

DEL DIAGNÓSTICO A LA APLICACIÓN: CONCEPTOS BÁSICOS Y PRÁCTICOS PARA LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS

Antonio P. Mallarino*

Introducción

La cuidadosa planificación del manejo de nutrientes siempre es importante para los productores, pero lo es especialmente en estos tiempos de cambios bruscos e imprevistos en los precios de los fertilizantes y los productos agrícolas, así como por la mayor preocupación de la sociedad con respecto a la calidad de las aguas. Los altos precios de los fertilizantes no serían un problema si existiese un correspondiente aumento de los precios de los productos agrícolas que mantengan o mejoren la relación precios - insumo/producto. Las fluctuaciones imprevistas en las relaciones de precios complican las decisiones respecto a la fertilización y estimulan a los productores a reducir las dosis de aplicación. En los países desarrollados, una reducción en las dosis de aplicación de nitrógeno (N) y fósforo (P) es vista con buenos ojos por el público y las agencias estatales a cargo del control de la calidad del ambiente. Sin embargo, una reducción de las dosis de N y P en todos los campos o condiciones de producción no es una buena decisión, porque no necesariamente va a aumentar la rentabilidad de la producción. Por esta razón, productores y agrónomos consultores deben tener presentes algunos principios básicos de manejo de nutrientes y posibles alternativas prácticas para este manejo, especialmente si consideramos que pocas veces existe una única manera de interpretar los análisis de suelos y decidir las dosis de fertilización para todas las condiciones de producción. La forma de encarar las alternativas posibles son muy diferentes para el caso de nutrientes móviles en el suelo, como el N, que para nutrientes relativamente inmóviles como P y potasio (K). En este artículo se discuten los conceptos básicos y las alternativas prácticas para el manejo de P que van desde las bases del diagnóstico hasta interpretaciones para el manejo de la fertilización.

El análisis de suelo y las calibraciones

El uso del análisis de suelo nunca está libre de error, pero es una herramienta de diagnóstico muy útil para decidir las dosis de fertilización. Si bien el muestreo del suelo y el análisis de laboratorio tienen un costo, el valor real se ha reducido significativamente en los últimos años si se compara con los precios de los fertilizantes y los precios de los productos agrícolas. En el mundo existen varios métodos de análisis para P que a menudo dan resultados diferentes. Aun el mismo método de análisis puede dar resultados que no son directamente comparables en suelos de propiedades químicas y mineralógicas muy contrastantes. Esto se debe a que el análisis de P del suelo (así como el de otros nutrientes), no mide la cantidad de P

disponible en el suelo para los cultivos, sino solamente cierta cantidad que es proporcional a la cantidad disponible. Por lo tanto, los métodos de análisis de suelo deben calibrarse para diferentes suelos de una región o país. El proceso de calibración incluye la determinación del valor crítico del análisis o el rango de valores que separan suelos donde hay respuesta probable a la fertilización de los suelos donde la respuesta es poco probable (Dahnke y Olson, 1990). En la mayoría de las regiones o países donde se han calibrado los análisis de suelo, se establecen categorías de interpretación que generalmente son muy baja, baja, media, alta y muy alta, en relación a la suficiencia del nutriente en cuestión. Estas categorías a menudo difieren entre cultivos porque las necesidades pueden ser diferentes y a veces también entre suelos con propiedades contrastantes.

Una vez que se dispone de los datos de los experimentos de calibración conducidos en el campo, no existe un método único, que sea siempre el mejor, para determinar el nivel o rango crítico ni las clases interpretativas. Se puede usar una variedad de modelos matemáticos para estimar el nivel o rango crítico, pero todos imparten un cierto grado de sesgo y con todos hay un cierto grado de incertidumbre. Además, los cálculos del nivel crítico pueden apuntar a relaciones agronómicas fijas, como por ejemplo máximo rendimiento, o relaciones económicas tales como el óptimo económico basado en las relaciones de precios que son de naturaleza cambiante. La investigación ha demostrado que se pueden determinar varios niveles críticos, para un mismo método, suelo, o cultivo, todos con cierta validez dependiendo de los modelos usados y de las condiciones asumidas por los investigadores (Mallarino y Blackmer, 1992). Es importante entender que las interpretaciones del análisis de suelo y las recomendaciones de fertilización siempre reflejan la opinión de los investigadores en cuanto a la filosofía de manejo de la nutrición y de la producción.

Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilización

La filosofía fundamental para interpretar el análisis de suelo y desarrollar recomendaciones de fertilización varía mucho a través de las regiones o países dependiendo de la forma de pensar de los investigadores y/o extensionistas envueltos en el proceso. Tradicionalmente estas filosofías se agrupan en dos claros conceptos: 1) el concepto de "nivel de suficiencia" y 2) el concepto de "subir y mantener". En su forma estricta, el nivel de suficiencia establece que hay un nivel de nutriente por debajo del cual hay respuesta a la fertilización. Cada nutriente tiene su

* Departamento de Agronomía - Iowa State University, Ames, Iowa, Estados Unidos. Correo electrónico: apmallar@iastate.edu

nivel de suficiencia y deficiencia, se fertiliza cada cultivo con la dosis óptima de acuerdo al nivel de cada nutriente y se reconoce que la dosis óptima de un nutriente puede ser afectada por el contenido de otros nutrientes en el suelo. El concepto de subir y luego mantener se basa en el poder residual de los fertilizantes fosfatados y potásicos y establece que si el contenido del nutriente determinado por el análisis está por debajo del nivel óptimo se debe fertilizar no solo para alcanzar el máximo rendimiento sino para subir el nivel del nutriente hasta el nivel óptimo en un plazo determinado. En algunos casos se interpreta mal este concepto y se recomienda fertilizar con lo que el cultivo va a remover en el grano cosechado aún cuando los niveles de nutriente en el suelo sean altos y la probabilidad de respuesta sea casi nula.

Las metodologías usadas en los diferentes estados de los Estados Unidos son bastante similares y representan posiciones intermedias entre los conceptos del nivel de suficiencia y subir y mantener. Las recomendaciones para las categorías bajas a veces incluyen sólo la dosis que daría el máximo rendimiento económico en la mayoría de las condiciones, pero a veces incluyen las dosis para maximizar el rendimiento y pueden incluir un componente para subir el nivel del nutriente en el suelo paulatinamente. Sin embargo, ningún estado recomienda una única aplicación para tratar de llegar inmediatamente al nivel de nutriente que determina el máximo. En algunos estados se especifica la proporción de la dosis que mantendría el nivel inicial de nutriente y la proporción para lograr la máxima respuesta y subir el nivel. En el estado de Iowa, en el cinturón maicero norteamericano, las dosis recomendadas para suelos deficientes son las estimadas para alcanzar el máximo rendimiento con una alta probabilidad. Las dosis recomendadas para las categorías muy baja y baja suben el nivel de nutriente hasta el óptimo en un período de cuatro a seis años, dependiendo especialmente de los niveles de rendimiento. El tipo de suelo no es muy importante en Iowa para desarrollar la recomendación, porque si bien hay suelos diferentes, las características que determinan la eficiencia de la aplicación de P y el uso de P por los cultivos no son muy diferentes para los suelos predominantes.

Es importante considerar que en la mayoría de los suelos del cinturón maicero y de muchas zonas templadas aún las dosis óptimas económicas de fertilización resultan en un incremento paulatino de los niveles de P en el suelo. Esto se explica por las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos (fijan poco P), la absorción y remoción parcial del P aplicado durante el primer cultivo, el reciclaje de P en los residuos, y la transferencia de P de horizontes profundos a los superficiales (Dodd y Mallarino, 2005). Estas condiciones y procesos permiten que se pueda manejar el nivel de P en el suelo a corto o mediano plazo.

