

APLICACIÓN DE FÓSFORO EN SECUENCIAS AGRÍCOLAS EN SIEMBRA DIRECTA EN HAPLUDOLÉS ÉNTICOS

SERGIO RILLO¹; CRISTIAN ÁLVAREZ^{2*}; MARTIN DÍAZ-ZORITA³ & ELKE J. NOELLEMAYER⁴

Recibido: 13-01-16

Recibido con revisiones: 24-07-16

Aceptado: 04-08-16

RESUMEN

Los contenidos de fósforo (P) extractable de la mayoría de los suelos de la región pampeana disminuyeron al intensificarse su extracción con cultivos y pasturas. Son frecuentes los sitios con limitaciones en P que requieren de su aplicación para mejorar la producción agrícola. Las recomendaciones de fertilización difieren según tecnologías de aplicación por lo que nuestro objetivo fue cuantificar la respuesta de trigo (*Triticum aestivum* L), soja [*Glycine max* (L) Merrill] y maíz (*Zea mays* L) en rotación al uso del P según cultivos y localización del fertilizante. Durante 3 ciclos consecutivos de cultivos y en 9 lotes del centro de la región subhúmeda pampeana, sobre Hapludolés Énticos se establecieron tratamientos control sin fertilización con P y fertilizados con 22 kg ha⁻¹ de P en cobertura total (P_{voleo}) y en la línea de siembra (P_{línea}). Anualmente, se determinaron componentes del rendimiento, eficiencia de uso del P (EUP) y niveles de P extractable (Bray Kurtz I) del suelo. El agregado de P aumentó 43% la producción de trigo, 26% la de maíz, 49% la de soja de primera y 26% la de soja de segunda. No se observaron diferencias en las respuestas entre la ubicación del fertilizante. La EUP fue mayor en P_{línea}, principalmente en maíz. En ausencia de fertilización, los niveles de P extraído de los suelos disminuyeron en promedio a razón de 0,4 mg kg⁻¹ año⁻¹. En los tratamientos fertilizados, el P extraído de los suelos aumentó entre 2,0 mg kg⁻¹ en P_{línea} y 4,0 mg kg⁻¹ en P_{voleo}. La decisión de la ubicación de fertilizantes con P requiere considerar, además del nivel extractable en el suelo, el cultivo y el propósito de la práctica para maximizar la eficiencia de conversión en granos o de mejora en los contenidos en el suelo.

Palabras clave. Agricultura de secano - Maíz - Trigo - Soja.

PHOSPHORUS FERTILIZATION IN CROP SEQUENCES IN ENTIC HAPLUDOLLS UNDER NO-TILLAGE

ABSTRACT

The levels of soil extractable phosphorus (P) from most of the soils in the pampas region decreased due to the extraction in intensified crops and pastures systems. Sites with limited P levels are frequent thus P fertilization is required for the enhancement of agricultural yields. Fertilization recommendations practices vary depending on the location of the applied nutrient. Our objective was to quantify the grain yield response of wheat (*Triticum aestivum* L), soybean [*Glycine max* (L) Merrill] and corn (*Zea mays* L) in rotation depending on the location of the fertilizer. The study was performed during 3 crop rotational cycles in 9 sites from the center part of the subhumid Pampas region with Entic Hapludolls. The treatments were: control without P fertilization and fertilized crops with 22 kg ha⁻¹ of P broadcasted (P_{broadcasted}) and in the planting furrow (P_{furrow}). Crop yield components, P use efficiency (PUE) and soil extractable (Bray Kurtz I) levels were yearly measured. The application of P increased 43% the wheat grain yields, 26% the corn production, 49% first crop soybean yields and 26% second crop soybean grain production. Similar crop responses to P fertilization between the 2 location treatments (P_{broadcasted} and P_{furrow}) were observed. The mean PUE was greater when the fertilizer was P_{furrow} applied, mainly for corn crops. In the treatments without P fertilization, the soil extractable P levels decreased at rate of 0.4 mg kg⁻¹ year⁻¹. At the end of the study, the soil extractable contents were greater in the P fertilized treatments than in the control without fertilization. The difference varied from 2.0 mg kg⁻¹ in the P_{furrow} to 4.0 mg kg⁻¹ in the P_{broadcasted}. The decision about where to locate the P fertilizer requires, not only taking into account soil extractable levels but also defining the target crop and the purpose of the practices maximizing the efficacy to produce grains or to enhance the soil P contents.

