

El futuro del fósforo fertilizante (I)

El P como macronutriente se considera globalmente una materia prima crítica

El fósforo es un elemento esencial e insustituible en todas las células vivas; sin P no habría ningún ser vivo en la tierra. La importancia del P para la vida ha centrado la atención en su uso eficiente en la agricultura en los últimos años por tres razones principales. En primer lugar, la roca fosfórica a partir de la que se elaboran los fertilizantes fosfatados es un recurso finito y no renovable, y debe utilizarse de manera eficiente para maximizar su vida útil. En segundo lugar, existe la necesidad de mantener y mejorar el estado de P de muchos suelos, particularmente los de los países menos desarrollados, para el crecimiento de los cultivos alimentarios de fibra y la bioenergía. En tercer lugar, la importancia del efecto adverso de la eutrofización en las masas de agua superficiales deriva de la transferencia del P del suelo al agua.

Reservas de fósforo y demanda de este macronutriente

El tamaño del recurso mundial de P ha sido una gran fuente de preocupación recientemente. De todos los elementos requeridos en grandes cantidades por las células vivas, el recurso global de P es el más pequeño. Hace unos años, se predijo que, a las tasas de extracción vigentes en ese momento, la reserva de roca fosfórica económicamente explotable se agotaría en 60 a 100 años. Una reevaluación re-

Luis López Bellido.

Catedrático Emérito. Universidad de Córdoba.

El tamaño del recurso mundial de fósforo (P) ha sido una gran fuente de preocupación recientemente. De todos los elementos requeridos en grandes cantidades por las células vivas, el recurso global de P es el más pequeño. Un objetivo importante es desarrollar sistemas agrícolas productivos en los que se incremente la disponibilidad de P en el suelo, se reduzcan las entradas y salidas de fertilizantes fosfatados, o los recursos renovables alternativos de P para la fertilización de cultivos.



ciente sugiere que sin cambios en la demanda las reservas explotables de roca fosfórica pueden durar entre 300 y 400 años. Tales predicciones destacan la necesidad de utilizar el P de manera eficiente y reciclarlo para cerrar el ciclo de oferta y demanda.

El fosfato mineral es un recurso no renovable, con el 85% de las reservas de roca fosfórica ahora conocidas en sólo tres países: Marruecos, China y Estados Unidos. En consecuencia, la Comisión Europea ha incluido la roca de fosfato mineral y el P en la lista de materias primas críticas.

El P es el segundo nutriente esencial para la mayoría de los cultivos y es necesario para su producción óptima en los agroecosistemas. Sin embargo, existen dudas sobre si tenemos suficiente P para mantener las cosechas futuras. Los pronósticos hasta 2050 indican que la superficie de tierra cultivada tendría que aumentar en un 20% para apoyar la demanda de alimentos para la población mundial y también asumir un aumento en el consumo de fertilizantes fosfatados. Sin embargo, las reservas económicamente disponibles de fosfatos de roca podrían agotarse en este escenario.

Una estimación conservadora, basada en datos de la industria, indica que dicha cúspide en la extracción global de P podría ocurrir en 2033. Éste es el punto en el que se agotan las reservas de roca fosfórica de alta calidad y muy accesibles. Después de este punto, la menor calidad y la dificultad para acceder a las reservas de fosfato restantes las hacen antieconómicas para la extracción y el procesamiento.

Dado que la demanda de fertilizantes fosfatados sigue creciendo y el suministro de fertilizantes fosfatados está limitado por recursos finitos, debemos ser proactivos en el desarrollo de tecnologías para maximizar la eficiencia del uso de fertilizantes fosfatados en los agroecosistemas de los países desarrollados y en desarrollo.



Durante las próximas décadas habrá demandas adicionales de P debido a una mayor demanda de carne y otros cambios en la dieta (particularmente a medida que las naciones emergentes se vuelven más desarrolladas). Dado que el P es una piedra angular de la producción de alimentos, la gestión mundial de P puede verse desafiada en los próximos años.

