el mercado: una vez más, a los fabricantes de refrescos les sale más barato comprar botellas PET nuevas hechas con petróleo, en vez de las recicladas. ¿Pero y si el material reciclado no tuviera la misma calidad del ori-

ginal, sino unas propiedades más valiosas y mejor pagadas en el mercado?

En eso están enfrascados en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE. UU., donde están diseñando por ingeniería genética “un microbio capaz de producir enzimas que digieren los plásticos y, luego, convierten el producto resultante en materiales como el composite –una resina que proviene de la mezcla heterogénea de materiales sintéticos– para hacer tablas de snowboard, aspas de turbinas eólicas o partes de vehículos”, nos adelanta Beckham.

TENIENDO EN CUENTA QUE “EL PRECIO EN QUE SE VENDE EL PET REICLADO ESTÁ ALREDEDOR DE UN DÓLAR POR KILO, y los materiales composite que hacemos por este método se venden a unos 5 dólares por kilo, esto representa un potencial considerable de valor añadido y un aliciente más que atractivo para la industria de recogida y tratamiento de plásticos. Estamos hablando con varias empresas interesadas en escalar esta tecnología. Pensamos que tiene un gran potencial a corto plazo, si somos capaces de encontrar a los socios adecuados”, nos confía.

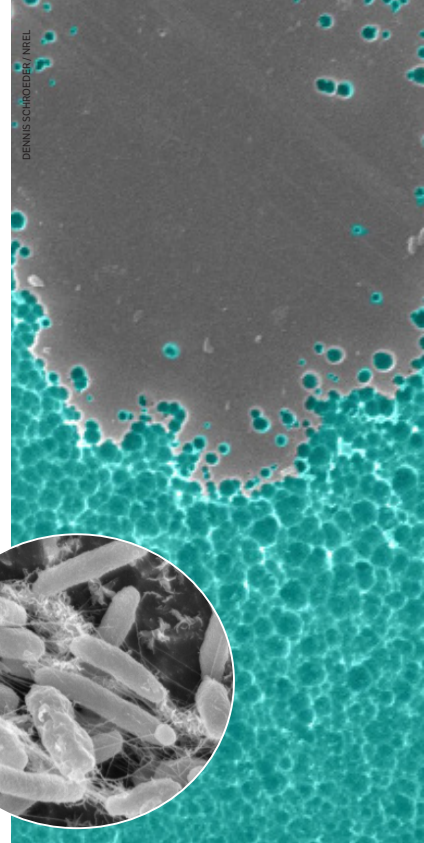
Ante este panorama, ¿se podrá cumplir el

objetivo de que todo el plástico sea reciclado? “La tecnología está, pero hay que echar una mano desde la legislación, para que se fabriquen productos de un solo material. El problema es que los plásticos son una familia muy rica en composiciones químicas. Están formados por polímeros combinados con aditivos. Y no todos responden igual a los mismos procesos de reciclado”, apunta Hernández. Lo difícil es poder separarlos por familias para tratarlos cada uno como se debe. “Cuando no se puede, como ocurre con los tetra briks, el método mecánico no sirve y hay que recurrir al reciclado químico”, apostilla.

En su opinión, “no serviría de nada prohibir los plásticos o limitar su venta, porque están demasiado extendidos”. Ejemplos como los que hemos visto “tendrán que ser desarrollados y escalados en colaboración con la industria para hacer realidad estas ideas, solucionar el cúmulo de plásticos en el medio ambiente e incentivar su recogida”, nos dice Beckham. La clave: centrarse en “la transición hacia plásticos hechos con materiales de fuentes renovables –alternativas al petróleo–, y fabricados con la prioridad de facilitar su reciclado”. □



DENNIS SCHROEDER / NREL



DENNIS SCHROEDER / NREL

Los ingenieros químicos Gregg Beckham (izquierda) y Nic Rorrer, en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE. UU., han modificado una enzima, la PETasa (derecha), que descompone el PET de botellas usadas. La bacteria *Ideonella sakaiensis* (centro) produce esta enzima de forma natural, aunque a una velocidad más lenta que su contraparte de laboratorio.

Bacterias domesticadas para vomitar plástico

En el Centro de Biología Molecular Severo Ochoa de Madrid (CSIC-UAM), Jorge Barriuso experimenta con microorganismos capaces de degradar polímeros de origen natural, para que, tras las oportunas modificaciones genéticas, sean capaces de atacar también a los plásticos –que son más duros de pelar porque los enlaces de sus moléculas son más fuertes–. Y no solo eso, sino además “producir compuestos de valor añadido”, según explica a MUJ. Por ahora, al degradar el plástico, los microorganismos producen CO₂ y agua como productos de desecho del proceso de mineralización. En vez de esto y para evitar soltar más dióxido de carbono a la atmósfera, su objetivo es que “la bacteria procese y transforme los componentes del plástico para dar lugar a productos nuevos, como bioplásticos”. En concreto, el conejillo de indias que Barriuso más utiliza en su laboratorio es la bacteria *Pseudomonas*, “porque es buena colonizadora, es fácil de manipular y versátil genéticamente. Además, produce bioplásticos como parte de su metabolismo natural”.

Los bioplásticos, por cierto, están formados por enlaces más débiles que los plásticos artificiales y son mucho más fáciles de degradar en la naturaleza. Un ejemplo es el biosulfactante PHA, que es el que produce la *Pseudomonas*. Por eso, esta bacteria “ya se utiliza de forma industrial para producir bioplásticos, pero el alimento que le dan para que lo haga es caña de azúcar. Sería mucho menos costoso y más ecológico que pudiera hacer lo mismo pero “comiendo” plástico no reciclable como fuente de alimento. Eso haría que el PHA resultante fuera más accesible y su uso se extendiera”, observa. Hoy en día, los bioplásticos no se emplean mucho, “por una cuestión de precio, pero con las regulaciones de la UE cada vez tendrán que usarse más”, advierte Barriuso, que también forma parte de la plataforma SUSPLAST del CSIC.

Su equipo pone a prueba estas bacterias domesticadas

con el PET y el polietileno. También emplean hongos con capacidad oxidativa para el polietileno y otros que segregan cutinasa, una enzima que “come” PET. “La idea es aprovecharnos de una acción combinada. Mientras un organismo degrada –rompe los enlaces del plástico–, el otro se come esos “pedazos” y los transforma en bioplástico”, nos explica.

En cuanto a las ventajas del reciclado mediante microorganismos, Barriuso resalta que “no hay que usar productos químicos contaminantes y no tiene el coste energético del reciclado químico o mecánico. Es una alternativa más limpia y más beneficiosa en términos de coste económico”. Por otra parte, los productos reciclados no tendrían menor calidad que su original, como ocurre en las plantas mecánicas, sino que incluso podrían aportar un valor añadido.

“Costará hacerlo una realidad”, nos dice. Aun así, Barriuso es optimista y recalca que “hay empresas muy potentes que se están interesando en explorar e invertir en estas opciones”.



La bacteria *Pseudomonas* produce PHA, un tipo de poliéster biodegradable que sirve para crear plástico reciclable.

AGE