

## **Dinámica del fósforo en el sistema suelo-planta: Eficiencia, residualidad y Manejo de la Fertilización**

**Angel Berardo**

Unidad Integrada EEA INTA – Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP)

CC 276 (7620) Balcarce

aberardo@balcarce.inta.gov.ar

El fósforo (P) junto con el nitrógeno (N) son los dos nutrientes que con mayor frecuencia afectan la producción de los cultivos y de las praderas no solo en la Región Pampeana, sino también en otras áreas del país, al igual que en el resto del mundo. La mayor deficiencia de P hacia el sur y sudeste y del norte hacia el centro y centro norte de la Región Pampeana ya es historia del pasado, si bien reciente. La intensificación progresiva de la agricultura principalmente en ésta última región con la gran difusión de la soja y del doble cultivo (trigo-soja), con mayores rendimientos y niveles de extracción de nutrientes han acentuado el empobrecimiento de los suelos.

La extracción de P a partir de una producción de granos durante todo el siglo de aproximadamente 2 mil millones de toneladas puede estimarse en 250 a 300 kg/ha, para los 20 millones de hectáreas sembradas anualmente; pérdida importante ésta para contenidos de P nativo en los suelos de 400 a 600 ppm y aún mayores (800 a 1200 kg/ha P en la capa arable) mencionados en distintos trabajos (Navarro, 1973; Lavado, 1992; Urioste et al., 1996). Considerando que en la Región Pampeana entre el 50 y 80% del P nativo se encontraba bajo la forma orgánica, es indudable que ésta fracción, a través de su mineralización, ha sido la fuente principal para los cultivos.

Mizuno et al. (1982), no obstante las limitaciones existentes en la metodología utilizada, trataron de evaluar la mineralización del P orgánico en distintos suelos del país, obteniendo a los 15-20 días de incubación niveles de fósforo extractable (Ps) con resina que duplicaban y hasta triplicaban los niveles iniciales, con variaciones entre suelos, relacionadas a sus contenidos de Materia Orgánica. A título de ejemplo, la pérdida de 1% de materia orgánica (M.O.) en la capa arable implica también la mineralización de 1200 a 1400 kg de N, de 70 a 80 kg de S y de 100 a 120 kg de P. No es una exageración por consiguiente, considerar el doble de pérdidas de P (200 a 250 kg/ha) o aún superiores a las mencionadas, en función de los contenidos actuales de M.O.

Los niveles de extracción anual de P en la actualidad varían según las zonas y según los cultivos pero superan ampliamente (hasta 4 a 5 veces) el promedio histórico mencionado (2,5 a 3,0 kg/ha/año de P). La reposición actual de P en los cultivos apenas sobrepasa el 50% de la extracción por los granos, siendo ésta bastante heterogénea y con un balance más negativo en las zonas donde se ha intensificado aún más la agricultura y donde predomina la soja dentro de la rotación, cultivo éste último de muy baja fertilización.

El conocimiento de la dinámica y transformaciones de los nutrientes del suelo y de los agregados como fertilizantes, permite establecer pautas de manejo de la fertilización, que tratan de optimizar los rendimientos sin comprometer la pérdida de productividad de los suelos. En el país, los mayores esfuerzos se han orientado al estudio del N siendo por distintas razones más escasos los relacionados con el P; éstos a su vez están orientados en su mayoría a la obtención de métodos de diagnóstico de la fertilización fosfatada en cultivos y pasturas que relacionan básicamente los contenidos de P disponible en el suelo con los rendimientos o producción de materia seca y con la respuesta a P.

Estos estudios deben tener ajustes en la medida que así lo requieran los avances en la genética y en las prácticas de manejo del suelo y de los cultivos, que dan lugar a incrementos en los rendimientos y en los requerimientos de fósforo. La Siembra Directa, por los cambios en la redistribución del P en el suelo y en los procesos biológicos (mineralización e inmovilización), es un ejemplo.

Por consiguiente, es de particular relevancia conocer las transformaciones que se producen al incorporar el P al suelo, su recuperación por los cultivos y su efecto residual a través de los años. El mayor conocimiento sobre estos aspectos permite insertar más eficientemente a la

fertilización fosfatada en la secuencia de los cultivos y en las pasturas y evaluar con mayor precisión los efectos y los beneficios de esta práctica.

