



# OBSERVATORIO AMBIENTAL ARGENTINO



INFORME II

## El fósforo en riesgo de “extinción”

Sobre como un ciclo abierto de fósforo puede poner en riesgo la seguridad alimentaria



# AZARA

DESCUBRÍ TU ESPÍRITU EXPLORADOR

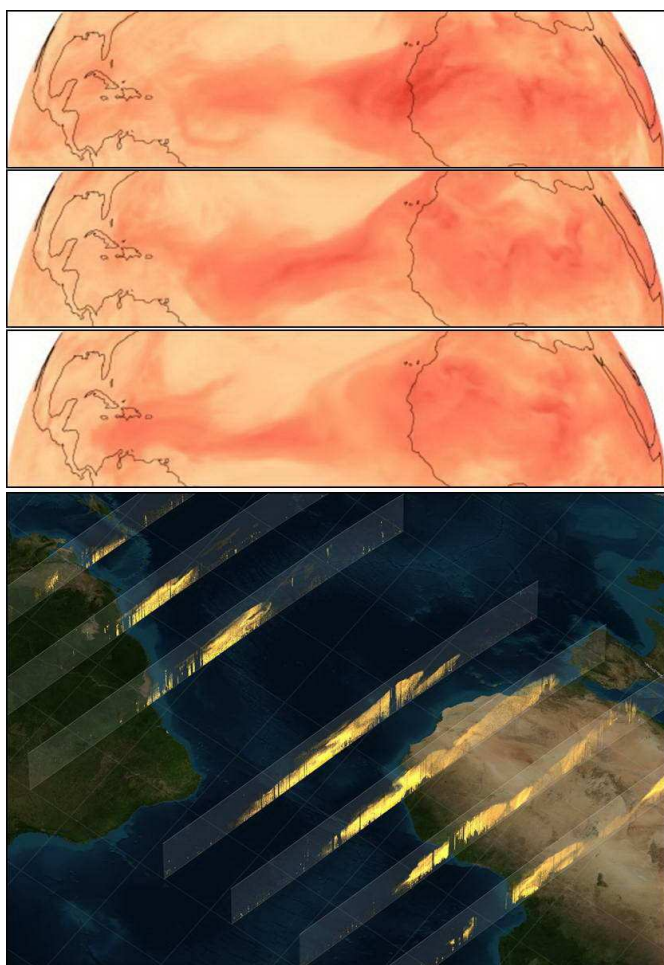
[www.fundacionazara.org.ar](http://www.fundacionazara.org.ar)



# El fósforo en riesgo de “extinción”

Sobre como un ciclo abierto de fósforo puede poner en riesgo la seguridad alimentaria

**El Sahara llega hasta América.** En febrero del 2015 la Nasa ([svs.gsfc.nasa.gov](http://svs.gsfc.nasa.gov)) publicó un estudio realizado desde 2007 con el instrumental satelital Calipso para la observación de aerosoles y nubes. Se obtuvo un diagrama tridimensional de la nube de polvo que brotan desde el Sahara y cruzan el Atlántico rumbo a América. Hace 150 Ma (millones de años) África y Sudamérica estaban unidas e iniciaron un proceso de separación que incluyó la formación del Océano Atlántico (Teoría de Tectónica de Placas). Hoy día mantienen un canal de comunicación unidireccional gracias a los vientos alisios ecuatoriales (este-a-oeste). Estos vientos alimentan al Amazonas y el Caribe con fertilizantes transportados en las tormentas de polvo.



