

Balance y dinámica de las formas de fósforo edáfico y su disponibilidad para el trigo

Julieta Bongiovani, Julio Iglesias, Gabriela Minoldo, Raúl Agamenoni y Juan A. Galantini

El fósforo disponible para las plantas proviene de la fracción soluble, en equilibrio con las fracciones lábiles orgánicas e inorgánicas, las moderadamente lábiles y las de muy baja labilidad. Este equilibrio es de extrema importancia para garantizar el adecuado suministro de P a las plantas.



El fósforo (P) es un elemento considerado esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Promueve el desarrollo radical y da precocidad a las plantas, ya que adelanta el período de madurez, a diferencia del N que tiende a prolongar el crecimiento vegetativo. La cantidad total de P absorbida por los diferentes cultivos para producir una tonelada de grano, fibra o forraje son muy variables. Sin embargo, es posible tener idea de valores de referencia, así como de sus índices de cosecha, a partir de la planilla desarrollada por el IPNI (García *et al.*, 2015; Tabla 1).

Tabla 1. Requerimientos de P (kg Mg^{-1} grano/forraje) e índice de cosecha (IC) de diferentes cultivos.

| Cultivo | Producción (Mg ha^{-1}) | P absorbido (kg) | Requerimiento P (kg Mg^{-1}) | ICP |
|-----------------|------------------------------------|------------------|---|------|
| Trigo | 4 | 20 | 5,0 | 0,80 |
| Maíz | 10 | 40 | 4,0 | 0,76 |
| Sorgo granífero | 9 | 40 | 4,4 | 0,82 |
| Soja | 9 | 28 | 7,0 | 0,88 |
| Alfalfa | 18 | 45 | 2,5 | 1,00 |
| Festuca | 10 | 30 | 3,0 | 1,00 |

Fuente: García et al., (2015).

Desde el punto de vista agronómico, el P disponible para las plantas proviene de la fracción soluble en forma de fosfatos mono (HPO_4^{2-}) y diácidos (H_2PO_4^-). Esta fracción se encuentra en equilibrio con las fracciones lábiles orgánicas e inorgánicas, las moderadamente lábiles y las de muy baja labilidad. El abastecimiento de P desde la fracción lábil es de extrema importancia para garantizar el adecuado suministro de este nutriente a las plantas.

El contenido total de P en la capa superficial del suelo puede variar desde 200 mg kg^{-1} en suelos arenosos hasta 5000 mg kg^{-1} cuando nos referimos a texturas finas. En suelos del SO

bonaerense, se han reportado contenidos varían entre 200 y 1000 mg kg⁻¹ (Galantini y Rosell, 1997; Suñer y Galantini, 2012, 2013). Esta región se caracteriza por las escasas precipitaciones y la incertidumbre de su ocurrencia, aspecto que condiciona la productividad y sustentabilidad de los sistemas agropecuarios. En el caso particular del sur de la provincia de Buenos Aires, la combinación de períodos de sequía, suelos de texturas gruesas y escasa cobertura ha llevado a severos procesos erosivos. En este contexto es de vital importancia el estudio del efecto de largo plazo que tienen los diferentes sistemas de producción sobre las propiedades del suelo. Considerando que el agua es uno de los factores limitantes de la producción, debe conocerse cómo diferentes alternativas conservacionistas pueden influir sobre la productividad y la posibilidad de mejora de las eficiencias de uso del agua y los nutrientes. El P colabora con el cumplimiento de este último objetivo al estimular el desarrollo de raíces, lo que permite una mejor exploración y capacidad de extracción del agua edáfica. Según la génesis y la historia agrícola de los suelos de la región, los contenidos de P son en general bajos. Como se expresó anteriormente, si bien la cantidad de fósforo total (Pt) puede ser suficiente, sólo una pequeña porción del mismo está disponible para los cultivos, fracción que está en equilibrio dinámico con las formas orgánicas e inorgánicas del suelo. Evidentemente para comprender en forma global la dinámica del P e interpretar los resultados de los análisis de fertilidad, deben conocerse los contenidos de P en cada una de las diferentes formas que se encuentren en el suelo. Además, se debe considerar el impacto de las diferentes prácticas agrícolas sobre las formas orgánicas e inorgánicas y relacionarlas con los cambios en la absorción por el cultivo, su nutrición, rendimiento y calidad industrial (Galantini *et al.*, 2005).