Hay que tener presente que el método de análisis de suelo ampliamente utilizado en la Región Pampeana para estimar el P “disponible” para las plantas (Bray y Kurtz I) extrae principalmente la fracción inorgánica (la más soluble y la intercambiable), y no evalúa los aportes por mineralización de la fracción de P orgánico; por consiguiente, suele subestimar en una magnitud variable el P realmente disponible para las plantas.

A título de ejemplo, se presentan algunos resultados de experiencias realizadas con pasturas y con cultivos en Argiudoles típicos del área de Balcarce, que presentan en la capa arable contenidos de Materia Orgánica de 5,5 a 6,5%, pH de 5,5 a 6,0 y contenidos de arcilla de 25 a 30% (textura franca). Estos resultados son extrapolables a suelos cuyas características no difieran en gran medida de las mencionadas.

En la Figura 1, después de un año de efectuada la fertilización con distintas dosis de P en pasturas, en un suelo de las características mencionadas, se muestran los cambios en las distintas fracciones de P orgánico e inorgánico, que son las más importantes para la nutrición de las plantas (Picone et al., 1999). A su vez, se indica la variación estacional de las fracciones orgánicas, evidenciándose un incremento del P de la biomasa en el período invernal y del P orgánico lábil en el período estival. Variaciones de una magnitud inferior, con incrementos en los períodos estivales se registraron también en las fracciones inorgánicas evaluadas (P Bray y P Olsen).

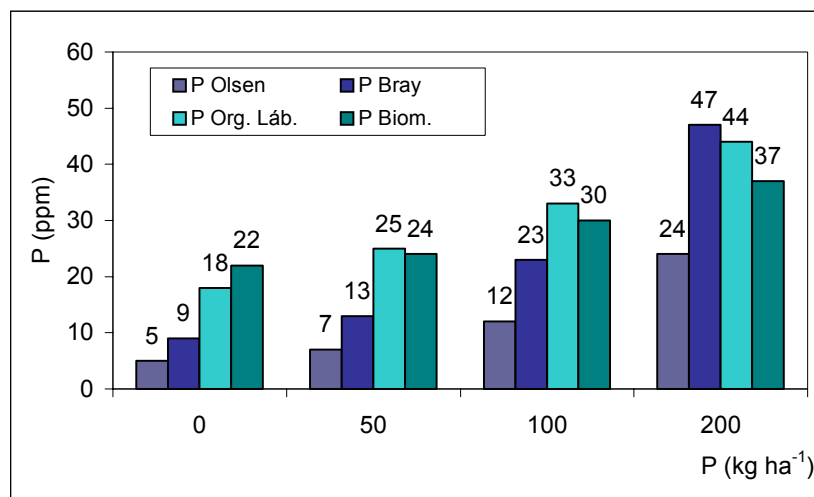


Figura 1. Efecto de la fertilización fosfatada sobre distintas fracciones de P en el suelo. Picote, Zamuner y Berardo, 1999. UIB.

En el Cuadro 1, a su vez para un suelo bajo cultivo de trigo, después de 8 años de fertilización, se indican los contenidos de las distintas fracciones de P orgánico e inorgánico con la producción acumulada y extracción de P por el grano (Diez et al., 2000). Estos resultados de P en suelo, que corresponden a la capa arable, donde se produce la mayor acumulación del P aplicado, indican en relación a un testigo, el destino de la fracción remanente hacia fosfatos orgánicos e inorgánicos de distinta disponibilidad para los cultivos, que caracterizan la residualidad de éste nutriente, la que está afectada por características de suelo como pH, textura y contenido de Materia Orgánica entre otras.

**Cuadro 1:** Contenidos finales (después de 8 años) de distintas fracciones de P en el suelo con la producción de granos y extracción del P en tratamientos de fertilización inicial y anual de P (Diez, Zamuner y col. 2000).

<b>Tratamientos P kg/ha</b>	<b>Org. Total</b>	<b>Inorg. Total</b>	<b>Total</b>	<b>Soluble HCO<sub>3</sub></b>	<b>Soluble NaOH</b>	<b>Bray</b>	<b>Producción Acumulada</b>	<b>Extracción de P en Granos</b>
	<b>mg P/kg<sup>-1</sup></b>						<b>ton/ha</b>	<b>kg/ha</b>
176 inicial	370	68	438	35	132	20	34	112
22 anual	340	89	429	39	143	29	36	110
88 inicial	340	62	401	31	143	16	32	93
11 anual	323	69	392	31	112	18	32	96
Testigo	350	50	400	29	113	11	26	69

