



Foto: AP Images/Wang congqi/maghechina

La paradoja del fósforo*

Escasez y sobreabundancia de un nutriente clave

Mientras conducía a los Estados Unidos a través de la Gran Depresión y preparaba al país para la guerra en Europa, el entonces presidente Franklin Roosevelt se tomó un momento en 1938 para hablar a los miembros del Congreso acerca del fósforo.¹ Más específicamente, habló de los fosfatos, la forma del fósforo más comúnmente explotada a nivel comercial. La presentación de Roosevelt no fue de carácter científico sino una alerta precautoria sobre el papel crítico que desempeña este elemento en la producción agrícola. Las empresas privadas, advirtió, estaban exportando cantidades cada vez mayores de fosfatos a los mercados extranjeros. Dada la posibilidad de que este componente esencial de los fertilizantes llegara a escasear dentro del país, Roosevelt recomendaba desarrollar una política formal para hacer frente a un problema estratégico.

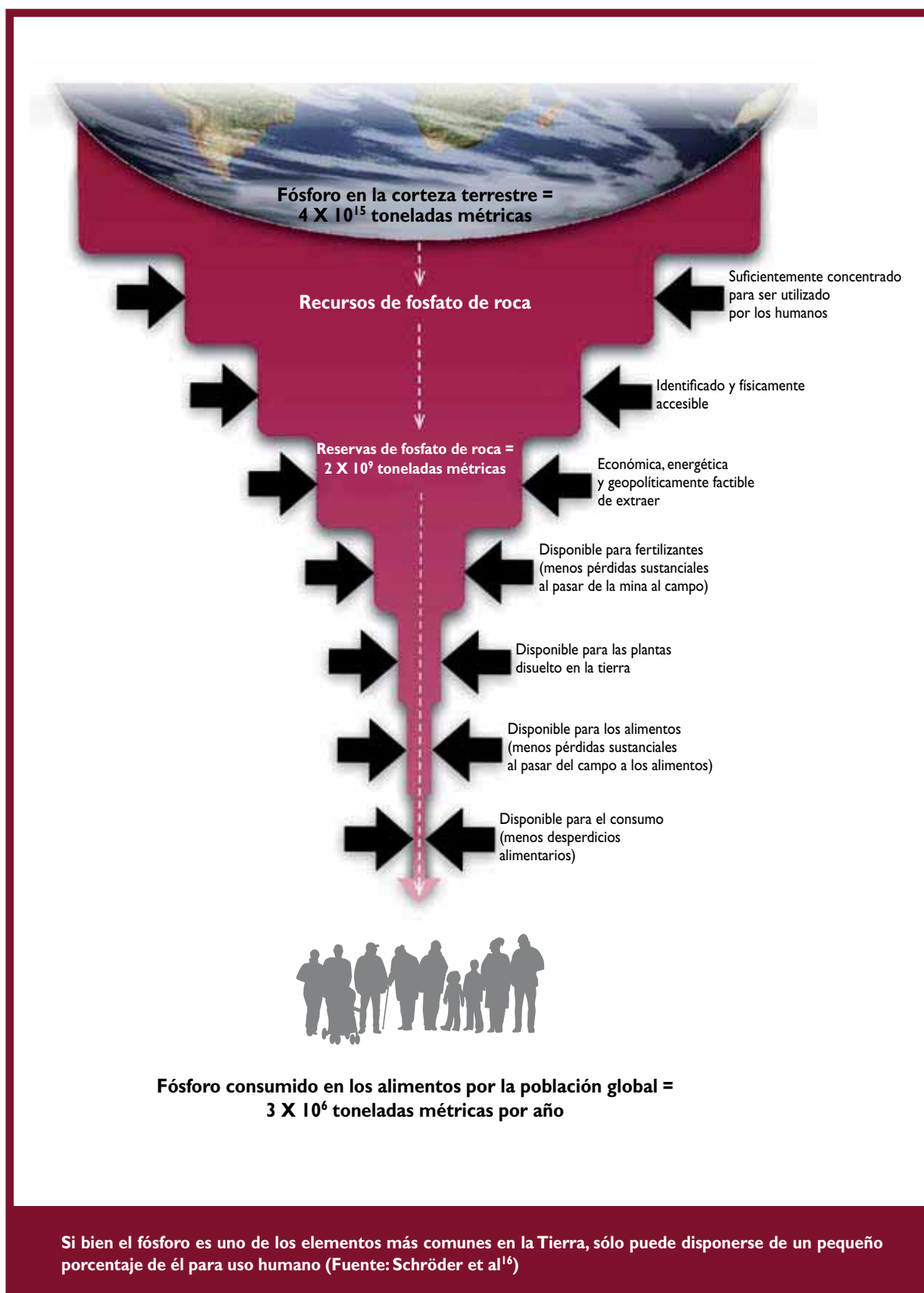
“La administración de nuestros depósitos de fosfato debería ser considerada un asunto de interés nacional”, señaló. “La situación parece ofrecer a esta nación una oportunidad de ejercer la previsión en el uso de un gran recurso nacional casi ignorado hasta ahora en nuestros planes para el desarrollo de la nación”.¹

A pesar del llamado de Roosevelt, no se formuló ninguna política de fosfatos. A más de siete décadas, la frase “casi ignorado hasta ahora” se sigue repitiendo en muchas discusiones en torno al tema del fósforo. Mientras tanto, la importancia de los fosfatos es aún mayor hoy en día que en los años 1930. El fosfato de roca se ha convertido en una mercancía sujeta al comercio global y a una serie de debates con carga política, cuyos temas van desde la degradación del medio ambiente y las amenazas a la salud humana hasta la seguridad alimentaria y la soberanía agrícola.

“El cuello de botella de la vida”

El fósforo, uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre,² fue llamado “el cuello de botella de la vida” por el escritor científico Isaac Asimov. “La vida puede multiplicarse hasta que se acabe todo el fósforo; después hay un alto inexorable que nada puede evitar”, escribió. “Acaso podamos reemplazar el carbón con energía nuclear, la madera con plásticos, la carne con levaduras y el aislamiento con la amabilidad; pero no hay sustituto ni reemplazo alguno para el fósforo”.³

* Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, volumen 119, número 5, mayo 2011, páginas A208-A213.



Asimov señaló que la alfalfa puede prosperar en un suelo que contenga 0.1% de fósforo, mientras que la estructura de la planta contiene 0.7% de fósforo. Esta necesidad estequiométrica de fósforo lo convierte en un elemento irremplazable que rige el crecimiento de las plantas. No hay ningún insumo, natural o sintético, capaz de ocupar el lugar del fósforo.

Si bien el fósforo fue identificado químicamente hace apenas unos siglos, se lo ha empleado a lo largo de la historia de la agricultura en los residuos agrícolas y en el estiércol que se esparce los campos. Esta práctica tradicional sigue en vigor, pero la explotación minera del fósforo en el siglo XX contribuyó a elevar de manera constante los rendimientos agrícolas. Los fertilizantes con alto contenido de fósforo, nitrógeno y potasio elevaron el crecimiento de las plantas a niveles sin precedentes, sobre todo en los suelos tropicales más pobres en estos componentes.⁴

Desde mucho antes de la célebre Revolución Verde que comenzó en los años 1940 antes de volverse realmente popular en la década de 1960, los fertilizantes manufacturados estaban preparando a los agricultores para alimentar a más personas que nunca en el mundo. Los agoreros, según los cuales mil millones de personas a comienzos del siglo XX ya eran demasiadas, se habrían horrorizado de ver a más de 6 mil millones de seres humanos vivos y en su mayoría en buena salud a finales del milenio.

