

MANEJO INTEGRADO DEL P EDÁFICO. CRITERIOS DE DIAGNÓSTICO PARA LA FERTILIDAD FOSFATADA

A. A. del C. Rollán ^{a,*}, O.A. Bachmeier ^a, M.A. Moreno ^b

^a Edafología, Facultad de Ciencias Agropecuarias.

^b Laboratorio de Suelos y Aguas, Facultad de Ciencias Agropecuarias

(* arollan@agro.unc.edu.ar)

RESUMEN

La factibilidad de predecir la respuesta a la aplicación de fósforo (P) es un paso crítico en el diseño de un plan de fertilización fosfatada. La predicción se inicia con el análisis de suelo. No existe ningún sustituto de un análisis de suelo preciso y confiable. Sin embargo, la forma en que se realiza el muestreo, la técnica analítica utilizada, la localización del fertilizante en campañas anteriores, los cambios en la orientación de las líneas de siembra e incluso la estratificación generada por la siembra directa limitan la precisión y confiabilidad del valor de P medido. De allí la importancia de conocer estos factores para incluirlos dentro de los criterios o pautas a considerar al momento de realizar el diagnóstico de la fertilidad fosforada.

Palabras clave: *muestreo – P-extractable – índice de retención – variabilidad espacial*

INTRODUCCIÓN

Con un nuevo paradigma centrado en el bienestar general de los cultivos y el cuidado del ambiente, el manejo de la fertilidad fosfatada debe de realizarse de forma eficiente y práctica para activar la disponibilidad y accesibilidad de fuentes de fósforo (P) para la planta, con el fin de optimizar la productividad de los cultivos, disminuir de manera drástica el uso de fertilizantes inorgánicos, la contaminación de los suelos y el deterioro agro-ecológico (Fixen, 2003).

La FAO (1998) propuso el concepto de manejo nutricional integral, que consiste en la sustentabilidad del suelo para aportar nutrientes y el uso racional en el manejo de sus fuentes (Hossner y Jou, 2009). A tal fin, uno de los aspectos sobre el cual es necesario trabajar es en el ajuste de los métodos de diagnóstico que se utilizan para el cálculo de la cantidad de fertilizantes a aplicar.

Sobre la base de que el análisis del contenido de P edáfico como único criterio resulta una herramienta deficiente para el diagnóstico de fertilidad, este último se podría mejorar a través de la inclusión de aquellos aspectos que regulan la dinámica del nutriente y condicionan la

respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada (Loewy, 2002).

Anghinoni et al. (2003); García y Picone (2004); Rollán et al. (2017), entre otros, brindan información sobre cuáles son los factores edáficos, de manejo, culturales, analíticos e incluso del comportamiento u absorción diferencial de los cultivos que deberían tenerse en cuenta al momento de realizar el diagnóstico.

Las recomendaciones generales de manejo requieren de un fino ajuste a las condiciones locales. Para ello, técnicos, productores y asesores cuentan con una valiosa herramienta: la información generada a nivel regional con el fin de dar respuestas a un sinnúmero de interrogantes que mantienen vigente el interés por el P edáfico.

Este trabajo tiene como fin, a la luz de los conocimientos actuales, individualizar los aspectos a tener en cuenta para en el muestreo, determinación e interpretación de los resultados analíticos para el manejo integral de la nutrición fosfatada. Para ello, cada uno de los factores a considerar se abordará individualmente a continuación.

Formas del fósforo en el suelo

El P en el suelo se encuentra bajo la forma de compuestos orgánicos (Po) e inorgánicos (Pi) con distintas proporciones relativas en función del tipo de suelo y ambiente. El Po está compuesto de varias fracciones: desde las más lábiles hasta las más resistentes a la mineralización. La fracción Po lábil corresponde a la biomasa microbiana. Cross y Schlessinger (1995) muestran que el fraccionamiento de Hedley proporciona un índice valioso de la importancia relativa de los procesos biológicos para el contenido de P en el suelo. El Po lábil solo tiene un rol cualitativo ya que hasta el momento no existe una metodología de rutina para su evaluación.