Para la evaluación de la residualidad de P aplicado a través de los años se requieren ensayos específicos, de larga duración, en los que entre otros aspectos se controlan los incrementos en la disponibilidad de P y sus efectos en los rendimientos en relación a tratamientos testigos. A título de ejemplo, en la Figura 2a se indican los cambios en los contenidos de P extractable (Ps) a través de los años en tratamientos de fertilización inicial (Pi) y anual (Pa) en trigo (Berardo et al., 1998; Berardo et al., 2000). En la Figura 2b se muestran las relaciones obtenidas entre las dosis de P aplicadas inicialmente y los niveles de Ps en algunos de los años posteriores, y cuyas regresiones se indican en el Cuadro 2, para

dos secuencias de cultivos utilizadas en el ensayo.

Cuadro 2: Relaciones de Ps (y) en función de Pi (x) en los años posteriores a la fertilización, en dos secuencias de cultivo. N° de casos por regresión= 18.

M o n o c u l t i v o d e T r i g o		
A ñ o	F u n c i ó n	R <sup>2</sup>
1	$y = 9,38 + 0,165x$	0,96
2	$y = 8,53 + 0,116x$	0,95
3	$y = 8,62 + 0,080x$	0,92
4	$y = 7,00 + 0,074x$	0,92
5	$y = 5,91 + 0,055x$	0,88
6	$y = 7,19 + 0,048x$	0,89
7	$y = 8,17 + 0,045x$	0,82
8	$y = 8,06 + 0,042x$	0,92
T r i g o - G i r a s o l		
A ñ o	F u n c i ó n	R <sup>2</sup>
2	$y = 7,37 + 0,111x$	0,95
4	$y = 5,69 + 0,052x$	0,88
6	$y = 4,73 + 0,047x$	0,81

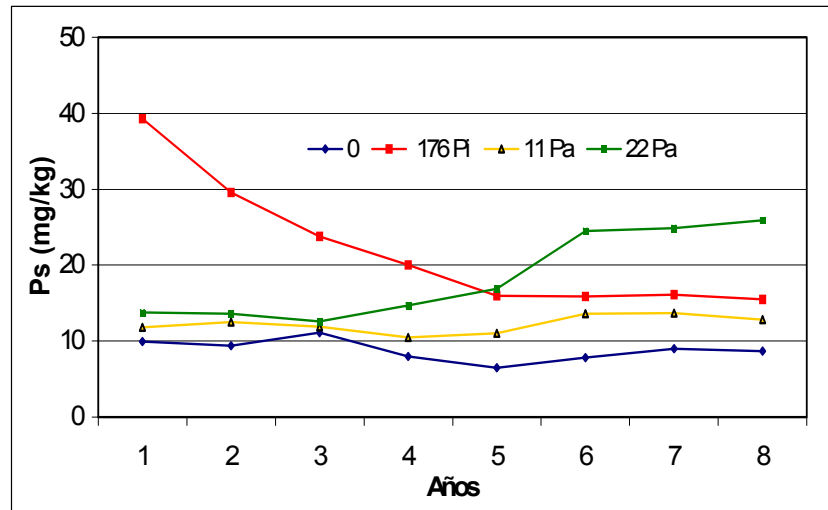


Figura 2a. Evolución de fósforo extractable (Ps) en tratamientos de fertilización inicial (i) y anual (a). Berardo y Grattone 1998. UBI.

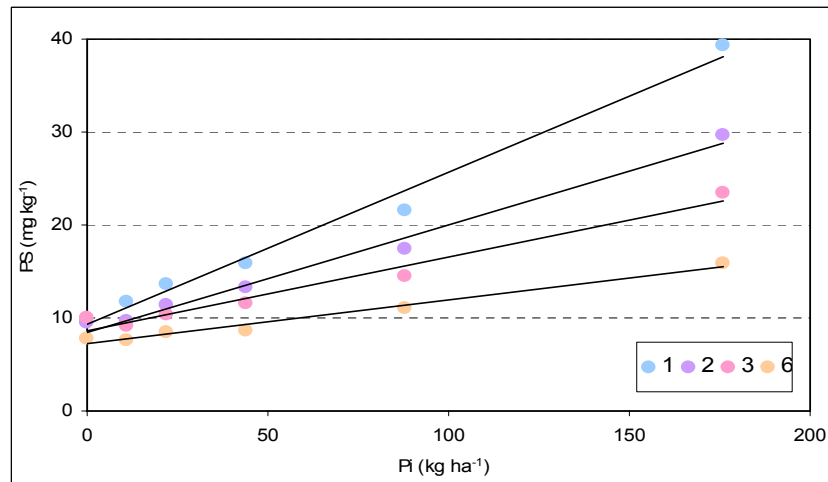


Figura 2b. Relación entre Pi y PS, en algunos años posteriores a la fertilización (1, 2, 3 y 6), en el monocultivo de trigo.

