

Evolución del P Bray del suelo en función del balance de P en el largo plazo*

P.A. Barbagelata^{1,2**} y M. Chesta³

Introducción

En las últimas décadas se produjo una gran expansión del área bajo producción agrícola en la región pampeana argentina. Esta expansión se apoyó parcialmente en el cambio en el sistema de labranza tradicional hacia la siembra directa (SD). Los suelos de la región presentan bajos niveles de fósforo (P) disponible para las plantas (Tasi, 2000; Sainz Rozas et al., 2012) debido a la baja reposición de este nutriente exportado con las cosechas de forrajes y granos (balances negativos) y/o a características inherentes a los materiales originarios de los mismos. La aplicación racional de fertilizantes fosfatados generalmente aumenta el rendimiento de los cultivos en amplias regiones del país (Barbagelata, 2012), incrementando también la rentabilidad de los productores.

Es necesario contar con información acerca de cambios en niveles de P en suelo en sistemas de producción de trigo, soja y maíz con diferentes estrategias de fertilización con P para ayudar a los productores a manejar los nutrientes en una forma más eficiente. Sumado a esto, en los últimos años en algunos países han comenzado a exigir planes de manejo de nutrientes que estimen el impacto de las prácticas de fertilización sobre el aumento o disminución de los niveles de P en suelo (Dodd y Mallarino, 2005).

Los estudios de larga duración permiten reunir información esencial para estudiar cómo los sistemas de producción y la fertilización afectan la evolución de P en el suelo a través del tiempo. Conociendo cómo los niveles de P en suelo decaen o aumentan, cuando dosis de P menores o mayores al promedio de remoción por los cultivos son aplicadas, debería ayudar a manejar la fertilización con P para mantener niveles óptimos de P en suelo a través del tiempo y a determinar por cuánto tiempo se puede mantener un campo en producción antes que los niveles de P en suelo decrezcan a niveles que requieran fertilización (Webb et al., 1992; Mallarino et al., 1991; Dodd y Mallarino, 2005; Cox, 1992).

Las investigaciones de larga duración en fertilidad han servido como base de los programas de recomendaciones de fertilización usados actualmente en muchos países (McCallister et al., 1987; McCollum, 1991). Estos permiten determinar los efectos acumulativos de las prácticas en el mismo suelo, aparte del efecto sobre los cultivos y son la fuente de información más confiable

para recomendar las dosis de fertilizantes a aplicar y para responder a preguntas originadas en la filosofía de fertilización que indica que las dosis de nutrientes a aplicar deben estar basadas en la remoción por los cultivos (Cope, 1981). Dichas recomendaciones están sustentadas en una filosofía con bases razonables pero que debería ser verificada y apuntalada con datos de estudios de campo de larga duración. Potencialmente existen claras diferencias entre las distintas regiones del país en los requerimientos de fertilización fosfatada necesarios para mantener altos rendimientos y niveles óptimos de P en suelo. Estas diferencias se deben probablemente a variaciones en los tipos y cantidades de minerales nativos dominantes, que afectan la capacidad buffer de los suelos, y a las reservas de P en el subsuelo (Mc Callister et al., 1987).

