

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

TÍTULO:

“EL FÓSFORO EN LOS SUELOS DEL DISTRITO VILLA ELOISA”

AUTOR:

ING. AGR. OSCAR ALBERTO NOVELLO

Tesis presentada para optar al grado de Magister en Manejo y

Conservación de Recursos Naturales

DIRECTOR DE TESIS:

ING. AGR. Ms. Cs. CÉSAR QUINTERO

CODIRECTOR DE TESIS:

ING. AGR. Ms. Cs. LAURA FERRERAS

Zavalla, 05 de Diciembre de 2008.-

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento y gratitud a los Ings. Agrs. Ms. Cs. César Quintero y Laura Ferreras, Director y Co-Directora de Tesis respectivamente, por su excelente predisposición y guía a lo largo de todo el proceso de producción del presente trabajo.

Especial agradecimiento además a las siguientes personas: Ing. Agr. Guillermo Gerster, Lic. Graciela Boschetti, Dr. Fernando García.

Agradecimiento también a la Ing. Agr. Ms. Cs. Liliana Suñer, Ing. Agr. Ms. Cs. Hugo Vivas, Ing. Agr. Angel Berardo, Dra. Mabel Vazquez, personas que amablemente respondieron a mis consultas o solicitud de información.

Finalmente, para la Flia. Simunovich una enorme gratitud por haberme permitido desarrollar mis actividades en su propiedad y por su permanente colaboración para llevar a cabo las tareas de campo.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.	Pág. 1
1.1 El fósforo en el suelo. Generalidades.	Pág. 1
1.2 Contenido de fósforo en los suelos pampeanos.	Pág. 3
1.3 Antecedentes.	Pág. 5
1.4 Hipótesis.	Pág. 10
1.5 Objetivos.	Pág. 10
2. MATERIALES Y MÉTODOS.	Pág. 11
2.1 Caracterización del distrito Villa Eloisa.	Pág. 11
2.2 Evaluación de los contenidos de las diferentes formas de fósforo en perfiles de suelo ubicados en el distrito Villa Eloisa.	Pág. 12
2.3 Experimento a campo.	Pág. 13
2.3.1 Mediciones efectuadas en los cultivos.	Pág. 16
2.3.2 Determinaciones efectuadas en el suelo.	Pág. 16
3. RESULTADOS.	Pág. 19
3.1 Contenidos de las diferentes formas de fósforo en perfiles de suelo ubicados en el distrito Villa Eloisa.	Pág. 19
3.1.1 Contenido de fósforo total.	Pág. 21
3.1.2 Contenido de las diferentes fracciones de fósforo total.	Pág. 22
3.1.3 Contenido de fósforo extractable.	Pág. 27
3.1.4 Contenido de carbono orgánico y pH.	Pág. 28
3.2 Experimento a campo.	Pág. 30

3.2.1 Análisis de suelo inicial.	Pág. 30
3.2.2 Rendimiento de los cultivos durante el ciclo de rotación.	Pág. 31
3.2.3 Contenidos de fósforo en grano.	Pág. 33
3.2.4 Evolución del fósforo extractable durante los tres primeros años de duración del experimento.	Pág. 34
3.2.5 Cambios en las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo del suelo.	Pág. 38
4. DISCUSIÓN.	Pág. 44
4.1. Evaluación de los contenidos de las diferentes formas de fósforo en perfiles de suelo ubicados en el distrito Villa Eloisa.	Pág. 44
4.1.1 Fósforo total.	Pág. 44
4.1.2 Fracciones de fósforo total.	Pág. 46
4.1.3 Fósforo extractable.	Pág. 48
4.2 Experimento a campo.	Pág. 50
4.2.1 Rendimiento de los cultivos durante el ciclo de rotación.	Pág. 50
4.2.2 Evolución del fósforo extractable durante los tres primeros años de duración del experimento.	Pág. 54
4.2.3 Cambios en las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo del suelo.	Pág. 58
5. CONCLUSIONES.	Pág. 66
6. BIBLIOGRAFÍA.	Pág. 68

INDICE DE TABLAS

Tabla I	Distribución porcentual de los contenidos de fósforo extractable en suelos de seis distritos de Santa Fe.	Pág. 6
Tabla II	Fechas de siembra y cosecha, densidad de siembra, distanciamiento entre hileras e híbridos/variedades empleados para cada cultivo durante el primer ciclo de rotación.	Pág. 15
Tabla III	Precipitaciones ocurridas en Villa Eloisa durante el período 01/2002 y 06/2005	Pág. 15
Tabla IV	Contenidos de fósforo extractable, fósforo inorgánico, fósforo orgánico, fósforo ocluido, fósforo total, carbono orgánico y pH por horizonte en seis perfiles de suelos ubicados en el distrito Villa Eloisa.	Pág. 20
Tabla V	Relación entre el contenido de fósforo orgánico y de carbono orgánico dentro del perfil, promedio de los seis perfiles.	Pág. 23
Tabla VI	Disminuciones porcentuales de fósforo inorgánico, fósforo ocluido y fósforo orgánico para el promedio de los cuatro lotes agrícolas respecto al Lote 5.	Pág. 24
Tabla VII	Contenidos de fósforo extractable, carbono orgánico y pH medidos previamente a la instalación del experimento, a una profundidad de 0-20 cm y por parcela de repetición.	Pág. 30
Tabla VIII	Rendimiento en granos de los cultivos correspondientes a los tres primeros años de duración del experimento.	Pág. 31
Tabla IX	Análisis de variancia para los efectos separados y combinados del agregado de P y N.	Pág. 31
Tabla X	Rendimientos promedio en granos de los cultivos para cada dosis de fósforo agregada.	Pág. 32
Tabla XI	Contenido de fósforo en granos de los cuatro cultivos incluidos en el primer ciclo de rotación.	Pág. 33
Tabla XII	Evolución del contenido de fósforo extractable durante los tres primeros años del experimento a 0-20 cm de profundidad y evaluación a 20-40 y 40-60 cm de profundidad al final del primer ciclo de rotación.	Pág. 34

Tabla XIII	Balance de fósforo acumulado para los tres primeros años de duración del experimento.	Pág. 35
Tabla XIV	Contenidos de las diferentes fracciones de P (Hedley et al., 1982, modificado por Tiessen y Moir, 1993) al final del segundo año (0-20 cm) y del tercer año (0-20, 20-40 y 40-60 cm) de rotación.	Pág. 38
Tabla XV	Diferencias absolutas de los contenidos de las diferentes fracciones de P (Hedley et al., 1982, modificado por Tiessen y Moir, 1993) entre los tres tratamientos que recibieron fósforo respecto al testigo sin fertilizar.	Pág. 39
Tabla XVI	Diferencias porcentuales de los contenidos de las diferentes fracciones de P (Hedley et al., 1982, modificado por Tiessen y Moir, 1993) entre los tres tratamientos que recibieron fósforo respecto al testigo sin fertilizar.	Pág. 40
Tabla XVII	Coefficientes de correlación de Pearson entre el fósforo extractable y las diferentes fracciones de fósforo (Hedley et al., 1984, modificado por Tiessen y Moir, 1993) para la profundidad 0-20 cm.	Pág. 42

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Esquema simplificado de Larsen que muestra la relación existente entre las distintas fracciones de P en el suelo.	Pág. 2
Fig. 2	Balance de fósforo estimado en suelos de la región pampeana, campaña 2002/03.	Pág. 4
Fig. 3	Ubicación geográfica del distrito Villa Eloisa	Pág. 11
Fig. 4	Profundidades consideradas para la toma de muestras en los perfiles.	Pág. 13
Fig. 5	Distribución del contenido de fósforo total dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.	Pág. 22
Fig. 6	Distribución dentro del perfil de suelo del contenido de carbono orgánico y de fósforo orgánico promedios para los seis perfiles evaluados.	Pág. 23
Fig. 7	Distribución del contenido de fósforo inorgánico dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.	Pág. 24
Fig. 8	Distribución del contenido de fósforo ocluido dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.	Pág. 25
Fig. 9	Diferencias en los contenidos de fósforo total, fósforo orgánico y fósforo inorgánico + fósforo ocluido entre el Lote 5 y el promedio de los lotes agrícolas.	Pág. 26
Fig. 10	Distribución del contenido de fósforo inorgánico dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.	Pág. 26
Fig. 11	Distribución del contenido de fósforo extractable dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.	Pág. 28
Fig. 12	Distribución del contenido de carbono orgánico dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.	Pág. 29
Fig. 13	Evolución del contenido de fósforo extractable medido a 0-20 cm de profundidad en cada tratamiento principal durante los tres primeros años de rotación.	Pág. 36

RESUMEN

La actividad productiva que se desarrolló en la llanura pampeana, con escasa o nula fertilización fosfatada, ha provocado que la mayor parte de los suelos posean en la actualidad bajos contenidos de fósforo extractable para las plantas.

Para evaluar el impacto que ha tenido esta situación en los suelos del distrito Villa Eloisa (Santa Fe):

(1) Se midió el contenido de fósforo total y de sus fracciones en seis perfiles ubicados en este distrito, en lotes con diferente manejo productivo y hasta el metro de profundidad.

(2) Se inició una experiencia en un campo ubicado cinco kilómetros al sureste de la localidad de Villa Eloisa, donde bajo una rotación que incluyó maíz, trigo/soja y soja, se agregaron cuatro dosis de fósforo (0, 13, 27 y 81 kg/ha) combinadas con dos dosis de nitrógeno (42 y 84 kg/ha). Las evaluaciones llevadas a cabo en el suelo fueron determinación de carbono orgánico, pH, fósforo extractable y fracciones de fósforo (Hedley et al., 1983) y en los cultivos rendimiento y contenido de fósforo en granos.

En los perfiles de suelos analizados se pudo comprobar que la actividad agrícola redujo el contenido de fósforo en toda la profundidad considerada, por disminuciones tanto de la fracción orgánica como de la inorgánica. La disminución del fósforo extractable se observó, en cambio, fundamentalmente hasta los 40 cm de profundidad.

La fertilización fosfatada no produjo incrementos significativos de rendimiento en los cultivos de maíz, soja de primera y soja de segunda. Esto se produjo a pesar que el contenido de fósforo extractable a 0-20 cm en el suelo donde se instaló la experiencia ($11,5 \text{ mg kg}^{-1}$) se encontraba por debajo del umbral crítico citado por la bibliografía y que como consecuencia de no agregar fósforo su contenido disminuyó a razón de $1,2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En el cultivo de trigo, en cambio, se evaluó una respuesta significativa a la fertilización con fósforo.

El agregado de fósforo produjo un aumento en el contenido de fósforo extractable medido a 0-20 cm de profundidad, en una magnitud que dependió de la dosis agregada y del momento de su aplicación. El fósforo remanente proveniente del fertilizante que no fue absorbido por los cultivos se acumuló principalmente en las fracciones inorgánicas más lábiles (P-MIA, Pi-NaCO₃H y Pi-NaOH), lo que indica que queda en el suelo bajo formas fácilmente disponibles para los cultivos siguientes. Además, los cambios medidos en las fracciones orgánicas fueron de mucha menor magnitud que los observados en las inorgánicas.

ABSTRACT

The productive activity which was carried out in Pampas, with little or no phosphated fertilization, has caused the current low quantity of extractable phosphorous that great part of the soil offers to plants.

