

ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN FOSFORADA EN UNA ROTACIÓN DE CULTIVOS EN EL SUDESTE BONAERENSE

GUILLERMO ADRIÁN DIVITO¹; HERNÁN SAINZ ROZAS^{1,2,3} & HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA^{1,2}

1 Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP;

2 Estación Experimental Agropecuaria INTA, Balcarce, Buenos Aires, Argentina

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. C.C. 276, (7620) Balcarce, Argentina.

Correo electrónico: hecheverr@balcarce.inta.gov.ar

Recibido: 00-00-00

Aceptado: 00-00-00

RESUMEN

En suelos del sudeste Bonaerense el fósforo (P) del fertilizante forma productos de mediana a alta solubilidad, lo cual le confiere un alto valor residual. A partir de esto, surge la posibilidad de definir estrategias de fertilización basadas en la frecuencia con que se efectúa su aplicación. Para rotaciones de cuatro cultivos en tres años se desconoce el efecto de alternativas de fertilización fosfatada. Los objetivos fueron: 1) evaluar el rendimiento de cultivos fertilizados con P anualmente y cada tres años, a la rotación de cultivos, y 2) determinar la eficiencia de uso y de recuperación del P (EUP y ERP, respectivamente) aplicado para dichas estrategias de fertilización. El experimento se realizó sobre un complejo de Paleudol Petrocálcico y Argiudol Típico en la EEA I.N.T.A. Balcarce, con un alto nivel inicial de P-Bray (28,7 mg kg⁻¹) y bajo siembra directa. A lo largo de dos ciclos de rotación, integrados por maíz, soja y trigo/soja de segunda, se evaluaron tres tratamientos: aplicación de P con frecuencia anual, por única vez a la rotación y un testigo sin P, en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. No se observaron diferencias en el rendimiento de los cultivos fertilizados en forma anual y a la rotación, durante los dos ciclos. El testigo difirió de los tratamientos fertilizados solo durante el segundo ciclo de rotación. La EUP de la rotación (EUProt) no difirió entre estrategias de aplicación (19,4 y 32,4 kg kg⁻¹ durante el primer ciclo y 32,9 y 37,4 kg kg⁻¹ durante el segundo, para tratamientos fertilizados anualmente y a la rotación, respectivamente). Tampoco existieron diferencias entre estrategias de fertilización en la EUP de cada cultivo. En cambio, durante el primer ciclo, la ERP resultó mayor para el tratamiento fertilizado a la rotación respecto de la aplicación anual (0,13 y 0,03 kg kg⁻¹), mientras que en el segundo ciclo no se detectaron diferencias entre ambos (0,16 y 0,17 kg kg⁻¹ para la aplicación anual y a la rotación, respectivamente). Se encontró una débil asociación entre la variación anual en el nivel de P-Bray y el balance de P correspondiente al cultivo implantado dicho año. Para el tratamiento testigo, se elaboró un modelo para predecir la disminución en el P disponible considerando el nivel inicial de P-Bray y la exportación de P de los cultivos como variables.

Palabras clave. Aplicación de fósforo anual, aplicación de fósforo a la rotación de cultivos.

PHOSPHORUS FERTILIZATION STRATEGIES IN A BUENOS AIRES SOUTHEAST CROP ROTATION

ABSTRACT

In the soils of southeast Buenos Aires, fertilizer phosphorus (P) forms medium to high solubility products, making it possible to define different fertilization strategies based on application frequency. The effect of P application rates capable of fulfilling all crop requirements in intensive rotations in the region is unknown. The objectives of this work were to: (1) assess yields in crops fertilized with P annually and once during the crop rotation and (2) determine P use efficiency and P recovery for each fertilization strategy. The experiment was conducted at the E.E.A. I.N.T.A. Balcarce on a Typic Argiudoll and Petrocalcic Paleudoll complex, under no-tillage and with high P-Bray (Bray & Kurts, 1945) content (28.7 mg kg⁻¹). During the two rotation cycles for maize, soybean, and double wheat/soybean crop, three treatments were assessed: application of P annually, application once during the rotation cycle, and a control without P application. The experimental design was in randomized blocks with four repetitions. No crop yield differences were found between annual and rotation fertilization strategies across the two cycles evaluated. The control crop yield did not differ from the fertilized crop during the first rotation cycle but did during the second. The crop rotation P use efficiency (EUProt) did not differ between nutrient applications strategies (19.4 and 32.4 kg kg⁻¹ during the first cycle and 32.9 and 37.4 kg kg⁻¹ during the second for annually and rotation fertilized treatments respectively). There were no differences between strategies in the crop P use efficiency of each crop (EUPcult). In contrast, during the first cycle, the applied P recovery efficiency (ERP) was higher for the rotation fertilized treatment than the annual application (0.13 and 0.03 kg kg⁻¹), while there were no differences in the second cycle (0.16 and 0.17 kg kg⁻¹ for annual and rotation application respectively). The correlation between the annual change in soil P-Bray and the P balance of the crop sown that year was low. A model was developed to predict the available-P decline in soils without P application, considering initial P-Bray level and crop P exportation as variables.

Key words. Annual phosphorus application, rotation phosphorus application.

INTRODUCCIÓN

Los suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires se caracterizan por presentar en estado prístino niveles de fósforo (P) extractable (P-Bray 1) menores a 10 mg kg^{-1} (Sainz Rozas & Echeverría, 2008). Esta condición inicial genera deficiencias que limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos por lo que se debe recurrir al aporte del nutriente vía fertilización para alcanzar elevados rendimientos.