A pesar de la mencionada escasez, algunos autores la consideran con frecuencia una declaración alarmista, ya que no se describe adecuadamente el problema de tal escasez. Lo atribuyen a que se ignoran datos geológicos básicos; y la dinámica de recursos y reservas que se dan en un mercado impulsado por la demanda. Sostienen que en el caso del P, la escasez es un asunto económico. A igualdad de condiciones mantienen que hay suficientes recursos que pueden convertirse en reservas dentro de los rangos de costes de producción factibles para la roca de fosfato durante al menos algunos siglos, antes de que se produzca una supuesta cúspide de recursos. Extraordinariamente, los altos precios del P, los picos

de producción o la volatilidad de los precios no se deben a la escasez física, sino a otras razones como burbujas en los mercados financieros, desequilibrios de oferta y demanda, infructuosos esfuerzos de prospección en la industria minera, efectos geopolíticos y muchos otros factores.

Para garantizar la seguridad alimentaria, especialmente en los países en desarrollo con el aumento de la población y, a menudo, los suelos deficientes en P, y para utilizar el P de manera eficiente, la estrategia más adecuada será sin duda incrementar el P disponible para las plantas en el suelo hasta el nivel crítico apropiado para el tipo de suelo y sistema agrícola y mantener este nivel reemplazando el P eliminado en los cultivos cosechados.

Sin embargo, y especialmente en muchas economías en desarrollo, aumentar el P del suelo a niveles críticos probablemente llevará un período prolongado de tiempo debido a la escasez de capital y, a menudo, debido al acceso local limitado a los recursos de P. Durante este período, será de vital importancia administrar todos esos inputs agronómicos, para lograr ren-

dimientos máximos y asegurar una alta recuperación a corto plazo del P aplicado.

La sobrefertilización con P y su posterior exportación a través de la escorrentía puede provocar la eutrofización de los cuerpos de agua y los hábitats terrestres naturales. Por lo tanto, un desafío importante es desarrollar sistemas agrícolas productivos en los que se incremente la disponibilidad de P en los suelos, al tiempo que se reducen las entradas y salidas de P mineral y los impactos negativos fuera del lugar.

Por último, otro aspecto a considerar es que la mayoría de los fertilizantes de P provenientes de roca fosfórica de origen sedimentario suelen tener un contenido del metal pesado cadmio (Cd), que en algunos casos es elevado.

El P fertilizante reciclado, actuación agronómica

El P es un elemento esencial, como ya se ha dicho, para todas las formas de vida y, por lo tanto, su disponibilidad es un factor importante para el funcionamiento de la agricultura. Sin embargo, los recursos de roca fosfórica para la producción de fertilizantes fosfatados solo están disponibles en unos pocos países. Por lo tanto, la recuperación de P a partir de materiales de desecho se ha convertido en un interés creciente durante la última década y se ha investigado en todo el mundo.

Para caracterizar potenciales nuevos fertilizantes de P formulados a partir de materiales reciclados, se han realizado una gran variedad de caracterizaciones de compuestos de P, extracciones químicas y experimentos de crecimiento. En general, los fertilizantes de P de materiales reciclados muestran una amplia gama de compuestos fosfóricos con estructura química y solubilidad muy diferentes. Los experimentos de crecimiento realizados para evaluar sus efectos fertilizantes muestran altas variaciones para la mayoría de los



Las estrategias prometedoras incluyen la recuperación del P de corrientes mixtas de aguas residuales o de fracciones de desechos orgánicos separados, desechos de los alimentos, otros desechos industriales, así como los residuos de cultivos generados después de la agricultura

productos. Si bien estos experimentos han demostrado que algunos fertilizantes hechos de materiales reciclados pueden alcanzar efectos del P del mismo orden de magnitud que los fertilizantes a base de roca de fosfato soluble en agua (**figura 1**).

El P como macronutriente y, en consecuencia, la roca fosfórica como recurso finito se considera globalmente una materia prima crítica. Para la Unión Europea, el P está en el centro de un debate sobre la demanda de una economía circular. En consecuencia, las tecnologías para la recuperación de P de corrientes de desechos se están investigando más intensamente, especialmente en la Unión Europea, América del Norte y Japón al menos durante los últimos 20 años.