To evaluate the impact that this situation has had on the soil of the Villa Eloisa district (Santa Fe Province):

(1) The total content of phosphorous and of its fractions were measured in six soil profiles located in this district, in fields with different productive management and up to a depth of one meter.

(2) An experiment was carried out in a field located five kilometers southeast from Villa Eloisa, where four doses of phosphorous (0, 13, 27 and 81 kg/ha) were added together with two doses of nitrogen (42 and 84 kg/ha), under a rotation that included corn, wheat/soybean and soybean. The evaluations of the soil were: determination of organic carbon, pH, extractable phosphorous and fractions of phosphorous (Hedley et al., 1983) and of the crops: yield and phosphorous content in grains.

In the soil profiles analyzed it could be proved that the agricultural activity reduced the phosphorous content in all the depth considered, because of a decrease in both organic and inorganic fractions. However, the decrease of extractable phosphorous was fundamentally found up to a depth of 40 cm.

The phosphated fertilization did not cause significant increase of yields in the cultivation of corn, first and second class soybean. This happened despite the content of extractable phosphorus in the soil (at 0-20 cm) where the experiment was carried out ($11,5 \text{ mg kg}^{-1}$) was below the critical threshold mentioned by the bibliography and, as a result of not adding phosphorous to its content, it decreased at the rate of $1,2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ per year}^{-1}$. However,

in the cultivation of wheat, there was a significant response to the fertilization with phosphorous.

The addition of phosphorous produced an increase to the content of the extractable phosphorous measured at a depth of 0-20 cm, to an extent that depended on the dose added and on the time of application. The remaining phosphorous coming from the fertilizer that was not absorbed by the crops accumulated mainly in the most labile inorganic fractions (P-MIA, Pi-NaCO₃H and Pi-NaOH), which indicates that it remains in the soil under forms easily available for the following crops. In addition, the changes measured in the organic fractions were of minor magnitude to those observed in the inorganic fractions.

1. INTRODUCCION

El fósforo (P) es un elemento esencial para todos los seres vivos, y su presencia es clave en numerosos procesos bioquímicos y fisiológicos. Este elemento participa en las complejas estructuras de los ácidos ribonucleico (ARN) y desoxirribonucleico (ADN), es un componente esencial del sistema de transporte de energía en las células (adenosín trifosfato - ATP-) y de la estructura de sus membranas, y está involucrado en la síntesis de proteínas y vitaminas (Johnston y Steen, 2000).

En la planta es extremadamente móvil; está presente en los meristemas de crecimiento y se acumula en hojas o en frutos. La deficiencia de fósforo en los cultivos afecta no solo el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento, sino también a la calidad de los frutos y la formación de las semillas (Johnston y Steen, 2000).

1.1 El fósforo en el suelo. Generalidades.

El fósforo no es un elemento raro en la naturaleza; se encuentra en el onceavo lugar de acuerdo a su abundancia en la corteza terrestre, aunque su concentración en muchos tipos de rocas es baja. Se presenta casi exclusivamente en el estado de oxidación V (Giuffré, 2005), formando distintos fosfatos a los que está unido en un amplio rango de energías o fuerzas de enlace (Johnston y Steen, 2000). El fósforo se encuentra en el suelo tanto en formas orgánicas como inorgánicas, y su solubilidad está condicionada por reacciones físico-químicas y biológicas (Boschetti *et al.*, 2001). Dentro del rango de pH que se presenta en la mayor parte de los suelos, se encuentra en solución como ión ortofosfato H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} , éste último predominando por encima de pH 7,2 (Lindsay, 1979).

Su fuente primaria en el suelo es la apatita, $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \times \text{CaX}_2$, donde X puede ser F^- , Cl^- , OH^- o CO_3^{2-} . La apatita predomina en los estadios iniciales de evolución del suelo; en

estadios intermedios predominan los fosfatos secundarios de calcio, hierro y aluminio, además del fósforo orgánico, y en suelos altamente evolucionados los fosfatos ocluidos, disminuyendo los fosfatos inorgánicos secundarios y el fósforo orgánico (Giuffré, 2005).

Las diferentes formas inorgánicas y orgánicas de fósforo se encuentran en el suelo en un equilibrio dinámico (Figura 1). A medida que se agota rápidamente debido a la absorción de las plantas, el fósforo de la solución del suelo es repuesto en forma continua por la fracción lábil, que está representada por los fosfatos adsorbidos en el complejo de intercambio, los minerales de mayor solubilidad y las formas orgánicas de rápida mineralización. El fósforo no lábil no está en equilibrio con la solución, constituyendo la reserva en formas minerales y orgánicas estables (Benavides *et al.*, 2000). No obstante, si las reservas más lábiles se agotan serán los compuestos menos solubles los que determinen la concentración de fósforo en la solución del suelo (Galantini *et al.*, 2005).

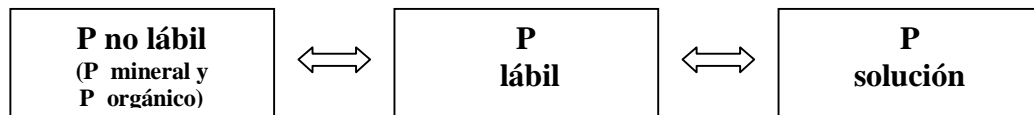


Figura 1. Esquema simplificado de Larsen (1977) que muestra la relación existente entre las distintas fracciones de P en el suelo (adaptado de Benavides *et al.*, 2000).

Los suelos presentan capacidades variadas para suministrar fósforo a los cultivos debido a que es una pequeña fracción del fósforo total (Pt) del suelo la que se encuentra disponible para los mismos (Galantini *et al.*, 2005); solamente el 0,01% del fósforo del suelo se encuentra como soluble (Giuffré, 2005). El factor capacidad de un suelo (que es la relación dinámica entre el P lábil y el P de la solución del suelo) será importante en la nutrición de las plantas, determinando cuan rápidamente un suelo podrá reponer el fósforo que es agotado de la solución (Benavides *et al.*, 2000). La capacidad de retención de fósforo es una propiedad de cada suelo, relacionada con el porcentaje de arcilla y de óxidos libres (Quintero *et al.*, 1999); la mayor parte de los

suelos cultivados de Argentina presentan mediana a baja capacidad de absorción de fósforo (Quintero, 2003).

En suelos que nunca han recibido aportes por medio de la fertilización, el contenido de fósforo está controlado por el proveniente del material originario del suelo y las propiedades resultantes de su pedogénesis (Morrás, 1999); el fósforo presenta la particularidad de que no se recicla por medio de la lluvia ni por otros agentes atmosféricos (Giuffré, 2005). En cambio, en los sistemas bajo producción agrícola-ganaderos, su contenido está fuertemente afectado por la exportación a través las cosechas agrícolas o los productos de origen animal (Vázquez, 2002).

1.2 Contenido de fósforo en los suelos pampeanos

Las variaciones existentes en los contenidos de Pt entre distintas zonas de la región pampeana están bien documentadas y deberían relacionarse inicialmente a la diferente composición mineralógica del material parental de los suelos (Morrás, 1999).

Datos referentes a contenidos de Pt reportados a principios del siglo XX muestran estas diferencias entre áreas. De esta forma se puede establecer que la provincia de Entre Ríos, el noreste de la provincia de Santa Fe y el centro de la provincia de Buenos Aires son las zonas más desprovistas del elemento, mientras que los suelos del centro sur de la provincia de Santa Fe están entre los de mayores contenidos promedio de fósforo, tanto para el horizonte sub-superficial como para el horizonte superficial (Morrás, 1999).

Con respecto a los contenidos de fósforo extractable (Pe) en los suelos de la llanura pampeana, podría en principio generalizarse que los mismos se incrementan de este a oeste (Morrás, 1999), siguiendo en cierta manera a la menor o mayor riqueza de fósforo en el material parental de los mismos. Sin embargo, la intensificación del uso productivo de los suelos ha ido modificando este patrón de distribución de fósforo en la llanura pampeana,

contribuyendo a generar situaciones de balances negativos y deficiencias para gran parte de los cultivos extensivos, en zonas tradicionalmente bien provistas (Vázquez, 2002).

A pesar de que en la Argentina la tasa de aplicación de fósforo respecto a su remoción se ha ido incrementando durante los últimos años, su reposición aún no supera el 45% del total extraído, resultando en una constante disminución de sus niveles en el suelo (Fixen y García, 2006). En la actualidad, las áreas de balances más negativos de fósforo coinciden con las áreas de mayor difusión del cultivo de soja, ya sea las tradicionales del norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba como las áreas de más reciente expansión como el centro norte de Córdoba y Entre Ríos (García, 2006). Esta situación ha provocado que la mayoría de los suelos pampeanos posean bajos contenidos de Pe para las plantas (Darwich, 1998).

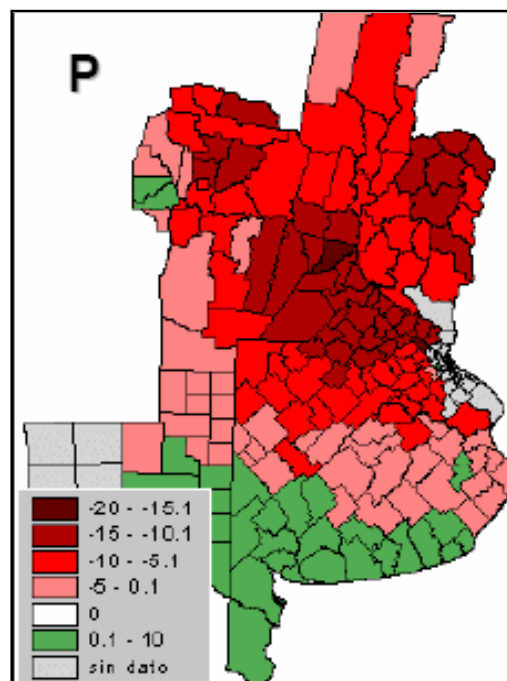


Figura 2. Balance de fósforo estimado (en kg ha⁻¹ año⁻¹) en suelos de la región pampeana, campaña 2002/03 (adaptado de García, 2006).

Los suelos del centro sur de la provincia de Santa Fe no escapan a la situación anteriormente descrita. Por ejemplo, se estima que para la campaña 2002/03 en el departamento Iriondo (Santa Fe) el balance de fósforo anual fue negativo a razón de $-15 / -20 \text{ kg ha}^{-1}$ (García, 2006) (Figura 2). Particularmente para el distrito Villa Eloisa (departamento Iriondo) y durante la campaña 2004/05, se estima que los niveles de reposición de fósforo fueron del 38% en el cultivo de soja de 1ª, del 41% para maíz y del 90% para trigo.

1.3 Antecedentes

En el año 1989, Michelena *et al.* publicaron los resultados de una evaluación sobre el estado de degradación química y física de los suelos del norte de la región pampeana, incluyendo en los mismos al distrito Villa Eloisa. En dicho estudio se determinó que ya para ese entonces en el horizonte superficial de suelos pertenecientes a la serie Villa Eloisa las pérdidas de Pe respecto a suelos vírgenes o muy poco alterados ($105,0 \text{ mg Pe kg}^{-1}$) era del 77% para lotes bajo agricultura continua ($24,1 \text{ mg Pe kg}^{-1}$) y del 58% para lotes con rotación agrícola ganadera ($43,6 \text{ mg Pe kg}^{-1}$).