Dentro de los factores que determinan la disponibilidad de P, es importante la función de las formas orgánicas como parte del reciclado de este nutriente (Anderson, 1996; Szott & Palm, 1997). La disminución de fósforo orgánico (Po) inducida por la agricultura ha sido reportada por varios autores (Charter & Mattingly, 1980; Tate, 1984). Los cambios netos de Po en suelos cultivados son usualmente muy pequeños en relación al Pt, por lo que se requieren varios años del mismo manejo para detectar cambios significativos. La mineralización de Po en un período entre 20-50 años en las parcelas de Rothamsted (Inglaterra) fue del orden de 0,5-3,2 kg P ha⁻¹ año⁻¹ (Charter & Mattingly, 1980). Cuando el P de la reserva del suelo se agota, el mismo se repone a partir de formas lábiles y moderadamente lábiles; si éstas se agotan, las especies menos solubles como los minerales

secundarios serán las que determinen la concentración de P en la solución del suelo (Galantini *et al.* 2005).

Los sistemas con laboreos mínimos o nulos favorecen la estratificación de la materia orgánica (MO), del nitrógeno (N) y P asociados (Unger, 1991; Galantini *et al.*, 1996; Holanda *et al.*, 1998). En particular la siembra directa (SD) produce una modificación del ambiente edáfico y cambios en el ciclo de la MO, con la consecuente modificación de los equilibrios de las formas de P y su disponibilidad para los cultivos. Este sistema produce una mayor concentración y disponibilidad de P en el suelo superficial que el logrado con la labranza convencional, producto de un aumento de la MO. Los residuos superficiales mantienen el suelo más húmedo, favoreciendo la difusión del P hacia las raíces, mejora la actividad microbiana, así como el ciclado del P y la calidad del suelo (Zibilske & Bradford, 2003).

Descripción experimental

El presente estudio se realizó en la EEA INTA Hilario Ascasubi, Ruta 3, km 794 partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. El clima de la región se caracteriza por vientos fuertes del O, NO y N, temperaturas bajas y escasa humedad (precipitación de 447,2 mm anuales promedio de 1966-2011), con veranos de alta demanda hídrica e inviernos rigurosos.

En un ensayo de sistemas productivos de labranza y rotaciones en secano iniciado en 2004 en un *Haplustol Éntico* de textura arenosa franca, con diseño aleatorizado en tres bloques, se tomaron muestras de tres sistemas de producción (SP) con diferente labranza, definidos como:

LC, Labranza convencional, trigo-campo natural con pastoreo;

LV, Labranza vertical, trigo- campo natural con pastoreo;

SD, Siembra directa, rotación trigo- avena+vicia con pastoreo.

En cada SP se extrajo suelo en los 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad, cuando todas las rotaciones coincidieron con trigo, se secaron al aire y se tamizaron por 2 mm. Durante la madurez fisiológica del trigo se tomaron 2 muestras de material vegetal de 1 m lineal cada una por tratamiento y bloque.

Determinaciones analíticas

En el suelo: P extraíble (Pe), Bray & Kurtz (1945); P orgánico (Po) e inorgánico (Pi), Saunders & Willians (1955); pH (suelo: agua, 1:2,5); densidad aparente (DA) Blake & Hartge (1986).

En el material vegetal: Rendimiento en grano (kg ha^{-1}); Rendimiento en materia seca total aérea (MSta kg ha^{-1}); Peso de 1000 granos (g); Número de espigas m^{-2} .

