

La indeseable inmortalidad (parte 2)

MARGARITA I. BERNAL – URUCHURTU

La Dra. Margarita I. Bernal Uruchurtu es Profesora - Investigadora del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEMor) y es integrante de la Academia de Ciencias de Morelos.

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

La semana pasada presentamos a ustedes el problema de contaminación por sustancias polifluoroaromáticas (PFAS); compuestos que, en la narrativa periodística, reciben el nombre de inmortales y su aparición en el medio se ha considerado como una potencial amenaza para todos los seres vivos (1). Llegaron al medio debido a la falta de cuidado en las aguas de desecho de los lugares en donde se manufacturaron muchos productos derivados de ellos. Si bien no hay evidencia de que productos como el Teflón, las películas impermeabilizantes o los aditivos para generar productos resistentes al agua liberan los PFAS durante su utilización, la vasta utilización de estos nos habla de las enormes cantidades que se utilizaron para su fabricación. Setenta y cinco años después del inicio de la fabricación masiva de PFAS, es hasta este año que en Estados Unidos se estableció el nivel máximo permitido en agua potable. Sin duda, el panorama es difícil.

Y ahora, ¿qué hacemos?

El daño ya está hecho y es tarea de un gran número de expertos el trabajar juntos para evitar que los efectos de las PFAS se continúen propagando eternamente. La tarea titánica tiene, en mi opinión, tres ejes fundamentales: avanzar en la comprensión del comportamiento de estos contaminantes libres en el medio, la remoción de ellos del agua potable y, la búsqueda de compuestos que los sustituyan sin riesgo en todas sus aplicaciones. Y hay buenas noticias, en los tres ejes se ha avanzado en los últimos años.

El hallazgo de PFAS en aguas residuales, en la lluvia, en la sangre humana y en las zonas más remotas de los océanos terrestres genera naturalmente la pregunta de cómo es que estos compuestos persistentes viajaron tan largas distancias hasta encontrarse en lugares como el Océano Ártico (2). Saber si se trata de su destino final ese remoto lugar, o si desde allí se redistribuye a otros lugares es un proyecto multinacional en el que se han estudiado las corrientes profundas del océano y el transporte atmosférico de estos compuestos (3). Aunque estos compuestos sean repelentes al agua y no volátiles, pueden ser transportados en la atmósfera en partículas de aerosol. Un aspecto que hay que tomar en cuenta es que los PFAS son muy solubles en el océano, pero no se adhieren a la materia

orgánica allí presente, sino que reaccionan con otros contaminantes como los compuestos organofosforados provenientes de descargas agrícolas. Las mediciones realizadas en el Ártico por un grupo de científicos alemanes, estadounidenses y canadienses sugieren que una corriente muy profunda arrastra aproximadamente 123 toneladas de PFAS al año hacia allá y que, de esas, 110 regresan al Océano Atlántico. En la figura 1 se presenta un esquema adaptado de ese estudio. Esto nos lleva a pensar que las 13 toneladas de diferencia quedaron en el Ártico y que las fluctuaciones de la temperatura y salinidad de las corrientes marinas pueden liberarlas o mantenerlas allí durante mucho tiempo. Estudios de este tipo son muy importantes, ya que obtener mediciones fiables en ese lugar, considerar los factores geográficos, marinos y químicos que intervienen no es fácil y, por ello, estos logros suponen un estímulo muy importante para avanzar y mejorar la tecnología útil para estos proyectos.

una empresa tiene un compuesto con una cierta huella y se encuentran trazas de este en otro lugar, es posible relacionarlos con gran certidumbre. Esta técnica no solo sirve para rastrear los PFAS, sino también abre un enorme espectro de posibles aplicaciones que van desde la identificación de fármacos falsificados hasta la astrobiología. Podrían servir para saber si las moléculas orgánicas descubiertas en Marte son remanentes de alguna forma de vida en ese planeta.

Supongamos ahora que, no solo ya sabemos dónde están los PFAS y en qué cantidad se encuentran, ¿qué hacemos con ellos? Se sabe que los métodos de filtración de agua a través de materiales como el carbón activado son útiles para retirarlos del agua; sin embargo, si el filtro no se renueva muy frecuentemente, los PFAS vuelven a escapar. Aunque hay otro tipo de filtros de los que los PFAS no escapan fácilmente, las técnicas de filtrado son caras y crean desechos que necesitan ser tratados. La clave sería