Años después, a través de una recopilación de datos de análisis de Pe sobre muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0-20 cm, extraídas entre los años 1998/2005 y provenientes de lotes destinados a la actividad agrícola ubicados en el distrito Villa Eloisa y en distritos cercanos (Cañada de Gómez, Armstrong, Tortugas, Montes de Oca y Las Rosas), Novello y Quintero (2006) encontraron marcadas diferencias entre el distrito Villa Eloisa y el resto de las áreas evaluadas (Tabla I).

Tabla I. Distribución porcentual en cuatro categorías de muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0-20 cm en función de los contenidos de fósforo extractable (Pe), para 6 distritos ubicados en los departamentos Belgrano e Iriondo (Santa Fe).

Distrito	Pe ≤ 10 mg kg⁻¹ (%)	10 < Pe ≤ 15 mg kg⁻¹ (%)	15 < Pe ≤ 20 mg kg⁻¹ (%)	Pe > 20 mg kg⁻¹ (%)	Promedio (mg kg⁻¹)
Va. Eloisa	17,2	32,8	26,5	23,5	16,4
Tortugas	5,3	23,0	22,0	49,7	21,3
Armstrong	3,2	14,3	25,4	57,1	23,9
Cda. de Gómez	3,9	34,1	21,7	40,3	20,0
Montes de Oca	2,6	8,9	26,2	62,3	25,1
Las Rosas	0,0	2,2	6,5	91,3	36,7

Puede observarse, por ejemplo, que en el distrito Villa Eloisa solamente el 23,5% de las muestras superaron los 20 mg Pe kg⁻¹, mientras que el valor porcentual más bajo hallado en cualquier otro distrito para este rango fue del 40,3% (distrito Cañada de Gómez). Se destaca también que en el distrito Villa Eloisa el 17,2% de las muestras analizadas no superaron los 10 mg Pe kg⁻¹, triplicando al valor inmediatamente superior encontrado (distrito Tortugas). Sin embargo, no se disponen de estudios recientes a nivel local que permitan conocer que sucede con el Pt y sus fracciones orgánicas e inorgánicas, tanto en el horizonte superficial como en profundidades mayores.

Podría esperarse que estos bajos contenidos de Pe presentes en los suelos del distrito Villa Eloisa produzcan limitaciones en los rendimientos de los cultivos más difundidos en el área (soja, maíz y trigo) y que por ende existan respuestas positivas al agregado de fósforo por medio de la fertilización. Distintos experimentos a campo efectuados en el distrito Villa Eloisa y en distritos vecinos evaluando respuestas a la fertilización fosfatada en estos cultivos han arrojado resultados diferentes según el cultivo y/o material genético involucrado, el nivel de Pe medido en el suelo, la dosis de fósforo agregada y su combinación con diferentes dosis

de nitrógeno (N) y azufre (S) (Gerster y Novello, 2003; Cordone *et al.*, 2004; Gerster *et al.*, 2005; Capurro *et al.*, 2005 y 2007).

Si bien en el país existen algunos antecedentes de experimentos a campo de mayor duración (Galantini *et al.*, 2005; Vivas *et al.*, 2007; García *et al.*, 2007), se destaca que todas las experiencias realizadas a nivel local citadas anteriormente se llevaron a cabo durante un tiempo que no excedió el del ciclo del cultivo involucrado. Sin embargo, deberían tenerse en cuenta diferentes aspectos relacionados con el fósforo que se agrega al suelo por medio del fertilizante:

- En primer lugar, y debido a que su movilidad en el suelo es controlada por procesos de difusión, el movimiento del fósforo es limitado a un desplazamiento de pocos milímetros anuales (Barber, 1962).
- Sólo una pequeña fracción del fósforo aplicado con el fertilizante es absorbida por los cultivos en el año de su agregado (Lombi *et al.*, 2004),
- El fósforo que no permanece en la solución del suelo o que no es absorbido por los cultivos queda retenido en el suelo (Schmidt *et al.*, 1996).
- Por lo tanto, este elemento se acumula con aplicaciones continuas de fertilizantes a largo plazo (Zhang *et al.*, 2004).

A través del tiempo deberían ocurrir lentas reacciones entre el fósforo proveniente del fertilizante con el suelo, que incluyen la precipitación hacia formas altamente insolubles y una lenta difusión hacia sitios de adsorción. La rapidez y la magnitud de estas reacciones tendrá amplias variaciones entre diferentes tipos de suelos, dependiendo principalmente de la textura, el tipo de arcillas, pH, estabilidad y tamaño de agregados (Dobermann, 2002). Además, en presencia de un suelo empobrecido de fósforo es imposible mezclar, por ejemplo, 20 kg ha⁻¹ de este elemento en forma uniforme en un volumen de más de dos millones de kilogramos,

por lo que existen pocas posibilidades de que las raíces de las plantas puedan absorber este fósforo agregado (Johnston, 2000).

Sería de esperar, entonces, que los resultados de los experimentos sean diferentes si se considera una mayor escala de tiempo, dentro de una rotación que contemple a más de un cultivo. Paralelamente, la realización de estudios que permitan conocer la tasa de incremento o disminución del Pe como así también el destino del fósforo residual resultante de la fertilización y de la remoción por parte de los cultivos es esencial para planificar estrategias de fertilización a largo plazo que sustenten la producción de los cultivos, minimizando los riesgos ambientales (Zhang *et al.*, 2004). Además, un aspecto particular del fósforo y que debe tenerse muy en cuenta es el carácter finito de sus depósitos a nivel mundial. Si bien es difícil conocer con certeza la verdadera cantidad de estas reservas reales y potenciales de fósforo, a las tasas de uso actual las mismas podrían agotarse dentro de un período incluido entre los próximos 105 y 470 años (Syers, Johnston y Curtin, 2008).

Es de suma importancia entonces poder llegar a identificar a los diferentes compuestos de fósforo en el suelo y seguir los cambios que sufren bajo diferentes condiciones. No obstante, la química compleja y la variabilidad espacial de este elemento hacen que la identificación directa de sus compuestos y de su disponibilidad para las plantas sea muy dificultosa (Guo *et al.*, 2000). Menos del 50% de los compuestos orgánicos de fósforo en la mayor parte de los suelos se presentan como compuestos conocidos (Stevenson, 1986).

Sin embargo, a través del procedimiento de extracción secuencial desarrollado por Hedley *et al.* (1982) es posible ir removiendo en forma progresiva formas de fósforo cada vez menos disponibles con cada subsiguiente extracción (Schmidt *et al.*, 1996), permitiendo además separarlo en fracciones orgánicas e inorgánicas (Piccone y Zamuner, 2002). Este procedimiento de fraccionamiento de fósforo significó un gran avance respecto a otros

métodos que previamente habían sido desarrollados por diferentes investigadores (Zhang *et al.*, 2004).

1.4 Hipótesis

- El uso productivo que se ha hecho de los suelos del sur de la provincia de Santa Fe durante los últimos 60 años, con escaso o nulo empleo de fertilizantes fosfatados, ha provocado una disminución en los contenidos de fósforo a niveles que pueden limitar el rendimiento de los cultivos.
- En estos suelos la fertilización con fósforo modifica la distribución de sus distintas fracciones y produce aumentos en los rendimientos de los cultivos.

1.5 Objetivos

1. Evaluar los contenidos de diferentes formas de fósforo, carbono orgánico y pH en perfiles de suelos ubicados dentro del distrito Villa Eloisa.
2. Evaluar la respuesta de los cultivos que forman parte de una rotación maíz – trigo/soja – soja al agregado de cuatro dosis de fósforo en combinación con dos dosis de nitrógeno.
3. Evaluar el impacto de los diferentes niveles de fertilización fosfatada sobre las distintas fracciones de fósforo del suelo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización del distrito Villa Eloisa

El distrito Villa Eloisa se encuentra ubicado en el extremo suroeste del departamento Iriondo, provincia de Santa Fe (Figura 3), y comprende una superficie de aproximadamente 37200 hectáreas. Es una zona predominantemente agrícola, de paisaje mayormente ondulado, con pendiente general hacia el cauce del río Carcarañá con gradientes que oscilan entre 0% y 3%. Estas fuertes pendientes, por su gradiente y longitud, son las que principalmente originan la moderada a severa erosión hídrica presente en el área.

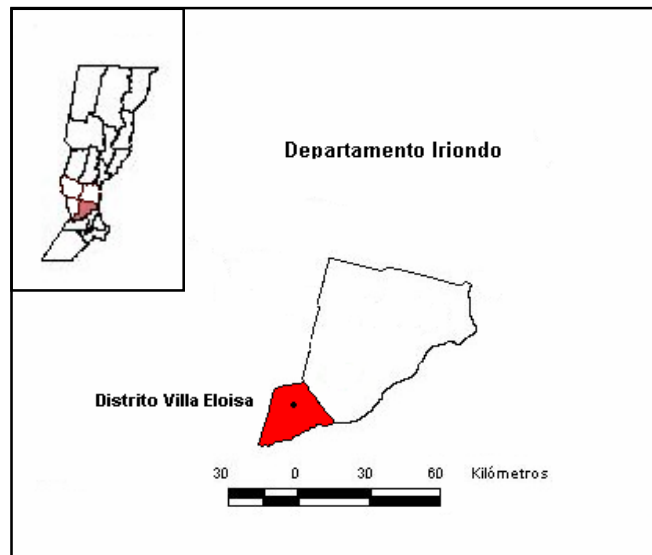


Figura 3. Ubicación geográfica del distrito Villa Eloisa.

El tipo de suelo representativo corresponde a la serie Villa Eloisa (Argiudol típico), con sus diferentes fases por erosión. Es un suelo oscuro, profundo y bien drenado, presente en las lomas y pendientes del área; posee un horizonte superficial de textura franco limosa, con un espesor inferior a 20 cm y un horizonte B de textura franco arcillo limosa. En el extremo noroeste del distrito predomina la serie Armstrong (Argiudol ácuico), representada por suelos

más profundos desarrollados en un área de paisaje llano o de lomadas con muy escasa pendiente (Carta de Suelos de la República Argentina, Hoja 3363-18).

Las temperaturas medias caracterizan al clima de la zona como templado, sin gran amplitud térmica anual. Se registran heladas entre fines del mes de mayo y mediados de septiembre, con un período medio libre de heladas de 270 días. El régimen pluviométrico tiende a ser de tipo monzónico, es decir con una concentración (70 % aproximadamente) de las lluvias en el verano y el otoño. La precipitación media anual es de aproximadamente 900 mm (Carta de Suelos de la República Argentina, Hoja 3363-18).

2.2 Evaluación de los contenidos de las diferentes formas de fósforo en perfiles de suelo ubicados en el distrito Villa Eloisa

Se seleccionaron seis perfiles de suelos correspondientes a lotes ubicados en el distrito Villa Eloisa, cinco pertenecientes a la serie Villa Eloisa (Lotes 1, 2, 3, 5 y 6) y el restante a la serie Armstrong (Lote 4). De ellos, cuatro lotes (Lotes 1, 2, 3 y 4) tuvieron durante los últimos sesenta años un manejo de agricultura continua, con aportes de fósforo mediante fertilización que variaron entre 0 y 12 kg ha⁻¹ anuales. Un lote (Lote 5) permaneció durante igual período de tiempo bajo pradera continua sin fertilizar, con *Stipa sp.* como especie predominante. El restante (Lote 6) estuvo en sus primeros cuarenta y cinco años bajo un monte de *Eucaliptus sp.*, y a partir de aquí como pradera natural continua, siempre sin fertilizar. De los mismos se extrajeron muestras compuestas por 6 submuestras a partir de cada horizonte y hasta una profundidad de 1,2 m (Figura 4).