Resultados

Rendimiento de trigo

Los rendimientos medios de MSta del trigo en los distintos sistemas de labranza mostraron diferencias significativas (Tabla 2). En LC presentó menor producción (2905 kg ha⁻¹) que en el resto de los sistemas, posiblemente como consecuencia de la mayor agresividad del sistema. La SD presentó el mayor rendimiento (6438 kg ha⁻¹), asociado esto a la incorporación de verdeos consorciados y a mejoras en la eficiencia de los barbechos. En cambio, en el tratamiento LV se observaron valores de producción intermedios.

La producción de granos mostró similar tendencia que la MSta, con aumento del rendimiento a medida que disminuyó el movimiento del suelo: LC ≤ LV ≤ SD. Igual tendencia se observó en los valores medios de índices de cosecha de grano (IC) en cada SP; menores en LC (0,31) mayores en LV (0,40) e intermedios en SD. Particularmente el IC=0,31 determinado en LC, corresponde un valor bajo relacionado a los observados para un cultivo de trigo de desarrollo normal de la región. Esto podría atribuirse a la menor cantidad de agua almacenada en el perfil de suelo provocada por el sistema de labranza, sumado a las escasas precipitaciones desde el inicio del ciclo hasta principios de la etapa de llenado de granos (25 mm junio- fin de septiembre). Los mayores números de espigas m⁻² observados en SD reflejaron mejores condiciones durante la primera etapa del desarrollo del trigo, posiblemente debido a la mejora del balance de agua consecuencia de la cobertura del suelo con los residuos. El aumento en la cantidad de plantas que producen mayor MSta, genera mayores requerimientos hídricos, los que no siempre pueden ser satisfechos (Galantini *et al.*, 2006).

Tabla 2. Rendimiento y parámetros de productividad del trigo con diferente labranza.

| | LC | LV | SD |
|------------------------------|--------|---------|---------|
| MSta (kg ha ⁻¹) | 2905 a | 4467 b | 6438 c |
| Grano (kg ha ⁻¹) | 933 a | 1775 ab | 2392 b |
| IC | 0,31 a | 0,40 b | 0,37 ab |
| Nº esp. m ⁻² | 246 a | 369 ab | 391 b |
| Peso 1000 gr (g) | 28 a | 30 ab | 32 b |

LC, labranza convencional; LV, labranza vertical; SD, siembra directa. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas. (DMS; $\alpha=0,05$).

Densidad aparente

Los valores de DA en 0-20 cm fueron diferentes entre los sistemas de labranza (Tabla 2). La SD mostró los mayores valores de DA debido al menor laboreo. En los sistemas LC y LV (con mayor cantidad de labores) no superaron el valor de 1,38 Mg m⁻³. En los 0-5 cm en todos los sistemas de labranza se observaron valores semejantes. En 5-20 cm en SD el suelo

con menores labores mantiene un valor semejante en todo el perfil estudiado. En cambio, en LC y LV la DA dependerá del estado del suelo al momento de la toma de muestra, debido que las labores ocasionan una remoción del suelo que generan una gran cantidad de macroporos en forma artificial con estabilidad de corto plazo que colapsan luego del impacto de las lluvias y los ciclos secos (Iglesias *et al.*, 1996), por lo que el suelo se compacta y aumenta la DA. También se debe tener en cuenta la profundidad de labor que en LC y LV llegó a los 15 cm

El pH en el suelo

Los valores de pH en 0-15 cm del suelo variaron entre 6,7 y 7,0 (Tabla 2). El pH del suelo puede variar a nivel anual como estacional dependiendo tanto de condiciones ambientales (suelo y clima) y de manejo. En este caso, en los sistemas con menor laboreo (LV y SD) se observaron valores más bajos en superficie, los que fueron pequeños e indican estabilidad de los sistemas. En 0-5 cm se observó mayor pH en LC frente a los demás SP posiblemente debido a que sólo hubo cultivo año por medio. Particularmente, el año de estudio, el contenido de materia seca aportado al suelo fue menor.