En Argentina es escasa la información publicada proveniente de ensayos de larga duración. Berardo et al. (1997) estudiaron la evolución de P en suelo durante siete años posteriores a la aplicación de distintos niveles iniciales de P, en un sistema de trigo continuo en el sudeste bonaerense, lo que le permitió elaborar un modelo que explica la residualidad del P para las condiciones estudiadas. Recientemente, Ciampitti et al. (2011) generaron información sobre los requerimientos de P para incrementar el P extractable en rotaciones que incluyeron trigo, soja y maíz en suelos molisoles del norte de la región pampeana. Sin embargo, es necesario generar más información sobre los efectos de la fertilización fosfatada en el largo plazo en sistemas de producción de cultivos bajo siembra directa.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización fosfatada en el largo plazo sobre el balance de P y el cambio en los niveles de P Bray en los primeros 20 cm del suelo a través del tiempo y estudiar la relación entre estos últimos.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el lote 11 del establecimiento "Los Cordobeses" ubicado en el Distrito Don Cristóbal del Departamento Paraná, provincia de Entre Ríos (32° 03' 47.0" S; 59° 55' 49.0"). En este lote se inició con siembra directa en el ciclo 1991/92, año desde el cual se han implantado 38 cultivos hasta 2015/16 (**Tabla 1**), lo que da un promedio 1.52 cultivos año⁻¹. El suelo predominante en el lote es serie San Pablito, el cual pertenece a la familia "fina, montmorillonítica, térmica"

¹ EEA INTA Paraná

² UNER, Facultad de Ciencias Agropecuarias

³ AAPRESID, Regional Paraná

* Trabajo presentado en el XXV CACS, 27 de Junio al 1ro de Julio de 2016, Río Cuarto, Córdoba, Argentina

** Autor de contacto. Correo electrónico: barbagelata.pedro@inta.gob.ar

Tabla 1. Rendimiento de los cultivos (a humedad comercial), dosis de P aplicadas, extracción anual de P estimada, balance anual de P y contenido de P Bray en los primeros 20 cm del suelo en las 25 campañas evaluadas.

Campaña	Rotación	Rendimiento de los cultivos				Dosis de	Extracción de	Balance anual de	P Bray
		Trigo	Soja	Maíz	Sorgo	P	P	P	
		kg ha ⁻¹				kg P ha ⁻¹			mg kg ⁻¹
1991-92	Trigo/Soja	2650	2200	-	-	9.6	20.9	-11.3	9.0
1992-93	Trigo/Soja	2750	1570	-	-	13.0	17.9	-4.9	7.8
1993-94	Trigo/Soja	2070	1780	-	-	8.8	16.6	-7.8	6.7
1994-95	Trigo/Soja	1830	1910	-	-	15.8	16.5	-0.7	6.0
1995-96	Sorgo	-	-	-	4110	8.0	12.7	-4.7	3.4
1996-97	Trigo/Soja	3500	1300	-	-	21.8	19.0	2.8	7.5
1997-98	Soja 1 ^º	-	3670	-	-	10.0	19.6	-9.6	6.4
1998-99	Trigo/Soja	4880	1800	-	-	42.7	26.5	16.3	12.6
1999-00	Soja 1 ^º	-	2950	-	-	29.0	15.7	13.3	10.7
2000-01	Trigo/Soja	3500	3600	-	-	21.0	31.3	-10.3	7.8
2001-02	Trigo/Soja	1700	3300	-	-	31.7	23.5	8.3	9.3
2002-03	Maíz	-	-	7800	-	27.0	20.3	6.7	10.5
2003-04	Trigo/Soja	2800	2450	-	-	32.7	22.7	9.9	12.5
2004-05	Maíz	-	-	11 500	-	35.6	29.9	5.7	19.6
2005-06	Trigo/Soja	5090	2130	-	-	36.7	29.0	7.7	13.5
2006-07	Maíz	-	-	11 300	-	34.0	29.4	4.7	15.5
2007-08	Trigo/Soja	3500	3330	-	-	50.6	29.9	20.7	10.7
2008-09	Maíz	-	-	3730	-	27.2	9.7	17.5	20.3
2009-10	Soja 1 ^º	-	3950	-	-	12.0	21.1	-9.1	12.5
2010-11	Trigo/Soja	7050	2380	-	-	35.5	37.1	-1.6	14.6
2011-12	Maíz	-	-	5500	-	26.8	14.3	12.5	16.6
2012-13	Soja 1 ^º	-	3120	-	-	12.0	16.6	-4.6	24.2
2013-14	Trigo/Maíz	4450	-	8250	-	21.9	36.8	-15.0	16.7
2014-15	Soja 1 ^º	-	4350	-	-	25.0	23.2	1.8	13.2
2015-16	Maíz	-	-	7100	-	48.0	18.5	29.5	30.1

de los Argiudoles vérticos. Son suelos moderadamente bien drenados, con un epipedón pardo a pardo grisáceo, “franco-arcillo-limoso” seguido de un horizonte argílico no muy oscuro y de textura arcillo-limoso. El contenido de arcilla en el horizonte superficial es 38%.