La producción agrícola ha aumentado no sólo a la par sino a un ritmo todavía mayor que la población. En 2010, año en que el conteo global de la población se cerró en siete mil millones de personas, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) reportó una disminución absoluta del número de personas desnutridas

en el mundo en relación con el año anterior, aunque la cifra de 925 millones sigue siendo alarmante.⁵

Rara vez se atribuye al fósforo esta disminución, pero este progreso sería impensable sin la drástica expansión de su uso en forma de fertilizantes a base de fosfatos.⁴ Como lo indicó el discurso de Roosevelt ante el Congreso, ya para 1930 la importancia de este recurso estaba comprobada. La producción actual de fosfato de roca es casi 13 veces mayor que la de entonces.⁶ No obstante, según Dana Cordell, principal investigadora del Instituto de Desarrollo Sostenible para el Futuro de la Universidad Tecnológica de Sydney y cofundadora de la Iniciativa Mundial de Investigación del Fósforo, las estimaciones de la cantidad que queda aún en la Tierra varían.

Cordell realizó uno de los intentos más resueltos⁷ de precisar esas cifras. A juzgar por su descripción, los investigadores de su campo consideran que el fósforo no es un oscuro cuello de botella bioquímico sino un agente que debiera ocupar un lugar central en muchas discusiones científicas y sobre políticas.

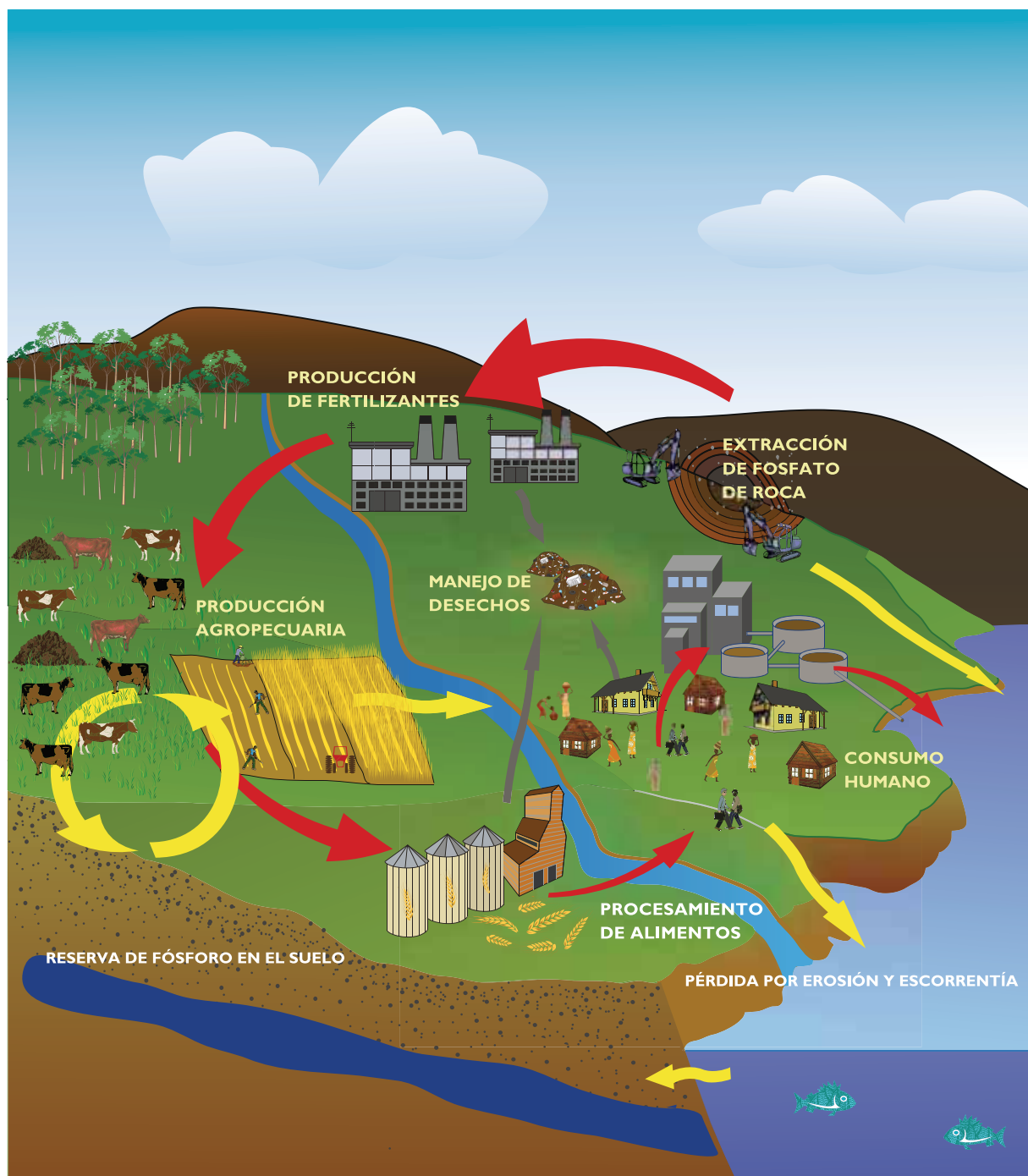
“El fósforo desempeña muchos papeles, deseables e indeseables, en la sociedad hoy en día”, escribió en 2010. “En cualquier momento dado, el fósforo desempeña diferentes funciones a escalas temporales y geográficas muy diferentes: transporta señales instantáneas al cerebro en el ATP químico o permanece inmóvil como una molécula de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ en la roca de fosfato rica en apatita que tardó decenas de millones de años en formarse, en espera de ser extraído; es absorbido por las raíces de las plantas mediante difusión química, o bien, eliminado por nuestro organismo en una momentánea gota de orina antes de diluirse en un aluvión de agua del inodoro para reunirse con otras aguas residuales domésticas e industriales en una planta de tratamiento lejana.