La valoración cuantitativa del P se reduce a la medida analítica del Pi de modo que el requerimiento de fertilización queda íntimamente ligado al resultado del análisis químico del suelo (Loewy, 2002).

Fósforo extractable Bray

La interpretación de los análisis químicos de suelos requiere de un necesario conocimiento de la teoría que los soportan. Los análisis químicos miden cantidad de los nutrientes presentes en el suelo, Etchevers Barra (1999) llama a esta medida índice de la disponibilidad del nutriente. Los índices de disponibilidad pueden corresponder a la fracción soluble, intercambiable, extractable, fijada o mineralizable del nutriente por lo que es necesario saber para cada nutriente qué fracción ha sido cuantificada.

En el caso del P, las técnicas analíticas de rutina que se utilizan con fines diagnósticos brindan información del P extractable (Pe) (Bachmeier y Rollán, 1994). Cabe aclarar que en ningún caso la medida analítica del Pe corresponde a la cantidad que realmente la planta puede utilizar, sino que, tal como se verá más adelante, éstas son cantidades que se relacionan de una manera definida con la fracción disponible en el suelo, que es a la que la planta puede tener acceso (Etchevers Barra, 1999).

Muestreo

La recomendación para la fertilización fosfatada se basa en el nivel de Pe medido en una muestra de suelo representativa del lote. En el caso del P, esta representatividad está condicionada por la existencia de zonas con alta concentración de P que causan grandes errores en la determinación del Pe a nivel lote.

En la Figura 1 se presenta el esquema explicativo propuesto por Bianchini (2016), que muestra de qué manera el simple cambio de orientación de las líneas de siembra en la secuencia de cultivos que se realiza en el lote, determina que no sea homogéneo en lo que respecta a los contenidos de Pe. Esta heterogeneidad resulta en una alta variabilidad analítica que campaña tras campaña se observa en los análisis de suelos.

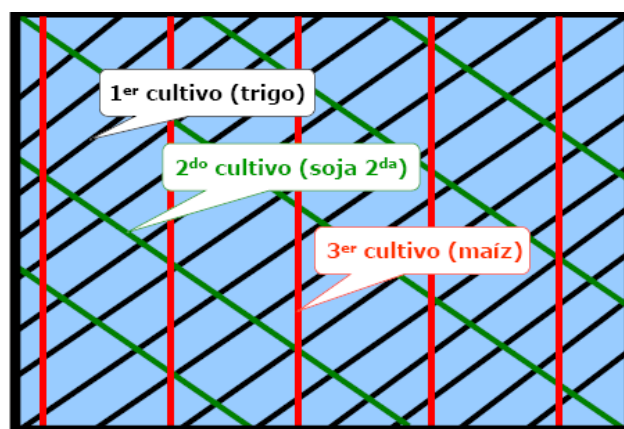


Figura 1: Esquema de la distribución espacial que resulta la aplicación de fertilizantes fosforados en banda para la secuencia trigo/soja/maíz por cambio en la orientación de las líneas de siembra (fuente: Bianchini, 2016)

Además, el incremento del uso agrícola de los lotes (particularmente en la zona centro y norte de Córdoba) ha llevado a la desaparición de aguadas, corrales de encierre, montes de reparo, antiguos puestos, etc. Pocos años bastan para que ya no queden indicio de su presencia por lo que, al momento de realizar el muestreo, no se cuenta con indicadores visibles de esos sectores “ricos” en P.

Boem y Marasas (2005) llaman **zonas rojas** a las zonas dentro del lote con una concentración de $P_e > 40\text{ppm}$. Los autores concluyen que la inclusión en la muestra de suelo de sub-muestras provenientes de estas áreas genera *incerteza*: campañas donde los análisis de suelo indican que hay “mucho P” y otros de marcada caída en los niveles de P; *dudas*: sobre la calidad de la tarea analítica del laboratorio; *indefinición*: al momento de calcular la dosis de P a aplicar, y un sinnúmero de interrogantes que evidencian la necesidad de contar con criterios de muestreo que permitan minimizar este efecto.