El balance de P en el suelo fue calculado como la diferencia entre el ingreso y el egreso de P del sistema. El ingreso de P fue computado a partir de los fertilizantes fosfatados aplicados, según la concentración de P de la fuente utilizada. Las fuentes de fertilizantes fosfatados utilizadas fueron superfosfato triple de calcio (0-46-0), fosfato monoamónico (12-52-0) o fosfato diamónico (18-46-0). Los fertilizantes se aplicaron generalmente en pre-siembra, en cobertura total, o al momento de la siembra al costado de las semillas. El egreso de P del sistema fue estimado a partir de la medición del rendimiento anual

de los cultivos cosechados en el lote y la concentración de P de los mismos, utilizando las planillas de cálculos publicadas por IPNI Cono Sur (García y Correndo, 2016). Según estas planillas la concentración de P, expresada en base a humedad comercial de cada cultivo, es de 3.5, 5.3, 2.6 y 3.1 g P kg⁻¹ grano para trigo, soja, maíz y sorgo, respectivamente.

El muestreo de suelos se realizó anualmente luego de la cosecha del cultivo de verano respectivo, durante el mes de mayo, a una profundidad de 20 cm. La muestra de suelo compuesta por 25 submuestras se tomó al azar dentro del lote, respetando cada año el mismo patrón de muestreo. La muestra seca al aire se tamizó por una malla de 2 mm para el análisis de P Bray (Bray y Kurtz, 1945), pH suelo:agua 1:2.5 y contenido de materia orgánica (MO).