*El Sahara-Amazonas es un raro ejemplo de fertilización entre continentes. Es factible gracias a la desertificación del Sahara que permite las tormentas de arena rica en minerales (entre ellos el fósforo) y a los vientos alisios muy cálidos y secos que cruzan el Atlántico e impiden la formación de tormentas que laven el polvo. Los fertilizantes cruzan el Atlántico en 6 días y se depositan en una amplia región desde el Amazonas hasta el sur de Estados Unidos, dando lugar a la recuperación de fósforo en la selva amazónica y alimentando a las estériles islas del Caribe.*

Las tormentas de arena del Sahara mueven 770 Mt (millones de toneladas) de polvo al año; es la mitad de todo el polvo llevado a la atmósfera en forma natural en el planeta. Los vientos alisios cruzan el Atlántico con 160 Mt de aerosoles, de los cuales 28 Mt caen en el Amazonas durante el invierno y 43 Mt en el Mar Caribe en el verano. En el Amazonas caen 22.000 t de fósforo, un mineral imprescindible y escaso. Las partículas se mueven a 5-7 km de altura, en una masa de aire muy caliente y con solo

3% de humedad. Tardan 6 días en su recorrido desde África hasta América. Las tormentas de polvo del Sahara absorben radiación solar y se calientan y a la vez, enfrían el Océano Atlántico, lo que impide la formación de tormentas de lluvia y favorecen las sequías. En Chad se encuentra la depresión de Bodélé, formada por el lecho seco de un lago inmenso de 400.000 km<sup>2</sup> (equivalente a las provincias de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos), cargado de microorganismos muertos que retienen fósforo e hierro. Este lugar fue estudiado para medir el aporte anual de fósforo al Amazonas y se estimó que 4 m de altura del suelo del lago fueron eliminados en los últimos 1.000 años (20% llegan a América), habiendo para otros 1.000 años. El aumento de las precipitaciones en el Sahel (tierra semiárida al sur del Sahara) producirá una reducción en el polvo que cruza el Atlántico y la pérdida de fertilidad del Amazonas durante este siglo.

Así es como, el estéril norte de África, alimenta al exuberante Amazonas de nutrientes minerales; cosa que solo es posible gracias a la desertificación. El Amazonas es un sistema lixiviado donde los nutrientes en el suelo son lavados por las lluvias y transportados al Atlántico. Por esto, aunque es muy productivo, es muy pobre en nutrientes. Para mantener el balance de nutrientes se requiere el aporte externo desde el Sahara y sin este aporte transoceánico los suelos del Amazonas estarían exhaustos por la pérdida vegetal y con poca fertilidad. El estudio de la turba en los Everglades (Florida) demostró que este polvo está llegando desde África desde hace miles de años. Las islas del Caribe serían rocas muertas sin el aporte de nutrientes desde el Sahara. Las tormentas de polvo llevan hierro hasta el Caribe y alimentan a los organismos del fitoplancton que producen carbonato de calcio. Son las cianobacterias que fijan el nitrógeno y consumen mucho hierro (10 veces más que otros fotosintetizadores). La deposición de estos caparzones dio lugar a islas, como el banco de las Bahamas, que demoraron 100 Ma en establecerse. El polvo del Sahara en la Isla de Guadalupe eleva los niveles de contaminación natural por encima de la contaminación industrial de Europa. El polvo no solo lleva nutrientes y sal, sino bacterias y hongos, que pueden ser un problema sanitario, produciendo alergias y crisis asmáticas en el Caribe. Las partículas son muy pequeñas y penetran a los pulmones y la mucosa.

**Elementos químicos de la vida.** En 2015 la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) confirmó la incorporación de 4 nuevos elementos químicos a la Tabla Periódica, para llegar a un total de 122. Los 4 nuevos elementos fueron creaciones del hombre. Aunque se tengan dudas de cuantos elementos químicos pueden ser creados (el aumento en tamaño hace a los átomos más inestables y radiactivos), lo cierto es que se pueden encontrar 77 elementos químicos que circulan entre las rocas, el suelo, el agua y la atmósfera, en circuitos cerrados. Es lo que se llama el ciclo de los elementos y están activados por fuerzas naturales (erupciones volcánicas, terremotos, erosión de agua o viento y la vida) y la intervención humana (minería y petróleo, construcción y agricultura). De estos 77 elementos, 62 ciclos están intervenidos por las acciones humanas. En muchos casos no son los elementos objetivo, pero son parte del movimiento de sedimentos y rocas de la minería y construcción (35.000 Mt/año de rocas removidas). Este y otros argumentos, llevó a proponer un nuevo periodo geológico: el Antropoceno.