El P aplicado como fertilizante reacciona con los constituyentes físico-químicos del suelo produciendo compuestos de distinto grado de solubilidad. Este comportamiento condiciona la disponibilidad de P para los cultivos en cada suelo en particular. En los suelos del sudeste bonaerense, el P del fertilizante forma productos de mediana a alta solubilidad (Picone *et al.*, 2007). Esta característica genera que dicho nutriente manifieste residualidad en el suelo, permaneciendo disponible para la absorción por parte de los cultivos que integran la rotación. En este sentido, trabajos realizados en la región demuestran que una única aplicación de 22 y 11 kg de P ha^{-1} generó incrementos en el rendimiento de cultivos de grano durante 7 y 4 años respectivamente, en suelo con bajo contenido de P-Bray (Berardo *et al.*, 1997). Estas respuestas a la fertilización se manifestaron en monocultivo de trigo y en rotación de trigo/girasol. En la actualidad se ha intensificado el uso del suelo en la región siendo muy frecuente la rotación trigo/soja de segunda, maíz, soja (Calviño, com. pers.).

A partir de la residualidad de éste nutriente surge la posibilidad de definir estrategias de fertilización basadas en la frecuencia con que se efectúa su aplicación. La práctica más difundida es la fertilización al momento de la siembra de cada cultivo, pero la aplicación de una dosis única, que contemple los requerimientos de todos los cultivos que integran la rotación se presenta como una estrategia de interés. La misma presenta beneficios al simplificar la logística de la labor y además, ante un escenario de cambios en el costo de los fertilizantes fosfatados permitiría, cuando la relación de precios resulte conveniente, su acumulación en el suelo para un posterior uso por los cultivos. Puesto que los cultivos responden de manera diferencial al agregado de P (Echeverría & García, 1998), las mayores dosis deberían aplicarse a los cultivos de mayor probabilidad de respuesta. Para las rotaciones del sudeste bonaerense, la aplicación de P se efectuaría al trigo (cabeza de rotación), que posee el nivel de suficiencia en suelo más alto. El maíz y la soja, sembrados posteriormente logran rendimientos máximos con menor disponibilidad de P en el suelo, por lo que podrían aprovechar el efecto residual de la aplicación al trigo.

La adición continua de P en los suelos del sudeste bonaerense ha generado un incremento del nivel de P-Bray

en el suelo respecto de sus niveles originales (Echeverría & García, 1998; Sainz Rozas & Echeverría, 2008). No obstante, es necesario mantener dicho nivel en suelo a través de la reposición del P exportado en los granos. Para esta situación, se desconoce el efecto del empleo de distintas estrategias de fertilización con P en Molisoles con alto contenido de P-Bray y si estas modifican la exportación de P por los cultivos. Por ello los objetivos del presente trabajo fueron: 1) evaluar el rendimiento de cultivos fertilizados con P anualmente y en forma única, a la rotación de cultivos, y 2) determinar la eficiencia de uso y de recuperación del P aplicado para cada estrategia de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó sobre un complejo de Paleudol Petrocálcico y Argiudol Típico (Serie Mar del Plata) con 2% de pendiente (sin erosión), ubicado en la EEA INTA Balcarce ($37^{\circ}45'$ latitud sur y $58^{\circ}18'$ longitud oeste, 138 m sobre el nivel del mar). El suelo estuvo en rotación agrícola con laboreos mecánicos (una pasada de arado de rejas y rastra de discos antes de la siembra) durante los 25 años previos al ensayo, y sus características en el estrato 0-20 cm al inicio de la experiencia fueron: 21,3% de arcillas, pH 5,5, 5,6% de materia orgánica (MO) y $28,7 \text{ mg kg}^{-1}$ de P-Bray. Se evaluaron tres tratamientos: aplicación de P con frecuencia anual, por única vez a la rotación de cultivos y un testigo sin fertilización con dicho nutriente. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental tuvo 60 m^2 (12 m por 5 m).

La experiencia se llevó adelante durante dos ciclos de rotación, de tres años de duración cada uno, en un suelo bajo siembra directa. La secuencia de cultivos para el primer ciclo fue: maíz (2001), soja (2002) y trigo/soja (2003); mientras que el segundo ciclo estuvo integrado por trigo/soja (2004), maíz (2005) y soja (2006). En el primer año el híbrido de maíz fue Dekalb 634, mientras que en 2005 fue Dekalb RR 682. Las variedades de soja de primera fueron Nidera 3000 (2002) y Don Mario 4000 (2006), mientras que la variedad de soja de segunda fue Don Mario 2200. En ambos años la variedad de trigo fue Buck Sureño. Los cultivos se sembraron bajo el sistema de siembra directa en fechas óptimas para la zona excepto la soja de segunda de 2005 que fue sembrada a mediados de enero, fecha considerada tardía (Monzón *et al.*, 2007). Los cultivos se mantuvieron libres de malezas y enfermedades. En madurez fisiológica, se realizaron gavillas recolectando las plantas en 5 m lineales sobre 5 surcos de cada unidad experimental para trigo y se pasaron las mismas por trilladora estacionaria. Para soja y maíz se recolectaron 3 surcos de igual longitud. El rendimiento en grano se expresó al 13,5% de humedad para soja y al 14% de humedad para trigo y maíz. La concentración de P total en los granos se determinó según la metodología propuesta por Walinga *et al.* (1995).