Las muestras de suelo obtenidas se secaron al aire y pasaron por tamiz de 2 mm para determinar pH en agua por método potenciométrico (dilución 2.5:1), carbono orgánico (CO) por el método de Walkley & Black (Nelson y Sommers, 1982) y fósforo extractable (Pe)

(Bray-Kurtz N° 1, 1945), y por tamiz de 0,5 mm para determinar fósforo inorgánico (Pi), fósforo orgánico (Po) (Saunders y Williams, 1955) y fósforo total (Pt) (Bowman y Cole, 1978). El fósforo ocluido (Pocl) es la fracción de fósforo inorgánico no extraída por el método de Saunders y Williams (1955) y se calculó como $Pt - (Pi + Po)$ (Galantini y Rosell, 1997). Para todas las determinaciones, los contenidos del elemento en los extractos se analizaron colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962).

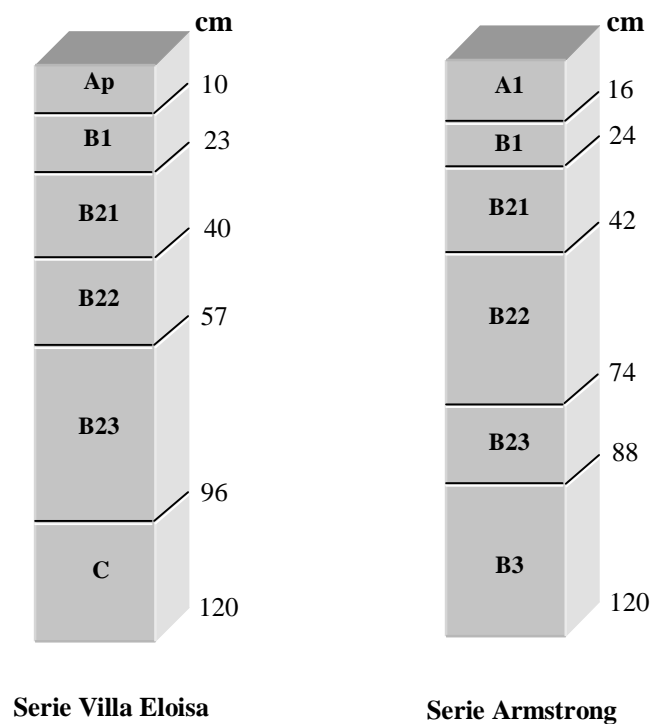


Figura 4. Profundidades consideradas para la toma de muestras en los perfiles.

2.3 Experimento a campo

Se inició a partir del mes de octubre de 2002 una experiencia prevista de al menos diez años de duración, en el establecimiento propiedad del Sr. Ricardo Simunovich, ubicado cinco kilómetros al sureste de la localidad de Villa Eloisa, provincia de Santa Fe (32° 55' latitud sur y 61° 32' longitud oeste). El suelo pertenece al subgrupo Argiudol típico serie Villa Eloisa

(Carta de Suelos de la República Argentina, Hoja 3363-18), cuyos parámetros químicos principales son: pH 5,8 – CO 1,79% - Pe 11,5 mg kg⁻¹.

Para el presente trabajo se tuvieron solamente en cuenta los tres primeros años (primer ciclo de la rotación). El mismo se llevó a cabo bajo una rotación que incluyó maíz (*Zea mays* L.) (2002/03), trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja de segunda (*Glycine max* Merr.) (2003/2004) y soja de primera (2004/2005) en siembra directa, con un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Los tratamientos principales tuvieron el agregado de cuatro dosis de fósforo: **P0** = 0 kg ha⁻¹, **P13** = 13 kg ha⁻¹ anuales, **P27** = 27 kg ha⁻¹ anuales y **P81** = 81 kg ha⁻¹ una vez cada tres años. Como tratamientos secundarios, a cada tratamiento principal y solamente para los cultivos de maíz y trigo, se agregaron dos dosis diferentes de nitrógeno: **N42** = 42 kg ha⁻¹ y **N84** = 84 kg ha⁻¹. Los tratamientos (secundarios) se dispusieron en parcelas de 9,8 m de ancho por 90 m de longitud.

En todos los casos, la fuente fosfatada empleada fue superfosfato triple (0-46-0), y la fuente nitrogenada urea (46-0-0). Para las dosis anuales de fósforo de 13 y 27 kg ha⁻¹ el fertilizante fosfatado se aplicó al momento de la siembra de los cultivos e incorporado al costado de la línea de siembra; para la dosis de 81 kg ha⁻¹ el fertilizante fosfatado se agregó de la siguiente forma: 54 kg ha⁻¹ incorporado inmediatamente antes de la siembra del cultivo inicial de la rotación (maíz), y 27 kg ha⁻¹ al momento de la siembra de dicho cultivo, incorporado al costado de la línea de siembra. La urea se aplicó incorporada en la presiembra de los cultivos de maíz y trigo. Durante los tres primeros años, todas las parcelas recibieron 21 kg ha⁻¹ anuales de azufre aplicados en forma de yeso agrícola al voleo y en presiembra de los cultivos.

Las tareas de siembra, fertilización, protección y cosecha de los cultivos se realizaron con maquinaria convencional, propiedad del establecimiento. Los cultivos se mantuvieron

libres de malezas, insectos y enfermedades durante todo su ciclo. Algunos datos referentes a los cultivos implantados en el primer ciclo de la rotación se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Fechas de siembra y cosecha, densidad de siembra, distanciamiento entre hileras e híbridos/variedades empleados para cada cultivo durante el primer ciclo de rotación.

Año	Cultivo	Variedad/híbrido	Fecha de siembra	Densidad de siembra	Distancia entre hileras	Fecha de cosecha
2002/03	Maíz	Nidera AX882	08/10/02	5,5 semillas m ⁻¹	70 cm	15/04/03
	Trigo	Klein Escorpión	14/06/03	120 kg ha ⁻¹	19 cm	21/11/03
2003/04	Soja	Don Mario 4800	10/12/03	31semillas m ⁻¹	70 cm	03/05/04
2004/05	Soja	Don Mario 4800	08/11/04	27 semillas m ⁻¹	70 cm	12/04/05

Las precipitaciones ocurridas durante los tres primeros ciclos de cultivos se muestran en la tabla III.

Tabla III. Precipitaciones (expresadas en mm) ocurridas en la localidad de Villa Eloisa entre enero de 2002 y junio de 2005.

	2002	2003	2004	2005
Enero	107	91	107	201
Febrero	103	110	73	56
Marzo	179	149	81	170
Abril	115	158	157	111
Mayo	28	21	87	0
Junio	2	0	0	5
Julio	18	84	29	
Agosto	42	55	29	
Septiembre	24	9	0	
Octubre	254	43	64	
Noviembre	109	26	48	
Diciembre	193	150	181	
Total	1174	896	856	

Fuente: Ing. Agr. Marcelo Cipollone. Agricultores Federados Argentinos SCL Centro Villa Eloisa

2.3.1 Mediciones efectuadas en los cultivos

- Rendimiento. Se midieron los rendimientos en grano para todos los cultivos incluidos en la rotación, los que posteriormente fueron transformados llevándolos a peso seco (13,5% de humedad). Se empleó una balanza con precisión de 2 kilogramos, realizándose la cosecha total de cada unidad experimental. A los datos obtenidos se les efectuó el análisis de la variancia y comparación de medias con test LSD empleando un nivel de significancia del 5 %; para ello se utilizó el software estadístico InfoStat (2000).
- Contenido de fósforo total en granos. Se evaluó para todos los cultivos incluidos en la rotación y para todos los tratamientos. Previo al análisis químico el material se secó en estufa con ventilación forzada a 70 °C durante 48 horas; posteriormente el material se pasó por un molino de picado fino (1 mm). Se pesó 1 gr de la muestra procesada, la cual fue llevada a mufla (500 °C) durante 4 horas. Luego de este tiempo se disolvieron las cenizas con 3 ml de agua destilada y 1 ml de ácido clorhídrico, y se filtró. Se llevó a volumen de 100 ml y se sacó una alícuota de 1ml para realizar el posterior desarrollo de color por medio del método colorimétrico de Murphy y Riley (1962).

2.3.2 Determinaciones efectuadas en el suelo

- Fósforo extractable (Bray-Kurtz N° 1, 1945). Medido en muestras compuestas de suelo extraídas a una profundidad de 0 – 20 cm, tomadas al inicio del ensayo y anualmente en el mes de junio, y a profundidades de 20 – 40 y 40 – 60 cm tomadas al final del primer ciclo de rotación (año 2005). Los muestreos se efectuaron dentro de las parcelas que recibieron la dosis mayor de nitrógeno (N84). El contenido de fósforo en el extracto se determinó colorimétricamente por el procedimiento de Murphy y Riley (1962).

- Carbono orgánico por el método de Walkley & Black (Nelson y Sommers, 1982) y pH por método potenciométrico (dilución 2.5:1). Medidos en las muestras de suelo compuestas tomadas al inicio del ensayo a una profundidad de 0 – 20 cm.
- Balance de fósforo acumulado. Determinado anualmente según la siguiente fórmula:

$$\Delta P = P_{ag} - P_{ext}$$

$$P_{ext} = (R * CPg)$$

donde ΔP = balance de fósforo acumulado ($kg\ ha^{-1}$)
 P_{ag} = fósforo agregado con el fertilizante anualmente y acumulado ($kg\ ha^{-1}$)
 P_{ext} = fósforo extraído con las cosechas anualmente y acumulado ($kg\ ha^{-1}$)
 R = rendimiento del cultivo ($kg\ ha^{-1}$)
 CPg = contenido promedio de fósforo en grano (%)

- Fracciones de fósforo (Hedley *et al.*, 1982) modificado por Tiessen y Moir (1993). Determinadas en las muestras de suelo compuestas tomadas en junio de 2004 (0 – 20 cm. de profundidad) y al final del primer ciclo de rotación (año 2005) (0 – 20, 20 – 40 y 40 – 60 cm de profundidad), sobre una muestra compuesta de las 3 repeticiones.

El método de fraccionamiento empleado cuantifica a las siguientes fracciones de fósforo:

- Fósforo inorgánico más biodisponible (P-MIA) extraído con membrana de intercambio aniónica, presente en la solución del suelo o adsorbido muy débilmente sobre hidróxidos y carbonatos, extraído con membrana de intercambio aniónica.
- Fósforo orgánico e inorgánico lábil adsorbidos débilmente a los coloides del suelo ($Po-NaHCO_3$ y $Pi-NaHCO_3$), extraídos con bicarbonato de sodio.
- Fósforo orgánico e inorgánico moderadamente lábil ($Po-NaOH$ y $Pi-NaOH$), el primero asociado al humus y el segundo unido a la superficie de arcillas o de compuestos de hierro y aluminio, extraídos con hidróxido de sodio.