La vida hace uso de 30 elementos químicos, sumando los mayoritarios (11), los considerados trazas (15) y los discutibles (4). Los elementos químicos componen 20 aminoácidos, las moléculas básicas de la vida que son codificados por el ADN. Los elementos químicos se intercambian entre seres vivos y la naturaleza siguiendo ciclos de dos tipos: biológico (ciclos rápidos y considerados cerrados) y geológicos (ciclos lentos, considerados abiertos a la escala humana). Los ciclos involucran la atmósfera (gases y polvo); hidrósfera (océanos, ríos, humedales); el terreno (rocas y suelo) y los seres vivos. Los elementos básicos de la vida (carbono, hidrógeno y oxígeno), pasan fácilmente desde el aire y agua a los tejidos vivos. Otros,

como el nitrógeno, los obtienen desde el aire las bacterias simbiotas de las raíces. Pero algunos, como el fósforo, están firmemente guardados en la roca y deben ser añadidos al suelo para aumentar la producción agrícola.

<p>(verde) mayoritarios (amarillo) trazas (azul) discutidos</p>																	
<p>(rojo) riesgo alto (amarillo) riesgo medio</p>																	



La Tabla Periódica de los Elementos muestra a los ingredientes básicos de la vida y el riesgo de cada uno de ellos. El fósforo es un elemento mayoritario (macronutriente) y a la vez está en riesgo alto de disponibilidad. La diferencia entre la aplicación adicional de fósforo en la agricultura (fotografía en Tennessee en 1942) produjo varias décadas de fertilización indiscriminada, cuyos efectos adversos se observan en Estados Unidos.

El origen natural del fósforo P es por meteorización de las rocas que aportan fosfatos (derivados de  $PO_4$ ), y que los vegetales incorporan en su crecimiento ingresando al fósforo en la cadena alimentaria. Los animales lo excretan y vuelve al ciclo mediante el suelo. El fosfato que se escapa de este ciclo llega al mar y si no es consumido por el fitoplancton, se precipita en el fondo del océano volviendo al ciclo geológico mediante las rocas (cientos de millones de años). El fósforo es muy escaso en los suelos; la agricultura lo extrae y exporta, y para mantener el ciclo debe ser repuesto. Un aporte externo en exceso será lavado por las lluvias y contaminará el agua en arroyos y humedales, estimulando el crecimiento de algas y cianobacterias tóxicas. Un proceso que aumenta el desbalance es el desmonte previo a la agricultura. El fósforo se encuentra en las plantas y queda poco en el suelo. Cuando se eliminan las plantas y se retiran los troncos o se queman, el fósforo es lavado por las lluvias y se pierde del terreno.

**El origen del fósforo terrestre.** Como todo el resto de los elementos, el fósforo actual es de origen extraterrestre (toda la Tierra es de origen extraterrestre). Se cree que en tiempos de formación de la Tierra, el

intenso bombardeo de meteoritos proporcionó fósforo reactivo, que al ser liberado en el agua, se incorporó al ciclo de las moléculas prebióticas (química orgánica anterior a la vida). Los científicos documentaron el fósforo contenido en piedra caliza del Arcaico temprano, mostrando que era abundante hace unos 3.500 Ma. Los meteoritos habrían entregado fósforo en minerales que no se ven hoy en la superficie de la Tierra, y estos minerales oxidados en agua liberaron el fósforo en una forma que sólo se refleja en la Tierra primitiva (fosfito soluble y reactivo, una sal que pudo ser incorporado en las moléculas). El fosfito pudo ser lo suficientemente abundante como para ajustar la química de los océanos, y que luego fuera atrapado en carbonato marino donde se conservó hasta el presente.