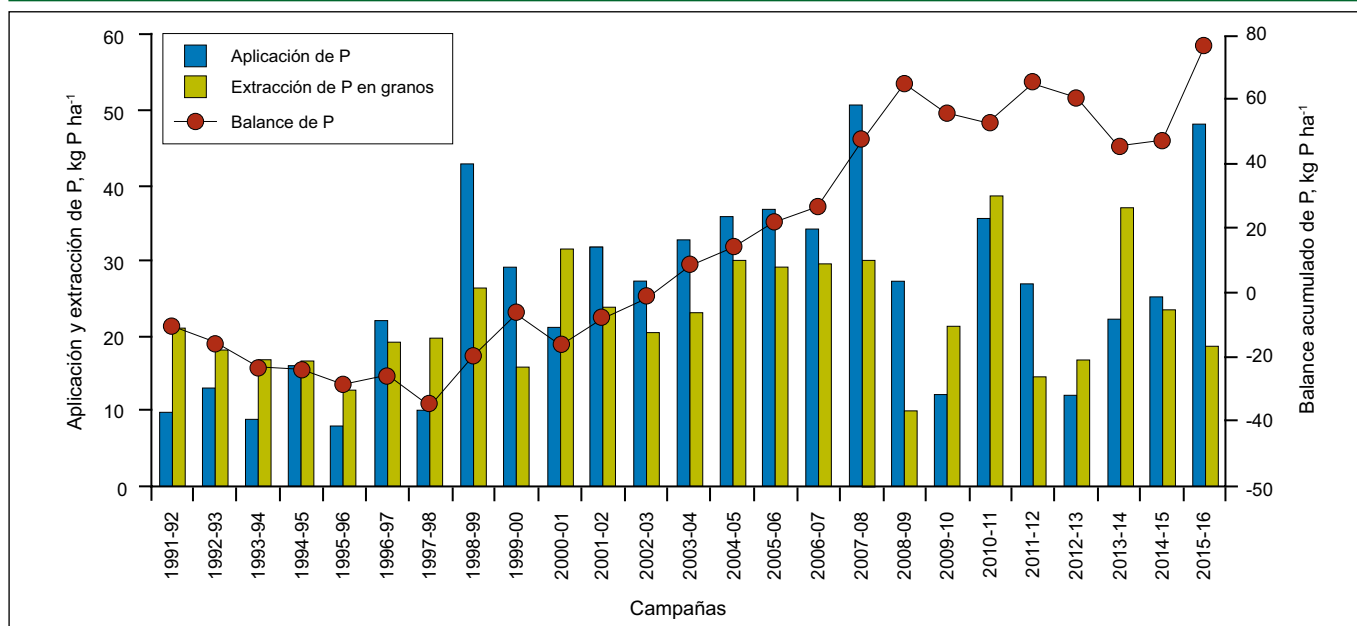


Figura 1. Dosis de P aplicadas, extracción de P estimada y balance acumulado de P en las 25 campañas agrícolas evaluadas en el lote 11 del establecimiento “Los Cordobeses”, provincia de Entre Ríos.

Los resultados obtenidos se analizaron mediante estadísticos descriptivos y regresión simple entre las variables balance acumulado de P y el P Bray. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011).

Resultados y discusión

El rendimiento de los cultivos incluidos en la rotación varió en función de la disponibilidad hídrica de cada año (**Tabla 1**), fluctuando desde 1700 a 7050 kg ha⁻¹ para trigo (13 cultivos), 1300 a 4350 kg ha⁻¹ para soja (17 cultivos) y 3730 a 11 500 kg ha⁻¹ para maíz o sorgo (8 cultivos). En los 25 ciclos agrícolas evaluados el rendimiento promedio fue de 6034 kg ha⁻¹ año⁻¹, los que multiplicados por la concentración promedio de P en granos (3.7 g de P kg⁻¹ grano) resultan en una extracción media de 22.3 kg de P ha⁻¹ año⁻¹.

La dosis promedio de P aplicada en los 25 años de estudio fue de 25.5 kg P ha⁻¹, con un mínimo anual de 8 y un máximo de 50.6 kg ha⁻¹ en los ciclos 1995/96 y 2007/08 (**Tabla 1**), respectivamente, totalizando 636 kg P ha⁻¹ en el periodo considerado.

En la **Figura 1** se muestran las dosis de P aplicadas anualmente vía fertilizantes fosfatados, las cantidades estimadas de P exportadas anualmente con los granos y el balance acumulado de P. Allí se puede observar un balance negativo de P durante las primeras campañas, en donde las dosis de P rondaban los 10 kg ha⁻¹ año⁻¹, y un quiebre de tendencia a partir de la campaña 1998/99 en donde el balance comienza a ser positivo, fruto de las dosis crecientes de P aplicadas anualmente.

En este esquema simplificado del balance de P no son tenidos en cuenta pérdidas potenciales del sistema a través de la lixiviación, escurrimiento superficial y erosión hídrica, que pueden provocar mermas de la fase

más enriquecida del suelo, en cuanto a concentración de materia orgánica y nutrientes. La erosión es uno de los pocos procesos irreversibles de degradación de suelos, lo cual destaca la importancia de aplicar las medidas de control necesarias para mantener la misma dentro de los niveles de tolerancia aceptados. En suelos afectados por este fenómeno, la erosión puede transformarse en la principal vía de pérdida de nutrientes del sistema (Morón, 2003), antes que los nutrientes exportados con los granos cosechados.