Tanto los incrementos en los contenidos de Ps como sus efectos sobre los rendimientos de trigo, que se indican en el Cuadro 3,

manifiestan la alta eficiencia acumulada (kg de trigo/kg de P aplicado) y la elevada recuperación “aparente” del P aplicado que alcanza valores superiores al 70% para las dosis más bajas de P (11 y 22 kg/ha) a lo largo de 7 años de evaluación. La eficiencia acumulada en trigo con las dosis más bajas de P mencionadas, aplicadas inicialmente, alcanzó valores de 150 a 160 (kg trigo/kg P) en el monocultivo y de 60 a 80 (kg trigo/kg P) aproximadamente cuando éste se intercaló con girasol.

Cuadro 3. Rendimiento (Rac), Respuesta (dRac) y Eficiencia (dRac/P) acumulada, de la Fertilización Fosfatada; P Acumulado (Pgac) y Recuperado en el grano ( $\Delta$ Pg) en la rotación trigo-trigo y trigo-girasol (7 años) (Berardo y Grattone, 1998).

DOSIS (kg P.ha <sup>-1</sup> )	ROTACION									
	TRIGO-TRIGO					TRIGO-GIRASOL				
	Rac (kg.ha <sup>-1</sup> )	dRac	dRac/P (kg.ha <sup>-1</sup> /kg P)	Pgac (kg P.ha <sup>-1</sup> )	$\Delta$ Pg (Kg/ha) (%)	Rac (kg.ha <sup>-1</sup> )	dRac	dRac/P (kg.ha <sup>-1</sup> /kg P)	Pgac (kg P.ha <sup>-1</sup> )	
0	22605	---	---	57	---	16435	---	---	43	
11	24333	1728	159	66	9 82	17070	635	58	47	
22	26188	3583	164	73	16 72	18249	1814	83	51	
44	27492	4887	112	78	21 48	19032	2597	59	55	
88	28685	6080	70	82	25 28	19347	2912	33	58	
176	30249	7644	44	98	41 23	20305	3870	22	68	
11 a	28065	5460	72	84	27	19142	2707	35	57	
22 a	31822	9217	60	98	41	20521	4086	27	65	

a = Refertilización anual.

En la Figura 3, a su vez se indica como va disminuyendo progresivamente a lo largo de 5 años la respuesta en trigo a dos dosis de fertilización inicial de P (22 y 44 kg/ha), tanto en el monocultivo (a) como en el intercalado con girasol (b). Estos resultados por si solos evidencian el elevado beneficio de la fertilización con P, por sus efectos sobre los rendimientos a través de los años posteriores a su aplicación, siendo alta su recuperación, lo que implica una baja inmovilización en el suelo.