Anghinoni et al. (2003) sugieren el muestreo de fajas transversales a las bandas o líneas de fertilización de años anteriores, desde una entrebanda a la siguiente entrebanda, incluyendo la línea fertilizada (Figura 1). El muestreo puede

realizarse con barreno en forma transversal a la banda de fertilización considerando 3 sub-muestras entre bandas y 1 sobre la banda en bandas a 17,5-19 cm de separación; para bandas de 38 a 40 cm se recomienda 7 sub-muestras entre bandas y 1 en la banda y, para bandas de 60 a 80 cm, 13 sub-muestras en la entre banda y 1 en la banda (Anghinoni et al., 2003).

Otra alternativa para reducir el efecto de las zonas rojas es, mediante un muestreo sistemático del lote, hacer un mapa de la distribución espacial del Pe como se muestra en la Figura 2a y 2b (Boem y Marasas, 2005). Esto permite conocer la ubicación y el porcentaje de la superficie del lote ocupado por las **zonas rojas** a fin de excluirlas del muestreo o incluirlas pero con un plan de muestreo y manejo específico.

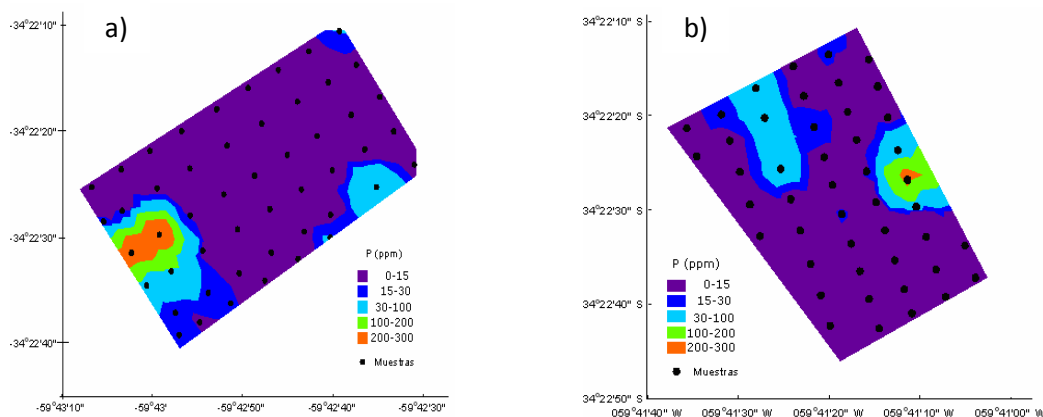


Figura 2. Mapas de distribución del fósforo extractable (Pe) medido en muestras georeferenciadas de 0 a 20 cm de profundidad por muestreo sistemático. Visualización porcentual de zonas rojas (>40ppm de Pe) en dos lotes de producción a) y b) del norte de la provincia de Buenos Aires. Adaptado de Boem y Marasas (2005)

Análisis de suelo

La cuantificación del P disponible en el suelo, es decir, aquel susceptible de ser absorbido por la planta, se investiga desde hace más de un siglo (Carrero et al., 2015). A pesar de ello, no hay un método universal para su estimación por lo que el P medido se identifica como P extractable (Pe) y no como P disponible.

Los extractantes utilizados en las diversas técnicas para dosar el fósforo informan sobre el factor intensidad (cantidad de P-solución) y parcialmente sobre el factor cantidad (cantidad de P-matriz), cuya solubilización será directamente proporcional a la energía del extractor utilizado (Peaslee, 1978). Esta energía depende de la composición del extractante, la que determina su pH y el tipo de interacción entre el extractante y la matriz de suelo.

En nuestro país a principio de los '80 comenzó a generalizarse el uso del método de Olsen (1954) para suelos con pH >7 y el método de Bray (1945) para los suelos con pH <7, en función de la naturaleza alcalina y ácida respectivamente de cada uno estos extractantes. A partir de allí se realizaron numerosos estudios tendientes a evaluar y comparar ambos métodos.