Key words. Dryland agriculture - Corn - Wheat - Soybean.

1 UE y DT INTA «9 de Julio»

2 UE y DT INTA «Gral. Pico»

3 Monsanto BioAg

4 Facultad de Agronomía UNLPam

* Autor de contacto: alvarez.cristian@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, por lo tanto, el mantenimiento de adecuadas cantidades o concentraciones de P en el suelo a través de la aplicación de fertilizantes inorgánicos y/o fuentes orgánicas es crítico para la sustentabilidad de los sistemas de producción a largo plazo (Sharpley & Smith, 1994). Debido a su importancia en la productividad de los cultivos y conforme a la ausencia de procesos naturales de reposición, el P es el segundo nutriente aplicado como fertilizante para la producción agropecuaria en la Argentina y el tercero a nivel mundial (FAO, 2014). El contenido de P total del suelo puede variar desde 200 a 5000 mg kg⁻¹ (Kuo, 1996) y la capacidad del suelo de proveer P es muy variable. Aun cuando la reserva de P total en los suelos excede los requerimientos de los cultivos, estos podrían exponerse a deficiencias en el nutriente limitando su normal producción. La mayor parte del P que absorben los cultivos se concentra en los granos y por lo tanto es exportado con las cosechas siendo la extracción continua sin reposición una de las formas directas de pérdida de fertilidad de los suelos (Cordell *et al.*, 2009).

Investigaciones recientes en la Argentina validan frecuentes deficiencias y respuestas de diversos cultivos a la fertilización con nitrógeno, P y azufre, particularmente en la región central pampeana en el sur de las provincias de Santa Fe y Córdoba y norte de la de Buenos Aires (Fernández López & Mendoza, 2008; Vázquez *et al.*, 1987). Sainz Rozas *et al.* (2012) también mostraron que la mayor parte de los suelos del oeste, norte y sur de la región pampeana presentan rangos de P extractable limitantes para la normal producción de los cultivos.

Generalmente, las respuestas a la fertilización se evalúan considerando los efectos directos para un ciclo de cultivo. Sin embargo, los efectos de esta práctica se observan sobre los cultivos siguientes (García *et al.*, 2005; Salvaggiotti *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2006; Karamanos *et al.*, 2007; Takahashi, 2007). La dosis media utilizada en la región pampeana es de 2,6 kg de P ha⁻¹ (FAO, 2014) con niveles estimados de recuperación del P aplicado entre 10 a 30%. Por lo que se considera que una proporción estará parcialmente disponible para los cultivos siguientes.

Los resultados de estudios de la tecnología de aplicación de fertilizantes con P muestran resultados variados. En general, no se registran diferencias en la eficiencia de uso del P y en los rendimientos en aplicaciones realizadas en la línea de siembra comparadas con aplicaciones super-

ficiales ("al voleo") en sistemas en siembra directa (Divito *et al.*, 2002). Algunos estudios sugieren que cuando los suelos presentan valores de P extractable (método de Bray Kurtz I) superiores a 10 mg kg⁻¹ y las dosis de fertilización son iguales o mayores a 22 kg P ha⁻¹ (equivalentes a aproximadamente 100 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico o de superfosfato triple), aplicadas con anticipación y suceden lluvias posteriores de al menos 50 mm, las aplicaciones en cobertura total son igualmente eficientes que las aplicaciones en línea en el momento de la siembra (Ciampitti *et al.*, 2011). En cambio, en la pampa arenosa se ha observado que cuando los suelos son deficientes en P, la incorporación del nutriente en la línea de siembra es más eficiente que las aplicaciones en cobertura total (Picone *et al.*, 2007).