La mayoría de los depósitos actuales de fósforo naturales que se explotan provienen de esqueletos de animales marinos fosilizados. Vivieron en las costas de los océanos antiguos y hoy están en la superficie de los continentes. Se los encuentra como roca fosfato con impurezas (calcio y otros metales). La purificación de la roca produce fósforo blanco, que es una molécula con 4 átomos de fósforo ( $P_4$ ) formando un tetraedro. En la industria química, la molécula de  $P_4$  se destruye mediante cloro y forma  $PCl_3$ , que luego se sustituye por moléculas orgánicas (con carbono). Son los llamados compuestos organofosforados, tales como los encontrados en los pesticidas.

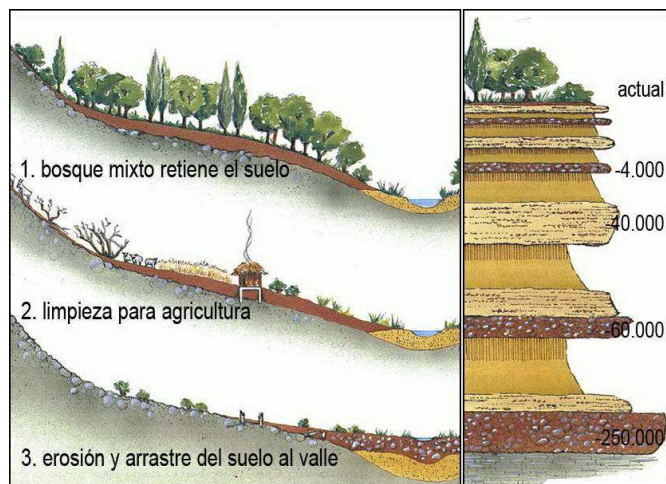
Este fósforo proviene del ciclo geológico (las rocas), pero también puede obtenerse fósforo desde el ciclo biológico (guano y estiércol, residuos cloacales). Una fuente puntual en el siglo XIX fueron las tumbas. En el censo de 1851, se mostró que Inglaterra tenía más habitantes en las ciudades que en el campo y las razones eran la reducción de mortandad y la mejora en la salud y alimentación. Para mantener la producción agrícola se saquearon las tumbas de varias ciudades en toda Europa, lo que permitió producir ácido fosfórico mediante un tratamiento de los huesos con ácido sulfúrico. En 1870 se produjeron 40.000 toneladas de fertilizante fósforo en base a huesos de tumbas.

**El fósforo como fertilizante.** Los nutrientes asimilables por las raíces de las plantas y que se adicionan al suelo se llaman fertilizantes. Las plantas no necesitan compuestos complejos (vitaminas o aminoácidos como los animales) pero requieren los elementos químicos básicos, que pueden incluso entregarse por hidroponía (cultivo sin suelo). Para muchos arqueólogos, el ascenso de los imperios (como el romano) coincide con el incremento de la productividad agrícola y el descenso con el agotamiento por falta de fertilidad de los suelos. En 1609, el literato peruano Garcilazo de la Vega, escribió los "Comentarios Reales" donde describió las prácticas agrícolas de los Incas prehispánicos. Usaban fertilizantes orgánicos como el guano de llamas y aves. En el 2011 se publicó un estudio arqueológico que correlaciona el polen de maíz de hace 2.700 años, con la cantidad de ácaros provenientes del excremento de llamas en una zona cercana a Machu Picchu. Así, la sociedad Inca pasó de consumir quinua al maíz (que contiene mayores calorías) gracias a la agricultura con fertilizantes.

En 1800, fue Humboldt quien introdujo en Europa el guano de las islas del Pacífico como fuente de fertilizantes. La extracción de guano fue disparó y duró casi un siglo. Las reservas databan de hasta 5 Ma (sólidos como rocas). Pero para inicios del siglo XX las reservas fósiles de guano estaban agotadas. En 1847 se había encontrado que los nutrientes podían aplicarse en forma mineral, lo que puso las bases de la industria minera de fertilizantes. La agricultura es una industria extractiva como la minería, pero se diferencia en que es renovable si se reponen los nutrientes básicos. El problema es cual es el origen de estos nutrientes: ya no hay guano o huesos y los aportes desde la minería tienen a escasear. El futuro dependerá del reciclaje permanente de los elementos (estiércol, aguas residuales) que equilibre las pérdidas de los ríos y el aporte de las montañas.