ratura es superior a 374 °C y la presión es 220 veces superior a la presión atmosférica normal, alcanzamos el estado crítico. En estas condiciones, el agua se comporta como un disolvente diferente al agua líquida y por ello ha generado mucho interés en su uso en procesos industriales, otras sustancias como el CO₂ supercrítico ya se usa para eliminar la cafeína del café en grano. Al reducir un poco la presión o la temperatura, recuperamos el agua en forma de líquido o de gas, y los compuestos que eran solubles en el estado supercrítico, dejan de serlo y se separan, lo que facilita su remoción. Al agregarle a un contenedor con agua supercrítica un oxidante, es decir, una molécula capaz de quitar electrones a otra, el agua puede destruir una gran variedad de compuestos orgánicos, más del 99% de los contaminantes presentes en una muestra. La compañía *Battelle* ha adaptado esta tecnología y ha construido el *Aniquilador de PFAS*, un dispositivo que, empleando agua en estas condiciones puede romper los fuertes

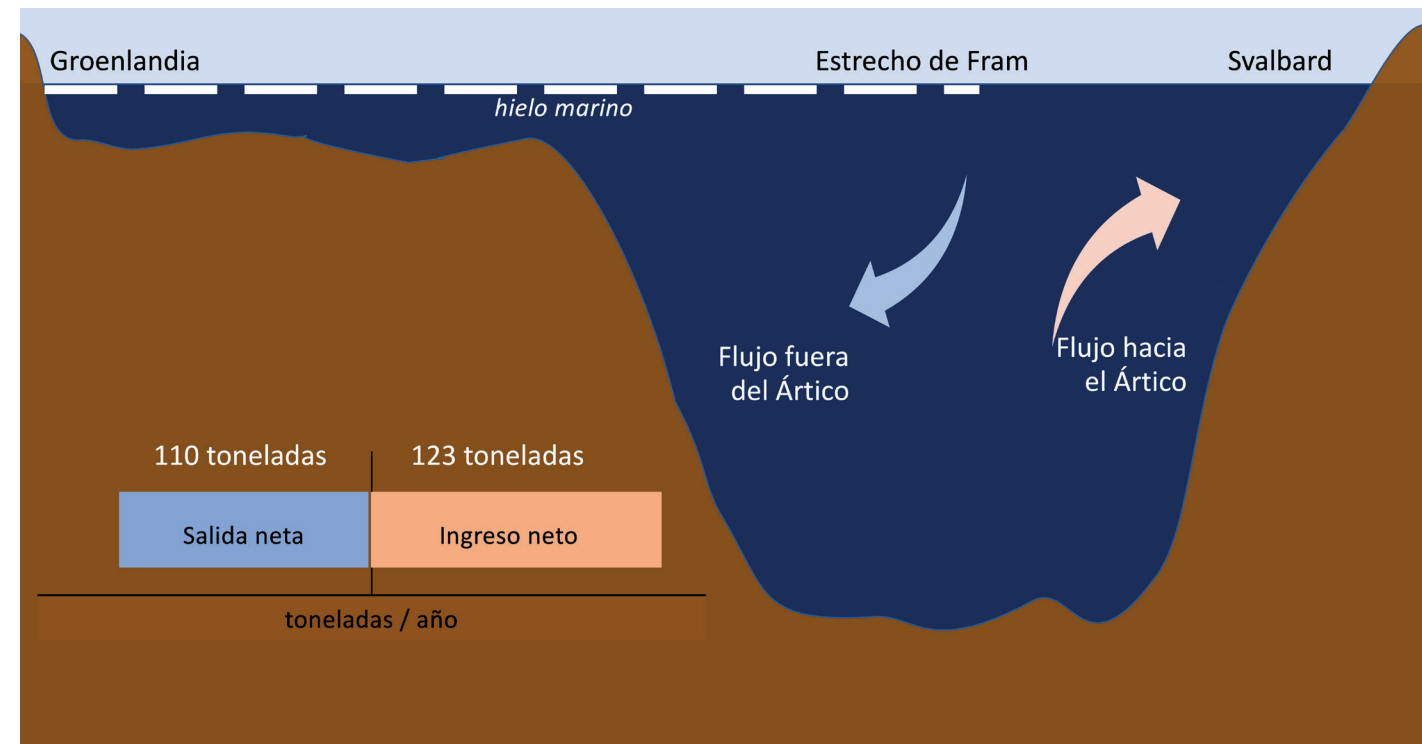


FIGURA 1. LOS compuestos que pertenecen a la familia de los PFAS han sido monitoreados en el Océano Ártico, confirmando que desde allí se distribuyen a otros océanos y una fracción de lo que llega permanece allí. Figura adaptada de la referencia 3.