El balance o evolución del P extractable del suelo es un indicador de sustentabilidad de los sistemas de producción. Dado que en sistemas fertilizados evitando dosis excesivas, la lixiviación es despreciable y la erosión controlable mediante diversas prácticas de manejo de suelos (Barrow, 1980), la principal pérdida de P es a través de la cosecha de los cultivos de grano y la remoción de forraje (FAO, 2014; Sheldrick *et al.*, 2003). La fertilización con P es la única vía de entrada del nutriente al sistema (Vázquez, 2002). Adicionalmente, debido a la retención en el suelo, es un nutriente con alta residualidad en el suelo y baja eficiencia de recuperación del aplicado al fertilizar (Rubio *et al.*, 2007). En suelos de textura superficial arenosa y franca arenosa con limitada retención de fosfatos, tales los predominantes en Hapludoles Énticos de la región semiárida-subhúmeda pampeana, y con bajos niveles de fósforo extractable la fertilización anual con fósforo mejoraría la producción de cultivos de cosecha independientemente de su ubicación con respecto a la línea de siembra de estos.

El objetivo de este estudio fue cuantificar la respuesta de trigo (*Triticum aestivum* L.), soja [*Glycine max* (L.) Merrill], maíz (*Zea mays* L.) en rotación al uso del P según cultivos y localización del fertilizante. Además se planteó evaluar los cambios en los contenidos de P extractable entre planteos de fertilización fosfatada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en los campos de producción de la Escuela de Agricultura y Ganadería "MC y ML Inchausti" en 25 de Mayo (Buenos Aires, Argentina). Se inició en tres años diferentes (2005, 2006 y 2007 a razón de 3 lotes por

año) y se continuó hasta el año 2012 totalizando así 9 lotes que provenían de 6 años en siembra directa. Con una secuencia de 4 cultivos: trigo(T)/soja de segunda (S2), maíz (M) y soja (S). Esta secuencia se realizó durante por tres ciclos continuos en los mismos lotes. En la Tabla 1 se presentan los registros mensuales de lluvias y de evapotranspiración durante el periodo de estudio. En todos los lotes, el suelo fue clasificado como Hapludol Entico perteneciente a la serie Norumbega, originado a partir de materiales eólicos arenosos con un perfil pobremente desarrollado y de textura franco-arenosa (INTA, 1972). Las propiedades de los suelos variaron entre 20,2 y 53,5 g kg⁻¹ de materia orgánica (MO); pH en agua entre 5,5 y 6,0; entre 1,0 y 2,5 g kg⁻¹ de nitrógeno total (Nt) y entre 5,8 y 7,4 mg kg⁻¹ de P extractable (Bray Kurtz I).

Los tratamientos evaluados fueron un testigo sin fertilización con P (Control) y dos fertilizados con 22 kg ha⁻¹ de P (100 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio, SFT, 46% P₂O₅) aplicado en cobertura total (P_{voleo}) y en la línea de siembra (P_{línea}) en parcelas experimentales de 40 m². El P_{voleo} se realizó entre 45 y 60 días antes de la siembra y el tratamiento de fertilización P_{línea} en el momento de la siembra, al costado de las semillas y aproximadamente a 6 cm de profundidad. Los tratamientos de fertilización se realizaron todos los años al sembrar los cultivos de trigo, de maíz y de soja. En soja de segunda

fecha de siembra no se aplicaron tratamientos de fertilización. En los cultivos de trigo y de maíz, además se fertilizó con una mezcla de urea (46% N) con sulfato de amonio (21% N 24% S) aportando 150 kg ha⁻¹ de N y 7 kg ha⁻¹ de S. Los cultivos de soja en la primera fecha de siembra fueron fertilizados solo con 7 kg ha⁻¹ de S aplicado como yeso agrícola (CaSO₄·2H₂O, 18% S y 24% Ca).

Los cultivos de trigo se sembraron entre el 8 de junio y el 5 de julio a razón de 250 semillas m⁻² y con un distanciamiento entre hileras de 0,21 m. Los cultivos de maíz se sembraron entre el 20 de septiembre y el 6 de octubre logrando aproximadamente 7,8 plantas m⁻² con un distanciamiento entre hileras de 0,70 m. Los cultivos de soja en primer fecha de siembra se realizaron entre el 15 y el 30 de octubre a razón de 40 semillas m⁻² inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum* aportados por inoculantes comerciales y dispuestas a 0,35 m de distancia entre hileras de siembra. Los cultivos de soja de segunda se sembraron luego de la cosecha de los cultivos de trigo, entre el 17 y el 22 de diciembre, con 45 semillas m⁻² inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum* aportados con inoculantes comerciales y a 0,35 m de distancia entre hileras de siembra. En todos los casos se realizaron controles químicos de malezas en el cultivo y durante los barbechos, se mantuvieron libres de plagas y enfermedades con la aplicación de insecticidas y fungicidas.