En el muestreo inicial de suelos realizado en 1992 el P Bray fue de 9 mg P kg⁻¹, el pH 6 y la MO 4.26%. La evolución del contenido de P Bray en el suelo durante los 25 años evaluados (**Figura 2**) siguió la misma tendencia del balance acumulado de P mostrado en la **Figura 1**. Esto marca la relevancia de alcanzar balances positivos de nutrientes como el P que permitan elevar sus contenidos en el suelo y así aumentar el potencial de rendimiento de los lotes con baja disponibilidad de este nutriente. La evolución de P Bray en el largo plazo es fuertemente afectada por el contenido inicial del mismo, los años de cultivo y las dosis anuales de fertilización con P (Dodd y Mallarino, 2005).

El estudio de la relación entre el balance acumulado de P y el P Bray (**Figura 3**) permite estimar el valor de este último a partir del balance acumulado de P logrado. Según la ecuación de la regresión lineal ($R^2 = 0.66$, $P < 0.001$), empleando la inversa de la pendiente, se calculó que una variación de 7.2 kg de P ha⁻¹ de balance acumulado resultaría en un cambio en el P Bray de 1 mg P kg⁻¹ suelo. Ciampitti et al. (2011) obtuvieron valores menores (2.5 a 3.3 kg de P ha⁻¹) de balance acumulado de P por unidad de cambio en el P Bray en suelos con P Bray inicial de < 25 mg kg⁻¹ en parcelas fertilizadas con P. Estos menores valores de P necesarios para modificar el P Bray del suelo indican un mayor efecto residual del

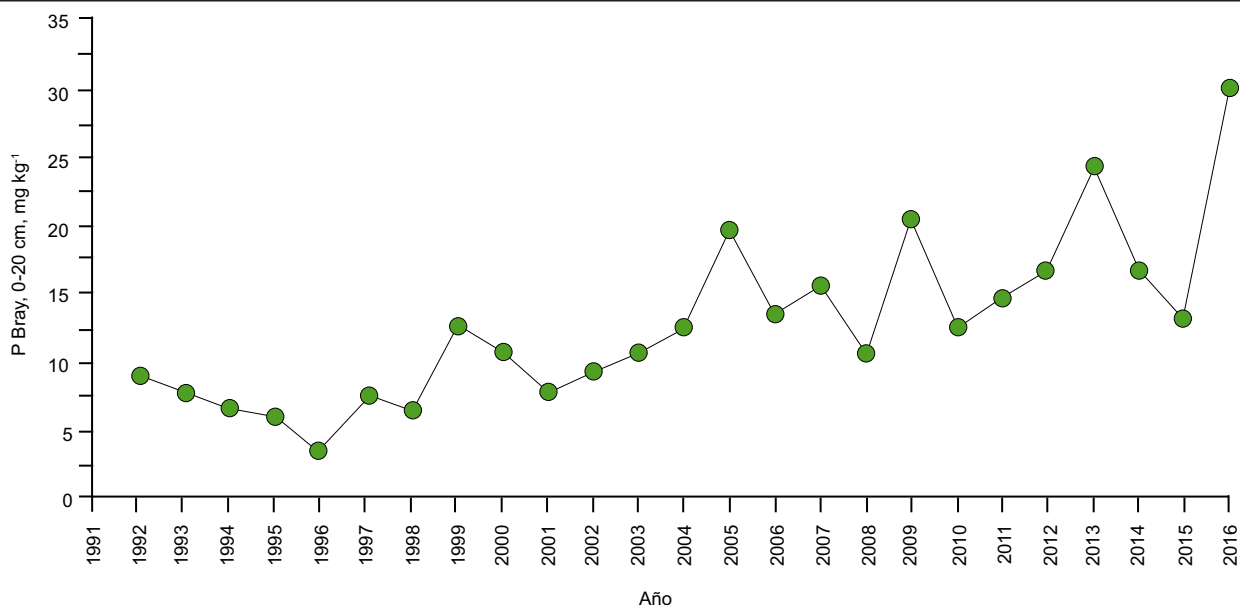


Figura 2. Evolución del P Bray (0-20 cm) en los 25 años evaluados en el lote 11 del establecimiento “Los Cordobeses”, provincia de Entre Ríos.