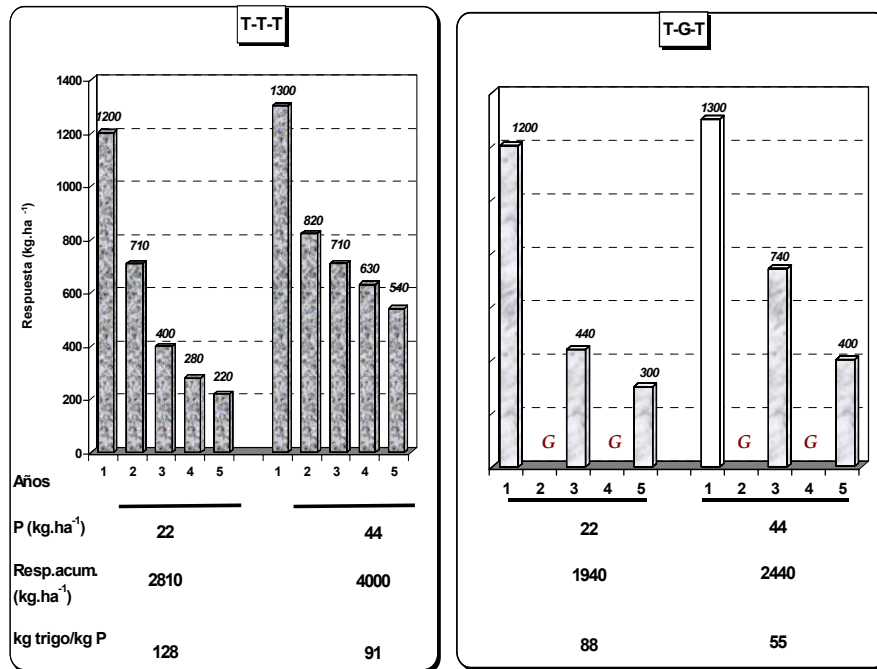


Figura 3a y b. Fósforo Residual: Sus efectos sobre los rendimientos de trigo a través de los años, en el monocultivo de trigo (a) y en trigo intercalado con girasol (b). UIB – 2000. Berardo y Col. 2000.

En pasturas, los resultados son bastante similares a los obtenidos con cultivos. A título de ejemplo, en el Cuadro 4 se indican los contenidos de Ps en el suelo, la producción de Materia Seca y el P extraído en distintos tratamientos de fertilización fosfatada inicial y en uno de fertilización anual de alfalfa, en un ensayo de 4 años de duración (Berardo y Marino, 1999; Berardo y Marino, 2000). Para el mismo ensayo, en la Figura 4 se indica la relación entre las dosis de P aplicado inicialmente y los contenidos de Ps en cada uno de los años (a) y la evolución del Ps a través de los años incluyendo un tratamiento de refertilización anual con 100 kg/ha de P (b). Las pendientes son bastante similares a las obtenidas bajo cultivos, con variaciones entre años atribuibles a las condiciones hídricas y a los niveles de producción y de extracción de P por la alfalfa.

CUADRO 4: Efecto de la fertilización inicial (i) y anual (a) sobre el P extractable (Ps, ppm), la producción de Materia Seca (MS, ton/ha) de alfalfa, el P absorbido (Pa, kg/ha) y la eficiencia total acumulada (Efic., kg MS/kg P), a lo largo de 4 años (Berardo y Marino 1999).

P (kg/ha)	1° año		2° año			3° año			4° año			Total		
	MS	Pa	Ps	MS	Pa	Ps	MS	Pa	Ps	MS	Pa	MS	Pa	Efic.
Testigo	10.0	20	6.7	9.1	18	6.3	7.6	11	4.9	8.2	11	34.9	60	
25i	14.3	33	6.8	11.8	27	7.6	9.1	14	5.2	10.0	14	45.2	88	412
50i	16.0	37	17.2	12.9	29	10.4	9.3	14	6.5	9.1	15	47.3	95	248
100i	20.2	50	23.0	16.6	40	22.6	11.5	19	13.1	11.9	17	60.2	126	253
50i + 100a	16.0	37	17.2	15.0	40	47.4	14.4	33	47.5	15.3	31	44.7	140	74

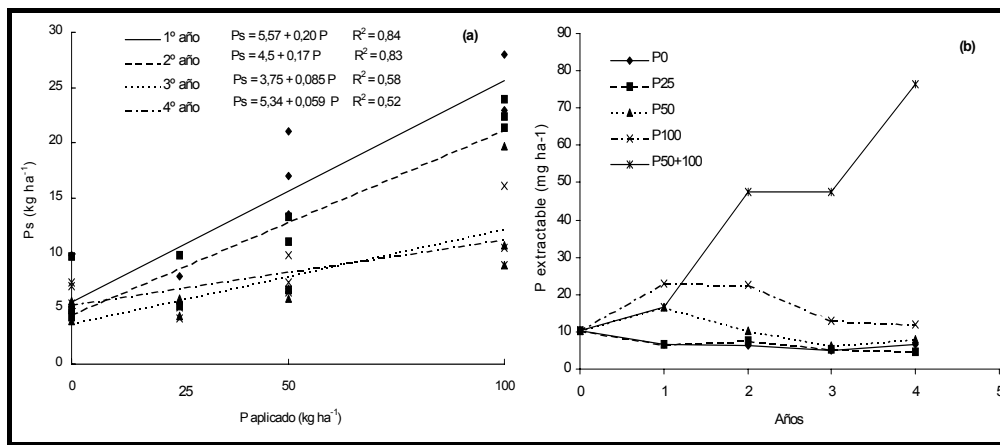


Figura 4: (a) Relación entre la dosis de fertilización inicial con P y el contenido de P extractable (Ps) en los cuatro años posteriores a su aplicación en alfalfa. (b) Evolución del contenido de P extractable para cada tratamiento a través de los años (Berardo y Marino, 1999).