- Fósforo inorgánico unido al calcio en minerales de apatita y ocluido en suelos más meteorizados (Pi-HCl), extraído con ácido clorhídrico.
- Fósforo orgánico e inorgánico químicamente más estables y relativamente insolubles (P-residual), remanente luego de las extracciones anteriores, extraído con ácido sulfúrico.

El contenido de fósforo en los extractos se determinó colorimétricamente por el procedimiento de Murphy y Riley (1962).

Los datos obtenidos fueron posteriormente analizados estadísticamente con análisis de regresión y correlación empleando el software InfoStat (2000).

3. RESULTADOS

3.1 Contenidos de las diferentes formas de fósforo en perfiles de suelo ubicados en el distrito Villa Eloisa

En la Tabla IV se presentan los resultados obtenidos de los análisis de las diferentes fracciones de P, CO y pH efectuados por horizonte en los seis suelos seleccionados.

Tabla IV. Contenidos de fósforo extractable (Pe), fósforo inorgánico (Pi), fósforo orgánico (Po), fósforo ocluido (Pocl), fósforo total (Pt), carbono orgánico (CO) y pH por horizonte en seis perfiles de suelos ubicados en el distrito Villa Eloisa.

Lote 1 – Simunovich (serie Villa Eloisa)							
Horizonte	Pe	Pi	Po	Pocl	Pt	CO	pH
Ap 0-10	10,8	155,9	192,2	174,3	522,5	1,560	5,8
B1 10-23	5,0	142,5	169,4	103,1	415,0	1,230	6,0
B21 23-40	3,3	180,0	118,8	126,2	425,0	0,789	6,1
B22 40-57	4,2	206,3	95,3	100,9	402,5	0,557	6,3
B23 57-96	10,0	290,0	88,8	141,2	520,0	0,296	6,4
C >96	18,3	391,3	103,7	82,5	577,5	0,136	6,4
Lote 2 – Príncipe (serie Villa Eloisa)							
Horizonte	Pe	Pi	Po	Pocl	Pt	CO	pH
Ap 0-10	9,7	157,0	209,0	79,0	445,0	1,949	5,8
B1 10-23	5,6	151,0	188,0	64,0	403,0	1,560	5,9
B21 23-40	7,3	109,0	159,0	105,0	373,0	0,974	6,1
B22 40-57	6,9	154,0	122,0	114,0	390,0	0,777	6,1
B23 57-96	4,5	203,0	91,0	134,0	428,0	0,586	6,2
C >96	9,4	318,0	48,0	114,0	480,0	0,389	6,4
Lote 3 – Rossetti (serie Villa Eloisa)							
Horizonte	Pe	Pi	Po	Pocl	Pt	CO	pH
Ap 0-10	21,7	213,0	171,0	76,0	460,0	1,479	5,9
B1 10-23	7,4	173,0	169,0	78,0	420,0	1,249	6,1
B21 23-40	6,3	193,0	130,0	110,0	433,0	0,740	6,4
B22 40-57	7,8	269,0	77,0	117,0	463,0	0,480	6,5
B23 57-96	14,4	379,0	62,0	109,0	550,0	0,279	6,6
C >96	23,4	651,0	55,0	47,0	753,0	0,096	6,7
Lote 4 – Scocco (serie Armstrong)							
Horizonte	Pe	Pi	Po	Pocl	Pt	CO	pH
A1 0-16	37,5	231,0	204,0	70,0	505,0	1,577	6,0
B1 16-24	15,4	191,0	175,0	84,0	450,0	1,160	6,1
B21 24-42	12,6	238,0	115,0	117,0	470,0	0,653	6,5
B22 42-74	22,3	310,0	90,0	123,0	523,0	0,500	6,5
B23 74-88	27,2	356,0	77,0	135,0	568,0	0,432	6,7
B3 88-120	35,6	420,0	68,0	122,0	610,0	0,336	6,8
Lote 5 – Potrero (serie Villa Eloisa)							
Horizonte	Pe	Pi	Po	Pocl	Pt	CO	pH
Ap 0-10	133,0	440,0	270,7	191,8	902,5	2,396	5,9
B1 10-23	96,5	333,5	192,8	208,7	735,0	1,549	6,3
B21 23-40	29,6	256,3	106,8	176,9	540,0	0,621	6,8
B22 40-57	19,1	280,6	97,5	316,9	695,0	0,470	7,0
B23 57-96	15,0	405,0	63,8	238,7	707,5	0,261	7,3
C >96	10,8	462,5	57,5	152,5	672,5	0,191	7,8
Lote 6 – Pierleoni (serie Villa Eloisa)							
Horizonte	Pe	Pi	Po	Pocl	Pt	CO	pH
Ap 0-10	57,7	331,0	243,0	57,0	631,0	2,531	6,6
B1 10-23	50,9	281,0	186,0	76,0	543,0	1,449	7,1
B21 23-40	19,2	237,0	126,0	94,0	457,0	0,774	7,2
B22 40-57	8,7	330,0	13,0	94,0	437,0	0,387	7,0
B23 57-96	16,2	466,0	31,0	43,0	540,0	0,228	7,0
C >96	16,5	523,0	40,0	23,0	586,0	0,109	7,2

Pe – Pi – Po – Pocl – Pt : expresados en mg kg⁻¹
CO: expresado en %

3.1.1 Contenido de fósforo total

Los valores de Pt medidos en el horizonte superficial fluctuaron entre 445 y 902 mg kg⁻¹. Teniendo en cuenta solamente a los cuatro suelos con uso agrícola (Lotes 1, 2, 3 y 4), el Pt medido para dicho horizonte osciló entre 445 y 505 mg kg⁻¹. Respecto a los lotes sin historia agrícola, el contenido de Pt en el Lote 5 para el horizonte superficial (902 mg kg⁻¹) fue en promedio un 87% superior al obtenido en los lotes agrícolas analizados. En el Lote 6, si bien el contenido de Pt en el horizonte superficial (631 mg kg⁻¹) fue superior a cualquiera de los obtenidos para los cuatro suelos agrícolas, representó solamente un 70% del medido en el Lote 5.

En todos los perfiles, el contenido de Pt fue más bajo entre los 23 y 40 cm. En los lotes con manejo agrícola el máximo valor se registró siempre en el horizonte más profundo, mientras que en los lotes 5 y 6 este valor se obtuvo en el horizonte superficial. El mayor contenido de Pt hallado en superficie en el Lote 5 respecto a los lotes agrícolas se mantuvo en todo el perfil, pero con diferencias menores. El Lote 6 también mostró una similar tendencia, aunque de menor magnitud y fundamentalmente hasta los 40 cm de profundidad (Figura 5).

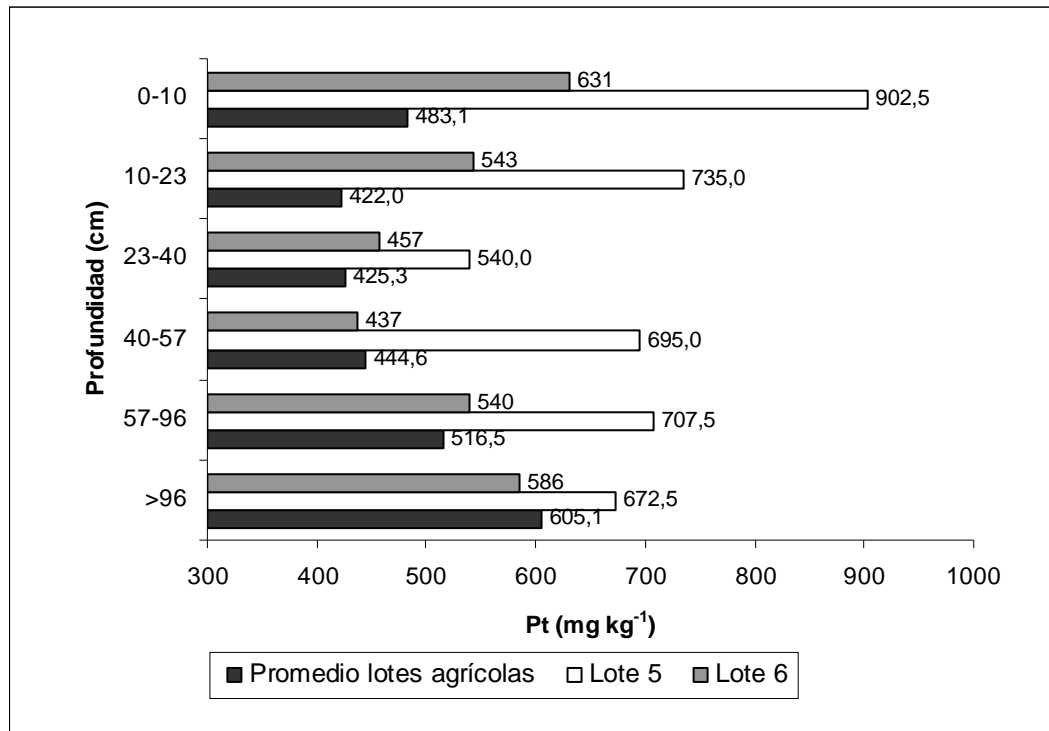


Figura 5. Distribución del contenido de fósforo total (Pt) dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.

3.1.2 Contenido de las diferentes fracciones de fósforo total

Para el horizonte superficial de los cuatro lotes agrícolas y para el Lote 6, la distribución entre las formas inorgánicas y orgánicas de fósforo indicó, en promedio, una relación de $(P_i+P_{ocl})/P_o$ próxima a 60/40, mientras que para el Lote 5 fue de 70/30. En profundidad de todos los perfiles, y debido a la progresiva disminución en los aportes de material orgánico, esta relación fue aumentando sostenidamente hasta llegar a un máximo en el horizonte más profundo (entre 87/13 y 93/7). Si bien el comportamiento del P_o en profundidad acompañó a la disminución sostenida del contenido de CO (Figura 6), la relación P_o/CO tendió a incrementarse con el aumento de profundidad (Tabla V).