Así, contamina los cuerpos de agua en forma de cianobacterias, o simplemente circula de manera natural entre la tierra, la biota y el agua sin ser advertida por la mayor parte de la sociedad”.⁸

Sobreabundancia de algo bueno

Pese a sus virtudes como sustancia esencial para la vida, el fósforo también se ha granjeado una reputación como contaminante. En las áreas rurales fluye regularmente hacia las aguas receptoras como producto de la escorrentía de los campos de cultivo,⁹ y en las áreas urbanas viaja por los sistemas de drenaje, como un componente importante del excremento humano que se descarga de los inodoros. En cualquiera de estos casos, el fósforo puede incrementar excesivamente los niveles locales de los nutrientes, provocando la reproducción rápida de algas en los lagos y ríos donde se concentra, un proceso llamado eutroficación.¹⁰

Este crecimiento excesivo de las algas puede llegar a reducir los niveles de oxígeno en el agua al grado de impedir la supervivencia de algunas especies de peces. El lago Erie se vio afectado por esta situación en los años setenta, lo cual atrajo la atención de David Schindler, biólogo de la Universidad de Alberta. Utilizando un pequeño lago de prueba dividido en dos partes por una cortina sumergida en el norte de Ontario, este científico demostró que los detergentes a base de fosfatos que surgían de las corrientes de aguas residuales municipales eran uno de los principales factores causantes del problema del lago Erie.¹¹ Acto seguido, se persuadió a los fabricantes de detergentes a limitar drásticamente la cantidad de fosfatos en sus productos, lo que redujo sustancialmente la eutroficación en el lago.¹²



Las flechas rojas muestran la principal dirección de los flujos de fósforo. Las flechas amarillas muestran el reciclaje del fósforo en el suelo y las cosechas y su movimiento hacia los cuerpos de agua. Las flechas grises muestran la pérdida de fósforo a través de los desperdicios alimentarios en los tiraderos de basura. (Fuente: UNEP³²)

A partir de entonces, Schindler ha continuado estudiando el reto constante que representa la sobrecarga de nutrientes para los ambientes acuáticos y para la salud humana. Él y su coautor Val Smith escribieron en 2009: “Es claro que las actividades de desecho de residuos biológicos como la aplicación de estiércol a las tierras de cultivo puede incrementar al mismo tiempo la carga de fósforo, de nitrógeno y de bacterias coliformes potencialmente peligrosas en las aguas superficiales”.¹³ “Sin embargo, la carga de nutrientes incrementada podría influir por sí sola en la abundancia, composición, virulencia y supervivencia de los organismos patógenos que ya viven en los ecosistemas acuáticos”.

Según el Comité Internacional de Ambientes Lacustres (en inglés, ILEC), organización no gubernamental japonesa que desde 1986 ha estado examinando la salubridad de 217 cuerpos de agua dulce, el lago Erie no es el único que enfrenta este reto bioquímico. En cinco publicaciones que salieron a la luz entre 1988 y 1994 el ILEC informó acerca de los lagos que presentaban el mismo problema en diversas partes del mundo en la segunda mitad del siglo XX. Mientras que la acción local finalmente llegó a reducir los niveles del insumo en 66 de esos lagos, los datos actuales¹⁴ indican que todos ellos mantienen niveles de nutrientes muy superiores a los de hace algunas décadas.

El impacto de este cambio va mucho más allá de lo estético. Una reseña publicada en 2009 en la revista *Environmental Science & Technology* evaluó la eutroficación en Estados Unidos en un mínimo de 2 200 millones de dólares.¹⁵ Un gran porcentaje de esta suma corresponde a propiedades ribereñas en peligro y a pérdidas de oportunidades recreativas. Al mismo tiempo, los investigadores tasaron en 813 millones de dólares la demanda de agua para beber que se

creó debido al sabor y olor inaceptables de las aguas eutrofizadas. “Esta estimación se basa únicamente en los costos del agua embotellada y no toma en cuenta costos adicionales relacionados con tratamientos alternativos, tales como la perforación de pozos o el acarreo de agua de otros lugares”, afirmaron Walter K. Dodd y sus colegas, con base en un estudio de 241 plantas de agua potable.

Por lo que se refiere a otros costos relacionados con la salud, los autores afirman: “Las floraciones de algas provocan enfermedades a los humanos, y rara vez les causan la muerte. No incluimos los costos en salud humana porque parecen ser menores en comparación con otros factores que investigamos. Aun así, es probable que se tienda a invertir sumas considerables para evitar las floraciones tóxicas”.¹⁵

Incluso en su aplicación benéfica como fertilizante, el fósforo puede imponer un costo en salud humana. Por ejemplo, dependiendo de su ubicación, los depósitos de rocas de fosfato pueden coexistir con cantidades variables de metales pesados. Un informe comisionado en 2010 por la Dirección General del Medio Ambiente de la Unión Europea y realizado en colaboración con la Universidad de Wageningen y el Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo expresa una preocupación inmediata en relación con el cadmio,¹⁶ cuyas propiedades tóxicas para riñones, huesos y pulmones está comprobada, y que se encuentra naturalmente en los depósitos de roca de fosfato.¹⁷ Se considera que los fertilizantes a base de fosfatos son la principal fuente de cadmio en los suelos agrícolas.¹⁸

La cantidad particular de cadmio que se encuentra en un determinado depósito de fosfato puede variar de una parte del mundo a otra. Por ejemplo, en la geología ígnea de Sudáfrica puede haber sólo 0.04-4.0 mg de cad-

mio por cada kilogramo de fósforo, mientras que en las capas sedimentarias del Senegal la proporción asciende a 71-148 mg/kg.¹⁶

El informe de la Dirección General acepta una conclusión de la Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes en el sentido de que la lenta acumulación de cadmio en los suelos agrícolas de todo el mundo no ha producido concentraciones lo suficientemente elevadas como para que se requiera actuar.¹⁹ Esta conclusión se vio reforzada después por un estudio de campo de los índices de transferencia de cadmio de los fertilizantes a las lechugas que se cultivan en ese suelo. Dicho estudio, que cubrió un periodo de dos años, se publicó en 2004 en la revista *Water, Air and Soil Pollution*, en dos partes.^{20,21} Esta investigación reveló que a la larga el uso del superfosfato triple reducía de hecho la eficiencia de la transferencia de cadmio al suelo.

No obstante, un estudio similar de los índices de transferencia en las papas, publicado un año antes en la misma revista, advertía contra el uso agresivo de fertilizantes ricos en fosfatos. Emine Erman Kara y sus colegas escribieron: “Se encontró que debía evitarse el cultivo de las papas en las zonas con niveles elevados de metales pesados debido a que las papas tienden a acumular cantidades notablemente mayores de éstos que otras plantas”. Añaden: “Se observó la necesidad de tratar los suelos ácidos con cal a fin de lentificar la captación de metales pesados por las plantas a través del suelo”. Además, este tratamiento “podría evitar la contaminación de las aguas subterráneas de la región con metales pesados, especialmente en las zonas ácidas”.²²

El informe de 2010 de la Dirección General cita asimismo un informe del año 2000 a la Comisión Europea, en el que se sugiere que los niveles de cadmio de los fertilizantes podrían justificar regulaciones que

obliguen a someter a los fosfatos de los fertilizantes utilizados en la UE a un tratamiento capaz de eliminar prácticamente todo residuo de cadmio.²³ Este proceso, que emplea calor para eliminar dicho metal, es factible pero costoso.^{24,25} Por ello, la producción de un fertilizante menos dañino para la salud podría limitar el acceso a los fertilizantes esenciales para aquellos agricultores que no cuenten con medios para adquirirlos.²⁶

Escasez de algo bueno

La falta de acceso a los fertilizantes ya es una realidad para los agricultores de los países que no cuentan con recursos considerables de fosfatos. Esto apunta a dos problemas relacionados entre sí, según señala Cordell. Primeramente, los agricultores pobres que cultivan en suelos deficientes en fósforo no tienen acceso a los mercados de fertilizantes, sobre todo en el África subsahariana. Y en segundo lugar, sólo unos cuantos países controlan las reservas de fosfatos restantes, lo que hace que cualquier país que dependa de las importaciones sea vulnerable a la volatilidad de los precios y de la disponibilidad.⁷

Estos países son numerosos debido a que, según se cree, los depósitos más grandes de este material son relativamente pocos. Una estimación del Estudio Geológico de Estados Unidos (en inglés, USGS)²⁷ realizado en 2010 identificó plenamente que 93% de las reservas mundiales de fosfato se encuentra en sólo seis países: Marruecos, China, Argelia, Siria, Sudáfrica y Jordania. Más de 83% del total se halla exclusivamente en Marruecos.