Los fertilizantes son críticos para lograr una buena productividad agrícola ya que determinan el tamaño de la planta y la cantidad de proteínas en los

granos. Del nivel de proteínas depende que una cebada sea útil para destilación (cerveza, whisky o ginebra) o se destine para forraje (alimentación de animales). Pero, el exceso de fertilizantes puede tener un impacto negativo en el ambiente debido a la eutrofización de los cursos de agua. Los fertilizantes básicos (llamados macronutrientes) son el nitrógeno, potasio y fósforo. Los cereales (trigo, maíz) consumen entre 20-30 kg/t de nitrógeno en la planta y entregan 15-20 kg/t en los granos. Para el fósforo absorben 4-5 kg/t y entregan 3-4 kg/t en los granos. En el caso de la soja se absorben 75 kg/t de nitrógeno y 7 kg/t de fósforo y entregan 55 y 6 kg/t en los granos. Por esto, la agricultura es una industria extractiva y deben dejarse los restos de la cosecha para reponer una parte de los nutrientes.

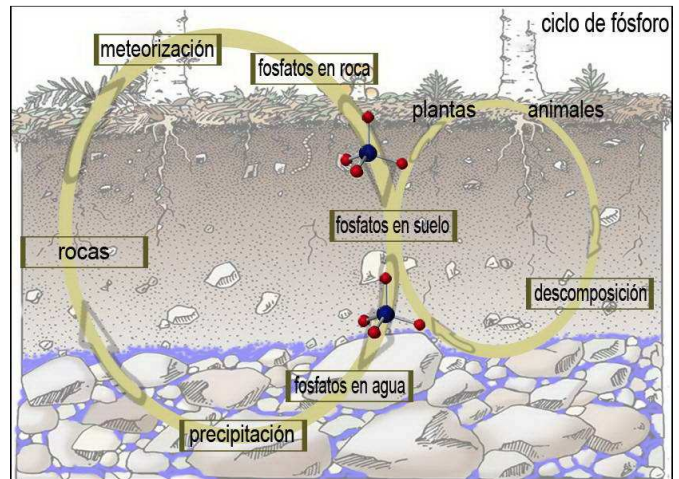


El estudio del perfil del terreno en un valle en Argólida (Grecia) muestra como en distintas épocas y por distintas razones (la agricultura en la última etapa) el suelo terminaba en el fondo del valle debido a la deforestación. En forma natural la meteorización de las rocas en las laderas llevan nutrientes a los valles. Además de los aportes naturales, el guano sirvió durante el siglo XIX para fertilización del suelo, pero en el siglo XX la roca fosforada fue la principal fuente. Esta fuente está en riesgo y la provisión de fósforo a futuro está en riesgo.

**El problema del "pico de fósforo".** El concepto del "pico de fósforo" se relaciona con la provisión mineral y se enlaza a los conceptos de límites planetarios y de seguridad alimentaria. El fósforo mineral se extrae desde la roca fosfórica. En 2015 se extrajeron cerca de 200 Mt de roca de fosfato y las reservas se estiman en 71.000 Mt, pero las económicamente disponibles serían 16.000 Mt. El fósforo disponible en la roca es del orden del 10%. Al ritmo actual las reservas se agotarán hacia el 2100, con un pico cercano al 2035. Los niveles de consumo seguirán aumentando, y creando una brecha entre la oferta y demanda. Agotado el recurso del fósforo desde la minería, quedarán las reservas renovables: las aguas residuales municipales y agrícolas (estiércol de ganado o de digestión del

biogás). En las próximas décadas se requiere hacer encajar el consumo con el reciclaje. Alguien dijo "el fósforo será el primer elemento químico de la Tabla Periódica que ingresará en la Lista Roja de Peligro de Extinción". Además, por la "ley de los mínimos", la producción de una cosecha agrícola está fijada por el nutriente que esté en menor cantidad, lo cual vuelve al fósforo un elemento crítico.