Fósforo contenido en aguas residuales

El principal producto de la agricultura son los alimentos para la nutrición de la población. Después del consumo de alimentos, una gran parte de los nutrientes contenidos terminan en los sistemas de alcantarillado, al menos en las regiones industrializadas del mundo. Las aguas residuales municipales contienen cantidades impor-

tantes de nutrientes como N y P que se eliminan en gran medida en las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) para proteger de la eutrofización los ecosistemas como ríos, lagos y el mar. El P está presente principalmente en forma de iones ortofosfatos disueltos y de P unido en partículas sólidas, y es transferido a los lodos de las aguas residuales, ya sea por eliminación biológica del P o por precipitación química con sales de aluminio o hierro.

Las estrategias prometedoras para la recuperación de P incluyen la recuperación del P de corrientes mixtas de aguas residuales o de fracciones de desechos orgánicos separados, incluida la orina, las heces, el estiércol animal, los cadáveres y los desechos de los mataderos (es decir, huesos, sangre, pezuñas), desechos de alimentos, otros desechos industriales, así como los residuos de cultivos generados después de la agricultura (por ejemplo, por las industrias de procesamiento de alimentos). La mayoría de estas fuentes son renovables y, por lo general, están disponibles localmente. Sin embargo, tienen menos concentración de P y, por lo tanto, son más voluminosos que los fertilizantes procesados a partir de la roca fosfórica.

La remoción del P de las aguas residuales y la recuperación en la forma de estruvita, que es un fosfato hidratado de amonio y magnesio, ha despertado recientemente el interés de la investigación. Se ha sugerido que la producción de estruvita reemplace tecnologías convencionales de remoción de P (por ejemplo, precipitación de metales con sales de Fe o Al) en las que los precipitados de P son difíciles, si no imposible, de reciclar de forma económica. Al disolverse lentamente en la solución del suelo, la estruvita puede actuar como un fertilizante de liberación lenta y, por lo tanto, su cristalización se considera un método prometedor para eliminar el P de los efluentes y proporcionar una fuente alternativa de fertilizante P.

La estruvita también se considera un fertilizante respetuoso con el medio ambiente, ya que conduce a una menor pérdida de N por evaporación en comparación con la de otros fertilizantes ricos en N como la urea. Además, aunque varios autores han detectado impurezas de metales pesados en los precipitados de estruvita, que podrían ser una amenaza potencial para su uso agrícola, investigaciones recientes han demostrado que el contenido de metales pesados en la estruvita elaborada a partir de diversas fuentes está por debajo del límite legal como fertilizante.

La utilización de la orina está ganando una atención renovada como método para recuperar nutrientes de los excrementos humanos. Se ha estimado que, si se recolectara el P de la orina y las heces podría representar el 22% de la demanda global total de P, e incluso esta parte podría ser aún mayor en el futuro, debido al crecimiento de la población y al cambio hacia una dieta rica en proteínas. Casi el 95-100% del P en la orina existe como iones de fosfato inorgánico y, por lo tanto, como una forma disponible para las plantas, lo que hace que la orina (aplicada tal cual o precipitada en estruvita) sea un fertilizante apropiado.

Sin embargo, la implementación de la recuperación de P a partir de los excrementos humanos tiene el mayor potencial en las regiones en desarrollo como África y Asia, ya que la actual falta de instalaciones de saneamiento no sufriría las barreras de la modernización de los sistemas existentes en las regiones desarrolladas con una amplia cobertura de saneamiento.

Producción de biochar

Más recientemente, también se ha sugerido recuperar el P de los desechos orgánicos mediante la producción de biochar (carbón vegetal o biocarbón). El biochar es el resultado sólido de la pirólisis de la



biomasa (residuos de cultivos, lodos de depuradora, estiércol, residuos sólidos urbanos, residuos de alimentos) con un suministro mínimo de oxígeno. Dado que P no se volatiliza hasta los 700-800°C, se espera que el biochar, que generalmente se produce a temperaturas más bajas (<700°C), contenga todo el P original presente en la materia prima, en contraste con el carbono (C), el cual comienza a volatilizarse a aproximadamente 100°C.

Por lo tanto, la pirólisis del material orgánico puede mejorar en gran medida la disponibilidad de P al volatilizarse de manera desproporcionada el C y al escindir los enlaces de P orgánico, lo que da como resultado un residuo de sales de P solubles asociadas con el material carbonizado. Utilizando estiércol de cerdo como materia prima, se obtuvo que el 92- 97% del P presente en la materia prima de la pirólisis finaliza en biochar. Aún es más importante encontrar que el 100% del P presente en el biochar podría lixiviarse como ortofosfato y, por lo tanto, en una forma disponible para las plantas.