En Iowa no se considera la meta de rendimiento para las recomendaciones correspondientes a las categorías bajas. Sin embargo, la dosis de mantenimiento para la categoría

denominada óptima está basada exclusivamente en la remoción promedio de P en el grano, ensilaje o heno. Este es un aspecto importante de la filosofía de fertilización utilizada en la mayor parte de los Estados Unidos y daría para mucha discusión que no es posible en este artículo. En gran parte del cinturón maicero, la dosis de aplicación y la remoción de P con la cosecha son los dos factores más importantes que determinan la evolución de los niveles de P y K en los suelos. En esta región, la variación del tipo de suelo a menudo no es importante y cuando hay un efecto del tipo de suelo, éste es en gran parte debido a las diferencias en el nivel de rendimiento. Resultados de ensayos de larga duración en suelos y zonas climáticas diferentes son la base de esta recomendación. Este tipo de información es útil porque permite estimar la cantidad de fertilizante a agregar para llegar a un nivel deseado del nutriente en el suelo, pero también sirve para determinar la cantidad a agregar periódicamente para mantener el nivel deseado.

Esta filosofía para el uso del análisis de suelo y el manejo de la fertilización tiene varias ventajas. Es muy sencilla de implementar, implica poco riesgo de perder posible respuesta, implica bajos costos de aplicación, es una buena opción para suelos con poca o moderada capacidad de retención de P y K y no requiere de muestreos de suelo anuales. Con esta metodología, los costos de aplicación y el tiempo dedicado al manejo son significativamente menores. Esto se debe a que la aplicación de dosis de mantenimiento o aquellas que con seguridad producen el máximo rendimiento permiten el uso de métodos de aplicación sencillos, baratos y que requieren poca atención. Esto incluye la fertilización al voleo y la aplicación de las necesidades de dos cultivos en una sola vez, normalmente antes del cultivo más exigente. Sin embargo, esta filosofía puede disminuir el retorno neto por kg de fertilizante agregado y puede que no sea una práctica recomendable en suelos con muy alta capacidad de retención de P o K o cuando la tenencia de la tierra es precaria, por ejemplo arrendamientos anuales. Con la filosofía estricta del nivel de suficiencia se trata de aplicar la dosis óptima que da el máximo rendimiento económico para un cultivo, por esta razón, es necesaria una mayor precisión del análisis de suelo, las interpretaciones y las recomendaciones. Además, puede requerir muestreos de suelos anuales o bianuales, aumenta el riesgo de perder respuesta si se aplica menos fertilizante del que se debe y requiere más atención. Probablemente sea una buena práctica en suelos muy fijadores de P o K o cuando el productor tiene una limitante grave de dinero disponible o tenencia de la tierra precaria, como en el caso de pequeños productores.

Consideración de incertidumbre y relaciones de precios

Aunque las calibraciones de los métodos de análisis de suelo fueran perfectas, siempre hay cierto grado de incertidumbre respecto a la relación entre el resultado del análisis de suelo y la suficiencia del nutriente para los cultivos. La incertidumbre resulta de errores de muestreo

Tabla 1. Interpretaciones del análisis de suelo para P y ejemplos de recomendaciones de fertilización en Iowa, Estados Unidos, para dos niveles de rendimiento de maíz y soya. †

Nivel de P Bray-1		Categoría	Rendimiento de Maíz		Rendimiento de Soya		
Subsuelo	0-15 cm		8 000 kg	12 000 kg	3 000 kg	4 000 kg	
ppm		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹					
Baja (< 8 ppm)	0-8	Muy baja	112	112	90	90	
	9-15	Baja	84	84	67	67	
	16-20	Óptima	54	80	40	67	
	21-30	Alta	‡	‡	0	0	
	> 31	Muy alta	0	0	0	0	
Alta (> 9 ppm)	0-5	Muy baja	112	112	90	90	
	6-10	Baja	84	84	67	67	
	11-15	Óptima	54	80	40	67	
	16-20	Alta	‡	‡	0	0	
	> 21	Muy alta	0	0	0	0	

† Adaptado de Sawyer et al. (2002). El nivel de rendimiento se utiliza sólo para determinar la fertilización para la categoría Óptima, para la cual se recomienda mantenimiento basado en remoción.

‡ Se recomienda aplicar una dosis baja de fertilizante a la siembra con suelo muy húmedo y frío ó con gruesa cubierta de residuos.