Tabla 1. Precipitaciones y evapotranspiración (método de Thornthwaite) mensual en 9 de Julio (Buenos Aires, Argentina).

Table 1. Monthly rainfall and evapotranspiration (Thornthwaite method) in 9 de Julio (Buenos Aires, Argentina).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitaciones (mm mes ⁻¹)												
2005	207	106	87	39	24	52	17	89	50	34	139	75
2006	224	190	40	142	0	57	15	0	27	280	58	126
2007	137	82	211	63	14	7	3	0	114	90	60	46
2008	125	107	196	0	22	35	78	0	45	147	55	15
2009	20	64	15	40	26	0	45	0	136	30	171	230
2010	112	108	46	40	65	60	45	0	91	65	30	15
2011	167	61	61	67	59	36	46	12	95	70	100	20
2012	143	250	235	68	147	7	0	140	90	108	117	184
Evapotranspiración (mm mes ⁻¹)												
2005	173	150	119	79	42	33	35	36	52	82	106	145
2006	171	141	98	79	36	30	42	36	63	106	127	169
2007	153	130	108	80	32	19	18	24	79	97	120	153
2008	177	153	114	79	64	33	58	47	60	92	179	171
2009	180	143	131	100	56	24	25	62	52	91	138	162
2010	173	139	117	63	44	25	24	27	60	71	124	162
2011	157	122	95	67	36	22	21	29	65	72	149	145
2012	180	133	103	68	53	25	13	38	65	87	141	153

Al inicio y al final de cada secuencia de cuatro cultivos (T/S2-M-S) y en todos los lotes se evaluó el nivel de fósforo extractable (Bray Kurtz I) en la capa superficial (0 a 20 cm) de los suelos. Se realizaron 6 submuestras por tratamiento y por cada bloque, en el área delimitada entre los surcos de siembra de los cultivos.

La producción de granos se evaluó por cosecha manual de 1 m² de trigo, 7 m² de maíz y 3,4 m² de soja. Luego, en una trilladora estacionaria se realizó la trilla de los granos. Los rendimientos se corrigieron a contenidos de humedad de recibo comercial de cada grano: 140, 145 y 135 g kg⁻¹ para trigo, maíz y soja, respectivamente. Las respuestas absolutas a la fertilización se calcularon a partir de la diferencia de rendimientos en grano entre los tratamientos P_{voleo} y P_{línea} y el control sin fertilización dentro de cada lote. La respuesta relativa entre tratamientos de fertilización correspondió al porcentaje del cociente entre la respuesta absoluta con respecto al rendimiento del tratamiento control sin fertilización. La eficiencia de uso del P (EUP) se estimó con el cociente entre la respuesta absoluta a la fertilización y la dosis aplicada de P en cada cultivo y tratamiento de fertilización.

Para el análisis de los resultados se consideró un diseño experimental de bloques completos aleatorizados con 9 repeticiones (lotes) con 2 factores de variación: i) secuencias completas de cultivos (3 ciclos) y ii) tratamientos de fertili-

zación (control, P_{voleo} y P_{línea}). En cada cultivo, para determinar diferencias entre tratamientos se realizaron análisis de varianza (ANVA) y prueba de comparación de medias de Fisher ($p \leq 0,10$) empleando el programa estadístico InfoStat® (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS

Producción de granos de los cultivos

La producción de trigo varió entre 3893 y 5281 kg ha⁻¹, la de maíz entre 7692 y 9554 kg ha⁻¹, la de soja de primera entre 2988 y 4424 kg ha⁻¹ y la de soja de segunda entre 2540 y 3166 kg ha⁻¹. En todos los casos, los rendimientos alcanzados se correspondieron con niveles normales de productividad para la región en estudio y mostraron variaciones tanto entre campañas como entre tratamientos de fertilización. En todos los cultivos, trigo, maíz y soja de primera fecha de siembra, los rendimientos fueron mayores en los tratamientos fertilizados con P que en los controles sin fertilizar (Tabla 2). En promedio, el agregado de P mejoró 43% la producción de trigo, 26% la de maíz, 49% la de soja en primer fecha de siembra y 26% la de soja de segunda. La información disponible no fue suficiente para detectar diferencias en los rendimientos de los cultivos entre for-