De manera similar el biocarbón rico en P elaborado a partir de estiércol de ganado y biosólidos podría utilizarse como fertilizante de liberación lenta. Lo mejor de esta técnica es que la pirólisis genera no solo biocarbón, sino también productos bioenergéticos (es decir, biocombustible y gas de síntesis) que se pueden valorizar económicamente. Por lo tanto, la pirólisis de desechos orgánicos puede considerarse una tecnología prometedora tanto para producir energía como para recuperar P (así como otros nutrientes).

La conversión de productos de desecho tal como el estiércol y los lodos en biocarbón también tiene otras ventajas adicionales en comparación con los métodos habituales de eliminación en vertederos o de aplicación directa al suelo, ya que la pirólisis reduce en gran medida el volumen de residuos, disminuye el riesgo de patógenos y algunos contaminantes orgánicos, y, lo que es más importante, aumenta la estabilidad del C, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con estos desechos. Sin embargo, se requieren pautas y regulaciones claras que garanticen que la composición del biocarbón, incluya no solo los nutrientes sino también contaminantes potenciales, que cumplan con los estándares aceptables.

En los últimos años ha habido mucha investigación y desarrollo en el campo del reciclado de fertilizantes, trayendo consigo una serie de nuevos productos con diferentes propiedades químicas. En este contexto, se ha observado que los métodos de extracción química estándar a menudo no representan con precisión la disponibilidad del P por la planta para reciclar de fertilizantes. Por lo tanto, los científicos han estado trabajando en el diseño de métodos alternativos nuevos u optimizados ya existentes para una evaluación rápida y fiable del P disponible por la planta de los fertilizantes. Una opción discutida

por varios grupos de investigadores es el uso de métodos de extracción secuencial para identificar reservas de P de diferente solubilidad, mientras que otros se han centrado en la extracción de P basada en sumideros, que imitarán la actividad de las raíces de las plantas en el suelo fertilizado.

Viabilidad de los fertilizantes de reciclaje de P

La literatura sobre la eficiencia agronómica de los fertilizantes de reciclaje de P ha sido revisada, más recientemente. La última revisión se centra específicamente en su potencial para la agricultura orgánica. Esta revisión tiene como objetivo resumir el conocimiento sobre la eficiencia agronómica de los fertilizantes reciclados que contienen P que se han desarrollado en los últimos años y, además, brindar una visión general actualizada del estado actual de la investigación sobre la viabilidad de diferentes métodos de extracción química para predecir la disponibilidad de la planta a partir de los fertilizantes de P reciclado.

En consecuencia, los fertilizantes reciclados de P también muestran una amplia variabilidad cuando se observa su rendimiento agronómico. Las cifras clave que describen el rendimiento agronómico también dependen del tipo de ensayo de crecimiento realizado para determinarlas. Otro factor importante que determina la solubilidad y, por tanto, el rendimiento de un fertilizante es la forma física en la que se suministra a la planta, que también varía entre los experimentos de crecimiento. Finalmente, la forma en que se suministra la fertilización básica con otros nutrientes esenciales para las plantas puede influir en el pH del sustrato y, por lo tanto, en la solubilidad y disponibilidad por las plantas de los fertilizantes de P.

Si bien los ensayos de campo son sin duda indispensables para demostrar el rendimiento agronómico de un nuevo fertilizante, esta revisión indica que debido a los muchos parámetros que influyen en su



El desarrollo de mejores prácticas de manejo de los fertilizantes fosfatados está comenzando a ser muy necesario, no solo por razones económicas y ambientales a corto plazo, sino también por la correcta administración de recursos de nutrientes no renovables de los que depende la producción de alimentos, piensos, fibras y biocombustibles

resultado, su interpretación comparativa es de hecho bastante propensa a conclusiones engañosas. Por lo tanto, se necesita con urgencia la estandarización de estos ensayos para hacerlos comparables.