Tabla 2. Densidad aparente (DA, Mg m⁻³) y pH en la capa superficial del suelo con diferentes sistemas de labranza

| Profundidad (cm) | DA (Mg m ⁻³) | | |
|---------------------|--------------------------|--------|--------|
| | LC | LV | SD |
| 0-5 | 1,27 a | 1,21 a | 1,20 a |
| 5-10 | 1,37 a | 1,32 a | 1,50 b |
| 10-15 | 1,42 b | 1,35 a | 1,55 c |
| 15-20 | 1,46 a | 1,45 a | 1,56 b |
| 0-20 | 1,38 b | 1,33 a | 1,45 c |
| | pH | | |
| | LC | LV | SD |
| 0-5 | 7,1 b | 6,6 a | 6,6 a |
| 5-10 | 7,0 b | 6,7 a | 6,8 a |
| 10-15 | 7,0 a | 6,8 a | 7,0 a |
| 0-15 | 7,0 b | 6,7 a | 6,8 ab |

LC, labranza convencional; LV, labranza vertical; SD, siembra directa. Letras distintas en la misma profundidad indican diferencias significativas entre sistemas de labranza ($p \leq 0,05$).

El fósforo orgánico

En los 20 cm el efecto de las labranzas (Figura 1a) sobre la cantidad de Po se observó que en los sistemas con mayor cantidad de labores fue menor (LC 367 kg ha⁻¹ y LV 365 kg ha⁻¹) a

diferencia de SD donde aumentó significativamente (541 kg ha^{-1}), coincidiendo con los resultados obtenidos por Six *et al.* (2002). La incorporación de residuos orgánicos en LC concentra Po en profundidad, paralelamente estimula la mineralización de la MO, liberando P en forma de Pi. En el caso de SD debido a la calidad de los residuos (leguminosa) el suelo mostró los valores más altos de Po de 0-15 cm. Toda práctica que tiende a aumentar la producción de los cultivos, como la fertilización de pasturas o de cultivos, aumenta la reserva de Po del suelo. Sin embargo, el aumento en la productividad implica un aumento en la exportación de nutrientes, por lo que es fundamental el adecuado balance de la fertilización. Por ello, el balance final es el resultado de la magnitud del aporte de residuos, de la velocidad a la que se transformen los materiales orgánicos y a la exportación que se haga por las cosechas o consumo animal.

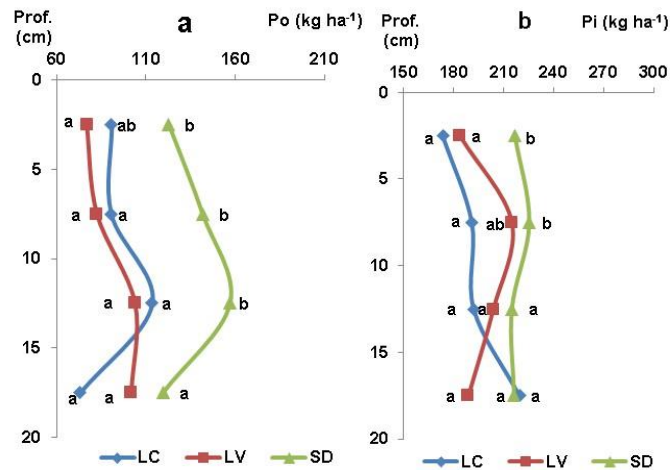
En 0-5 cm SD produce una mayor cantidad del P en el suelo superficial que en LC coincidiendo con Galantini *et al.* (2007). Esto es producto del aumento de MO, que además de aportar P puede disminuir la capacidad de fijación del P del suelo (Guppy *et al.*, 2005). Este efecto puede verse enmascarado por la combinación del uso de leguminosas y pastoreo en SD (122 kg ha^{-1}), que promueven, la descomposición más acelerada de la MO y, además la extracción de P en la biomasa consumida por el ganado.

De 5 a 15 cm se observó en SD la mayor cantidad de Po (156 kg ha^{-1}), consecuencia de la calidad del residuo incorporado. Esto se debería a que el Po se encuentra en un equilibrio dinámico con el Pi, siendo el resultado del balance entre el aporte de residuos y la mineralización. Posiblemente en este caso, la mayor disponibilidad de N en superficie favorecería la actividad biológica, estimulando la rápida transformación del Po a formas inorgánicas.