Tabla 2. Producción media de granos y componentes de rendimientos de trigo, soja y maíz en un Hapludol Entico según diferentes formas de aplicación de fósforo, en superficie (P_{voleo}) y en la línea de siembra (P_{línea}). Entre paréntesis se presenta el error estándar de la media. Diferentes letras en cada columna indican diferencias entre tratamientos de fertilización para cada cultivo ($p < 0,10$).
Table 2. Mean grain production and yield components of wheat, soybean and corn crops on an Entic Hapludoll according to different application forms of phosphorus, broadcasted (P_{voleo}) and in the planting line (P_{línea}). The standard error of the means is shown between parenthesis. Different letters in each column show significant differences ($p < 0.10$) between fertilization treatments for each crop.

Tratamiento	Trigo	Soja 2 ^a	Maíz	Soja
Rendimiento (kg ha ⁻¹)				
Control	3.893 (249) b	2.540 (272) b	7.692 (362) b	2.988 (149) b
P _{voleo}	4.975 (323) a	3.166 (332) a	9.221 (424) a	4.418 (230) a
P _{línea}	5.281 (433) a	3.124 (344) a	9.554 (564) a	4.424 (261) a
Granos m ⁻²				
Control	12.670 (868) b	1.875 (229) b	2.676 (133) b	1.925 (110) b
P _{voleo}	16.160 (1103) a	2.240 (263) a	3.118 (171) a	2.756 (153) a
P _{línea}	16.760 (1553) a	2.246 (279) a	3.166 (211) a	2.799 (180) a
Peso individual de granos (mg grano ⁻¹)				
Control	36 (2,5) a	149 (17,8) a	284 (13,9) b	158 (8,7) a
P _{voleo}	37 (2,4) a	152 (17,5) a	296 (16,0) a	159 (8,6) a
P _{línea}	37 (3,3) a	152 (18,9) a	304 (20,3) a	162 (9,9) a

mas de aplicación del P en superficie o incorporado en la línea de siembra. La producción acumulada de todos los cultivos fertilizados fue de 21.780 Mg ha⁻¹ cuando el P se aplicó en superficie (P_{voleo}) y de 22.383 Mg ha⁻¹ cuando la fertilización fue incorporada en el suelo (P_{línea}). En ausencia de fertilización con P la producción total acumulada fue 23% menor alcanzando 17.113 Mg ha⁻¹.

Para todos los cultivos, excepto maíz, el aumento de rendimiento se explicó principalmente por aumentos en el número de granos formados. En maíz también se observaron incrementos del peso individual de los granos.

Las respuestas, en promedio y en las 3 secuencias, variaron de 552 a 1313 kg ha⁻¹ para los tratamientos de aplicación del P en cobertura y de 486 a 1885 kg ha⁻¹ al fertilizar con P en la línea de siembra. Estas respuestas fueron en promedio del 33 y del 41% para para los tratamientos de P_{voleo} y de P_{línea}, respectivamente (Tabla 3).

La respuesta en producción de granos al fertilizar varió entre 561 y 1985 kg ha⁻¹ dependiendo del cultivo y forma de aplicación del P considerada (Tabla 3). Esta mejora representó entre el 24 y 49% de los rendimientos alcanzados con mayor variabilidad entre cultivos que entre formas de aplicación del fósforo. Entre los tratamientos de fertilización la diferencia de rendimientos varió entre -65

y 248 kg ha⁻¹ y sólo fue de mayor magnitud en el caso de los cultivos de maíz. Diferencias en la cantidad y distribución de las raíces de los cultivos en los suelos explican variaciones en la probabilidad de contacto con sitios enriquecidos en P al fertilizar, principalmente en sitios con bajos niveles extractables de P. La mayor respuesta de maíz en el tratamiento P_{línea} con respecto a P_{voleo} se atribuye a la menor densidad de plantas sembradas y mayor distanciamiento entre hileras con respecto a cultivos de soja y de trigo y consecuente menor exploración de la capa superficial de los suelos donde se localizan los aportes de P al fertilizar en superficie.