Muchos países europeos están aumentando sus actividades para hacer un uso más eficiente de los recursos renovables de fosfato secundario, incluidos sus residuos del tratamiento de aguas residuales, y convertirlos en fertilizantes comerciales y económicamente viables. Si bien los fertilizantes de P reciclado hechos a partir de materiales orgánicos procesados están ganando cada vez más importancia y reconocimiento, muchos investigadores han señalado que la evaluación de la disponibilidad por las plantas puede ser un desafío.

Los fertilizantes de P reciclado hechos a partir de materiales orgánicos procesados muestran una amplia gama de compuestos de P con una estructura química y solubilidad muy diferentes. Muy a menudo, un producto en particular se compone de más de una especie P y, dependiendo de las condiciones que prevalezcan du-

rante su proceso de producción, incluso los productos del mismo tipo pueden diferir considerablemente. Una característica importante a este respecto es el contenido de elementos como Fe, Al y Ca, que tienen una fuerte influencia en la especiación de los fosfatos.

Reservas de P en el suelo y disponibilidad para los cultivos

Una característica particular del P es su baja disponibilidad, debido a la lenta difusión y alta absorción en los suelos. La fertilización con P se realiza a menudo mediante la aplicación de fertilizantes químicos derivados de la roca fosfórica para satisfacer la demanda de los cultivos. Los recursos de roca fosfórica de alta calidad son finitos, y hay, como ya se ha dicho, mucho debate sobre su longevidad. Dada la importancia de P para la sostenibilidad de la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial, y debido a que muchos suelos en todo el mundo tienen baja disponibilidad de P, es importante estudiar la gestión sostenible del P a múltiples escalas, de región, explotación y cultivos.

El P disponible en el suelo es el principal depósito que abastece las necesidades de los cultivos y es susceptible de ser transportado en el medio ambiente a través de vías hidrológicas (escorrentía y lixiviación). Los agrónomos pueden confiar en los valores de P de los análisis de suelo para calcular las recomendaciones de P fertilizantes para una región en particular. Sin embargo, estas simples medidas no brindan mucha información sobre el tamaño y la dinámica de la reserva de P disponible en el suelo, que puede variar dentro y entre los campos agrícolas debido a las propiedades del suelo específicas del lugar, tal como el pH y las interacciones entre la microbiota del suelo y los cultivos.

El desarrollo de mejores prácticas de manejo de los fertilizantes fosfatados está comenzando a ser muy necesario, no solo

FERTILIZACIÓN

por razones económicas y ambientales a corto plazo, sino también por la correcta administración de los recursos de nutrientes no renovables de los que los alimentos, piensos, fibras, y la producción de biocombustible dependen. Un objetivo importante es desarrollar sistemas agrícolas productivos en los que se incremente la disponibilidad de P en el suelo, se reduzcan las entradas y salidas de fertilizantes fosfatados, o los recursos renovables alternativos de P para la fertilización de cultivos.

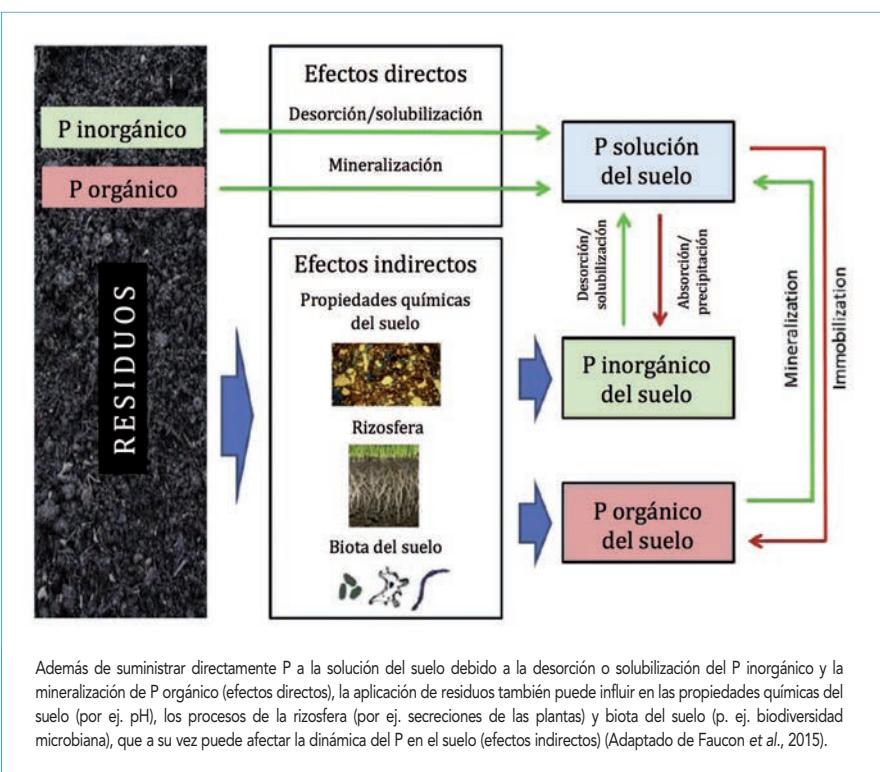
Los principales factores que controlan la disponibilidad de P en la solución del suelo son (**figura 1**):