Se aplicaron 70 kg ha^{-1} de P a cada ciclo de rotación, en una única dosis al inicio de la misma o fraccionada en aplicaciones

anuales según cultivo (Tabla 1). A todo el ensayo se lo fertilizó con nitrógeno (N) y azufre (S) con dosis que no limitaron el rendimiento de los cultivos (Tabla 1). Los fertilizantes fueron aplicados al voleo en cobertura total un día después de la siembra de cada cultivo. Se usó superfosfato triple de Ca (46-0-0) como fuente de P, SO₄Ca (20% S, 16% Ca) como fuente de S y urea (46-0-0) como fuente de N.

Todos los años se realizó muestreo de suelo previo a la siembra hasta los 60 cm de profundidad en cada unidad experimental. En los primeros 20 cm se realizaron determinaciones de P-Bray (Bray & Kurtz, 1945), N-NO₃⁻ y S-SO₄⁻. En los 20-40 y 40-60 cm de profundidad se realizaron determinaciones de S-SO₄⁻ y de N-NO₃⁻.

El balance de P para cada cultivo se obtuvo mediante la diferencia entre la entrada del nutriente vía fertilizante y la exportación en granos (Kirkby & Johnston, 2008). Para cada cultivo, el P exportado se calculó como el producto del rendimiento (corregido a 0% de humedad) por la concentración de P en grano. El balance de P para la rotación se obtuvo como la sumatoria de los balances de los cultivos que la integraron. Se calculó para cada tratamiento el rendimiento acumulado en cada ciclo como la suma de los rendimientos de los cultivos que lo integraron. La eficiencia de uso del P aplicado a cada ciclo de rotación de cultivos (EUProt) se calculó como:

$$EUProt = \frac{\sum RCF - \sum RT}{70}$$

donde $\sum RCF$ es la suma de los rendimientos de los cultivos fertilizados, $\sum RT$ es la suma de los rendimientos de los testigos y 70 representa la dosis de P a la rotación. Cuando se realizan aplicaciones de P a la rotación no es posible calcular eficiencias de

uso de P (EUP) reales para cada cultivo. Se propone realizar una estimación de dicha eficiencia (EUPcult) a partir de la contribución de cada cultivo a la EUProt, mediante:

$$EUPcult = EUProt * \frac{(RCF - RT)}{\sum RCF - \sum RT}$$

donde RCF es el rendimiento del cultivo fertilizado y RT es el rendimiento de dicho cultivo sin fertilizar. La EUP se expresa en kg grano kg P⁻¹.

La eficiencia de recuperación en grano del P aplicado para cada estrategia de fertilización en cada ciclo de rotación (ERP) se calculó mediante el método de la diferencia (Kirkby & Johnston, 2008):

$$ERP = \frac{\sum PEF - \sum PET}{70}$$

donde $\sum PEF$ es la suma del P exportado en grano por los cultivos fertilizados con P, $\sum PET$ es la suma del P exportado por los cultivos sin fertilizar y 70 es la dosis de P aplicada a la rotación. La ERP se expresa en kg P kg P⁻¹.

Se realizó el análisis de la varianza usando el procedimiento GLM (*General Linear Model*) del programa *Statistical Analysis System* (SAS Institute, 1985) con un nivel de significancia del 5%.

Se determinó el efecto del balance de P de cada cultivo sobre la variación anual del P-Bray (mg kg⁻¹). Dicha variación se calculó como la diferencia entre el P-Bray medido previo a la implantación del cultivo siguiente en la rotación al que se le determinó el balance de P y el P-Bray medido antes de la siembra de dicho cultivo (Fig. 1).

Tabla 1. Dosis de nutrientes (kg ha⁻¹) aplicados a cada cultivo de la rotación.

Table 1. Nutrients rate (kg ha⁻¹) applied to each crop rotation.

	2001-02			2002-03			2003-04			2004-05			2005-06			2006-07		
	Maíz			Soja			Trigo/Soja			Trigo/Soja			Maíz			Soja		
	N	P	S	N	P	S	N	P	S	N	P	S	N	P	S	N	P	S
Testigo	140	0	15	0	0	15	140	0	15	130	0	15	130	0	15	0	0	15
P anual	140	20	15	0	20	15	140	30	15	130	30	15	130	20	15	0	20	15
P rotación	140	70	15	0	0	15	140	0	15	130	70	15	130	0	15	0	0	15

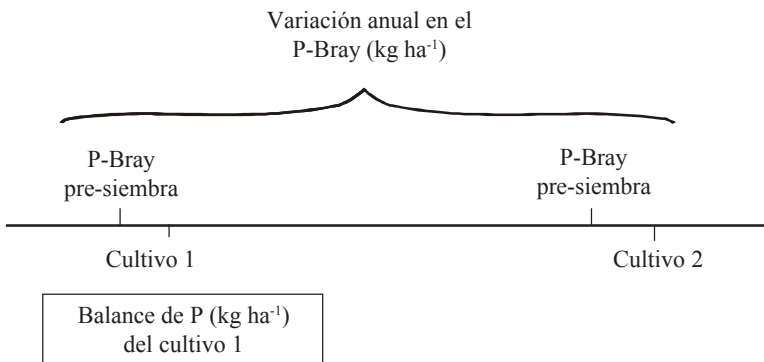


Figura 1. Metodología de cálculo de la variación anual del P-Bray (mg kg⁻¹) en función del balance de P (kg ha⁻¹) del cultivo implantado dicho año.