De acuerdo con una estimación más reciente del Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (en inglés, IFDC), basada en un análisis de la literatura, el total mundial ascendía a más del triple de la cantidad sugerida por el USGS.²⁸

La mayor parte de este incremento corresponde a reservas ubicadas en Marruecos, país que contiene 85% del total global. Steven van Kauwenbergh, autor del informe del IFDC, reconoció la sustancial disparidad entre estas dos estimaciones, así como la falta de datos confiables y públicamente disponibles. Por este motivo hizo un llamado a adoptar un enfoque mucho más exhaustivo del tema y convocó la participación de un contingente de observadores que no solamente incluya a miembros de la industria de los fosfatos.

“Se requerirá un esfuerzo conjunto de productores de fosfato de roca, agencias del gobierno, organizaciones internacionales y académicos para realizar un cálculo más definitivo de los recursos mundiales de fosfatos”, según argumentó en el informe.²⁸ Van Kauwenbergh insistió además en que, pese a las limitaciones de los datos presentados en el mismo, el ritmo actual de producción de fertilizantes podría sostenerse durante varios siglos.

Sin embargo, esta predicción no satisfizo a todos. En una crítica al informe del IFDC publicada en abril de 2011, Cordell y sus colegas cuestionaban los supuestos de que se tiene acceso a 100% de la reserva y de que el consumo no se incrementará. Escribieron además: “Existe un consenso en cuanto a que las concentraciones de fósforo en las reservas de fosfato restantes en el mundo están disminuyendo mientras que las impurezas están aumentando, y a que el acceso físico a ellas es cada vez más difícil. Mientras tanto, la extracción y el procesamiento de los fosfatos tienen un costo creciente e incrementan cada vez más la contaminación y los desechos, y al mismo tiempo se requiere de cada vez más energía para obtener los nutrientes que contienen”.²⁹

James Elser, quien inició su carrera estudiando la vida acuática, ha

mostrado un vivo interés en el modo en que la energía y determinadas sustancias químicas se mueven en el medio ambiente. El fósforo ocupa ahora un lugar importante en su trabajo integrador sobre la estequiometría biológica, por lo cual Elser se está enfocando en las alteraciones que nuestro uso desmedido de este elemento han provocado en su flujo natural en el medio ambiente.

Elser y algunos de sus colegas de la Universidad Estatal de Arizona fundaron la Iniciativa de Investigación sobre la Sustentabilidad del Fósforo con objeto de crear conciencia de las preguntas que se plantean en torno a las reservas de esta sustancia de consumo básico. En febrero de 2011 sus esfuerzos dieron lugar a la Cumbre de Fósforo Sostenible,³⁰ una reunión de tres días a la que acudieron más de 100 científicos, ingenieros, agricultores y empresarios.

“La Cumbre se distinguió por su enfoque participativo, interdisciplinario y creativo, que permitió a participantes con formación en diferentes campos compartir sus diversos conocimientos y perspectivas sobre el reto que representa el fósforo a nivel global”, señaló Cordell, quien habló en el evento. “Estuvo muy enfocado en las soluciones, y de ella se derivaron varias estrategias para avanzar de manera conjunta hacia una situación más sustentable”.

Entre estas estrategias se incluye la minimización de la cantidad de fósforo que se utiliza en la agricultura, recuperando todo residuo líquido antes de que llegue al medio ambiente e incluso reciclandolo para su utilización en el futuro.³¹ Elser añadió que urge buscar una mayor coordinación en el manejo del fósforo. “Actualmente el ciclo del fósforo se encuentra bajo nuestra responsabilidad”, señaló. “Los flujos que generamos son mayores que los flujos naturales. Esta no es

una manera adecuada de administrar un ciclo biogeoquímico”.

Tim Lougheed,

ha trabajado como escritor independiente en Ottawa, Canadá, desde 1991. Fue presidente de la Asociación Canadiense de Escritores Científicos, y aborda una amplia gama de temas de ciencia, tecnología, medicina y educación.