1. El pH del suelo.
2. La concentración de aniones que compiten con los iones de P en las reacciones de intercambio.
3. La concentración de Ca que puede precipitar con iones de P.
4. El contenido de óxidos e hidróxidos de Fe y Al, que pueden absorber P.

La disponibilidad de P en el suelo para los cultivos puede estar influenciada por la biota del suelo. Al modificar el suelo con una fuente de C fácilmente accesible, la aplicación de desechos orgánicos estimula el crecimiento microbiano. Esto puede conducir a una rápida disminución de la concentración de ortofosfato en la solución del suelo, debido al consumo e inmovilización de P por la biomasa microbiana, disminuyendo temporalmente la disponibilidad de P por las plantas hasta que la biomasa microbiana se revierta.

Dado que las formas orgánicas de P pueden constituir hasta el 80% del P total en el suelo, la liberación de P de la materia orgánica recalcitrante del suelo a la solución del suelo debido a la estimulación de la mineralización, la liberación de P orgánico de la biomasa microbiana y su posterior hidrólisis por fosfatases microbianas y de origen vegetal puede aumentar aún más la disponibilidad de P para las plantas.

FIG. 1 | Dinámica del P en el suelo en un sistema de residuos.



Además de suministrar directamente P a la solución del suelo debido a la desorción o solubilización del P inorgánico y la mineralización de P orgánico (efectos directos), la aplicación de residuos también puede influir en las propiedades químicas del suelo (por ej. pH), los procesos de la rizosfera (por ej. secreciones de las plantas) y biota del suelo (p. ej. biodiversidad microbiana), que a su vez puede afectar la dinámica del P en el suelo (efectos indirectos) (Adaptado de Faucon et al., 2015).

El ciclo P en un suelo cultivado se caracteriza por transformaciones entre varias formas químicas de P. Los tamaños de las agrupaciones de estas formas de P varían de cinco a seis órdenes de magnitud. Los compuestos de P del suelo se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. P orgánico e inorgánico soluble en la solución del suelo.
2. P inorgánico y orgánico débilmente adsorbido (lábil).
3. P insoluble, que está asociado con Ca en suelos calcáreos y alcalinos o unido a Fe y Al en suelos ácidos.
4. P fuertemente adsorbido y/o oculto por óxidos hidratados de Fe y Al
5. P orgánico insoluble en residuos vegetales, animales y microbianos no descompuestos dentro de la materia orgánica del suelo.

En la capa arable de los suelos cultivados, alrededor del 70% del P total está presente en formas inorgánicas, más del

20% está en formas orgánicas y solo unos pocos porcentajes están en la biomasa microbiana del suelo (bacterias y hongos).

El contenido de P es aproximadamente diez veces mayor en la capa arable que en el subsuelo debido a las aplicaciones regulares (generalmente anuales) de fertilizantes fosfatados y estiércol animal, así como al reciclaje de residuos de cultivos (partes aéreas y raíces). Las pérdidas de P a través de la escorrentía y la lixiviación son relativamente pequeñas, en comparación con la cantidad de P importado o reciclado en la capa de arable, en parte porque los minerales del suelo tienen una fuerte capacidad de retención de P.