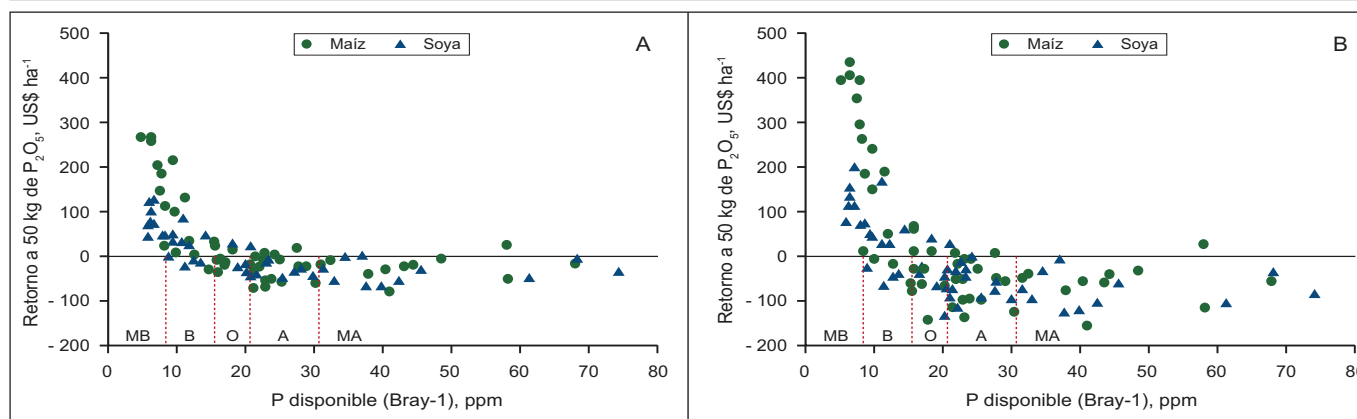


Figura 1. Retornos netos a la fertilización fosfatada para diferentes niveles de P disponible y de precios. A: Grano de maíz y soya a US\$ 80 y US\$ 200 t⁻¹, respectivamente y P a US\$ 0.70 kg⁻¹ de P₂O₅. B: Grano de maíz y soya a US\$ 167 y US\$ 367 t⁻¹, respectivamente y P a US\$ 0.88 kg⁻¹. Categorías interpretativas: muy baja (MB), baja (B), óptima (O), alta (A), muy alta (MA). Adaptado de Mallarino (2009). Precios expresados en dólares americanos (US\$).

(representatividad del área muestreada), errores de análisis, dificultad de predecir con un análisis puntual en el tiempo la cantidad de nutriente disponible durante los períodos más críticos del cultivo y dificultad para predecir la eficiencia de la fertilización para cada condición particular. Por lo tanto, es importante que las investigaciones de calibración de métodos de análisis determinen la probabilidad de respuesta del cultivo para distintos resultados del análisis. También es importante que las publicaciones con interpretaciones y recomendaciones indiquen estas probabilidades. En Iowa, por ejemplo, la probabilidad de respuesta para las categorías usadas en el estado es de aproximadamente 80, 65, 25, 5, y 1 % para las categorías muy baja, baja, óptima, alta y muy alta (Sawyer et al., 2002). Es importante notar que la clase óptima no indica cero probabilidad de respuesta sino 25 % de una respuesta pequeña a moderada (Tabla 1).

La relación de precios afecta a la dosis de fertilización que se debe aplicar para lograr el máximo retorno económico neto al uso de fertilizante. Independientemente de la filosofía para el manejo, los retornos netos a la fertilización son mayores a niveles bajos de análisis de suelo donde hay una alta probabilidad de una respuesta grande, los retornos disminuyen a medida que los niveles suben y pueden hacerse negativos si se fertiliza con valores altos donde no hay respuesta (Figura 1).