Bachmeier y Rollán (1994) evaluaron para el Gran grupo de suelos dominante en el área central de la Provincia de Córdoba (Haplustol), la relación existente entre Pe cuantificado por Olsen y Bray con: el pH del suelo, el contenido de materia orgánica, la profundidad de muestreo y el sistema de labranza. Los autores concluyen que ambos métodos (Olsen y Bray) son adecuados para evaluar los niveles de Pe en los suelos de la provincia. Sin embargo, debido a su mayor repetibilidad y sensibilidad analítica, concluyen que el método de Bray y Kurtz N° 1 es el más apto con fines diagnóstico.

Actualmente se reconoce al método de Bray y Kurtz N° 1 o Bray 1 como el método estándar para la medida del Pe de modo que los laboratorios informan los resultados como P-Bray (García y Picone, 2004).

Interpretación de los resultados

La interpretación de los análisis químicos de suelos requiere de un necesario conocimiento de las demandas nutricionales de los cultivos. Los cultivos no sólo varían en su modelo de respuesta, también difieren en los grados de restricción a los niveles de fertilización, formas de aplicación y efecto residual del P.

Para interpretar el resultado analítico obtenido es necesario comparar el dato con un valor de concentración: nivel crítico (NC), rango de concentración (RC) o índices de distinta naturaleza (IP) determinados con anterioridad para cada cultivo. Esta información está disponible para la mayoría de los cultivos extensivos y pasturas como se muestra en la Figura 3.

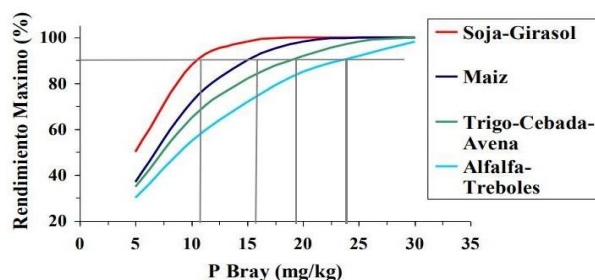


Figura 3. Relación entre el contenido de P extractable del suelo (Bray 1) y los rendimientos relativos de los cultivos de soja, girasol, maíz, trigo, cebada, avena, alfalfa y treboles presentado por Bianchini (2016) adaptado de Olson (1975)

Cantidad de P a aplicar

Uno de los primeros trabajos argentinos que considera la incidencia de los fenómenos de sorción de P en el cálculo de la dosis de fertilizante aplicar es el de Quinteros (2002). El autor define la expresión dosis equivalente (De) como los kg de P necesarios para incrementar una ppm de P-Bray. Conociendo el índice de retención de P (De) podemos estimar la cantidad de P a aplicar por ha.

Los kg ha⁻¹ de fertilizante fosforado a aplicar se calculan como la diferencia entre el P considerado óptimo (PNC), sea la concentración crítica, el valor umbral o el nivel crítico del cultivo y el Pe medido a la siembra, multiplicada por los kg ha⁻¹ requeridos para aumentar una ppm el contenido de P Bray en el suelo (De). Así:

$$\text{Dosis a aplicar (kg ha}^{-1}\text{)} = (\text{PNC}-\text{Pe}) \times \text{De}$$

(Quinteros, 2002)

Quinteros (2002) y Bianchini (2016) coinciden al señalar que para una amplia gama de suelos el valor de De oscila entre 3 y 5 kg P ha⁻¹, siendo 5 kg P ha⁻¹ el valor que se utiliza con fines prácticos.

A modo ejemplo, si el cultivo a implantar es maíz la cantidad de P requerido PNC será igual a 16 ppm P o 16 ppm de PNC y en el caso que el análisis de suelo indicara que Pe (0 a 20 cm) o P-Bray es de 9 ppm, asumiendo un valor promedio de De= 4 kg P ha⁻¹, el cálculo de la dosis de P aplicar resulta de:

Dosis a aplicar (kg ha^{-1}) = $(16 - 9) \times 5 = 35 \text{ kg P ha}^{-1}$
Si el fertilizante a aplicar fuera súper fosfato triple (0 46 0) la dosis de fertilizante aplicar sería de 80 kg ha^{-1} .