Resultados similares se han obtenido en pasturas consociadas en los mismos suelos, los que no difieren demasiado de los encontrados por Boschetti et al. (1996) en argiudoles vérticos en Entre Ríos.

La alta eficiencia total acumulada de la fertilización inicial (aproximadamente entre 250 y 400 kg/ha de materia seca/kg de P aplicados variable según la dosis de P) y la elevada recuperación "aparente" a través de los años del P aplicado (entre el 65% y casi el 100%) tal como se indica en la Figura 5, evidencian el impacto que puede alcanzar la fertilización fosfatada en pasturas, sin considerar los efectos que esta práctica implica sobre los cultivos que con posterioridad suelen insertarse en la rotación, principalmente por la mayor fijación biológica del Nitrógeno.

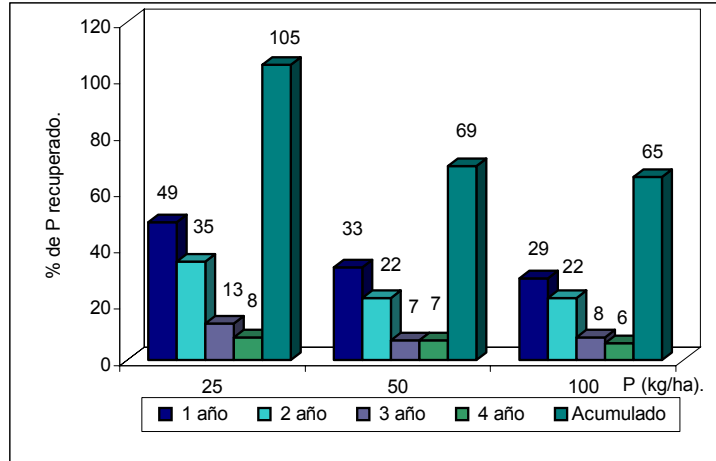


Figura 5: Recuperación de P aplicado en alfalfa durante 4 años posteriores a la fertilización. Berardo y Marino. 1999. UIB.

Otros aspectos asociados con la utilización eficiente del P, son la forma de aplicación y las dosis requeridas en función de los contenidos de Ps en el suelo y del nivel de producción esperado. A título de ejemplo, en la Figura 6 se indican resultados obtenidos con trigo en dos años de experimentación, aplicando 22 kg/ha de P en línea y al voleo en suelos con distintos contenidos de Ps (Berardo et al., 1999). Resulta evidente la mayor eficiencia del P aplicado en la línea en suelos con contenidos inferiores a 15 mg/kg, siendo la diferencia con la incorporación al voleo progresivamente menor en la medida que se incrementa la disponibilidad de P.

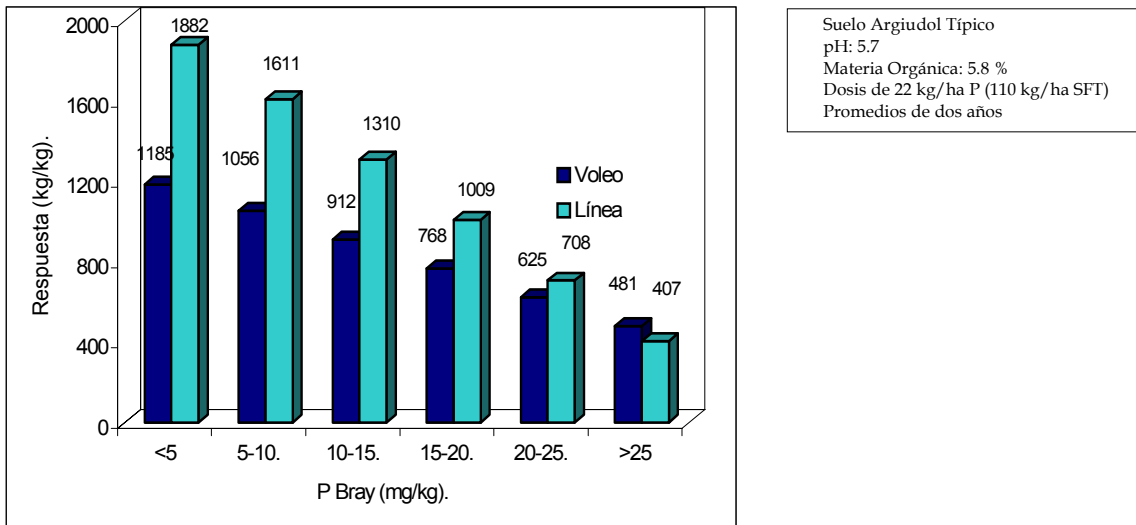


Figura 6. Métodos de Aplicación de Fósforo en Trigo. Berardo et al., 1998. UIB.