Figure 1. Calculating methodology for change in soil P-Bray (mg kg⁻¹) due to crop P balance (kg ha⁻¹).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo de maíz en 2001 y 2005 totalizaron 670 y 451 mm respectivamente, y tuvieron distribución homogénea en el tiempo por lo que, teniendo en cuenta los requerimientos del cultivo (550 mm), no se determinaron déficits hídricos severos en ninguno de los años. Durante la estación de crecimiento 2002-03, se registraron escasas precipitaciones desde fines de enero a principios de febrero, lo que habría limitado el rendimiento del cultivo de soja. En el 2003 las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de trigo fueron abundantes (748,3 mm) lo que determinó adecuado suministro hídrico. En 2004, las lluvias fueron escasas (313 mm), determinándose ligero déficit hídrico desde pre-antesis hasta la madurez del trigo. Durante los meses de febrero y marzo de 2004 y 2005 las precipitaciones totalizaron 139 y 126 mm respectivamente, generando suficiente disponibilidad de agua para lograr elevados rendimientos en soja de segunda. En síntesis, solo se registraron déficits hídricos en 2002 para el cultivo de soja de primera y en 2004 para el cultivo de trigo.

Rendimiento

La disponibilidad inicial de P (P-Bray) para los tres tratamientos fue de 28,7 mg kg⁻¹, cantidad que supera el umbral de suficiencia para todos los cultivos integrantes de la rotación (Echeverría & García, 1998). De este modo, durante los primeros años del ensayo (maíz 2001, soja 2002, trigo/soja 2003/04) no se manifestaron diferencias entre los tratamientos fertilizados y el testigo (Fig. 2). En particular, el maíz sembrado en 2001, mostró una tendencia de menor rendimiento respecto del fertilizado a la

rotación pero con una gran variabilidad entre repeticiones (CV 17%) lo que impidió que la diferencia sea estadísticamente significativa. Desde el comienzo del ensayo el nivel de P-Bray del testigo descendió gradualmente (Fig. 4) debido al balance negativo de P de los cultivos. Como consecuencia los rendimientos de los tratamientos fertilizados superaron al testigo en trigo 2004, maíz 2005 y soja 2006. Los rendimientos de soja de segunda obtenidos en los dos años de evaluación fueron muy inferiores a los esperados para la zona (Calviño *et al.*, 2003). En el caso de la soja implantada en 2004 el elevado rendimiento del cultivo de trigo sembrado en 2003 podría haber restringido la disponibilidad de agua y nutrientes, impactando negativamente en el rendimiento. La soja de segunda del año 2005 fue sembrada a mediados de enero, fecha considerada tardía para la zona (Mon-zón *et al.*, 2007), razón por la cual el cultivo se desarrolló en condiciones ambientales que no favorecieron la obtención de elevados rendimientos.

En ninguno de los cultivos evaluados se determinaron diferencias en rendimiento entre los tratamientos fertilizados en forma anual y a la rotación. Estos resultados son coincidentes con lo reportado por McCallister *et al.* (1987) para suelos de similares características y contenidos de P disponible, quienes no encontraron diferencias en rendimiento a lo largo de 5 años en una secuencia de maíz continuo, al evaluar dosis de P aplicadas en forma anual o dividida cada dos y tres años. Contrariamente, en suelos con bajo contenido de P, Buah *et al.* (2000) encontraron mayores respuestas en rendimiento de soja con aplicaciones anuales.

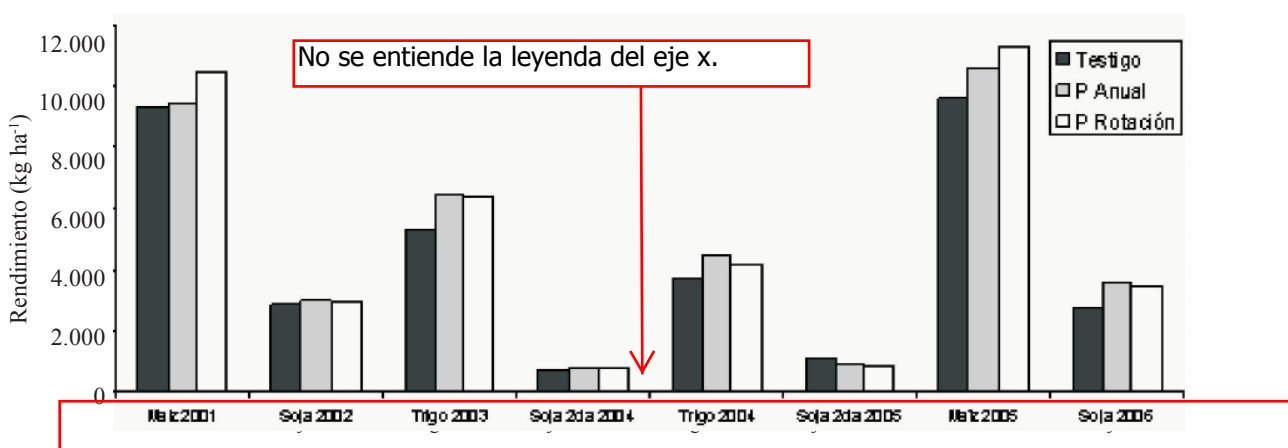


Figura 2. Rendimiento de los cultivos que integraron los dos ciclos de rotación. Entre cultivos del mismo año, letras distintas difieren significativamente según MDS. ($p < 0,05$).

Figure 2. Crop Yields during the two rotation cycles of. Among the same year crops, the same letters do not differ significantly according to LSD. ($P < 0.05$).