La eficiencia de producción de granos por unidad de P aplicado (EUP) varió entre 25 y 90 kg de granos (kg P)⁻¹ mostrando diferencias tanto entre cultivos como entre formas de localización del fertilizante. Sólo en los cultivos de maíz la EUP fue mayor en el tratamiento de fertilización localizado en la línea de siembra que en superficie. En el resto de los cultivos, la información disponible no mostró diferencias en la eficiencia de aprovechamiento del nutriente entre ubicaciones de los fertilizantes. Entre cultivos, la mayor EUP se observó en los cereales (maíz y trigo) y en soja de primera fecha de siembra. En soja de segunda fecha de siembra el aprovechamiento del P fue a partir del residual de la fertilización de trigo.

Tabla 3. Respuesta a la fertilización fosfatada y eficiencia de uso del P (EUP) de trigo, soja y maíz en un Hapludol Entico según diferentes formas de aplicación de fósforo en superficie (P_{voleo}) y en la línea de siembra (P_{línea}). Diferentes letras minúsculas en cada columna indican diferencias entre tratamientos de fertilización para cada cultivo (p < 0,10). Diferentes letras mayúsculas en cada fila indican diferencias entre cultivos para cada tratamiento de fertilización (p < 0,10).

Table 3. Response to phosphorus fertilization and P use efficiency (EUP) of wheat, soybean and corn crops on an Entic Hapludoll according to different application forms of phosphorus, broadcasted (P_{voleo}) and in the planting line (P_{línea}). Different small letters in each column show significant differences (p < 0.10) between fertilization treatments for each crop. Different capital letters in each row show significant differences (p < 0.10) between crops for each fertilization treatment.

Tratamientos	Trigo	Soja 2 ^a	Maíz	Soja
Respuesta (kg ha ⁻¹)				
P _{voleo} - Control	1.254 a	626 a	1.737 a	1.374 a
P _{línea} - Control	1.387 a	561 a	1.985 b	1.405 a
Respuesta relativa (%)				
P _{voleo} - Control	42 a	27 a	25 a	48 a
P _{línea} - Control	45 a	24 a	28 b	49 a
EUP (kg grano kg P ⁻¹)				
P _{voleo} - Control	57 a B	28 a C	79 a A	62 a B
P _{línea} - Control	63 a B	25 a C	90 b A	64 a B

Evolución del contenido de fósforo extractable del suelo

Los niveles iniciales de P extractable en todos los lotes fueron considerados bajos o limitantes para la normal producción de los cultivos estudiados con valores entre 5,8 y 7,4 mg kg⁻¹. Estos niveles son inferiores a los rangos umbrales de suficiencia del nutriente que en la región pampeana varían de 15 a 20; 13 a 18; y 9 a 14 mg kg⁻¹ para trigo, maíz y soja, respectivamente (Fernández López & Mendoza, 2008). Al final de cada secuencia de cultivos en rotación, los niveles de P extractable de los suelos en el control sin fertilización disminuyeron mientras que se incrementaron en ambos tratamientos de aplicación de P (Tabla 4).

En promedio, al producir cultivos sin fertilización con P los niveles extractables de este elemento se redujeron en aproximadamente 3,0 mg kg⁻¹ equivalentes a casi 0,4 mg kg⁻¹ año⁻¹. Esta tasa de disminución es inferior a la observada por Barraco *et al.* (2014) bajo condiciones semejantes de manejo en un Hapludol Típico que presentó, al inicio del estudio, niveles extractables de P superiores. En Argiudoles de la región pampeana, con niveles iniciales de

P extractable entre 11,2 y 45,5 mg kg⁻¹, se observaron tasas anuales de disminución en los niveles de P extractable del suelo de 0,4 y 3,1 mg P kg⁻¹ para rotaciones M-T/S y M-S-T/S, respectivamente (Ciampitti *et al.*, 2011). Estas diferencias se atribuyeron en parte a diferencias en la estrategia de fertilización implementada y a los niveles iniciales de P extractable. Zhang *et al.* (2004) observaron que en parcelas que no recibieron aplicaciones de P, la tasa anual de disminución fue de 3,9 mg P kg⁻¹, en coincidencia con lo reportado por Randall *et al.* (1997), quienes observaron una tasa anual de disminución de 3,3 mg P kg⁻¹ en suelos franco arcillosos en Minnesota (EE.UU.).