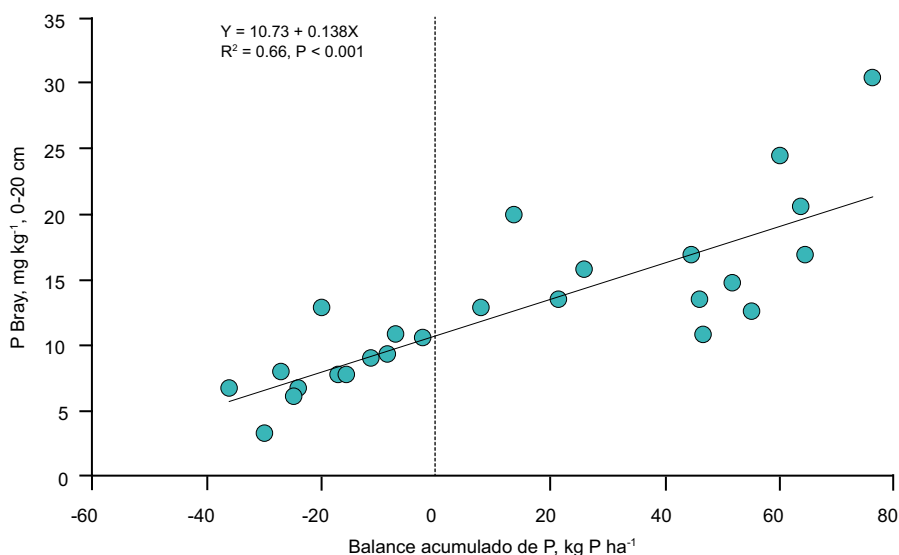


Figura 3. Relación entre el balance acumulado de P y el P Bray (0-20 cm) en los 25 años evaluados en el lote 11 del establecimiento “Los Cordobeses”, provincia de Entre Ríos.

P derivado de los fertilizantes aplicados. Por otro lado, Mallarino y Prater (2007) observaron que, luego de 12 años de rotación maíz-soja, fueron necesarios 16.8 kg P ha⁻¹ de balance positivo para incrementar 1 mg P Bray kg⁻¹.

Utilizando la ecuación mostrada en la **Figura 3** para estimar el P Bray luego de 25 años a partir del balance acumulado de P obtenido al final de dicho ciclo (78 kg P ha⁻¹), el valor predicho fue de 21.5 mg P Bray kg⁻¹, en tanto el valor medido en el año 2016 fue de 30.1 mg P Bray kg⁻¹ de suelo. Ambos niveles de P Bray, estimado y medido, están por sobre el rango considerado óptimo (12 a 18 mg P kg⁻¹) para la mayoría de los cultivos agrícolas de la región (Barbagelata et al., 2002; Barbagelata, 2012). Esto demuestra que balances de P positivos en los sistemas de producción, aún de escasa magnitud,

como el logrado en este trabajo (3 kg de P ha⁻¹ año⁻¹), permiten aumentar los niveles de P disponible del suelo y que el P Bray es un indicador sensible a estos cambios.

En los suelos de muchas zonas templadas aún las dosis óptimas económicas de fertilización fosfatada resultan en un incremento paulatino de los niveles de P en el suelo. Esto se debe a las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos (baja capacidad de fijar P), la absorción y remoción parcial del P aplicado durante el primer cultivo, el reciclaje de P en los residuos, y la relocalización de P de horizontes profundos a los superficiales (Dodd y Mallarino, 2005). Estas condiciones y procesos permiten que se pueda manejar el nivel de P en el suelo a corto o mediano plazo.