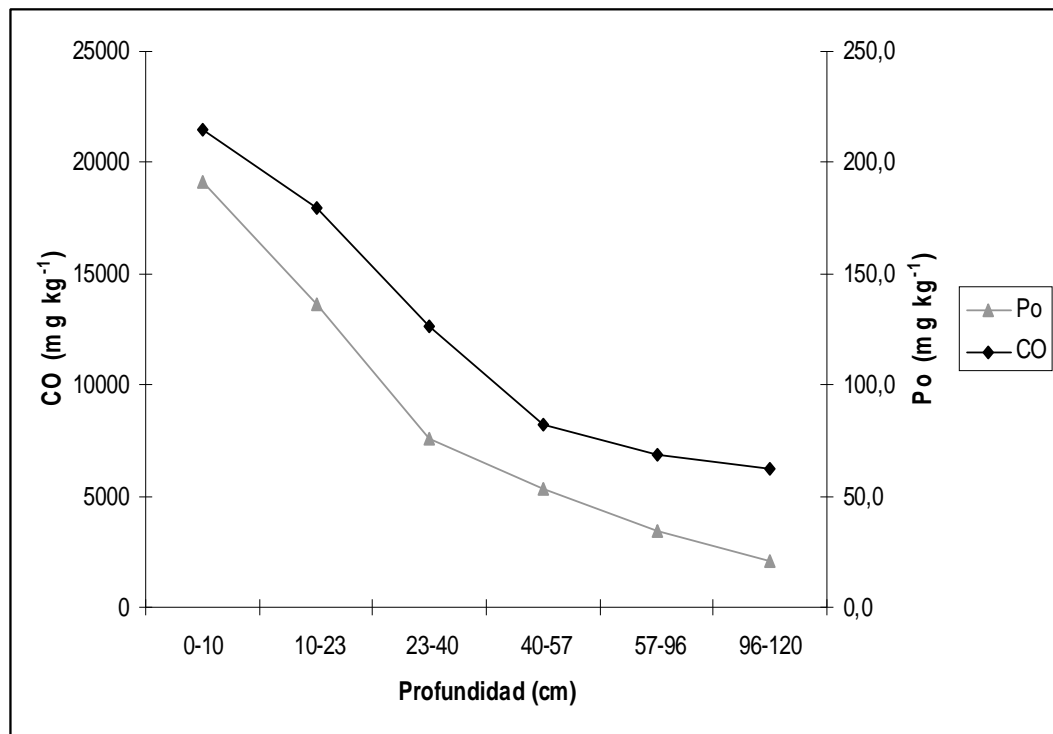


Figura 6. Distribución dentro del perfil de suelo del contenido de carbono orgánico (CO) y de fósforo orgánico (Po), promedios para los seis perfiles evaluados.

Tabla V. Relación entre el contenido de fósforo orgánico (Po) y de carbono orgánico (CO) dentro del perfil, promedio de los seis perfiles.

Horizonte	Po/CO
Ap 0-10	0,0112
B1 10-23	0,0132
B21 23-40	0,0166
B22 40-57	0,0156
B23 57-96	0,0199
C >96	0,0296

La diferencia hallada en el contenido de Pt para el horizonte superficial entre los cuatro lotes agrícolas y el Lote 5 estuvo estrechamente relacionada con la pérdida de las fracciones inorgánicas (Pi y Po_{cl}) (Figuras 7 - 8 y Tabla 6). El contenido superficial de Pi para el Lote 5 fue un 232% superior que el promedio de los cuatro suelos agrícolas; la

disminución de la fracción inorgánica no lábil (Pocl) mostró un comportamiento similar (254 %) en tres de los cuatro suelos agrícolas considerados.

En los horizontes más profundos, las fracciones inorgánicas de fósforo (Pi y Pocl) fueron también las más afectadas por el uso agrícola de los suelos (Figuras 7- 8 - 9 y Tabla 6).

Tabla VI. Disminuciones porcentuales de fósforo inorgánico (Pi), fósforo ocluido (Pocl) y fósforo orgánico (Po) para el promedio de los cuatro lotes agrícolas respecto al Lote 5.

Horizonte	Pi	Pocl	Po
Ap 0-10	57,0	48,0	28,3
B1 10-23	50,7	60,6	9,1
B21 23-40	29,8	35,2	-22,4
B22 40-57	16,3	64,1	1,5
B23 57-96	24,2	45,6	-24,9
C >96	3,8	40,1	-19,4

Respecto al comportamiento del Pocl, si bien se observó una tendencia de aumento en profundidad, la misma no fue tan marcada y consistente como la observada para el Pi.

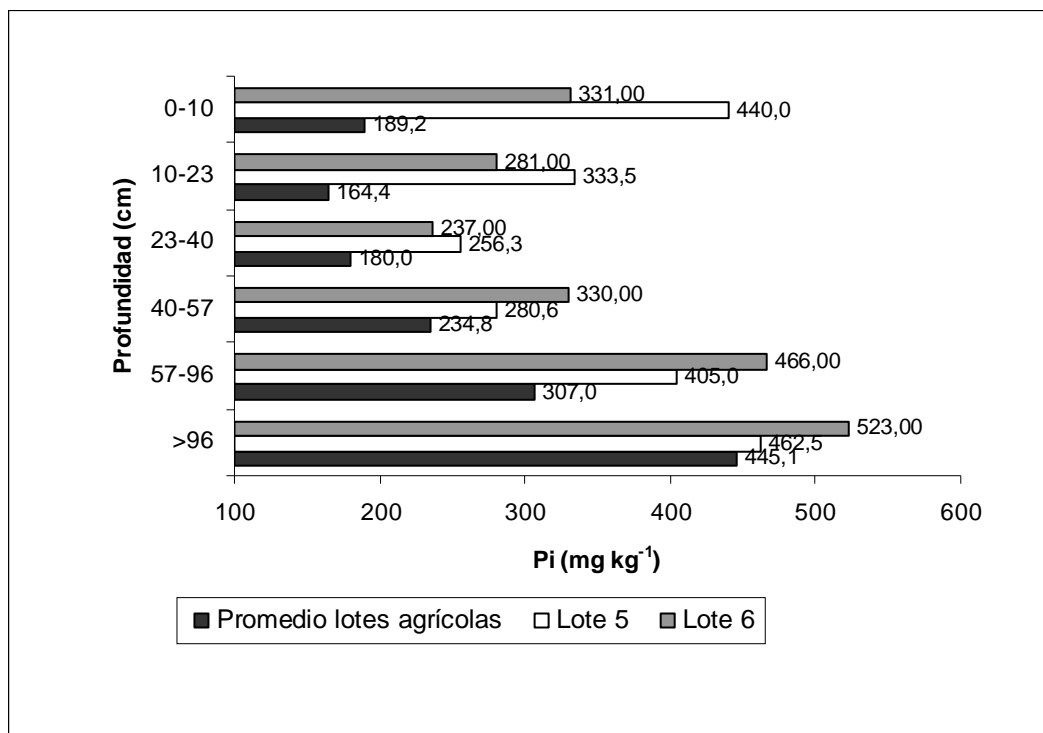


Figura 7. Distribución del contenido de fósforo inorgánico (Pi) dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.

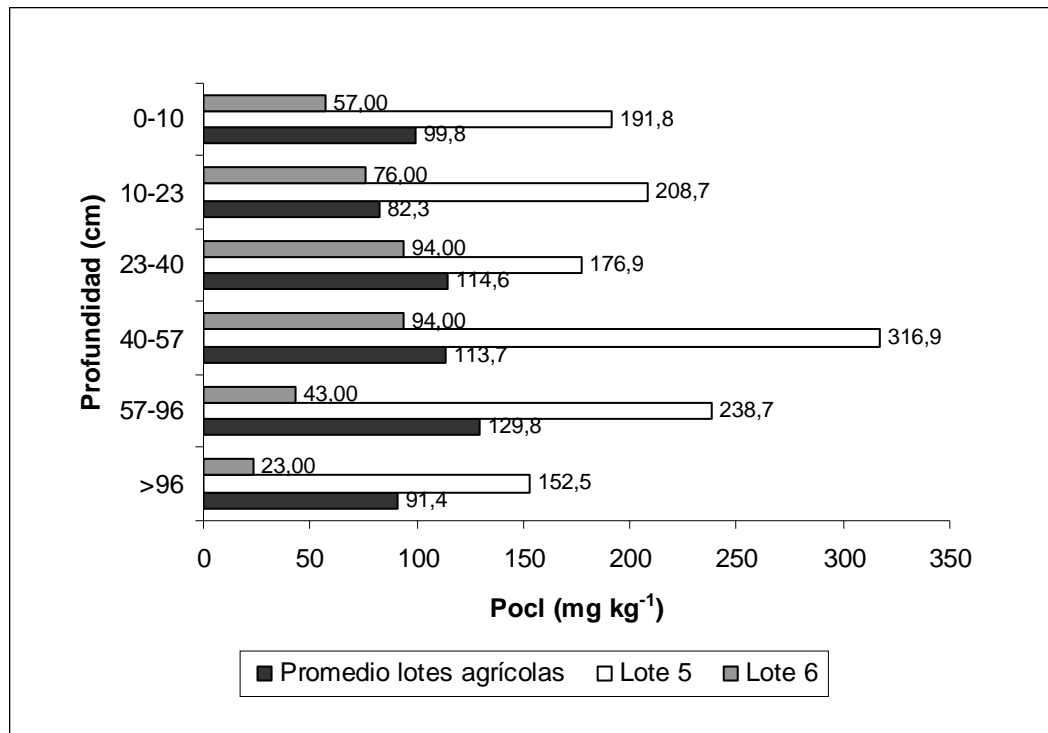


Figura 8. Distribución del contenido de fósforo ocluido (PoCl) dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.

Cabe destacarse que la disminución del Po debido al uso agrícola de los suelos se observó solamente hasta los 23 cm de profundidad (Figura10).

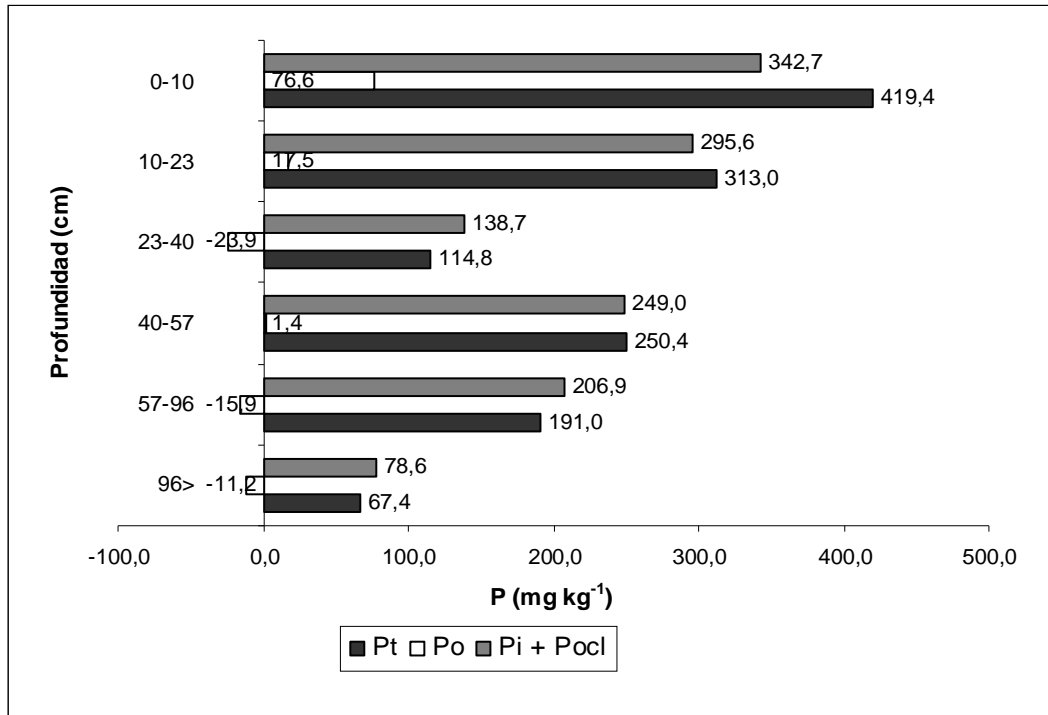


Figura 9. Diferencias en los contenidos de fósforo total (Pt), fósforo orgánico (Po) y fósforo inorgánico (Pi) + fósforo ocluido (Pocl) entre el Lote 5 y el promedio de los lotes agrícolas.