Localización del fertilizante

Evaluaciones realizadas en Uruguay (Bordoli et al., 2004) y en la región pampeana argentina (Bianchini, 2003) han demostrado que, bajo las condiciones edafo-climáticas locales, las aplicaciones al voleo de fertilizantes fosfatados solubles antes de la siembra resultan en respuestas similares a las de las aplicaciones en bandas al momento de la siembra. Estos resultados indicarían que la fijación de P en capas superficiales del suelo no sería un proceso de importancia bajo siembra directa (SD) en los molisoles de esa región.

No sucede lo mismo en los molisoles franco limosos de la zona centro de la provincia de Córdoba. En el espesor de 0 a 5 cm, la biodisponibilidad de P y la residualidad de los fertilizantes aplicados están reguladas por fenómenos de adsorción por parte de los coloides orgánicos, acumulados por el proceso de su estratificación asociado a la SD (Rollán et al., 2017) por lo cual se espera un comportamiento diferencial entre las aplicaciones en línea *versus* las aplicaciones al voleo.

García y Picone (2004) explican que las aplicaciones al voleo anticipadas presentan ventajas desde el punto de vista logístico, ya que incrementan la capacidad de trabajo de los equipos y podrían reducir la variabilidad horizontal y, por lo tanto, los problemas asociados al muestreo y diagnóstico de la fertilidad. Sin embargo para nuestras condiciones a) de manejo, donde el doble cultivo trigo-soja no integra la secuencia y b) edáficas, asociadas a los cambios inducidos por SD (Rollán y Bachmeier, 2015) llevan al incremento superficial de los procesos que sacan P de la solución del suelo a través de reacciones químicas de precipitación y de adsorción en los coloides (Q_{max}), y conducen a la acumulación formas de P más biodisponibles (Selles, 2003). Esto se debe a que si bien los

valores de Q_{max} de 0 a 5 cm son hasta 42 % mayores a los de 0 a 20 cm, los bajos valores de la constante de energía de sorción, k , facilitan el proceso de desorción de fosfatos hacia la solución del suelo en los primeros centímetros de profundidad, por lo que la aplicación localizada resulta más favorable (Bravo et al., 2013).

El fósforo como contaminante

Debido a que el P se mueve muy poco, en casi todos los suelos agrícolas, las pérdidas por lixiviación al manto freático no tienen importancia. La principal preocupación ambiental relativa al uso de fertilizantes fosfatados es el potencial que estos tienen de contribuir con P a los cuerpos superficiales de agua, lo que resulta en una acelerada eutrofización. Cabe indicar que el P aportado por los fertilizantes orgánicos tiene el mismo potencial de contaminación que los fertilizantes inorgánicos (Fixen, 2003).

El índice utilizado como predictor de pérdida potencial de P es el grado de saturación de P (ISP). Este índice se determina a través de la medida de la Q_{max} , obtenida a partir de isothermas de adsorción y el P_e (P-Bray).

En nuestra provincia estudios realizados por el Laboratorios de Suelos y Aguas de la FCA (datos no publicados) muestran que los valores de ISP de los suelos del centro de Córdoba se encuentran comprendidos en un rango entre el 12 y 39 %. Los mayores valores de ISP se observan de 0 a 5 cm en coincidencia con la estratificación superficial generada por la SD. Este comportamiento sugiere que los suelos del área son vulnerables a la pérdida de P, lo que determina la necesidad de evaluar el potencial efecto contaminante de la fertilización fosfatada, realizando un seguimiento del P soluble en las aguas de escorrentía y drenaje.

CONSIDERACIONES FINALES

Para mejorar el diagnóstico de fertilidad fosforada, se debe prestar atención a la manera en que se diseña y ejecuta el muestreo.

Se aconseja geo posicionar los lugares de extracción de cada sub-muestras. El número de sub muestras que integra la muestra compuesta deben considerar el modo de fertilización.

El método de Bray y Kurtz N° 1, que se utiliza con fines diagnóstico, informa el Pe. En ningún caso el P medido corresponde a la cantidad que realmente la planta puede utilizar.