En los tratamientos con aplicación anual de P se detectaron mayores concentraciones extractables de este elemento. Estas diferencias fueron de mayor magnitud, aproximadamente 4,0 mg kg⁻¹, cuando el fertilizante se distribuyó en superficie (P_{voileo}) mientras que al ubicarlo en la línea de siembra de los cultivos la mejora fue próxima a 2,0 mg kg⁻¹. Brown & Breight (1989) compararon diferentes métodos de determinación de P extractable tales como Bray Kurtz I, Bray II y Mehlich 3, y observaron que en los tratamientos donde se aplicó este elemento en superficie y en bandas en la línea de siembra se incrementó a razón de 0,46 y 0,20 mg P kg⁻¹, respectivamente. Estas diferencias se explicarían por la diferente accesibilidad de las raíces al elemento aplicado y se relacionarían inversamente con la eficiencia de aprovechamiento del nutriente calculada en relación a la producción de granos por unidad de elemento aplicado (Tabla 3).

Si bien los niveles extractables de P, independientemente de la estrategia de fertilización, se incrementaron al aplicar este elemento, en todos los casos, estos valores fueron inferiores a los umbrales de respuesta agronómica para los cultivos en esta secuencia de rotación (Ciampitti *et al.*, 2011). Es así, que planteos de manejo de la fertilización con P según criterios de recuperación de fertilidad requerirían implementar la aplicación del elemento en superficie (P_{voileo}) y considerar incrementos en la dosis para lograr un aumento adecuado de los niveles extractables de los suelos.

CONCLUSIONES

En Hapludoles Énticos de la región subhúmeda pampeana, con niveles extractables de P limitantes, la fertilización con este elemento, tanto en aplicaciones localizadas en la línea de siembra como en superficie, aumenta entre el 26 y el 49% la producción de granos de trigo, de maíz y de soja. Sólo los cultivos de maíz muestran mayor

Tabla 4. Fósforo extractable (mg kg⁻¹) en la capa de 0 a 20 cm superficial de 9 lotes experimentales evaluados al inicio y luego de 9 años de producción de trigo, soja de segunda, maíz y soja con diferentes formas de aplicación de fósforo, en superficie (P_{voileo}) y en la línea de siembra (P_{línea}). Letras diferentes entre los promedios indican diferencias entre tratamientos (p<0,10). sd = sin datos

Table 4. Soil extractable phosphorus (mg kg⁻¹) in the 0 to 20 cm layer of 9 experimental sites evaluated at the beginning and after 9 years of wheat/soybean second crop, corn and soybean production with different application forms of P fertilization, broadcasted (P_{voileo}) and in the planting line (P_{línea}). Different letters show significant differences between means (p<0.10). sd = not available data.

Lote	Inicial		Final	
		Control	P _{voileo}	P _{línea}
I	6,0	3,5	10,9	7,8
II	7,4	3,2	9,0	8,6
III	6,1	4,6	19,0	10,2
IV	5,8	3,8	7,0	8,0
V	7,6	5,0	7,6	6,5
VI	6,2	3,2	8,4	4,4
VII	7,9	3,5	13,3	11,2
VIII	sd	sd	sd	sd
IX	5,7	4,9	10,5	10,7
Promedio	6,6 d	4,0 c	10,7 a	8,4 b