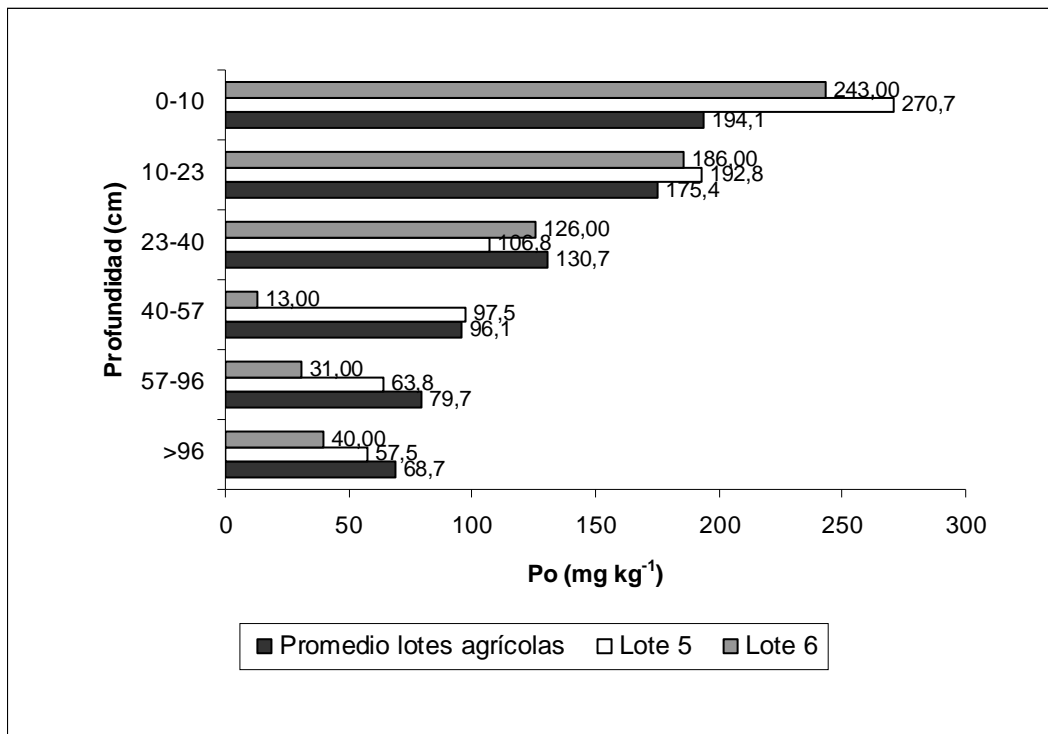


Figura 10. Distribución del contenido de fósforo orgánico (Po) dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.

3.1.3 Contenido de fósforo extractable

En los cuatro lotes agrícolas evaluados se midieron valores de Pe para el horizonte superficial que fluctuaron entre 9,7 y 37,5 mg kg⁻¹, con el mayor valor correspondiente al suelo perteneciente a la serie Armstrong. Esto representó disminuciones de los contenidos de Pe que oscilaron entre el 72% y 93% respecto al Lote 5 y el 35% al 83% respecto al Lote 6.

En el horizonte B1 de los seis perfiles los contenidos de Pe fueron menores respecto al horizonte superior, oscilando en los suelos con uso agrícola entre 5 y 15,4 mg kg⁻¹. A partir de los 23-24 cm de profundidad las diferencias entre perfiles con y sin historia agrícola tendieron a disminuir, hasta incluso medirse mayores contenidos de Pe en el horizonte C de los Lotes 1, 3 y 4 respecto a los Lotes 5 y 6.

Al igual que lo observado para el Pt, el contenido de Pe en los suelos agrícolas fue menor entre los 23 y 40 cm de profundidad; en el Lote 5 el contenido de Pe disminuyó progresivamente en todo el perfil hasta llegar a un mínimo en el horizonte C, mientras que el mínimo en el Lote 6 se presentó entre los 40 y 57 cm (Figura 11).

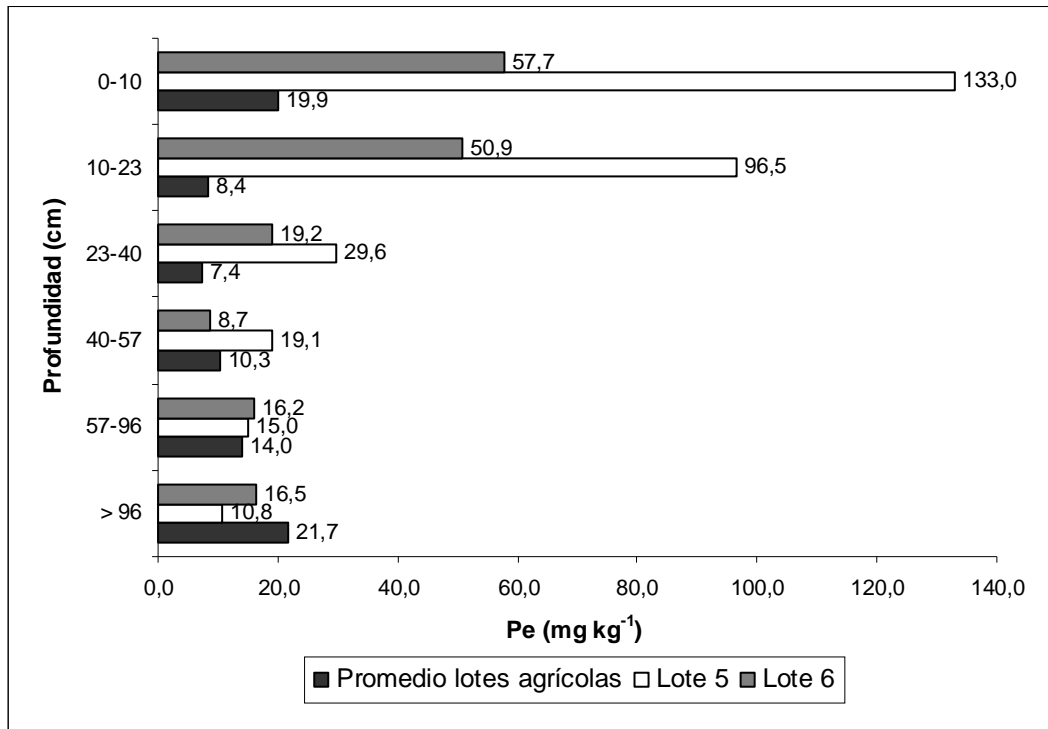


Figura 11. Distribución del contenido de fósforo extractable (Pe) dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.

En el horizonte superficial de los lotes 5 y 6, el Pe representó el 14,7% y el 9,1% respectivamente del Pt, mientras que en los lotes agrícolas, en promedio, este porcentaje disminuyó al 4,1%.

3.1.4 Contenido de carbono orgánico y pH

Carbono orgánico. Se determinaron marcadas diferencias en el horizonte superficial respecto al contenido de CO entre perfiles con distinto manejo. En promedio, el contenido de CO fue un 50% superior en aquellos lotes sin manejo agrícola respecto a los que sí lo tuvieron. Sin embargo, a mayores profundidades estas diferencias fueron disminuyendo hasta incluso revertir su sentido (Figura 12).

En todos los perfiles evaluados se observó una disminución sostenida del contenido de CO con la profundidad, hasta llegar a un mínimo en el horizonte inferior.

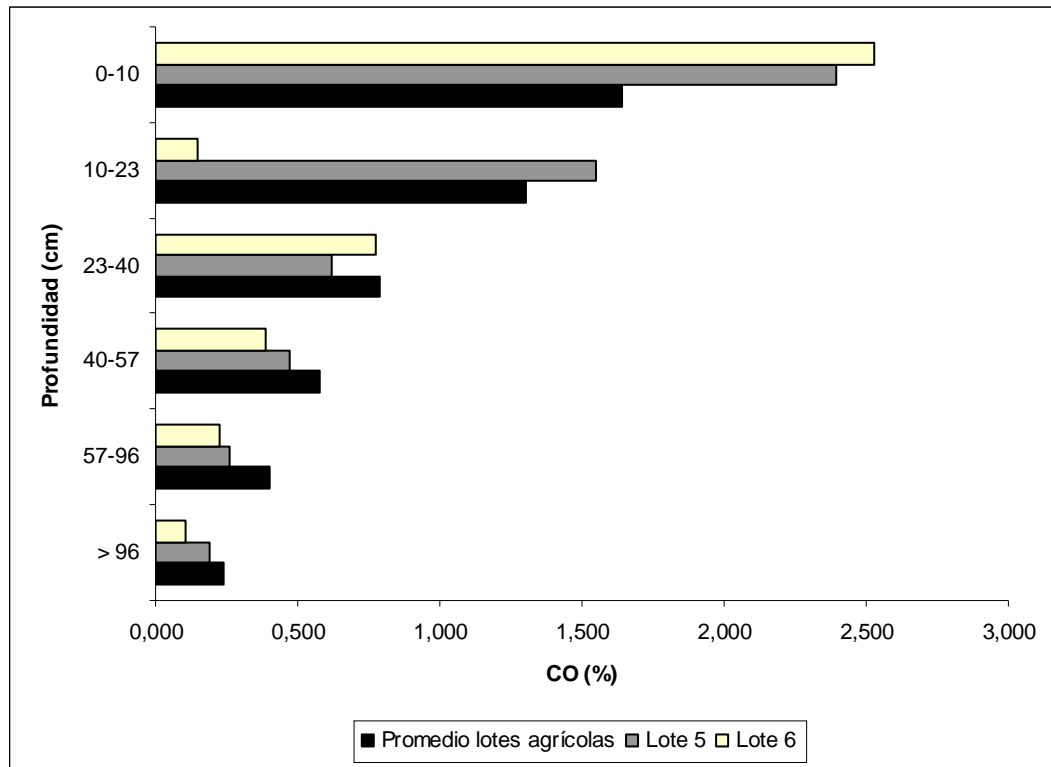


Figura 12. Distribución del contenido de carbono orgánico (CO) dentro del perfil en suelos con y sin historia de uso agrícola.

pH. Si bien en todos los perfiles se produjo un sostenido incremento de pH en profundidad, tanto los valores del horizonte superficial (5,8 – 6,6) como del horizonte más profundo (6,4-7,8) tuvieron variaciones entre perfiles. En general se pudo observar una acidificación debida a los años de agricultura continua, particularmente a partir de los 40 cm de profundidad.

3.2 Experimento a campo

3.2.1 Análisis de suelo inicial

En la Tabla VII se muestran los contenidos de Pe, CO y pH a 0-20 cm de profundidad medidos en el lote donde fue instalado el experimento, inmediatamente antes de la implantación del primer cultivo de la rotación (maíz).

Tabla VII. Contenidos de fósforo extractable (Pe), carbono orgánico (CO) y pH medidos previamente a la instalación del experimento, a una profundidad de 0-20 cm y por parcela de repetición (Rx).

Repetición	pH	CO (%)	Pe (mg kg⁻¹)
R1	5,8	1,83	11,3
R2	5,8	1,73	11,5
R3	5,9	1,83	11,5

En primer lugar, se observó uniformidad entre las diferentes parcelas de repetición respecto a los tres parámetros evaluados. Luego, se puede generalizar que se trata de un suelo moderadamente ácido (USDA, 1971, en Porta y col, 1999) y con baja a media disponibilidad de fósforo (Echeverría y García, 1998). Respecto al contenido de CO, el mismo fue superior al hallado como promedio (1,50%) en 204 muestras de suelo superficiales (0-20 cm) extraídas de lotes ubicados dentro del distrito Villa Eloisa entre los años 1998 y 2005 (datos no publicados).