El fósforo inorgánico

En general la cantidad de Pi en 0-20 cm presentó valores semejantes entre labranzas (Figura 1b). Los sistemas más disímiles, mostraron diferencias entre sí, mínimos en LC (777 kg ha^{-1}) y máximos en SD (873 kg ha^{-1}). Se observaron diferencias significativas de Pi en 0-5 cm entre los SP, con un contenido significativamente mayor en SD (216 mg kg^{-1}) respecto de LC (173 kg ha^{-1}) y LV (183 kg ha^{-1}). Coincidiendo con los resultados obtenidos por Galantini *et al.*, 2007, el aumento del Pi, acompañado de una disminución del Po, estaría confirmando las mejores condiciones para la mineralización de las formas orgánicas en las capas superficiales del suelo. El cultivo estaría actuando como una “bomba” que extrae el Pi del suelo, lo

deposita como Po sobre las capas superficiales y es transformado rápidamente a las formas inorgánicas, permaneciendo allí por su baja movilidad. Solo en 0-10 cm se observó diferencias entre los SP con labranza y SD ($LC = LV \leq SD$), $365 = 399 \leq 442 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente. Tanto en LC como en LV los niveles de Pi se mantienen sin grandes fluctuaciones de 0-20 cm.

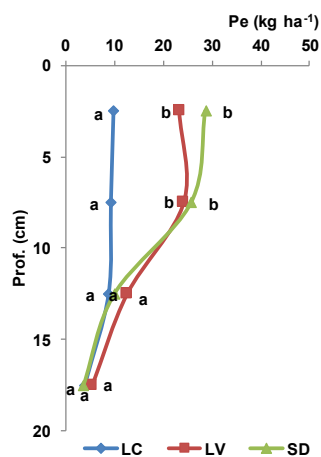


LC, labranza convencional; LV, labranza vertical; SD siembra directa. Letras distintas indican diferencias significativas entre sistemas de producción en cada profundidad ($p \leq 0,05$)

Figura 1. Distribución del fósforo orgánico (a) e inorgánico (b) en kg ha^{-1} en la profundidad 0-20 cm bajo diferentes labranzas.

El fósforo extraíble

En la profundidad 0-20 cm se observó la menor cantidad de Pe en LC (31) que en LC (65) y SD (68 kg ha^{-1}). Las diferencias mencionadas se detectaron en los primeros 10 cm, posiblemente por el laboreo año por medio en LC y LV (Figura 2). En LV de 0-5 cm, con labores verticales, el nivel medio de Pe (37 mg kg^{-1}) resultó similar a los registrados bajo SD (promedio 47 mg kg^{-1}), este efecto puede ser atribuible a la fertilización realizada durante la siembra del trigo en LV, mientras que en LC no se fertiliza. Se observó que a medida que disminuyó el laboreo, la acumulación de Pe en superficie fue mayor, ya que LC produce una homogenización del suelo hasta los 15 cm de profundidad.



LC, labranza convencional; LV, labranza vertical; SD, siembra directa. Letras distintas indican diferencias significativas entre SP en cada profundidad ($p \leq 0,05$).

Figura 2. Efecto de las labranzas sobre el fósforo extraíble (Pe, kg ha⁻¹) de 0-20 cm (kg ha⁻¹).

Conclusiones

Después de 11 años de la implementación diferentes sistemas de producción los rendimientos más altos tanto en materia seca como en grano se observaron en aquellos con menor remoción del suelo, en especial SD. La SD favorece la acumulación en superficie de Po, tomado de las formas inorgánicas de las capas profundas del suelo y quedando en superficie en forma orgánica como residuos y raíces, y de Pi, proveniente de la mineralización de los materiales orgánicos. Estos aumentos influyen sobre la forma más disponible (Pe) en la capa superficial. Los cultivos en estos sistemas producen mayores rendimientos con mayores contenidos de P en el grano, el cual es exportado del sistema. En estas condiciones es importante tener en cuenta que aumentos del rendimiento conllevan a requerimientos mayores de nutrientes, en especial de aquellos no incorporados como fertilizantes.