Balace de P

La cantidad de P exportado en grano de los tratamientos fertilizados superó al tratamiento testigo (Tabla 2). Esto obedece a que los tratamientos que recibieron aporte de P lograron mayores rendimientos (Fig. 2) y, en ciertos cultivos, mayor concentración en grano del nutriente (Fig. 3). La escasa diferencia en concentración de P en grano entre tratamientos fertilizados, se explicaría porque la aplicación anual o a la rotación mantuvo el nivel de P-Bray del suelo por encima de 23 mg kg⁻¹ durante el período experimental (Fig. 4); concentración que no generaría deficiencias para los cultivos (Echeverría & García, 1998). Además, la aplicación del fertilizante se realizó al voleo, forma que limita la absorción por parte de los vegetales en comparación con otras donde el P se localiza más cerca de la semilla (Kirkby & Johnston, 2008). La ausencia de consumo de lujo con aplicaciones elevadas de P resulta beneficiosa debido a que permite definir estrategias de

fertilización a la rotación. Mallarino (1996), para Molisoles del estado IOWA, reportó una débil asociación entre la disponibilidad de P en el suelo y la concentración de nutriente en grano de maíz, concluyendo que si bien existe una tendencia al consumo de lujo ésta no resulta de gran magnitud.

Para los ocho cultivos, el testigo acumuló un balance negativo de 99,9 kg P ha⁻¹. Por el contrario, el P aplicado durante los dos ciclos de rotación en los tratamientos fertilizados superó la extracción por los cultivos, resultando en un balance positivo de dicho nutriente en el suelo (Tabla 2). En este sentido, experiencias realizadas en la región sur de Santa Fe y sureste de Córdoba con la misma secuencia de cultivos y sin aporte de P generaron un balance negativo de 148,2 kg P ha⁻¹ a lo largo de 6 años (Ciampitti, 2009). Estas diferencias obedecen al mayor rendimiento de los cultivos, dado que la concentración de P en granos resultó similar a la obtenida en el presente

Tabla 2. Fósforo (P) aplicado, exportado y balance durante el período 2001-2006 para los tratamientos que recibieron fertilización anual, a la rotación y testigo. Medidas seguidas de letras iguales dentro de cada columna no difieren significativamente ($p < 0,05$).

Table 2. Applied, exported and phosphorus (P) balance during the 2001-2006 period for check, annual and rotation fertilization treatments. Measures followed by same letters inside each column do not differ significantly ($p < 0.05$).

Tratamiento	P aplicado (kg ha ⁻¹)	P exportado en grano (kg ha ⁻¹)	Balace de P (kg ha ⁻¹)
Testigo	0	99,9 b	-99,9 b
P Anual	140	113,6 a	26,4 a
P Rotación	140	120,2 a	19,8 a

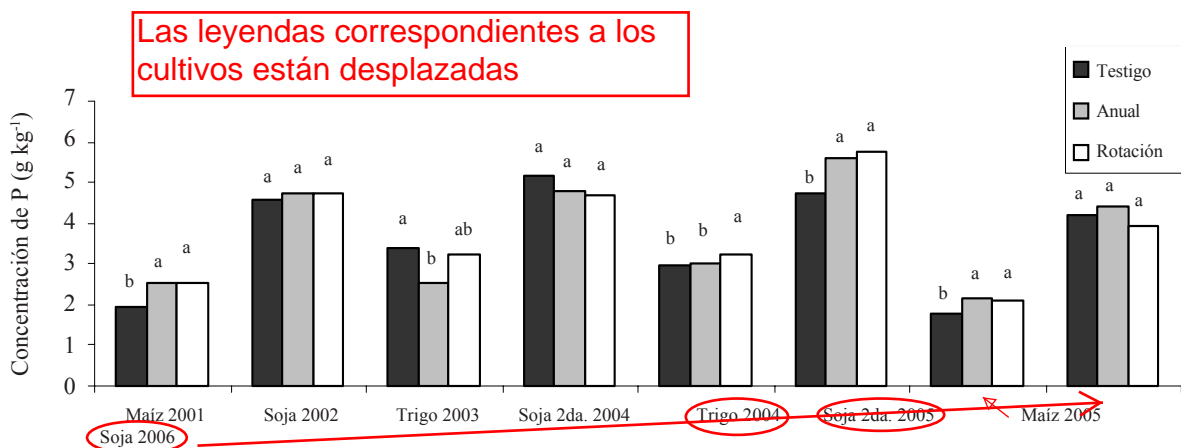


Figura 3. Concentración de P en grano de los cultivos que integraron los dos ciclos de rotación. Entre cultivos del mismo año, letras distintas difieren significativamente según MDS. ($p < 0,05$).

Figure 3. Grain P concentration of the Crops. Among the same year crops, the same letters do not differ significantly according to LSD. ($P < 0.05$).

trabajo. Asimismo, rotaciones más intensivas (maíz-trigo/soja de segunda) acumularon un déficit de 155,9 kg P ha⁻¹ en igual período de tiempo (Ciampitti, 2009). Picone *et al.* (2007), trabajando en suelos del sudeste bonaerense, determinaron que cuando la cantidad de P aplicada a los cultivos fue superior a la removida en grano (balance positivo de P), el exceso se acumuló en fracciones inorgánicas de rápida disponibilidad (extractable con membrana de intercambio aniónico y con NaHCO₃) para los cultivos.