Por ejemplo, para rastrear estos compuestos inmortales en el ambiente, un grupo de investigadores de la Universidad de Texas en Austin desarrolló un método que permitirá a las autoridades ambientales identificar el origen de un compuesto organofluorado y la trayectoria que siguió hasta terminar en acuíferos. Esta técnica consiste en colocar las muestras en un campo magnético muy fuerte y en analizar las ondas de radio que los átomos emiten en esas condiciones. Se trata de la técnica de resonancia magnética nuclear que permite conocer la posición de cada uno de los átomos de la molécula. Así, pueden conocer la composición de los isótopos de carbono en la molécula y, por tanto, crear una especie de “huella digital” del contaminante. Si

atraparlos y destruirlos inmediatamente. Actualmente hay pocos métodos capaces de degradar estas sustancias. En la búsqueda de formas de hacerlo encontré varias, incluyendo ensayos electroquímicos, reacciones con catalizadores, materiales cristalinos ultraporosos y bombardeo con electrones de muy alta energía. Entre ellos un par de opciones me parecieron prometedoras por la posibilidad de implementarlas de manera sostenible. La primera, es una oxidación en agua supercrítica y la segunda es un proyecto de ingeniería biotecnológica ambiental.

El estado supercrítico corresponde a la condición en la que la distinción entre líquido y vapor ha desaparecido. En el caso del agua, una vez que la tempe-

enlaces C-F de los PFAS, convirtiéndolos en sales inertes y dióxido de carbono. Los *Aniquiladores*, han funcionado ya de manera consistente durante más de tres años y el prototipo actual puede tratar más de dos mil litros de agua al día. Como esta cantidad es realmente pequeña, van a tratar de fabricar uno diez veces más grande. Y, aunque los resultados son alentadores, aún resulta un método energéticamente costoso (4).

En las aguas de desechos urbanos existe un microorganismo del género *Acetobacterium*, que es habitante común del sistema de drenaje de todo el mundo y puede romper el enlace C-F. En el pasado mes de junio, investigadores de la Universidad de California en Riverside (UCR) publicaron su descubrimiento

de la ruptura enzimática de este enlace. La ruptura directa del enlace C-F en estructuras con numerosos átomos de flúor es muy rara. El resultado de romper el enlace es la formación de iones fluoruro (F⁻), que son muy tóxicos para las células. Y, aunque en 2019 se había reportado que la bacteria *Acidimicrobium* sp. A6 podía degradar PFOS y otros PFAS, la enzima responsable de la reacción no se identificó (5). El grupo de la UCR se propuso identificar el mecanismo a través del cual la bacteria rompe el enlace para así generar enzimas modificadas capaces de trabajar en condiciones industriales. Inicialmente, buscaron organismos que tuviesen funcionando un mecanismo para eliminar el F⁻. El fluoruro es abundante en los minerales de la corteza terrestre por lo que es natural que la evolución haya conducido a que algunos microorganismos tengan familias de proteínas de membrana que exporten el F⁻. Después, probaron si las enzimas que rompen enlaces entre carbono y cloro o bromo podrían también con el enlace con flúor, pero los resultados no fueron positivos, debe haber un mecanismo diferente para romper este enlace. Mediante el análisis de metagenómica, buscaron complejos de enzimas que actuando de manera conjunta pudiesen reducir el enlace C-F, y al mismo tiempo realizar un proceso inverso de oxidación a otro sustrato. Así fue como encontraron el complejo *CarCDE* que puede hacer justamente eso (6). Al haber alcanza-

y crear complejos enzimáticos modificados que resuelvan los mecanismos y las reacciones termodinámicas de una forma más rápida que la evolución natural. Organismos modificados capaces de expresar las enzimas identificadas podrían emplearse en el tratamiento de aguas residuales y así eliminar los PFAS, como lo sugiere la Figura 2.

Finalmente, la diversidad de usos encontrados para los materiales elaborados con compuestos fluorados significa dos cosas: por un lado, la búsqueda de reemplazos útiles y, por otro acostumbrarnos a un modo de vida que nos haga menos dependientes de materiales que requieran de un proceso con numerosos compuestos sintéticos para ser útiles. Preguntarnos si necesitamos un envase para papas fritas en que no notemos las marcas de aceite después de un tiempo o si preferimos materiales con menor tratamiento e impacto ambiental en su fabricación. No obstante, hay materiales que se han convertido también en una solución al requerir lavado menos frecuente y con ello, ahorro de agua. Para este último caso encontramos muchos avances en el estudio de las propiedades de los siloxanos (compuestos de silicio), los biopolímeros y las nanopartículas que, por ejemplo, pueden formar películas o barreras para crear materiales impermeables. Los productos que lo han logrado utilizan leyendas que dicen “Eco