Al problema de la cantidad se suma el problema de la distribución y acceso seguro, en lo que es un problema geopolítico. El 85% de las reservas explotables de fósforo mineral está concentrada en 3 países, donde Marruecos es el principal (70%). Las pocas reservas mundiales tomarán un valor estratégico con posibles conflictos por los recursos naturales.



El ciclo del fósforo tiene una rama geológica y otra biológica. Estos ciclos se rompen cuando el fósforo que se pierde en los océanos es mayor al repuesto por la erosión de las rocas. El fósforo disponible para la minería es de 2.000 Mt, pero solo alcanza hasta fines de siglo. En forma natural, una parte del fósforo que se pierde en los océanos es repuesto a la superficie. La cadena de seres vivos que intervienen (abajo-derecha) están en disminución y por esto el "bombeo" se redujo en un cierto porcentaje. Se indica la cantidad de fósforo transportado al año y el porcentaje perdido desde hace 10.000 años. Antes existían 10 veces más ballenas, 20 veces más peces anádromos (salmón), el doble de aves marinas y 10 veces más grandes herbívoros (perezosos gigantes, mastodontes, etc.) Los grandes animales liberan nutrientes lejos de las áreas de alimentación mediante las heces, orina y la muerte. La tracción animal para distribuir nutrientes puede haber caído al 6% del valor prehistórico. Hoy hay muchas vacas, pero están encerradas en corrales.

**El problema del uso irracional.** Al problema de la falta a futuro se suma el problema del exceso en el presente. Los Estados Unidos tuvieron el pico

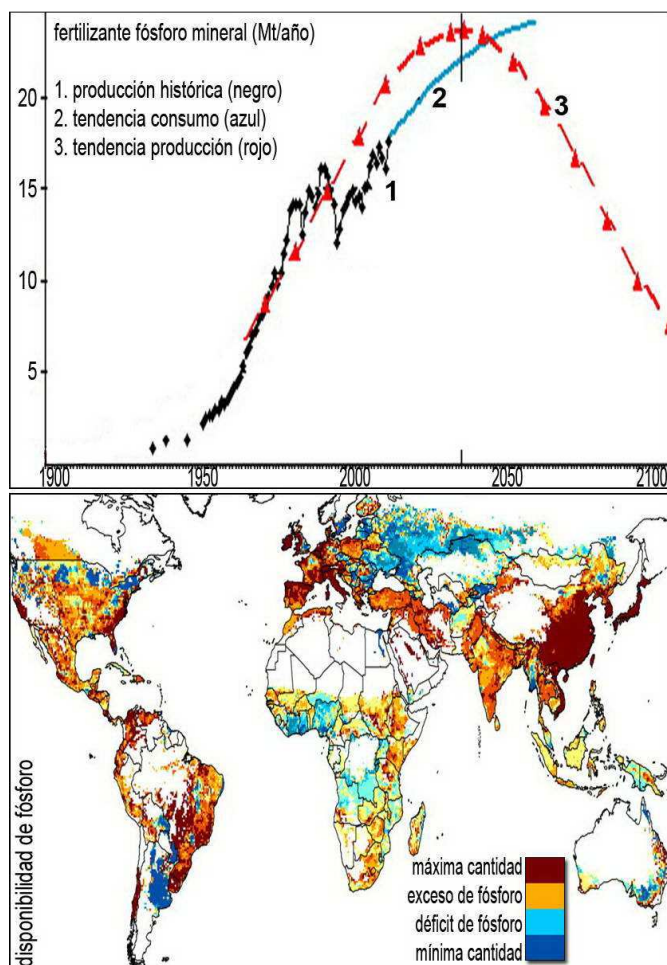
de consumo de fósforo en los años '80, pero las consecuencias se sienten aun en día. En tanto, China es el mayor consumidor y muy ineficiente de fertilizantes (usa 6 veces más fertilizantes y libera 23 veces más residuos que Estados Unidos). Estados Unidos es el mayor productor de granos pero solo usa 20 Mt de fertilizantes, en tanto China usa 50 Mt. Las principales razones se encuentran en la escala de los campos productivos (en China son parcelas muy fragmentadas) y la tecnología de racionamiento (agricultura de precisión) en la docificación de fertilizantes.