Las consecuencias del balance se manifestaron en la evolución del contenido de P-Bray en el suelo (Fig. 4). La aplicación anual incrementó levemente la concentración hasta alcanzar 32 mg P kg⁻¹. Contrariamente, el tratamiento fertilizado en forma única (a la rotación) mostró marcados aumentos en los años siguientes a la aplicación de P, seguido por leves descensos (Fig. 4). Las parcelas que no recibieron P mostraron una mayor disminución del P disponible durante los primeros 3 años del ensayo, mientras que durante el segundo ciclo de rotación esta tendencia se mantuvo pero en una forma no tan acentuada (Fig. 4). Berardo *et al.* (1997) trabajando en suelos de la zona reportaron que, cuando se discontinuó la aplicación de P a suelos con alto contenido, los descensos más marcados en el nivel de P-Bray se produjeron durante los primeros 3 o 4 años de cultivo. Este comportamiento estaría explicado porque la fertilización produce un mayor enriquecimiento relativo de las fracciones lábiles (Picone *et al.*, 2007), las que decaen rápidamente ante balances negativos de P (Blake *et al.*, 2003). Por otro lado, Zhang *et al.*

(2004) reportaron, para suelos similares de otras regiones, que los mecanismos responsables de que se produzca un *plateau* en niveles de baja disponibilidad de P son el abastecimiento desde fracciones menos solubles, desde estratos inferiores del perfil y la mineralización de la MO.

Se determinó una débil asociación ($R^2 = 0,40$) entre la variación anual de la concentración de P-Bray y el balance de P del cultivo (o doble cultivo, en el caso de trigo/soja de segunda) implantado dicho año, observándose una mayor dispersión de los datos cuando el balance de P fue negativo (Fig. 5). De este modo, se pone de manifiesto que la compleja dinámica de P en el suelo no permitiría realizar generalizaciones sobre los cambios en el P disponible como consecuencia de un determinado balance. Entre los factores que condicionan la dinámica del P para un suelo en particular se encuentran el nivel inicial de P disponible y el signo y la magnitud del balance de P. En este sentido, Rubio *et al.* (2008) y Haden *et al.* (2007) reportaron que en la medida que se incrementa el nivel inicial de P disponible en el suelo los aumentos en el P-Bray por unidad de P aplicado son mayores, debido a una saturación en los sitios de adsorción. Asimismo, cuando el nivel inicial de P disponible es bajo, no se manifiestan grandes cambios ante balances negativos del nutriente debido a que ocurre flujo desde fracciones menos lábiles (Zhang *et al.*, 2004). Por otra parte, Vadas *et al.* (2006) encontraron que la tasa de abastecimiento de P a la fracción disponible difiere según éste provenga de aporte externo (fertilizante) o desde «*pooles*» edáficos poco lábiles. Esto generaría

Debe decir:
($p < 0,05$;
 $r^2 = 0,40$)

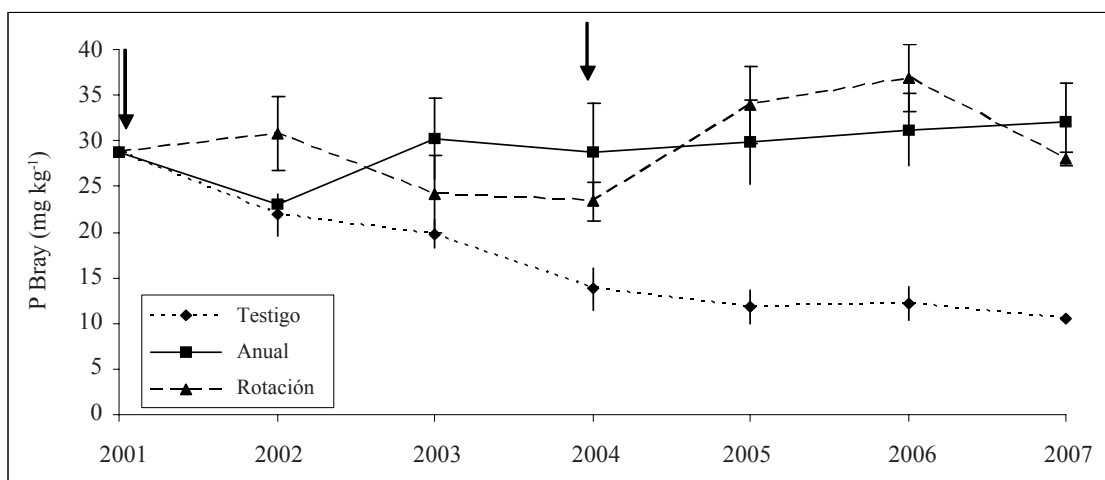


Figura 4. Evolución del P-Bray en función de los años y de las estrategias de fertilización. Las flechas indican el momento de la aplicación de P al tratamiento fertilizado cada tres años, a la rotación de cultivos.

Figure 4. P-Bray evolution on the basis of years and fertilization strategies. Arrows indicates the P application on the treatments fertilized once during the crop rotation.