industrias textil, de cosméticos y de productos de uso doméstico. Sin embargo, como consumidores debemos estar muy atentos a que los reemplazos cuenten con la suficiente evidencia de que son seguros y no impactan negativamente en el medio ambiente. Sin duda alguna, la indignación que puede provocar en nosotros el saber que la negligencia de una empresa ha generado un problema de contaminación tan extendido en nuestro planeta puede ayudarnos a movilizar nuestro interés como consumidores responsables que prefieren productos innovadores que cuenten con la suficiente evidencia de que su impacto en el ambiente ha sido considerado en todas las etapas de su vida útil, desde su fabricación hasta el desecho para su reciclaje o transformación.

La química sintética ocurre en el laboratorio, en condiciones controladas y en recipientes de vidrio, por lo que no es sencillo tener en cuenta todos los factores ambientales. La composición química del medio natural está sujeta a fluctuaciones importantes según la temporada y la presencia o ausencia de compuestos antropogénicos. Al contrario de lo que sucede en el laboratorio, en el ambiente el agua es el principal disolvente. Por ello, uno de los aprendizajes que se procura transmitir a todos los futuros químicos es el hecho de que, si un compuesto puede ser degradado en el laboratorio, ello no garantiza que lo mismo

perfecto y poco práctico.

Por otra parte, para los jóvenes con vocación hacia la Ciencia, existe todo un ámbito en el que se necesitan científicos comprometidos con el diseño de productos químicos seguros, que no persistan en el sistema más allá del tiempo necesario para su completo aprovechamiento; que no se bioacumulen, y por supuesto, que no sean tóxicos. La formación de científicos en todas las áreas, especialistas en métodos de análisis, diseñadores de nuevos métodos de análisis, creadores de dispositivos útiles para la remediación de problemas ambientales, y muchos más que aún no imaginamos, son indispensables para remediar los desastres que el consumo exagerado ha generado en los últimos setenta años. Siempre hay un mejor futuro posible.

Agradecimiento

Uno de los placeres de contribuir a esta sección es la posibilidad de discutir con los miembros de la ACMOR que actúan como revisores del trabajo. En este caso, quienes revisaron la versión original enriquecieron la discusión y la perspectiva sobre el tema. Les estoy muy agradecida por su atenta lectura.

Trabajos citados

- Bernal Uruchurtu, M. La indeseable inmortalidad. Parte 1. *La Unión de Morelos*, Septiembre 17, 2024. <https://acmor.org/publicaciones/la-indeseable-inmortalidad-parte-1>
- Passive Sampler Derived Profiles and Mass Flows of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) across the Fram Strait in the North Atlantic. Matthew Dunn, Simon Vojta, Thomas Soltwedel, Wilken-Jon von Appen, and Rainer Lohmann, *Environmental Science & Technology Letters*, (2024) 2, 11.
- Understanding the Flow of PFAS Between Oceans. *ACS Axial*. 2024. https://axial.acs.org/earth-space-and-environmental-chemistry/understanding-the-flow-of-pfas-between-oceans?pci=CACSR000001381593&utm_source=elqua&utm_medium=eml&utm_campaign=IC001_ST0001R_T001683_Axial_Newsletter_&src=IC001_ST0001R_T001683_Axial_Newsletter
- Trager, Rebecca. How to put an end to “forever chemicals” and annihilate PFAS pollution. *Chemistry World*. [En línea] *Chemistry World*, 2022. <https://www.chemistryworld.com/news/how-to-put-an-end-to-forever-chemicals-and-annihilate-pfas-pollution/4016018.article>.
- Defluorination of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) by *Acidimicrobium* sp. strain A6. S. Huang, P. R. Jaffé, *Environmental Science & Technology*, (2019) 53, 11410-11419.
- Electron bifurcation and fluoride efflux systems implicated in defluorination of perfluorinated unsaturated carboxylic acids by *Acetobacterium* spp. Yaochun Yu et al., *Science Advances*, (2024) 10, eado2957.
- Microbes found to destroy certain ‘forever chemicals’ by cleaving stubborn fluorine-to-carbon bonds. *Phys.org*. 2024. <https://phys.org/news/2024-07-microbes-destroy-chemicals-cleaving-stubborn.html>.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