Con fines prácticos se recomienda el valor de De de 5 kg P ha⁻¹ considerando que la biodisponibilidad de P y la residualidad de los fertilizantes aplicados están reguladas por fenómenos de adsorción debido a la estratificación asociada a la SD.

Considerando los NC de P de trigo, maíz y soja, con niveles de Pe menores de 15 ppm, es altamente probable la posibilidad de encontrar respuestas directas a la fertilización con P.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anghinoni I, Schlindwein J, Nicolodi M. 2003. Manejo del fósforo en siembra directa en el sur de Brasil: Variabilidad de fósforo y muestreo de suelo. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pp. 20-26
- Bachmeier OA, Rollán AA. 1994. Fósforo extractable en un suelo Haplustol éntico del área semiárida central de Córdoba, Argentina. Comparación de dos métodos de evaluación. *AgriScientia XI*: 23-28.
- Bianchini A. 2003. Localización de fósforo en siembra directa. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pp. 79-82.
- Bianchini A. 2016. Muestreo de suelos. Córdoba Curso Diagnostico Suelo y Fertilidad 2da Parte.
- Boem FH, Marasas PA. 2005. Pequeñas zonas con altas concentraciones de fósforo causan grandes errores en la determinación de fósforo disponible a nivel de lote. *INPOFOS Informaciones agronómicas* 25:9-13.
- Bordoli JM, Quincke A, Marchessi A. 2004. Fertilización fosfatada de trigo en siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas CD. AACs, Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Bravo I, Montoya JC, Menjivar JC. 2013. Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del Cauca, Colombia *Acta Agronómica*, 62(3), 261- 267.
- Bray R H, Kurtz L. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Carrero A, Zambrano AG, Hernández EG, Contreras FB, Machado D, Bianchi GB, Varela RD. 2015. Comparación de dos métodos de extracción de fósforo disponible en un suelo ácido. *Avances en Química*, 10: 29-33.
- Cross A, Schlessenger W. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64:197-214.
- Etchevers Barra J. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana*, 17 (3), 209-219.
- FAO. 1998. The estate of food and agriculture. Disponible en INTERNET <http://www.fao.org/3/w9500e/w9500e.pdf>, Visto 30/06/2019.
- Fixen, P. 2003. Dinámica del fósforo en el suelo y en el cultivo en relación al manejo de los fertilizantes fosfatados. Disponible en INTERNET <http://www.inpofos.org/ppiweb/ltamn.nsf/>. Visto 25/04/2019.
- García FO, Picone LI. 2004. Dinámica y Manejo de Fósforo en Siembra Directa *INFORMACIONES AGRONOMICAS* 55:1-5
- Hossner LR, Jou ASR. 2009. Soil nutrient management for sustained food crop production in upland farming systems in the tropics. Soil and Crop Sciences Department, Tennessee. USA. 1-18 pp.
- Loewy T. 2002. Estrategia de fertilización fosfórica. *IPNI* 16: 16-18.

- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. USDA, Washington, DC
- Peaslee DE, 1978. Relationships between relative crop yields, soil test phosphorus levels, and fertilizer requirements for phosphorus. Soil Sci. Plant Anal. 9:429-442.
- Quinteros CE.2002. Dosificación del Fósforo según Tipo de Suelos. INPOFOS 16 Edición Especial 8-10.
- Rollán A. Bachmeier O.2015. Efecto de la siembra directa continua sobre el comportamiento físico-funcional de los suelos franco-limosos de la región semiárida central de la provincia de Córdoba (Argentina). Revista TERRA Latinoamérica 33 (4):189-199
- Rollán AA, Bachmeier OA, Silva Rossi MM, Moreno MA. 2017. Efecto de la siembra directa sobre los procesos de adsorción de fósforo en los molisoles del centro norte de la provincia de Córdoba (Argentina). AgriScientia 34 (2):1-11,
- Selles F. 2003. Influencia de la siembra directa en la dinámica del fósforo en el suelo. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pp. 12-19