Durante el periodo analizado, el Pe del suelo tendió a aumentar en la medida que la labranza fue menor, consecuencia de un significativo aumento en la capa superficial. La SD es una alternativa para mejorar el manejo de este tipo de suelos, cuidando el equilibrio entre las formas de P y mejorando la productividad del cultivo de trigo. La inclusión de verdeos de invierno consociados mostró efectos positivos, sobre el suelo y sobre el cultivo, si bien serían necesarios estudios más detallados para aprovechar mejor el periodo largo sin cultivo entre dos trigos.

Bibliografía consultada

- Anderson C. 1996. Phosphate cycles in energy crop systems with emphasis on the availability of different phosphate fractions in soil. *Plant and Soil* 184: 11-21.
- Blake GR & KH Hartge. 1986. Bulk Density. In: Arnold Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1*: 363-375.
- Charter M & GEG Mattingly. 1980. Changes in organic phosphorus contents of soil from long-continued experiments at Rothamsted and Saxmundham. Rothamsted Experiment Station Report for 1979, Part 2: 41-61.
- Galantini JA, AM Miglierina, RA Rosell, JO Iglesias & MR Landriscini. 1996. Distribución del CO y Nt en fracciones granulométricas de un Hapludoll bajo dos sistemas de labranza. XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Santa Rosa, 57-58.
- Galantini JA, LG Suñer & H Krüger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *Rev. Investi. Agrop. (RIA-INTA)* 34 (2):13-31.
- Galantini JA, LG Suñer & JO Iglesias. 2007. Sistemas de labranza en el Sudoeste Bonaerense: Efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. *Rev. Invest. Agrop. (RIA-INTA)* 36 (1): 63-81.
- Galantini JA, MR Landriscini, R Fernández, G Minoldo, J Cacchiarelli & JO Iglesias. 2006. Trigo: Fertilización con nitrógeno y azufre en el sur y sudoeste bonaerense. *Informaciones agronómicas del Cono Sur* N° 29: 22-25.
- Galantini J.A., R.A. Rosell. 1997. Organic fractions, N, P, and S changes in a semiarid Haplustoll of Argentine under different crop sequences. *Soil & Tillage Research* 42: 221-228.
- García FO, LI Picone & IA Ciampitti. 2015. Fósforo. pp. 229-264. En: H.E Echeverría y F.O García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ed. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Holanda FSR, DB Mengel, MB Paula, JG Carvaho & JC Bertoni. 1998. Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29: 2383-2394.
- Iglesias J.O., J.A. Galantini, R.A. Rosell, A.M. Miglierina & M.R. Landriscini. 1996. Cambios en la distribución del espacio poroso en un Entic Haplustoll con diferentes secuencias de cultivos en la región semiárida Argentina. [Agricultura Técnica 56 \(1\): 43-48.](#)
- Six J., R.T. Conant, E.A. Paul & K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms for soil organic matter: Implications for C saturation of soils. *Plant Soil* 141: 155-176.
- Suñer L.G., J.A. Galantini. 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 30(1) 57-66.
- Suñer L., J. Galantini. 2013. Dinámica de las formas del P en suelos de la región sudoeste pampeana: Estudio de la incubación con fertilizante fosfatado. *Ciencia del Suelo* 31: 33-44.
- Szott LT & CA Palm. 1997. Nutrient stocks in managed and natural humid tropics fallows. *Plant and Soil*. 186: 293-309.
- Tate KR. 1984. The biological transformation of phosphorus in soil. *Plant Soil* 76:245-309.
- Unger PW. 1991. Organic matter, nutrient, and pH distribution in no - and conventional- tillage semiarid soils. *Agron. J.* 83: 186-189.
- Zibilske LM & JM Bradford. 2003. Tillage effects on phosphorus mineralization a microbial activity. *Soil Sci.* 168: 677-685.