La actividad biológica contribuye a la solubilización del P a través de la mineralización, la meteorización y otras reacciones fisicoquímicas, de modo que la capa de arable es la principal fuente de P disponible en el suelo para los cultivos. Sin embargo, el subsuelo también puede con-

tribuir con P soluble para que las plantas en crecimiento lo absorban cuando el P se traslada del subsuelo a la capa arable por las raíces y otros microorganismos.

El P es absorbido de la solución del suelo por las raíces de las plantas principalmente como iones ortofosfato, y en menor medida como ión fosfato de hidrógeno. Varios factores pueden influir tanto en la tasa como en la cantidad de P absorbido por las raíces y, por lo tanto, en las estimaciones de la eficiencia del uso de P; no solo la de una sola aplicación de P fertilizante, sino también la de las reservas de P acumuladas en el suelo a partir de adiciones pasadas de P como fertilizantes y estiércol.

Los factores más importantes que controlan la disponibilidad de P para las raíces de las plantas son la concentración de P en la solución del suelo y la capacidad amortiguadora de P del suelo. Este último controla la tasa a la que se repone el P en la solución del suelo, es decir, la tasa de desorción de P de la fase sólida del suelo, que es más rápida en suelos con una alta capacidad amortiguadora. También son muy importantes varios aspectos de las raíces. Estos incluyen el tamaño del sistema de raíces y la medida en que estas crecen en el suelo, que se ve afectado por la estructura del mismo, y también la eficiencia con la que las raíces absorben el P de la solución del suelo.

Factores agronómicos influyentes en la absorción del P

Muchos factores agronómicos que influyen en el rendimiento de los cultivos afectan la absorción de P y, por lo tanto, la estimación de la recuperación de P del suelo y del P fertilizante. Estos factores incluyen la humedad del suelo, en particular, y la medida en que se han controlado las malas hierbas, plagas y enfermedades. Al considerar una sola aplicación de P fertilizante,



la eficiencia con la que se usa también depende de que se mezcle con el volumen de suelo explorado por las raíces. Es importante reconocer que los efectos de estos factores varían de un año a otro, por lo que es esencial promediar las estimaciones de la recuperación de P durante varios años para obtener datos fiables.

El pH del suelo es el factor principal que afecta a la especiación y disponibilidad de los iones de P en los suelos cultivados. El P disponible en el suelo se ve afectado por las propiedades físicas de este, como la textura. También está influenciado por la estructura del suelo debido a las interacciones entre el P soluble y la fase sólida del suelo asociada con los agregados del suelo y la materia orgánica recalcitrante.

Los controles biológicos del P disponible en el suelo son evidentes en la rizosfera, debido a los efectos inducidos por las raíces sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo y las interacciones con la microflora del mismo. La modificación de la morfología y la arquitectura de las raíces

para promover una mejor exploración de la capa superior del suelo rica en P mejora la adquisición de éste. Los microorganismos del suelo, como las bacterias y los hongos, que solubilizan el P, también afectan al P disponible en el suelo a través de la solubilización directa del mismo de la fase sólida del suelo.

El P disponible en el suelo también se ve afectado por las prácticas de manejo agrícola como la rotación de cultivos, el laboreo y la fertilización. El laboreo, que implica arar y gradear, mezcla el P importado de enmiendas y el P reciclado de los residuos de cultivos en toda la capa arable (normalmente los 10-20 cm superiores) de los suelos agrícolas. Cuando los agricultores cambian a sistemas de laboreo de conservación o de laboreo cero, la mezcla del suelo y la alteración ocurren en zonas discretas. En consecuencia, los sistemas de laboreo cero se caracterizan por una estratificación de P con la profundidad, con altas concentraciones de P disponible en el suelo en los primeros centímetros de la capa superior del suelo y concentraciones decrecientes más bajas en el perfil del mismo.

La acumulación de P en la superficie del suelo es el resultado de una mezcla mínima de fertilizantes aplicados en la superficie y residuos de cultivos. Un movimiento vertical limitado de P en la mayoría de los suelos y la transferencia de P de las capas profundas del suelo a las capas poco profundas a través de la absorción de nutrientes de los cultivos, la mayoría de los cuales se concentra en los residuos que quedan en la superficie del suelo. La estratificación del P es motivo de preocupación porque las concentraciones más bajas de P disponible en el suelo en profundidad en la zona de enraizamiento pueden reducir el rendimiento del cultivo. ■