El retorno neto por kg de fertilizante aplicado es máximo a niveles de análisis bajos y con dosis bajas y disminuye a medida que los niveles de análisis o las dosis aumentan. Esto se debe a la característica forma curvilínea con incrementos decrecientes de la respuesta al aumento de fertilidad del suelo o al aumento de las dosis de fertilizantes (Figura 2). El máximo retorno económico se

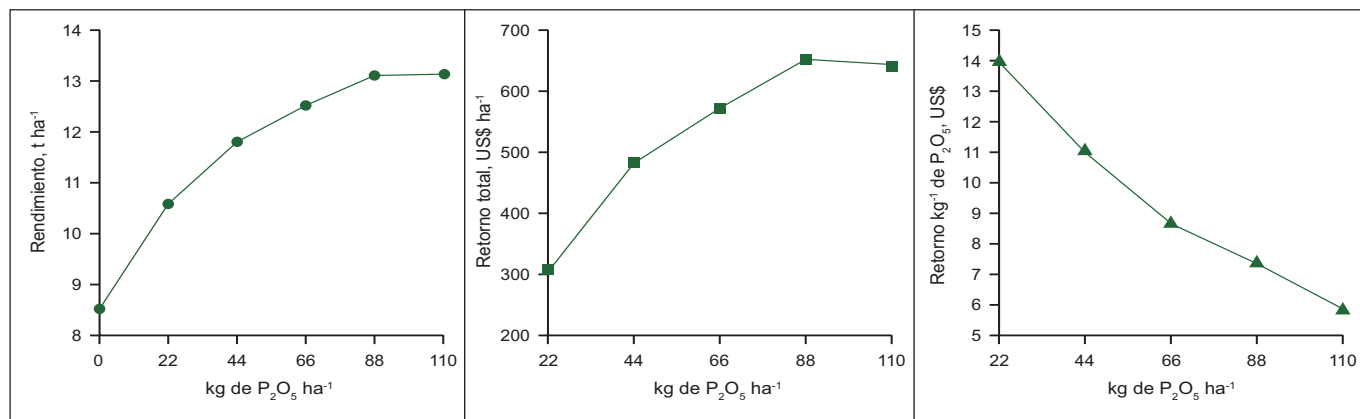


Figura 2. Respuesta de maíz a la fertilización fosfatada en un suelo de Iowa, Estados Unidos, con P disponible muy bajo en rendimiento, retorno neto total, y retorno por kg de P₂O₅ aplicado. Se asumieron precios de US\$ 167 t⁻¹ de maíz y US\$ 0.88 kg⁻¹ de P₂O₅. Adaptado de Mallarino (2009).

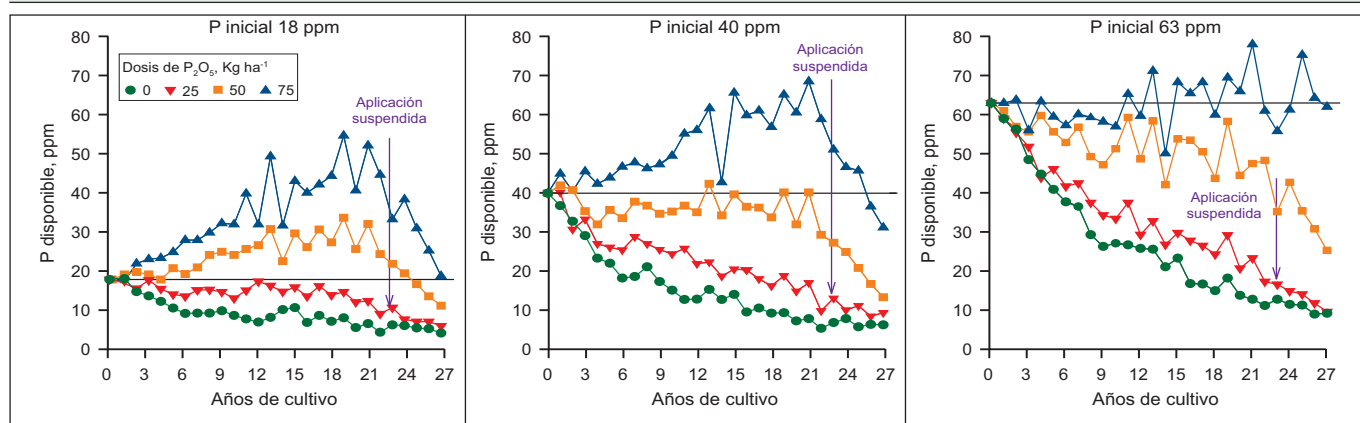


Figura 3. Cambios en P disponible (Bray-1) a través del tiempo para diferentes niveles iniciales y dosis anuales de fertilización fosfatada para la rotación maíz-soya. Adaptado de Mallarino (2009).