Referencias y notas

1. Wooley JT, Peters G. The American Presidency Project [página web]. Franklin D. Roosevelt. XXXII President of the United States: 1933–1945. 64—Message to Congress on Phosphates for Soil Fertility. 20 de mayo de 1938. Santa Bárbara, CA: The American Presidency Project (1999–2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/3tftvkj> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
2. Suess HE, Urey HC. Abundances of the elements. *Rev Modern Phys* 28(1):53–74 (1956); doi:10.1103/RevModPhys.28.53.
3. Asimov I. *Asimov on Chemistry*. Garden City, NY: Doubleday (1974).
4. Smil V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annu Rev Energy Environ* 25:53–88 (2000); doi:10.1146/annurev.energy.25.1.53.
5. FAO. Global Hunger Declining, but Still Unacceptably High: International Hunger Targets Difficult to Reach. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (septiembre de 2010). Disponible en: <http://tinyurl.com/3bypmlv> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
6. Buckingham DA, Jasinski SM. Phosphate Rock Statistics. En: *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States*, Data Series 140 (Kelly TD, Matos GR, comps.). Washington, DC: Estudio Geológico de EE. UU. (actualizado el 19 de octubre de 2010). Disponible en: <http://tinyurl.com/3ccm3ka> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
7. Cordell D, et al. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ Change* 19(2):292–305 (2009); doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
8. Cordell D. The story of phosphorus: sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security [tesis doctoral]. Linköping, Sweden: Linköping University (2010). Disponible en: <http://tinyurl.com/3fm7gix> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
9. Según Cordell, la pérdida de fósforo de los campos de cultivo podría deberse a las
- escorrentías de fertilizantes y al incremento de la erosión de los suelos no fertilizados que contienen fósforo naturalmente.
10. Smil V. Phosphorus: Global Transfers (Douglas I, comp.). En: *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Vol. 3, Causes and Consequences of Global Environmental Change, pp. 536–542. Chichester, UK: John Wiley & Sons (2002). Disponible en: <http://tinyurl.com/5u4fy7k> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
11. Schindler DW. Eutrophication and recovery in Experimental Lakes: implications for lake management. *Science* 184(4139):897–899 (1974); doi:10.1126/science.184.4139.897.
12. Schindler DW. A personal history of the Experimental Lakes Project. *Can J Fish Aquat Sci* 66(11):1837–1847 (2009); doi:10.1139/F09-134.
13. Smith V, Schindler D. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol Evol* 24(4):201–2007 (2009); doi:10.1016/j.tree.2008.11.009.
14. ILEC. Survey of the State of World Lakes. Kusatsu-shi, Shiga, Japón: Comité Internacional de Ambientes Lacustres. Disponible en: <http://tinyurl.com/3k2tksc> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
15. Dodds WK, et al. Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environ Sci Technol* 43(1):12–19 (2009); doi:10.1021/es801217q.
16. Schröder JJ, et al. Sustainable Use of Phosphorus. Informe 357. Wageningen, Países Bajos: Plant Research International [Investigación Internacional de Plantas], Universidad y Centro de Investigación de Wageningen (octubre de 2010). Disponible en: <http://tinyurl.com/3wyygys> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
17. Nordberg GF, et al., comps. *Handbook on the Toxicology of Metals*. Tercera edición. Salt Lake City, UT: Academic Press (2007).
18. Alloway BJ, comp. *Heavy Metals in Soils*. 2a ed. Londres, RU: Blackie Academic & Professional (1994).
19. Isherwood KF. *Mineral Fertilizer Use and the Environment*. París, Francia: Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (revisado en febrero de 2000). Disponible en: <http://tinyurl.com/43zq2p4> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
20. Huang B, et al. Cadmium uptake by lettuce from soil amended with phosphorus and trace element fertilizers. *Water Air Soil Pollut* 147(1-4):109–127 (2003); doi:10.1023/A:1024558228180.
21. Huang B, et al. Availability of cadmium in some phosphorus fertilizers to field grown lettuce. *Water Air Soil Pollut* 158(1):37–51 (2004); doi:10.1023/B:WATE.0000044832.04770.41.
22. Kara EE, et al. Evaluation of heavy metals' (Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn) distribution in sowing regions of potato fields in the province of Nigde, Turkey. *Water Air Soil Pollut* 153(1-4):173–186 (2004); doi:10.1023/B:WATE.0000019942.37633.31.
23. Oosterhuis FH, et al. A Possible EU Wide Charge on Cadmium in Phosphate Fertilisers: Economic and Environmental Implications. Informe Definitivo a la Comisión Europea. Informe #E-00/02. Ámsterdam, Países Bajos: Instituto de Estudios Ambientales, Vrije Universiteit (2000). Disponible en: <http://tinyurl.com/3n8q9kp> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
24. Lin JJ, Schorr MA. A challenge for the phosphate industry: Cd removal. *Phosphor Potassium* 208:27–32 (1997).
25. OECD. Risk Reduction Monograph No. 5: Cadmium—Background and National Experience with Reducing Risk. OECD Environment Monograph Series No. 104. París, Francia: Dirección del Medio Ambiente, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (1994). Disponible en: <http://tinyurl.com/3jfq8hq> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
26. Wanzala M, Roy A. The Africa Fertilizer Summit and Follow-Up. Preparado para el 13a Conferencia Internacional anual sobre el uso de fertilizantes, 6–8 de febrero de 2007, Sharm El-Sheikh, Egypt. Muscle Shoals, AL: Centro Internacional de Fertilidad de la Tierra y Desarrollo Agrícola (diciembre de 2006). Disponible en: <http://tinyurl.com/3lcfmnmz> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
27. Jasinski SM. Phosphate Rock. En: *Mineral Commodity Summaries*, January 2011. Washington, DC: U.S. Geological Survey (2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/4x2fapq> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
28. van Kauwenbergh S. *World Phosphate Rock Reserves and Resources*. Washington, DC and Muscle Shoals, AL: Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (2010).
29. Cordell D, et al. Peak phosphorus: the crunch time for humanity? *Sustainability Rev* 2(2): publicado únicamente en línea (2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/69q3g7f> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
30. Sustainable Phosphorus Summit, Featured Speakers [página web]. Tempe, AZ: School of Life Sciences, Universidad del Estado de Arizona. Disponible en: <http://tinyurl.com/3w4jc75> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].
31. Un número próximo de EHP incluirá un artículo sobre este tema.
32. UNEP. *UNEP Year Book 2011: Emerging Issues in Our Global Environment*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/3t9juxo> [consulta realizada el 13 de abril de 2011].

Bacteria intestinal del mosquito puede frenar el desarrollo del parásito de la malaria*

Antes de que el *Plasmodium falciparum*, el principal parásito causante de la malaria humana, pueda infectar a las personas, debe infectar a un mosquito que le sirve de huésped. Sin embargo, según un equipo de investigadores de la Escuela Bloomberg de Salud Pública de la Universidad Johns Hopkins y el Instituto de Investigación de la Malaria en Macha, Zambia, esto no siempre le resulta fácil. Dicho equipo informa que una bacteria que se encuentra de manera natural en los mosquitos produce una molécula de corta vida que puede matar al parásito *P. falciparum* en las primeras etapas de vida.¹ “Estas bacterias podrían utilizarse para desarrollar una estrategia de biocontrol” a fin de combatir la malaria, dice el autor principal George Dimopoulos, profesor adjunto del Departamento de Microbiología Molecular e Inmunología de la Universidad Johns Hopkins.

Dimopoulos y sus colegas aislaron bacterias del intestino medio de mosquitos *Anopheles arabiensis* recolectados en Zambia. Posteriormente, alimentaron a especímenes de los principales mosquitos transmisores de la malaria en África (*An. gambiae*) y Asia (*An. stephensi*) con estas bacterias. Observaron que ciertas bacterias gram-negativas inhibían el desarrollo temprano del *P. falciparum* en estos mosquitos. Un miembro recién descubierto del género *Enterobacter*, *Esp_Z*, inhibió casi por completo el desarrollo *in vitro* de los oocinetos, ooquistes y esporozoítos del *P. falciparum*.

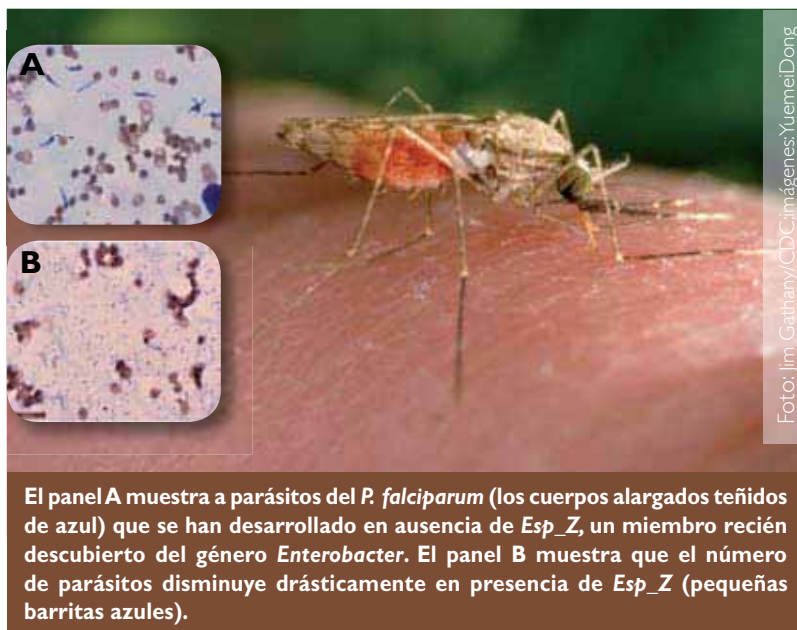


Foto: Jim Gathany/CDC; imágenes: Yuemei Dong

El panel A muestra a parásitos del *P. falciparum* (los cuerpos alargados teñidos de azul) que se han desarrollado en ausencia de *Esp_Z*, un miembro recién descubierto del género *Enterobacter*. El panel B muestra que el número de parásitos disminuye drásticamente en presencia de *Esp_Z* (pequeñas barritas azules).