La relación entre los contenidos de Ps y los rendimientos de trigo o la respuesta a la fertilización correspondiente a dos años de ensayos se muestran en la Figura 7a y 7b. En las dos campañas, con diferencias en los rendimientos por condiciones climáticas, se obtuvo una alta asociación entre los contenidos de Ps y la producción de trigo. Los rendimientos se incrementaron por cada unidad de Ps entre 70 y 90 kg/ha aproximadamente, según los años, hasta los niveles más altos de Ps utilizados (25-30 mg/kg). La respuesta a P fue en la misma magnitud progresivamente menor hasta los niveles más altos de Ps mencionados, siendo según el año de 2000 y 3000 kg/ha para los niveles más bajos de Ps (5 a 6 mg/kg) y de 400 a 500 kg/ha para los más altos 25 a 30 mg/kg.

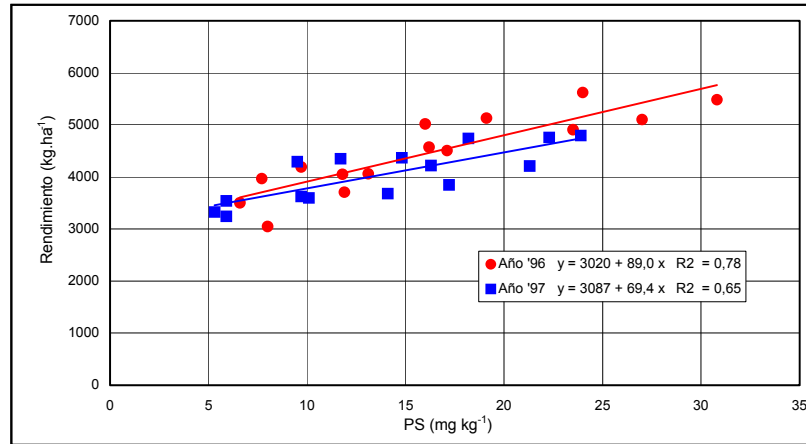


Figura 7a: Efecto del contenido de P extractable (PS) sobre el rendimiento de trigo.

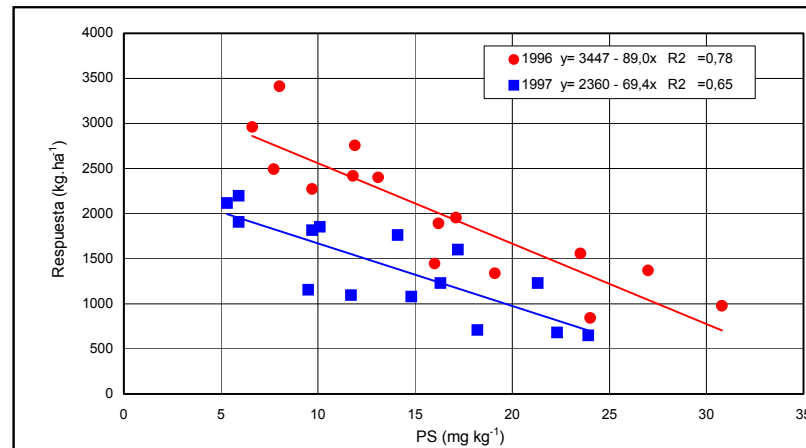


Figura 7b: Efecto del contenido de P extractable (PS) sobre la respuesta a la fertilización en trigo.

Relaciones de los niveles de Ps con los rendimientos y las respuestas a P se están evaluando también en los cultivos estivales (maíz, soja y girasol) en ensayos con un diseño experimental y contenidos de Ps similares a los utilizados en trigo. La información obtenida en pasturas y en trigo, junto con la que actualmente se está obteniendo con cultivos de verano, contribuirá a implementar un manejo más eficiente de la fertilización fosfatada en distintos sistemas de producción, dentro de una región bastante amplia, donde los suelos y las condiciones climáticas no difieran en gran medida de las correspondientes a la zona experimental.