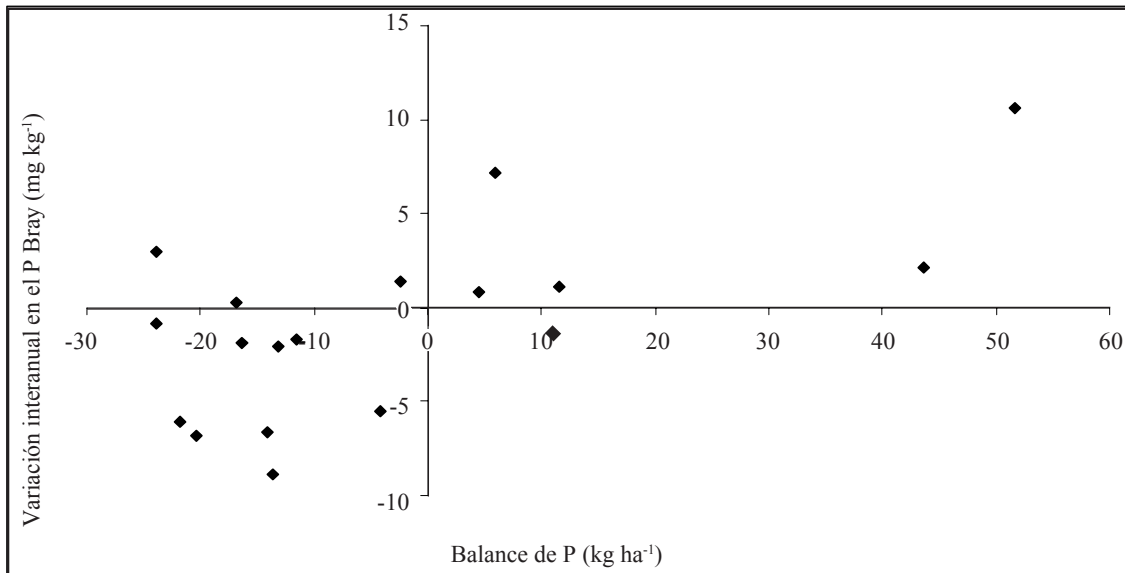


Figura 5. Variación anual de P-Bray en función del balance de P del cultivo implantado dicho año para los seis años.
Figure 5. Association between annual P-Bray variation and crop P balance for the six years.

cambios en el P-Bray de distinta magnitud, según se trate de balances positivos o negativos de P. Además, la metodología de determinación del P disponible para los cultivos presenta alta variabilidad en sus resultados, siendo el muestreo de suelo la mayor fuente de error (Petersen & Calvin, 1986). Esto genera que, aunque los cambios en las fracciones disponibles de P se produzcan, en algunos casos no se logren detectar con las técnicas empleadas. Contrariamente a lo obtenido en el presente trabajo, Zhang *et al.* (2004) reportaron una relación lineal entre el balance de P de los cultivos y el cambio anual en la concentración de P disponible y que la magnitud del cambio difirió según el balance fuera positivo o negativo.

Para el tratamiento testigo, la disminución en el nivel de P-Bray provocada por la exportación de P por los cultivos pudo representarse, mediante la ecuación:

$$DP = 6,17 - 0,10 * P_{inicial}^{1,27} - 0,29 * P_{exp} \quad (r^2=0,91)$$

donde: DP es la disminución en el P-Bray (mg kg⁻¹), P_{inicial} es el P-Bray en el suelo previo a la implantación del cultivo (mg kg⁻¹) y P_{exp} es el P exportado en granos (kg ha⁻¹) por dicho cultivo. De la misma se desprende que, tal como proponen Dodd & Mallarino (2005), cuanto mayor es la disponibilidad inicial de P en el suelo, más marcada es la disminución en el contenido de P-Bray.

Eficiencia de uso y de recuperación del P aplicado

Durante el primer ciclo de rotación, el maíz que recibió fertilización anual manifestó una menor EUPcult respecto del fertilizado a la rotación (Tabla 3) aunque la misma no resultó estadísticamente significativa. Esta diferencia podría corresponder a error experimental y a que, a pesar de que el nivel de P-Bray resultó elevado (28,7 mg kg⁻¹), la dosis de P aplicada fue baja (30 kg ha⁻¹) y al voleo, siendo esta forma de colocación menos eficiente que en la línea de siembra, dada la mayor distancia entre el fertilizante y las raíces (Kirkby & Johnston, 2008). Los demás cultivos de la rotación tampoco mostraron diferencias entre tratamientos (Tabla 3); de este modo, la EUProt resultó levemente menor para la estrategia de fertilización anual aunque no difirió estadísticamente. Durante el segundo ciclo no existieron diferencias en la EUPcult entre estrategias de fertilización y por ende tampoco en el promedio del ciclo de rotación. Berardo *et al.* (1997) reportaron que a lo largo de 7 años la aplicación única de 88 kg ha⁻¹ de P generó EUProt del orden de 70 y 33 kg grano kg P⁻¹ para secuencias de trigo continuo y trigo-girasol, respectivamente. Debe considerarse que el tipo de cultivo que integra la rotación, por la capacidad de incrementar su rendimiento ante el agregado de P, afecta la EUP promedio de la misma.

A lo largo de cada ciclo de rotación, el P aplicado como fertilizante se recuperó en los granos en proporciones que variaron entre un 3 y 17% (Tabla 4). Durante el primer

Tabla 3. Eficiencia de uso de fósforo de los cultivos (EUPcult) y eficiencia de uso de fósforo de la rotación (EUProt) para los tratamientos que recibieron fertilización anual y a la rotación. Medidas seguidas de letras iguales dentro de cada fila no difieren significativamente ($p < 0,05$).

Table 3. Crops phosphorus use efficiency (EUPcult) and rotation phosphorus use efficiency (EUProt) for treatments that received annual and rotation fertilization. Measures followed by same letters inside each row do not differ significantly ($p < 0.05$).