Otro estudio indicó que la eficacia de la bacteria era resultado de su producción de especies reactivas de oxígeno de las cuales se sabía ya que matan el *P. falciparum*. El estudio fue financiado en parte por el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas.

John Beier, un profesor de epidemiología y salud pública de la Universidad de Miami que no participó en la investigación considera que este hallazgo es “un descubrimiento significativo”. Beier opina que el hecho de poder suministrar esta bacteria a los mosquitos puede reducir el índice de transmisión de malaria a los seres humanos. Las estrategias actuales para combatir la malaria, entre las que se incluye

el uso de mosquiteros tratados con insecticida, el rociado de insecticidas en los interiores y los esfuerzos por eliminar los criaderos de los mosquitos, como el agua estancada, son insuficientes, señala Beier, para erradicar la enfermedad. Según las cifras más recientes de que se dispone, la Organización Mundial de la Salud reportó 247 millones de casos de malaria en 2008 y casi 1 millón de muertes, principalmente de niños en África.²

Dimopoulos señala que un método potencial de utilización de estas bacterias para combatir la malaria sería capitalizar el hambre de azúcar de los mosquitos. Mientras que las hembras requieren de la sangre únicamente para el desarrollo de

*Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, volumen 119, número 8, agosto de 2011, página A337.

los huevos, tanto las hembras como los machos necesitan alimentarse diariamente de azúcar; su alimento preferido es el néctar de las plantas. “Podríamos mezclar las bacterias con un néctar artificial y rociarlo sobre la vegetación”, dice Dimopoulos, “o bien, podríamos desarrollar “estaciones de alimentación” para atraer a los mosquitos, para que se alimenten allí de néctar y al mismo tiempo recojan las bacterias”.

Se están probando técnicas similares en otros países. En Mali, los investigadores reportaron que la aspersión de un cebo de jugo de fruta fermentado y mezclado con ácido bórico sobre las plantas redujo la población del *An. gambiae* en 90% en uno de los sitios del estudio.³ Por otra parte, un estudio realizado en Israel demostró que cuando se roció el agua azucarada fortalecida con el insecticida spinosad sobre los árboles frutales de los que los mosquitos solían alimentarse, prácticamente se erradicó la población de éstos.^{4,5}

Beier señala que se requiere de más investigación para comprender el comportamiento alimentario, a

base de azúcar, de los mosquitos en su estado natural, fenómeno que él mismo está estudiando. Añade que debe realizarse un esfuerzo para encontrar otras bacterias inhibidoras como las que fueron identificadas por Dimopoulos. “Me parece que es necesario demostrar cómo funcionarían estas bacterias en múltiples especies de mosquitos. Dondequiera que hay transmisión de la malaria, están presentes varias especies distintas de vectores competentes”, dice.

Dimopoulos y sus colegas reportaron haber encontrado el *Esp_Z* únicamente en 25% de los mosquitos de la muestra. Afirma que esto puede ser un reflejo de lo caprichoso del muestreo, o que quizá no todos los mosquitos están expuestos a la bacteria, o bien, que la bacteria puede tener dificultad para colonizar el intestino del mosquito. Él y sus colegas están trabajando para ayudar a la bacteria a establecerse mejor en el interior de éste. “Por medio de múltiples rondas de selección es posible adaptar la bacteria para que logre una mejor colonización del mosquito”, señala Dimopoulos.

Harvey Black, de Madison, WI, ha escrito para *EHP* desde 1994. Ha publicado asimismo en las revistas *Environmental Science & Technology*, *Chem-Matters* y *Milwaukee Journal Sentinel*.

Referencias y notas

1. Cirimotich CM, et al. Natural microbe-mediated refractoriness to *Plasmodium* infection in *Anopheles gambiae*. *Science* 332(6031):855–858 (2011); <http://dx.doi.org/10.1126/science.1201618>.
2. OMS. World Health Organization Media Centre Malaria Fact Sheet. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud (abril de 2010). Disponible en: <http://tinyurl.com/yolhob> [consulta realizada el 27 de junio de 2011].
3. Muller GC, et al. Successful field trial of attractive toxic sugar bait (ATSB) plant-spraying methods against malaria vectors in the *Anopheles gambiae* complex in Mali, West Africa. *Malaria J* 9:210 (2010); <http://dx.doi.org/10.1186/1475-2875-9-210>.
4. Muller G, Schlein Y. Sugar questing mosquitoes in arid areas gather on scarce blossoms that can be used for control. *Int J Parasitol* 36(10–11):1077–1180 (2006); <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpara.2006.06.008>.
5. Los autores observaron que al parecer otros insectos examinados en el estudio ingirieron spinosad, pero no hicieron ningún comentario sobre el modo en que se vieron afectados estos insectos.

La calidad del aire en los espacios interiores

El impacto del cambio climático en el medio ambiente de los espacios interiores*

Durante muchos años los investigadores han estado conscientes de los vínculos potenciales entre el cambio climático y la calidad del aire en los espacios exteriores.¹ Son muchos menos los estudios que se han enfocado en el

impacto del cambio climático en la calidad del aire en los espacios interiores. Sin embargo, un informe reciente del Instituto de Medicina (en inglés, IOM) concluye que la relación entre ambos amerita más atención y más acciones.²

“No hay muchas investigaciones sobre este tema, y se requiere de evidencias contundentes”, dice John Spengler, científico ambiental de la Escuela de Salud Pública de Harvard, quien presidió el comité encargado de redactar el informe. “Este informe

*Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, volumen 119, número 9, septiembre de 2011, página A382.

identifica la calidad del aire en los espacios interiores como una prioridad que merece ocupar un lugar importante en las investigaciones y políticas sobre el cambio climático”.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos pidió al IOM que investigara esta cuestión de manera independiente. “La mayoría de las personas pasan casi todo su tiempo en espacios interiores, de modo que es lógico que experimenten el cambio climático desde una perspectiva habitacional”, señala Patricia Butterfield, decana del Colegio de Enfermería de la Universidad Estatal de Washington, quien realizó la revisión del informe. El comité del IOM describe los cambios que podrían derivarse de los esfuerzos para mitigar o adaptar las construcciones residenciales y comerciales al cambio climático.