eficiencia de uso del nutriente cuando la fertilización es incorporada en bandas próximas a la línea de siembra. En ausencia de fertilización con P, los niveles extractables del nutriente disminuyen durante el ciclo de rotación de cultivos mientras que se incrementan bajo condiciones de fertilización. Esta mejora en los contenidos extractables de P es de mayor magnitud cuando los tratamientos se distribuyen sobre el suelo que en bandas incorporadas. La decisión de ubicación de fertilizantes con P requiere considerar, además del nivel extractable en el suelo, el cultivo y el propósito de la práctica para maximizar la eficiencia de conversión en granos o de mejora en los contenidos en el suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Barraco, M; M Díaz-Zorita; C Justo & A Lardone. 2014. ¿Fertilización fosfatada por suficiencia o restitución en secuencias agrícolas de la pampa arenosa? *Investigaciones Agronómicas* 16: 8-12.
- Barrow, N. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. *In: Khasawneh, F; E Sample & E Kamprath (eds)*. The role of phosphorus in agriculture. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin (EE.UU.), 333-339.
- Brown, JR & SG Breight. 1989. Changes in plant nutrients: a century of change. *In: Brown, JR (ed)* Proceedings of the Sanborn Field Centennial, 27 Junio 1989 (Publication SR-415) Universidad de Missouri, Columbia, MO (USA). pp.92-95.
- Ciampitti, IA; LI Picone; G Rubio & FO García, 2011. Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the pampas of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:918-928. doi: 10.2136/sssaj2010.0361.
- Cordell, D; JO Drangert & S White. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Chang.* 19: 292-305. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Di Rienzo, J; F Casanoves, M Balzarini, L Gonzalez, M Tablada & C Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Divito, GA; H Sainz Rozas & H Echeverría. 2002. Estrategias de fertilización fosforada en una rotación de cultivos en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo, Arg.* 28: 1-7.
- FAO, 2014. Anuario estadístico de la FAO 2014. Santiago, Chile. <http://www.fao.org/3/a-i3592s.pdf> (último acceso 21 de julio de 2016).
- Fernández López, C & R Mendoza. 2008. Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos y manejos productivos. *Ciencia del suelo, Arg.* 26: 13-27.
- García, F; L Picone & A Berardo. 2005. Fósforo. *En: Echeverría H. & F. García (eds)*. Fertilidad Suelos y Fertilización Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 99-121.
- INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. INTA-CIRN Instituto de suelos. Hoja 3560 - 32 Del Valle. Escala 1: 50.000.
- Karamanos, RE; JT Harapiak & GA Kruger. 2007. Long-Term P Fertilization Effects on Crop Yields and Soil Phosphorus. *Better Crops* 91: 25-27.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. *In: Sparks, DL (eds)* Methods of soil analysis, part 3, chemical methods. SSSA-ASA, Madison (USA). 869-919 pp.
- Lee, CH; CY Park, KD Park, WT Jeon & PJ Kim. 2006. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere* 56: 299-304.
- Picone L; I Capozzi, E Zamuner, H Echeverría & H Sainz Rozas. 2007. Transformaciones de fósforo en un Molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Ciencia del Suelo, Arg.* 25: 99-107.
- Randall, GW; TK Iragavarapu & SD Evans. 1997. Long-term phosphorus and potassium applications. I. Effect on soil test decline and decline rates and critical soil test levels. *Journal of Production Agriculture* 10: 565-571.
- Rubio, G; MC Cabello & F Gutiérrez Boem. 2007. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 35: 6-10.
- Sainz Rozas, H; HE Echeverría & H Angelini. 2012. Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones agronómicas* 4: 14-18.
- Salvagiotti, F; G Gerster; S Bacigaluppo; J Castellarin; C Galarza; N Gonzalez; V Gudelj; O Novello; H Pedrol & P Vallone. 2005. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo, Arg.* 22: 92-101.
- Sharpley, AN & SJ Smith. 1994. Wheat tillage and water quality in the Southern Plains. *Soil Tillage Res.* 30: 33-38.
- Sheldrick, WF; JK Syers & J Lingard. 2003. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 94: 341-354.
- Takahashi, S. 2007. Residual Effect of P Fertilizer in a Low-Humic Andosol with Low Extractable P. *Communications of Soil Science and Plant Analysis* 38: 1479-1485.
- Vázquez, M; E Noellemeyer; A Struffolino; L López-Camelo & L Barberis. 1987. Métodos de medición del fósforo extractable en suelos del norte y oeste de la pradera pampeana - su evaluación biológica. *Ciencia del Suelo, Arg.* 5: 19-30.
- Vázquez, ME. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas Cono Sur* 16: 3-7.
- Zhang, TQ; AF MacKenzie; BC Llang & CF Drury. 2004. Soil Test Phosphorus and Phosphorus Fractions with Long-Term Phosphorus Addition and Depletion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 519-528.