En América están hay 3 regiones de gran producción de soja (Iowa, Mato Grosso y Buenos Aires). ¿Cómo se comportan? Los suelos de la cuenca del Amazonas (oxisoles y ultisoles) no son aptos en forma natural para la agricultura. Pero, el suelo no es un limitador de la productividad si se adicionan los nutrientes faltantes. Sin embargo, al suelo se le reconoce una nueva función ecosistémica: el amortiguamiento de las consecuencias ambientales de la agricultura moderna. Por ejemplo, en Brasil se requiere aplicar gran cantidad de fertilizantes para abonar un suelo muy pobre. En tanto en Iowa, el uso de fósforo se redujo en las últimas décadas aunque el exceso histórico sigue dañando las vías fluviales. La producción de soja en Mato Grosso es factible gracias a la soja transgénica, el aporte de cal (para elevar el pH del suelo) y de fósforo (para superar la deficiencia de los suelos nativos). Los suelos en Mato Grosso están ganando 31 kg/ha/año de fósforo. Por suerte, los suelos profundos mantienen el fósforo y casi no hay escapes hacia las vías fluviales. En Iowa los suelos son fértiles (mollisol y alfisol), pero liberan fósforo mucho más fácilmente por escorrentía. Desde 1995 en Iowa se añade solo 3 kg/ha/año de fósforo, pero el suelo profundo sigue liberando el fósforo aplicado hace décadas atrás.

por la mínima cantidad de fósforo disponible en el suelo. Esto es una buena noticia desde el punto de vista del uso racional del fósforo como nutriente fertilizante de las cosechas.

En la Argentina, los suelos pampeanos son tan buenos como en Iowa y se logran rendimientos similares sin la aplicación de fósforo. Hasta hace una década, la soja se llevaba más fósforo que el incorporado (déficit neto sin contaminación), por lo que las críticas se centraban en la pérdida de suelo. Pero en años recientes se añade algo de fósforo para lograr un punto de equilibrio. Así, se puede obtener un suministro limitado de fósforo y se mantiene el agua limpia. En la Argentina el aporte de fertilizante es muy inferior al promedio global. Una razón es porque se cultiva principalmente soja, que obtiene el nitrógeno de la atmósfera por fijación biológica y responde poco a nutrientes como fósforo y azufre. Esta independencia de la soja no se repite en cultivos como el maíz, trigo y arroz. Sin embargo, otro problema aparece por sembrar monocultivos por lo que se insiste en la rotación.

**El problema de la contaminación.** En Noruega un tercio del fósforo se lo usa en la acuicultura (9.000 t/año). Pero, mientras el estiércol en los campos agrícolas es reutilizado en parte, casi la totalidad de los residuos de los peces y piensos de la acuicultura terminan en el océano. El fósforo (junto con el nitrógeno) es un fertilizante químico contaminante que produce eutrofización del agua, que es el crecimiento desmesurado del fitoplancton. El problema reside en gestionar el consumo mediante la reducción y el reciclado. Pero, exigir el reciclaje del fósforo será todo un desafío para la acuicultura.