Con frecuencia los planes para mitigar el cambio climático que proponen reducir las emisiones de dióxido de carbono plantean como meta reducir la cantidad de energía

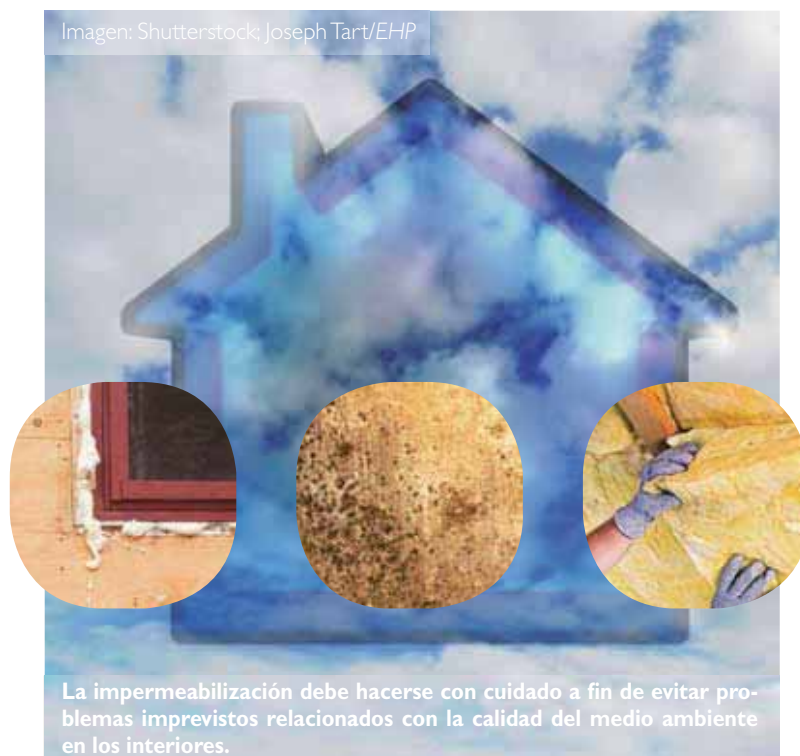
que se requiere para mantener un ambiente cómodo en los espacios interiores. Esto se debe a que la combustión para la producción de electricidad es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono en Estados Unidos.³ Sin embargo, según este informe, la climatización de las construcciones para lograr un consumo de energía más eficiente podría dar lugar a nuevos problemas en los interiores, o bien, empeorar las condiciones existentes. Por ejemplo, el hecho de enmasillar y sellar las fugas en los edificios puede alterar el flujo del aire y concentrar los contaminantes propios de los interiores, como el humo de tabaco, el radón y las emisiones químicas de los materiales de construcción.⁴ Y la humedad atrapada puede estimular el crecimiento de bacterias y moho.⁵

Las inclemencias climáticas presentan otra posibilidad de sufrir daños en los interiores. Por ejemplo, dice Butterfield, es posible que se inunden los sótanos de los hogares o que surja moho en los desvanes

cuando se intensifican las lluvias. Asimismo, se ha atribuido un incremento de los casos de envenenamiento por monóxido de carbono después de los huracanes al uso inadecuado de generadores portátiles que funcionan con gasolina, los cuales emiten niveles elevados de dióxido de carbono.⁶ Cuando se hace un uso adecuado de estos generadores con una buena ventilación, no causan problemas. Sin embargo, cuando se los utiliza de manera inadecuada, cerca o dentro de los hogares, es común que las personas vayan a dar a las salas de urgencias de los hospitales o incluso mueran. “Este es un buen ejemplo de la interacción que experimentaremos a medida que nos adaptemos al cambio climático”, señala Spengler. Añade que pueden introducirse en el mercado nuevos materiales y técnicas de climatización sin una previa evaluación de sus implicaciones para la salud. “Inventaremos todo tipo de cosas a medida que vayamos realizando adaptaciones para mitigar el cambio climático”, explica.

Los autores del informe señalan que se requiere de una “inversión inicial” que tome en cuenta las consecuencias potenciales de las acciones de adaptación de las viviendas a fin de evitar problemas y prevenir los costos de la atención médica y la pérdida de productividad de sus ocupantes. Esta inversión podría implicar una investigación que combine datos de las dependencias del gobierno para comprender de qué manera afecta el cambio climático a la salud ambiental, implementando programas para certificar productos como útiles o no tóxicos y capacitar a los trabajadores para que instalen adecuadamente los productos de probada eficacia. Ya existen modelos para garantizar la seguridad de los materiales de construcción en los programas del Consejo para la Construcción Ecológica de EUA y Labs21.⁷

El informe insta a las dependencias del gobierno a cooperar en



la investigación del problema y a buscar soluciones. Varias de estas dependencias ya están reuniendo extensos conjuntos de datos, por ejemplo, mediante las encuestas sobre el consumo residencial de energía que lleva a cabo el Departamento de Energía⁸ y la Encuesta Nacional de Altas Hospitalarias realizada por el Centro Nacional de Estadísticas de Salud de los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades.⁹ La combinación de estos datos puede ser útil para responder interrogantes sobre el modo en que el cambio climático afecta a la salud en los espacios interiores.

La identificación de los problemas complejos en materia de salud pública derivados de la relación entre el cambio climático y los ambientes en los espacios interiores puede conducir a decisiones acertadas en materia de políticas que podrían salvar vidas, comenta Butterfield. “El informe del IOM establece una conexión entre el cambio climático global y los climas extremos y el comportamiento de las personas al intentar adaptarse a ellos”, dice. “Por desgracia, muchas personas vivirán el cambio climático como un desastre natural, por ejemplo, una inundación

o un huracán. Necesitamos relacionar el cambio climático global con el medio ambiente en los espacios interiores para poder proporcionarles una orientación seria”.

Carol Potera, radicada en Montana, ha escrito para *EHP* desde 1996. Escribe también para *Microbe*, *Genetic Engineering News* y *American Journal of Nursing*.

Referencias y notas

1. Penner JE, et al. Climate Change and Its Interactions with Air Chemistry: Perspectives and Research Needs. Project Summary. Washington, DC: Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., Laboratorio de Investigaciones Ambientales y Evaluación de la Exposición (1989).
2. Committee on the Effect of Climate Change on Indoor Air Quality and Public Health, Institute of Medicine. Climate Change, the Indoor Environment, and Health. Washington, DC: The National Academies Press (2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/4xn4rhj> [consulta realizada el 8 de agosto de 2011].
3. EPA. 2011 U.S. Greenhouse Gas Emissions. Greenhouse Gas Inventory Report [website]. Washington, DC: Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (actualizado el 5 de agosto de 2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/coyr8r> [consulta realizada el 8 de agosto de 2011].
4. Letz GA. Sick building syndrome: acute illness among office workers—the role of building

ventilation, airborne contaminants and work stress. *Allergy Proc* 11(3):109-116 (1990); PMID:2196201.

5. Institute of Medicine, Committee on Damp Indoor Spaces and Health. Damp Indoor Spaces and Health. Washington, DC: National Academies Press (2004). Disponible en: <http://tinyurl.com/3mmnabz> [consulta realizada el 8 de agosto de 2011].

6. Centers for Disease Control and Prevention. Carbon monoxide poisoning after Hurricane Katrina—Alabama, Louisiana, and Mississippi, August–September 2005. *MMWR* 54(39):996–998 (2005); PMID:16208314.

7. La Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía fueron los primeros en patrocinar estas organizaciones, que actualmente operan de manera independiente. El Consejo de la Construcción Ecológica de EUA apoya a la industria de la construcción ecológica proporcionando materiales responsables, arquitectura sustentable y políticas públicas, y el programa Labs21 promueve el diseño de laboratorios con bajo consumo de energía.

8. EIA. Residential Energy Consumption Survey (RECS) [website]. Washington, DC: U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy (2009). Disponible en: <http://tinyurl.com/6xpex3c> [consulta realizada el 8 de agosto de 2011].