obtiene con una dosis de fertilizante algo menor a la necesaria para el máximo rendimiento. Una dosis de fertilización baja en suelos con niveles de P bajos resulta en altos retornos por kg de fertilizante aplicado, pero no logra el máximo retorno. En suelos con niveles de P cercanos al óptimo o mayores, la fertilización puede mantener o aumentar los niveles de P pero puede que no resulte en un beneficio económico a corto plazo (para una cosecha o ciclo).

Qué nivel de análisis de suelo debe mantenerse?

La remoción de P con la cosecha de granos o forraje, junto con la aplicación de P con fertilizantes o estiércol es el factor más importante que determina los cambios de niveles de P del suelo en el cinturón maicero y muchas zonas templadas del mundo. Los niveles de rendimiento, y, por lo tanto, de remoción de P y otros nutrientes, varían mucho entre campos, pero también pueden variar significativamente dentro de un campo.

La **Figura 3** muestra como ejemplo la evolución del nivel de P en un suelo de Iowa con los años como consecuencia de la fertilización y la producción de maíz y soya. Esta figura también muestra que la dosis necesaria para mantener cierto nivel inicial de P en el suelo es mayor a medida que el nivel inicial aumenta y que la tasa de declinación es mayor a niveles de P altos y durante los

primeros años cuando la fertilización se suspende. Este resultado también se ha observado en otras zonas del mundo, incluida Argentina. Aun cuando todavía no se entiende bien la razón para estas tendencias, se piensa que se debe a una mayor absorción y concentración de P con niveles altos y también mayores pérdidas de P con escurrimiento superficial o a través del perfil del suelo.

En el cinturón maicero, la investigación ha demostrado que un nivel óptimo de P (Bray-1, 16-20 ppm a 15 cm de profundidad) se mantiene o aumenta un poco al reponer el P extraído con las cosechas siempre y cuando los rendimientos y concentración de P de la porción cosechada se estime correctamente. Sin embargo, otras investigaciones han mostrado que la relación entre balance neto de P (aportes y remoción) y el análisis de suelo es buena a través de varios años, pero puede ser pobre en el corto plazo (**Figura 4**).

El concepto de mantener un deseado nivel de P o K disponible se usa en la mayoría de los estados de los Estados Unidos y en otras regiones templadas y claramente refleja uno de los aspectos más importantes de la filosofía predominante. Este concepto no se aplica cuando se sigue una filosofía estricta de nivel de suficiencia. Sin embargo, en muchas partes no se define bien cuál es el criterio seguido para elegir el nivel o rango de valores de análisis de suelo a mantener. Las

recomendaciones de Iowa claramente indican que el nivel de P disponible que se recomienda mantener (la clase óptima) es aquel nivel que resulta en un 25 % de respuesta pequeña a moderada. Una dosis de P basada en remoción sin duda aplica suficiente P para producir el máximo rendimiento de un cultivo o rotación (cuando se aplica al maíz la cantidad para la rotación maíz-soya). Sin embargo, esto no quiere decir que la dosis de fertilización basada en reposición sea la dosis óptima económica para un cultivo. En muchos casos, una dosis menor sería suficiente, pero predecir con precisión cuál sería esa dosis para cada campo o año en particular es difícil y la aplicación de una dosis muy baja reduce el retorno económico total y aumenta el riesgo de deficiencias futuras. Por lo tanto, el uso del concepto de mantenimiento refleja una filosofía de manejo de nutrientes a largo plazo y reduce el riesgo de perder rendimiento.