## CONCLUSIONES

- La menor disponibilidad de P en los suelos de la región está altamente asociada a la pérdida de materia orgánica, proceso que se ha acentuado por el uso más intensivo de los suelos y por la baja reposición de fósforo en relación a la cantidad extraída por los cultivos.
- Los efectos del fósforo aplicado, con las dosis comúnmente utilizadas, se prolongan hasta 4-5 años, tanto en pasturas como en cultivos; por lo tanto, el beneficio de la fertilización tiene que ser evaluado a través de los efectos acumulados en varios años.
- La alta recuperación a través de los años (hasta 70-80 %) del fósforo aplicado tanto en pasturas como en cultivos requiere de una mayor refertilización de este nutriente en la medida que se intensifican los sistemas de producción, que son cada vez más extractivos.
- La fertilización debería planificarse en función de la cantidad de fósforo extraída a través de las pasturas y de los cultivos utilizados en la rotación; con una dosis adicional, de un 20-30%, variable según los suelos, por

los procesos de inmovilización de este nutriente.

- Los niveles de disponibilidad de fósforo en el suelo deberían mantenerse por arriba de 15 a 20 ppm, con variaciones, según zonas y cultivos, por la distinta productividad y por las diferencias que éstos manifiestan a la respuesta a fósforo (Pasturas>Trigo>Maíz>Soja y Girasol).

## BIBLIOGRAFIA

- Berardo, A y Marino, M. A. 1999. Fertilización Fosfatada y Nitrogenada en la Producción de Forraje. Cuadernillo Agromercado. 30:2-5.
- Berardo, A. y Grattone, F. D. 1998. Efecto de la Aplicación de Fósforo y de su Residualidad sobre la Producción de Trigo. 4° Congreso Nacional de Trigo. Mar del Plata.
- Berardo, A. y Grattone, F. D. 2000. Fertilización Fosfatada Requerida para alcanzar Niveles Objetivos de Fósforo Bray en un Argiudol. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. 11-14 de Abril, 2000.
- Berardo, A. y Marino, M. A. 1999. Fertilización de Alfalfa en el Sudeste Bonaerense. Informaciones Agronómicas del Cono Sur No.4. INPOFOS.
- Berardo, A. y Marino, M. A. 2000. Efecto de la Fertilización Fosfatada sobre la Disponibilidad de Fósforo y su Relación con la Producción de Forraje en Molisoles del Sudeste Bonaerense. Alfalfa. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. 11-14 de Abril, 2000.
- Berardo, A. y Marino, M. A. 2000. Efecto de la Fertilización Fosfatada sobre la Disponibilidad de Fósforo y su Relación con la Producción de Forraje en Molisoles del Sudeste Bonaerense. Pasturas Consociadas. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. 11-14 de Abril, 2000.
- Berardo, A.; Grattone, F. D. Borrajo, G. 1999. Fertilización Fosfatada de Trigo: Respuesta y Forma de Aplicación. Informaciones Agronómicas del Cono Sur No.2. INPOFOS.
- Boschetti, N.G.; Quintero, C.E. y Benavidez, R. A. 1996. Residualidad del Fertilizante Fosfatado en Pasturas Consociadas en Entre Ríos (Argentina). Ciencias del Suelo. 14:20-23.
- Diez, A.; Zamuner, E.; Picone, L. y Berardo, A. 2000. Efecto de la Aplicación de Dosis única o fraccionada de Fertilizante Fosfatado sobre el Fósforo del Suelo. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. 11-14 de Abril, 2000.
- Lavado, R. S. 1992. Aspectos Dinámicos del Fósforo y su problemática en suelos argentinos. Proceder Agrotecnológico.
- Mizuno, I.; del Frade de Lafuente, M. S. 1982. Mineralización del fósforo orgánico. Rev. Fac. de Agronomía. UBA. 3 (2): 157-163.
- Navarro, C. A. 1973. Contribution a l'etude de la mineralization de fósfore organique dans les sols argentins. Thesis doctoral Gembloux. Belgique.
- Picone, L.; Zamuner, E. y Berardo A. 1999. Efecto de la Fertilización y Estación del Año en las Transformaciones de Algunas Fracciones del Fósforo en el Suelo. 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón. Temuco. Chile.
- Urioste, A. M.; Bono, A. A.; Buschiazzi D.; Hevia G. y Hepper E. 1996. Fracciones de fósforo en suelos agrícolas y pastoriles de la Región Semiárida Pampeana Central. Ciencia del Suelo. 14:92-95.