Conclusiones

El rendimiento promedio en los 25 ciclos agrícolas evaluados fue de 6034 kg ha⁻¹ año⁻¹, lo que resultó en una extracción total estimada de P en granos de 559 kg P ha⁻¹. En tanto, la cantidad de P aplicada vía fertilización en el mismo periodo fue 636 kg P ha⁻¹, produciendo un balance neto positivo de 78 kg de P ha⁻¹ al final del periodo.

La evolución del contenido de P Bray en el suelo durante los 25 años evaluados siguió la misma tendencia del balance acumulado de P.

La relación entre los cambios en el balance acumulado de P del sistema y el P Bray fue lineal y positiva. La variación del balance acumulado de P explicó un 66% de la variación en el contenido de P Bray del suelo, demostrando ser una buena aproximación para estimar los cambios en el mismo. La ecuación obtenida mostró que se necesitaron 7.2 kg de P ha⁻¹ de balance acumulado para modificar el P Bray en 1 mg P kg⁻¹ suelo.

Esto demuestra que balances de P positivos en los sistemas de producción, aún de escasa magnitud, como el logrado en este trabajo (3 kg de P ha⁻¹ año⁻¹), permiten incrementar paulatinamente los niveles de P extractable del suelo y que el P Bray es un indicador sensible para medir estos cambios.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos PNSUELO-1134024, PNCYO-1127033 y ERIOS-1263102 de INTA.

Bibliografía

- Barbágelata P.A. 2012. Manejo del fósforo en suelos de regiones templadas. Resúmenes de XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Barbágelata, P.A., R.J.M. Melchiori, O.F. Paparotti. 2002. Phosphorus fertilization of soybeans in clay soils of Entre Ríos province. *Better Crops Int.* Vol. 16(1):3-5.
- Berardo, A., F. Grattone; R. Rizzalli, y F. Garcia. 1997. Long-term effects of P fertilization in wheat yields, efficiency and soil test levels. *Better Crops* 12(2):18-20.
- Bray, R.H., L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Ciampitti I.A., F.O. García, L.I. Picone, G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:131-142.
- Cope, J.T., Jr. 1981. Effects of 50 years of fertilization with phosphorus and potassium on soil test levels and yield at six locations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:342-347.
- Cox, F.R. 1992. Range in soil phosphorus critical levels with time. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1504-1509.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves; M.G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada, y C.W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-Test Phosphorus and Crop Grain Yield Responses to Long-Term Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1118-1128.
- García, F.O., y A.A. Correndo. 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes de cereales, oleaginosas, industriales, forrajeras y hortalizas. IPNI, Programa Latinoamérica Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024> (revisado 29/02/2016).
- Mallarino, A.P., y J. Prater. 2007. Corn and soybean grain yield, phosphorus removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. pp. 241-253. In *The Integrated Crop Management Conf. Proceedings.* Nov. 29-30, 2007. Ames, IA. Iowa State Univ. Extension.
- Mallarino, A.P., J.R. Webb, y A.M. Blackmer. 1991. Corn and soybean yields during 11 years of phosphorus and potassium fertilization on high-testing soils. *J. Prod. Agric.* 4:312-317.
- McCallister, D.L., C.A. Shapiro, W.R. Raun, F.N. Anderson, G.W. Rehm, O.P. Engelstad, M.P. Russelle, y R.A. 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.
- McCollum, R.E. 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30-year trends on a Typic Umbraquult. *Agron. J.* 83:77-85.
- Morón, A. 2003. Efecto de las rotaciones Cultivos-Pasturas sobre la fertilidad de los suelos en ensayos de larga duración del INIA La Estanzuela (1963-2003). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 20:1-6. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. *RIA Vol.* 38(1):33-39.
- Tasi, H. 2000. Aptitud de uso y estado de degradación de suelos vertisoles y vérticos de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía (UBA)* 20(1):1-6.
- Webb, J.R., A.P. Mallarino, A.M. Blackmer. 1992. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* 5:148-152.