	Cultivo	EUPcult (kg grano kg P ⁻¹)	
		Anual	Rotación
Primer Ciclo	Maíz	1,8 a	15,4 a
	Soja	1,5 a	1,1 a
	Trigo	15,9 a	14,9 a
	Soja 2da	0,2 a	1,0 a
	EUProt	19,4 a	32,4 a
Segundo Ciclo	Trigo	10,6 a	6,2 a
	Soja 2da	-3,4 a	-3,9 a
	Maíz	14,1 a	24,4 a
	Soja	11,6 a	10,7 a
	EUProt	32,9 a	37,4 a

Tabla 4. Eficiencia de recuperación (ERP) de fósforo en cada ciclo de rotación para los tratamientos que recibieron fertilización anual y a la rotación. Medidas seguidas de letras iguales dentro cada ciclo de rotación no difieren significativamente ($p < 0,05$).

Table 4. Phosphorus Recovery Efficiency (ERP) in each rotation cycle for treatments that received annual and rotation fertilization. Measures followed by same letters inside each rotation cycle do not differ significantly ($p < 0.05$).

Rotación	Tratamiento	ERP (kg P kg P ⁻¹)
1er ciclo	P Anual	0,03 b
	P Rotación	0,13 a
2do ciclo	P Anual	0,17 a
	P Rotación	0,16 a

ciclo, la ERP fue mayor para el tratamiento de fertilización a la rotación, pero durante el siguiente, ambos tratamientos resultaron iguales. Los bajos valores de ERP obedecerían en gran medida a que el nivel inicial de P en el suelo fue alto (28,7 mg kg⁻¹); de este modo los cultivos fertilizados utilizaron el P edáfico en una alta proporción. Para un suelo de la misma región, Berardo (2003) reportó ERP del 70 y 50% para la aplicación de 22 y 44 kg de P ha⁻¹. En este caso la baja dosis de P aplicada sobre un suelo de bajo nivel de P-Bray y el mayor período en el cual se determinó la recuperación (8 años), contribuyeron a que la ERP sea mayor a la obtenida en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

Para un suelo con alto contenido de P inicial, la aplicación anual de P o en forma única, a la rotación de cultivos, no generó diferencias en el rendimiento de los cultivos que integraron los dos ciclos de rotación evaluados. Tampoco existieron diferencias en la EUPcult ni en la EUProt debidas a la estrategia de fertilización. En cambio, durante el primer ciclo, la ERP resultó mayor para el tratamiento fertilizado a la rotación respecto de la aplicación anual, mientras que en el segundo ciclo no se detectaron diferencias entre ambos.

REFERENCIAS

- Berardo A; F Grattone; R Rizzalli & F García. 1997. Long-term effects of phosphorus fertilization in wheat yields, efficiency and soil test levels. *Better Crops International* Vol. 12 No. 2, 18-20.
- Berardo, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. Simposio «El fósforo en la agricultura argentina», Rosario, 8-9 de Mayo de 2003. INPOFOS Cono Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Blake L; AE Johnston; PR Poulton & KWT Goulding. 2003 Phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant Soil* 254: 245-261.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.

- Buah, SSJ; TA Polito & R Killorn. 2000. No-tillage soybean response to banded and broadcast and direct and residual fertilizer phosphorus and potassium applications. *Agron. J.* 92: 657-662.
- Calviño, PA; VO Sadras & FH Andrade. 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *Field Crops Res.* 83: 67-77.
- Ciampitti, I.A. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. Tesis *Magister Scientiae* en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 116 pp.
- Dodd, JR & AP Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization strategies for corn-soybean rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1118-1128.
- Echeverría, HE & FO García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico N°149. Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. 16 p.
- Haden, VR; QM Ketterings & JE Kahabka. 2007. Factors affecting change in soil test phosphorus following manure and fertilizer application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(4): 1225-1232.
- Kirkby, EA & E Johnston. 2008. Soil and fertilizer phosphorus in relation to crop nutrition. In: PJ White, JP Hammond (eds.) *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*. Springer Science + Business Media B.V. p 177.
- Mallarino, A. 1996. Evaluation of optimum and above-optimum phosphorus supplies for corn by analysis of plant parts. *Agron. J.* 88: 376-380.
- McCallister, DL; CA Shapiro; WR Raun; FN Anderson; GW Rehm; OP Engelstad; MP Russelle & RA Olson. 1987. Rate of phosphorus and potassium buildup/decline with fertilization for corn and wheat on Nebraska Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1646-1652.
- Monzon, JP; VO Sadras; PA Abbate & OP Caviglia. 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Res.* 101: 44-52.
- Petersen, R & L Calvin. 1986. Sampling. In: A Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part I* 2nd Ed. *Agronomy* 9 (1): 33-51.
- Picone, L; I Capozzi; E Zamuner; H Echeverría & H Sainz Rozas. 2007. Transformaciones de fósforo en un Molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Ci Suelo* 25(2): 99-107.
- Rubio, G; MJ Cabello; FH Gutiérrez Boem & E Munaro. 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1721-1727.
- Sainz Rozas HR & HE Echeverría. 2008. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 13 al 16 de mayo de 2008 Potrero de los Funes (SL), Argentina.
- SAS Institute. 1985. SAS user's guide. Statistics. Vers. 5. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Vadas, PA; T Krogstad & AN Sharpley. 2006. Modeling phosphorus transfer between labile and nonlabile soil pools: updating the Epic Model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 736-743.
- Walinga, L; JJ van der Lee; VJG Houba; W van Vark & I Novozamsky. 1995. Digestion in tubes with H₂SO₄-salicylic acid- H₂O₂ and selenium and determination of Ca, K, Mg, N, Na & P Zn. In: Walinga, L; van der Lee, JJ; Houba, VJG; van Vark, W Novozamsky, I (eds.), *Plant Analysis Manual*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 258.
- Zhang, TQ; AF MacKenzie; BC Liang & CF Drury. 2004. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:519-528.