Otros factores afectan en forma significativa el manejo de la fertilización en general y el nivel de nutriente disponible que se quiere o puede mantener. Dos aspectos importantes son la filosofía del productor o consultor respecto la administración de la empresa agrícola y la actitud respecto al riesgo de perder retornos económicos debido a deficiencias o excesos de fertilización. La mayoría de los productores de Iowa y del cinturón maicero piensan que la fertilidad es la base del sistema productivo y que aún pequeñas deficiencias de nutrientes que limitan el rendimiento reducen la productividad y rentabilidad del sistema de producción. Muchos piensan que mantener un nivel de análisis que determina un 25 % probabilidad de respuesta es muy conservador y prefieren mantener niveles con una probabilidad de respuestas de aproximadamente el 5 % (la clase alta). Este es especialmente el caso cuando los precios de los fertilizantes son bajos y se sospecha que van a subir en el futuro. Debido al mismo razonamiento, los productores que empiezan a trabajar en suelos con niveles de P mayores al óptimo, ya sea naturalmente o porque anteriormente se habían subido los niveles, son reacios a esperar para fertilizar hasta que los niveles bajen del nivel óptimo.

Otro factor importante es la tenencia de la tierra. Fixen (1992) demostró que los intereses bancarios y tenencia de la tierra tienen un gran impacto en el nivel de P o K disponible que se considera óptimo y que se debe mantener. Hay muchas formas de tenencia de tierra y contratos de producción que no se pueden discutir en detalle en este artículo. Es claro que bajas dosis de fertilización aplicadas a suelos con niveles bajos no es una buena decisión económica aún con tenencia incierta en el futuro porque la probabilidad de reducir el beneficio

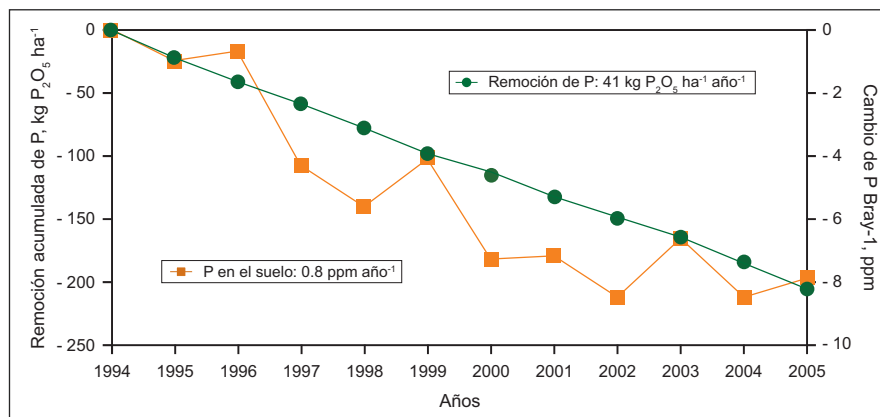


Figura 4. Cambios en P disponible (Bray-1) y remoción de P a través del tiempo para suelos sin fertilización fosfatada manejados con maíz y soya (promedios de cinco sitios). Adaptado de Mallarino y Prater (2007).

económico a la fertilización es grande y se puede limitar el beneficio económico al sistema de producción en general. Por otro lado, mantener un nivel de P disponible donde la probabilidad de respuesta es baja pensando en la productividad futura puede no ser una buena decisión cuando la tenencia de tierra no es segura por lo menos por dos o tres años.

Bibliografía

- Dahnke, W.C., y R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. p. 45-71. In R.L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis, 3rd ed. SSSA, Madison, WI.
- Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1118-1128.
- Fixen, P. 1992. Role of land tenure and other factors in soil P interpretations. p. 125-133. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 18-19. Vol. 8. Bridgeton, MO.
- Mallarino, A.P., y A.M. Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.
- Mallarino, A.P., y J. Prater. 2007. Corn and soybean grain yield, phosphorus removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. p.241-253. In *The Integrated Crop Management Conf. Proceedings*. Nov. 29-30, 2007. Ames, IA. Iowa State Univ. Extension.
- Mallarino, A.P. 2009. Long term phosphorus studies and how they affect recommendation philosophies. p. 6-12. In *North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings*. Nov. 14-15. Vol. 25. Des Moines, IA.
- Sawyer, J.E., A.P. Mallarino, R. Killorn, y S.K. Barnhart. 2002. General guide for crop nutrient recommendations in Iowa. Publ. Pm-1688 (Rev.). Iowa State Univ. Extension. Ames, IA. ❖