9. NCHS. National Hospital Discharge Survey [website]. Hyattsville, MD: Centro Nacional de Estadísticas de Salud, Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (actualizado el 21 de junio de 2011). Disponible en: <http://tinyurl.com/3prz22o> [consulta realizada el 8 de agosto de 2011].

Contaminación ambiental y salud infantil*

Los monitores domésticos establecen conexiones cardiorrespiratorias

Los niños son particularmente susceptibles a los efectos de la contaminación ambiental en la salud debido a que pasan más tiempo en espacios exteriores, tienen una mayor frecuencia respiratoria e inhalan un volumen mayor de aire en proporción con su peso corporal. Los bebés pueden ser especialmente

sensibles a los efectos de la contaminación ambiental porque sus sistemas inmune, respiratorio y nervioso central no están totalmente desarrollados. Hasta ahora se han estudiado mucho menos las respuestas de los bebés a la contaminación ambiental que las de los niños mayores. Un nuevo estudio establece un vínculo

entre la contaminación ambiental y un incremento del riesgo de apnea (pausas prolongadas en la respiración) y bradicardia (disminución del ritmo cardíaco) en los bebés con alto riesgo de presentar estos padecimientos [*EHP* 119(9):1321–1327; Peel *et al.*]. En el estudio participaron 4 277 bebés que residían en Atlanta y sus alrede-

*Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, volumen 119, número 9, septiembre de 2011, página A398.

Imagen: Joseph Tart/EHP



dores (un área de aproximadamente 200 km²) entre 1998 y 2002 y cuyos ritmos cardíacos y respiratorios se registraron por medio de monitores cardiorrespiratorios domésticos. La mayoría de los bebés sometidos a estos monitoreos habían presentado eventos de apnea relacionados con un nacimiento prematuro; otros bebés, incluyendo a algunos nacidos a término, padecían enfermedad por reflujo gastroesofágico. En una estación de seguimiento ubicada en una zona céntrica se midieron las concentraciones de ozono a nivel del suelo, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, mo-

nor al correspondiente a su edad o a su prematuridad). Se analizaron los vínculos entre estos eventos y los niveles promedio de contaminación ambiental registrados el día del evento y el día anterior.

Los investigadores encontraron asociaciones significativas entre la bradicardia y el incremento de los niveles de ozono tras 8 horas de exposición y de los niveles de dióxido de nitrógeno después de 1 hora. La relación entre el ozono y la apnea, aunque similar, no resultó ser estadísticamente significativa. En general se observaron vínculos

nóxico de carbono, hidrocarburos oxigenados y materia particulada.

Según el equipo de investigadores, los monitores registraron 8 960 eventos de apnea (en los cuales los bebés dejaron de respirar durante al menos 20 segundos) y 29 450 eventos de bradicardia (en los cuales el ritmo cardíaco de los bebés descendía a un valor me-

más fuertes en los bebés nacidos a término con un peso corporal normal en el momento de nacer que en los nacidos prematuramente con un peso corporal bajo; este es un hallazgo sorprendente, pero no carece de precedentes. También se halló una relación entre los eventos de apnea y las concentraciones de carbono orgánico en la materia particulada fina en los bebés nacidos a término con un peso corporal normal.

Estos hallazgos coinciden con los de estudios anteriores que vinculan la contaminación ambiental con síntomas respiratorios, con los ingresos hospitalarios por este motivo y con un incremento de la mortalidad infantil. No está claro cuáles son las causas de la apnea y la bradicardia; sin embargo, hay evidencias que permiten suponer que la inmadurez del control autónomo del sistema nervioso o del aparato respiratorio podría ocasionar una mayor vulnerabilidad a los efectos de la contaminación.

Kellyn S. Betts,

ha escrito durante una docena de años acerca de los contaminantes ambientales, los riesgos y la tecnología para resolver problemas ambientales, para publicaciones tales como *EHP* y *Environmental Science & Technology*.

Un repaso al humo de tercera mano*

Necesidades de investigación y recomendaciones

Durante los últimos 50 años los estudios han demostrado claramente que el tabaquismo está vinculado a efectos adversos para la salud tanto de los fumadores como de los individuos expuestos

al humo de segunda mano (HSM). Ahora se ha identificado un nuevo nivel de exposición: el humo de tercera mano (HTM), esto es, los contaminantes residuales del humo del tabaco que permanecen en las

superficies y en el polvo, se reemiten en la fase gaseosa e interactúan con otros compuestos. En un informe reciente, los investigadores ofrecen un análisis descriptivo de los componentes y la dinámica del HTM y

*Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, volumen 119, número 9, septiembre de 2011, página A399.

abogan por el establecimiento de un programa de investigación para llenar las lagunas en nuestra comprensión de la naturaleza y los efectos del HTM [EHP 119(9):1218–1226; Matt *et al.*]. La exposición al HTM es el resultado de la inhalación, ingestión o captación dérmica de los contaminantes del HTM en el aire, el polvo y otras superficies. Los autores señalan que el HTM y el HSM están estrechamente relacionados y de hecho coexisten, puesto que el HTM se genera en los ambientes en los que se fuma regularmente. Pero mientras que el HSM se elimina con la ventilación, los contaminantes del HTM pueden persistir en los ambientes durante varias horas o aun días después de que se ha fumado tabaco.

Los componentes del HTM, tales como la nicotina y los hidrocarburos aromáticos carcinogénicos policíclicos, incluyendo el benzopireno, son absorbidos y reemitidos desde las superficies interiores durante periodos variables después de que se han extinguido las fuentes de humo de tabaco. Algunos componentes del HTM reaccionan con otros compuestos del medio ambiente y producen contaminantes secundarios. Por ejemplo, las reacciones químicas entre la nicotina y el ácido nitroso conducen a la formación de otras nitrosaminas específicas del tabaco, y el ozono puede reaccionar con ciertos compuestos orgánicos volátiles, dando como resultado formaldehído, acetilaldehído y benzaldehído.



Foto: T. Hoenig/A.B./Media Bakery

El humo de tercera mano permanece después de que el humo de segunda mano se ha disipado y ha salido de la habitación.

Se han medido los componentes del HTM en espacios interiores meses después de que se fumó en ellos. La Dirección General de Salud Pública de EUA ha concluido que, al parecer, no existe ningún nivel de exposición al HSM que esté libre de riesgos; por ello es posible que la exposición al HTM sea nociva, particularmente para las poblaciones vulnerables, como los niños. Los investigadores recomiendan que los estudios futuros definan más claramente la química y la toxicología del HTM, lo cual ayudará a establecer, fomentar y hacer respetar políticas públicas y prácticas personales para limitar la exposición al humo de tabaco.

Los autores señalan que las políticas voluntarias públicas y privadas promulgadas en la última

década, incluyendo el incremento de espacios de trabajo, áreas públicas y alojamientos libres de humo, han hecho frente de manera eficaz a esta exposición al HTM en algunos entornos. Argumentan que pueden desarrollarse políticas de salud pública más firmes mediante un programa de investigación interdisciplinaria que combine la investigación básica y aplicada en materia de evaluación de riesgos con los estudios sobre el tabaquismo y su cese.

La Maestra **Tanya Tillett**, originaria de Durham, NC, forma parte del equipo de escritores de *EHP*. Ha sido parte del mismo desde el año 2000 y ha representado a *EHP* en congresos nacionales e internacionales.