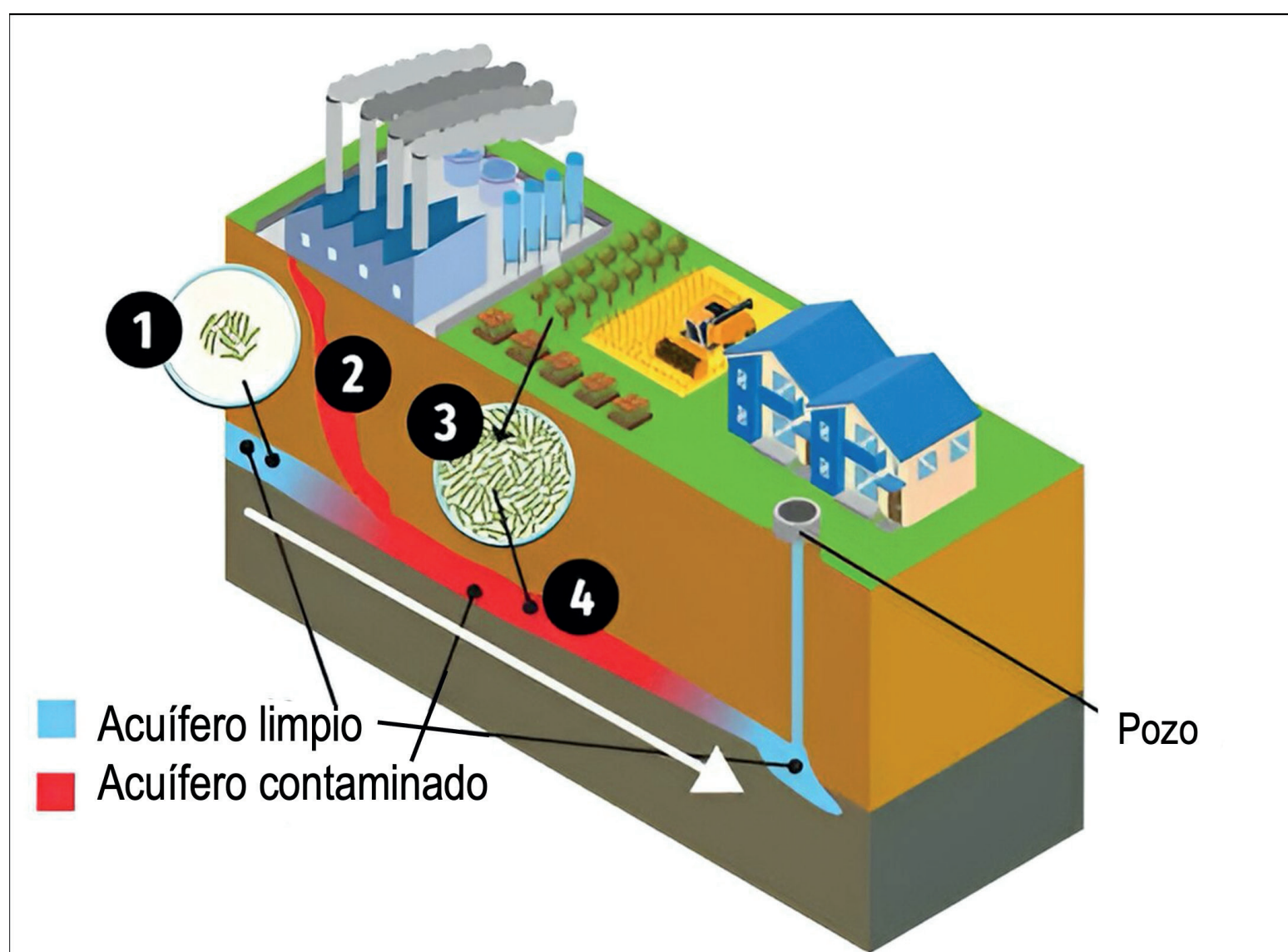


FIGURA 2. POSIBLE solución de ingeniería biotecnológica para eliminar los PFAS de las aguas subterráneas y de desecho. En 1) bacterias que existen de manera natural y degradan los contaminantes; 2) los contaminantes industriales se filtran a los acuíferos; 3) se inyectan nutrientes para aumentar la presencia de bacterias degradadoras de contaminantes; 4) gran presencia de bacterias degradadoras de contaminantes. Figura adaptada de (7)

do una comprensión de los mecanismos indispensables para degradar enzimáticamente los PFAS, se abre la posibilidad de descubrir

Finish” para señalar una exitosa transición a materiales resistentes al agua y libres de PFAS. Se esperan cambios similares en las

ocurrirá en el ambiente. Eliminar sustancias químicas una vez que se han dispersado en el ambiente, no solo es caro sino también im-