Las reservas de fósforo mineral disponibles, la producción y el consumo de fósforo determinan un pico hacia el 2035 y un límite hacia el 2100. Cuando se observan las distintas regiones del planeta la región pampeana destaca

El crecimiento de las algas causada por altos niveles de fósforo en los océanos creó cerca de 400 zonas costeras muertas. El ciclo biológico del fósforo está roto y se nota en la desembocadura de los ríos. Al ciclo natural (suelo-vegetales-animales-suelo) se adicionan 20 Mt/año de fósforo que se extraen de la roca y solo una parte llega al suelo. El ciclo se ha convertido en un proceso lineal, de las minas hacia el mar. Menos del 30% del fósforo en los fertilizantes es absorbido por las plantas y el resto se acumula en el suelo o se elimina por lavado. Por ejemplo, en Holanda hay suficiente fósforo en el suelo como para abastecer al país con el fertilizante para los próximos 40 años.

Un proceso de contaminación "natural" ocurre por deshielo en Groenlandia. Se estimó que se liberan 0,4 Mt/año de fósforo al Océano Ártico y que enriquece las aguas, lo que estimula el crecimiento del fitoplancton. El origen de este fósforo es el agua que fluye en la base de los glaciares. Cuando el hielo del glaciar se desliza sobre el lecho de rocas, tritura la roca de forma que los minerales se bombean al exterior. Se midió la concentración de fosfato disuelto en el glaciar Leverett y se estimó que el total de fósforo eliminado por Groenlandia es similar a los ríos Mississippi y Amazonas. Esto mismo debería ocurrir en Antártida y demás zonas glaciares.

Se debería sumar el impacto ambiental de la minería de fosfato. Se producen contaminantes atmosféricos como partículas desde las calderas, trituradores de piedra, polvo de fósforo, neblina ácida, amoníaco y óxidos de azufre y nitrógeno. Los desechos sólidos consisten en ceniza (si se emplea carbón para producir vapor para el proceso) y yeso (que puede ser considerado peligroso debido a su contenido de cadmio, uranio, gas de radón y otros elementos tóxicos de la piedra de fosfato). La fabricación y manejo de ácido sulfúrico y nítrico representa un riesgo de trabajo y peligro para la salud, muy grande. Los accidentes que producen fugas de amoníaco pueden poner en peligro no solamente a los trabajadores de la planta, sino también a la gente que vive o trabaja en los lugares aledaños. Otros posibles accidentes son las explosiones, y las lesiones de ojos, nariz, garganta y pulmones.

**El reciclaje de fósforo.** El fósforo no tiene sustituto, no es renovable y tiene un modelo actual de explotación que no es sustentable. Siendo que el ciclo biogeoquímico del fósforo está roto y se convirtió en un camino desde la mina al océano, se necesita identificar los eslabones y trabajar sobre ellos. (1) Se requiere conocer mejor las reservas minerales: identificar cuánto fósforo está disponible y reexaminar los costos de explotación (huella de fósforo). (2) Reducir las pérdidas de aplicación de fertilizante para prolongar las reservas y evitar contaminación (p.e., con agricultura de precisión). (3) Reciclar el estiércol animal y los residuos urbanos para reducir al mínimo las pérdidas por los ríos. Suiza fue el primer país en obligar a la recuperación de fósforo y el reciclaje de lodos de depuradora y residuos de matadero. El lodo y residuos de matadero en Suiza representan 9.100 toneladas de fósforo al año. Algunas empresas (p.e.,

NuReSys de Bélgica) usan técnicas para recuperar fosfato desde el lodo en las plantas depuradoras. (4) Adecuar la dieta para favorecer el consumo de alimentos que requieren menos fósforo. El aumento del consumo de carne e ingesta total de calorías eleva la "huella de fósforo", que es 50 veces más alta en la producción de animales que de vegetales.

El principal recurso natural de la Argentina es el suelo y siendo la agroindustria el principal productor, es también el principal responsable del manejo del fósforo. El control en el consumo de fósforo se logra mediante siembra directa, cultivo de cobertura, uso de terrazas, labranza de contorno y barreras contra el viento. La vegetación perenne (pastizales o bosques) son más eficiente en su uso de fosfato y pueden colocarse en franjas y junto a los arroyos para reducir las pérdidas de nutrientes por escorrentía.

Documento elaborado por el Ing. Roberto Ares (2016).