3.2.2 Rendimientos de los cultivos durante el ciclo de rotación

Los rendimientos obtenidos en los cultivos de maíz, trigo, soja de segunda y soja de primera implantados durante el primer ciclo de rotación se resumen en la Tabla VIII.

De acuerdo al análisis de la variancia efectuado (Tabla IX) se comprobó que no hubo interacción significativa entre P x N, por lo cual se interpreta que ambos nutrientes tuvieron efectos independientes sobre los rendimientos de los cultivos (Tabla X).

Tabla VIII. Rendimiento en granos de los cultivos (expresado en kg ha⁻¹) incluidos en la rotación (2003 – 05)

	MAÍZ	TRIGO	SOJA DE SEGUNDA	SOJA DE PRIMERA
Tratamiento	Rendimiento (kg ha⁻¹)			
P0 N42	8885 a	2339 a	1999 ab	3947 a
P0 N84	10215 b	2776 ab	1641 a	3900 a
P13 N42	8825 a	3099 bc	1869 ab	3960 a
P13 N84	10449 b	3204 bc	1644 a	4009 a
P27 N42	8794 a	2934 abc	1828 ab	3908 a
P27 N84	10092 b	3527 c	1604 a	3880 a
P81 N42	8679 a	2613 ab	2131 b	3973 a
P81 N84	10071 b	3217 bc	1645 a	3934 a

Valores de rendimiento promedio seguidos con la misma letra no difieren estadísticamente (Test de Tukey 5%)

Tabla IX. Análisis de variancia para los efectos separados y combinados del agregado de P y N.

Tratamiento	MAIZ	TRIGO	SOJA DE SEGUNDA	SOJA DE PRIMERA
Efecto P	0,1487	0,0015	0,3124	0,7580
Efecto N	<0,0001	0,0013	0,0002	0,8001
Efecto P x N	0,5005	0,4190	0,4669	0,9422

Tabla X. Rendimientos promedio en granos de los cultivos, expresados en kg ha^{-1} , para cada tratamiento de P.

Tratamiento	MAIZ	TRIGO	SOJA DE SEGUNDA	SOJA DE PRIMERA
P0	9550	2557 a	1820	3923
P13	9637	3152 b	1756	3984
P27	9443	3230 b	1716	3894
P81	9375	2972 ab	1888	3953

Valores de rendimiento promedio seguidos con la misma letra no difieren estadísticamente (Test de Tukey 5%)

Cultivo de maíz: se observaron diferencias significativas por el agregado de las dosis de nitrógeno, mientras que en ninguno de los tratamientos fertilizados con fósforo el rendimiento del cultivo tuvo diferencias significativas. El rendimiento promedio del cultivo con N42 fue de 8796 kg ha^{-1} mientras que con la dosis mayor de nitrógeno (N84) fue de 10207 kg ha^{-1} .

Cultivo de trigo: en este cultivo también se encontraron diferencias significativas las dosis de nitrógeno; el rendimiento promedio de trigo con N42 fue de 2746 kg ha^{-1} y con N84 fue de 3181 kg ha^{-1} .

A diferencia de lo observado en maíz, también se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados con fósforo, a excepción del tratamiento P81. Sin el agregado de fósforo el rendimiento de trigo fue de 2557 kg ha^{-1} , mientras que con fósforo fue de 3099 kg ha^{-1} .

De esta manera, la eficiencia de uso del fósforo aplicado fue de $45,7 \text{ kg grano/kg P}$ en el tratamiento P13 y de $24,9 \text{ kg grano/kg P}$ en el tratamiento P27

Cultivo de soja de segunda: debe destacarse que los bajos rendimientos de este cultivo en todos los tratamientos se debieron principalmente a las escasas precipitaciones ocurridas durante los meses de febrero y marzo de 2004, en momentos en los que el cultivo se

encontraba en la etapa reproductiva. De este modo, se obtuvieron mayores rendimientos en aquellos tratamientos que tuvieron la menor dosis de nitrógeno en el cultivo de trigo antecesor, atribuible al menor consumo de agua en aquellas parcelas que recibieron menor cantidad de fertilizante nitrogenado (Tablas VIII y IX).

Respecto a la respuesta del cultivo al agregado de fósforo, no se hallaron diferencias significativas entre los tratamientos.

Cultivo de soja de primera: en soja de primera no se hallaron respuestas significativas al agregado de fósforo, como tampoco ninguna influencia significativa al agregado de nitrógeno realizado durante los años anteriores.

3.2.3 Contenidos de fósforo en grano

En la Tabla XI se muestran los contenidos de fósforo medidos en grano de los cultivos participantes de la rotación. En general se observó una tendencia al incremento de la concentración de fósforo en grano a medida que aumentó la dosis de fertilizante fosfatado, independientemente de la cantidad de nitrógeno adicionada.

Tabla XI. Contenido de fósforo en granos (expresado en %) de los cuatro cultivos incluidos en la rotación (2003 – 05). Promedios de tres repeticiones.

Tratamiento	MAIZ	TRIGO	SOJA DE SEGUNDA	SOJA DE PRIMERA
P0 N42	0,261 a	0,410 b	0,594 a	0,594 a
P0 N84	0,267 a	0,393 ab	0,577 a	0,589 a
P13 N42	0,279 b	0,398 ab	0,591 a	0,648 b
P13 N84	0,279 b	0,382 a	0,623 b	0,654 b
P27 N42	0,294 c	0,393 ab	0,626 b	0,652 b
P27 N84	0,282 b	0,401 ab	0,620 ab	0,700 c
P81 N42	0,296 cd	0,407 b	0,643 b	0,649 b
P81 N84	0,301 d	0,406 b	0,645 b	0,643 b

Valores de contenido de P en grano promedio seguidos con la misma letra no difieren estadísticamente (Test de Tukey 5%)

3.2.4 Evolución del fósforo extractable durante los tres primeros años de duración del experimento

En la Tabla XII se pueden observar los valores de Pe medidos anualmente a 0 – 20 cm de profundidad durante los tres primeros años de la rotación, y a las profundidades de 20 – 40 y 40 – 60 cm los resultados obtenidos al final del primer ciclo de rotación (año 2005).

Tabla XII. Evolución del contenido de fósforo extractable (Pe) durante la rotación a 0-20 cm de profundidad y evaluación a 20-40 y 40-60 cm de profundidad al final del primer ciclo de rotación. Mediciones efectuadas en las parcelas que recibieron la mayor cantidad de N (84 kg ha⁻¹)

Año 2003 0-20 cm		Año 2004 0-20 cm		Año 2005 0-20 cm		Año 2005 20-40 cm		Año 2005 40-60 cm	
T	Pe	T	Pe	T	Pe	T	Pe	T	Pe
P0	8,0 a	P0	6,3 a	P0	8,1 a	P0	4,6 a	P0	7,1 a
P13	9,8 a	P13	11,7 b	P13	13,3 b	P13	6,8 b	P13	8,2 a
P27	11,0 a	P27	12,7 bc	P27	15,9 bc	P27	6,3 b	P27	7,8 a
P81	16,5 b	P81	16,8 c	P81	18,3 c	P81	6,3 b	P81	10,3 b

T: tratamiento principal (dosis de fósforo)
 Pe: fósforo extractable expresado en mg kg⁻¹
 Valores promedio seguidos con la misma letra no difieren estadísticamente (Test de Tukey 5%)

Tanto en el horizonte superficial como a mayores profundidades se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos respecto a los contenidos de Pe, que difirieron conforme el experimento fue avanzando en el tiempo y a la profundidad considerada.

Contenido de Pe a 0 – 20 cm de profundidad. Año 2003:

Se determinaron diferencias significativas solamente entre el tratamiento que tuvo la mayor dosis de fósforo agregada (81 kg ha⁻¹) y los tratamientos restantes.

Se observó una tendencia a la disminución del Pe en los tratamientos P0 y P13, al aumento en el tratamiento P81, y sin cambios en el tratamiento P27. El balance de fósforo acumulado (ΔP) calculado al final del primer año del experimento (año 2003) pudo explicar

esta observación (Tabla XIII). En efecto, en los tratamientos P0 y P13 el ΔP fue negativo (entre 11,6 y 27,3 kg P ha⁻¹), en el tratamiento P27 fue muy cercano a cero, y el tratamiento P81 fue el único que presentó un ΔP netamente positivo.

Tabla XIII. Balance de fósforo acumulado (ΔP) (fósforo agregado con el fertilizante menos fósforo extraído con las cosechas) para los tres primeros años de duración del experimento.

T	Año 2003			Año 2004			Año 2005		
	Pag	Pext	ΔP	Pag	Pext	ΔP	Pag	Pext	ΔP
P0 N42	0	23,2	-23,2	0	44,6	-44,6	0	68,1	-68,1
P0 N84	0	27,3	-27,3	0	47,6	-47,6	0	70,6	-70,6
P13 N42	13	24,6	-11,6	26	48,0	-22,0	39	73,7	-34,7
P13 N84	13	30,7	-17,7	26	53,2	-27,2	39	79,4	-40,4
P27 N42	27	26,0	1,0	54	49,0	5,0	81	74,5	6,5
P27 N84	27	28,5	-1,5	54	52,6	1,4	81	79,7	1,3
P81 N42	81	25,7	53,3	81	50,0	31	81	75,8	5,2
P81 N84	81	30,3	50,7	81	54,0	27	81	79,3	1,7

T: tratamiento
Pag: fósforo agregado con el fertilizante acumulado (kg ha⁻¹)
Pext: fósforo extraído con las cosechas acumulado (kg ha⁻¹)
 ΔP : balance de P acumulado

Contenido de Pe a 0 – 20 cm de profundidad. Año 2004:

Hacia el final del segundo año, se mantuvieron las diferencias significativas establecidas entre el tratamiento P81 y los tratamientos P0 y P13; pero si bien el valor de Pe medido en el tratamiento P81 continuó siendo mayor al obtenido en el tratamiento P27, las diferencias no alcanzaron a ser significativas. El contenido de Pe no presentó modificaciones en el tratamiento P81 respecto al año anterior; en el tratamiento P0 siguió disminuyendo, mientras que los tratamientos P13 y P27 aumentaron no hallándose diferencias significativas entre ambos.

El ΔP calculado al final del segundo año explicó esta situación para los tratamientos P27 y P81. Sin embargo, el contenido de Pe en el tratamiento P13 aumentó pese a haberse acumulado una extracción de fósforo superior a los 20 kg ha^{-1} luego de dos años de rotación.

Contenido de Pe a 0 – 20 cm de profundidad. Año 2005:

Al final del primer ciclo de rotación se evaluaron diferencias significativas para Pe entre tratamientos, similares a las halladas al final del año anterior, aunque observándose en todos ellos un aumento del Pe de similar magnitud ($2\text{-}3 \text{ mg kg}^{-1}$) respecto al año anterior.

Se determinó también la evolución del Pe en los primeros 20 cm de suelo durante los tres primeros años de duración del experimento (Figura 13).

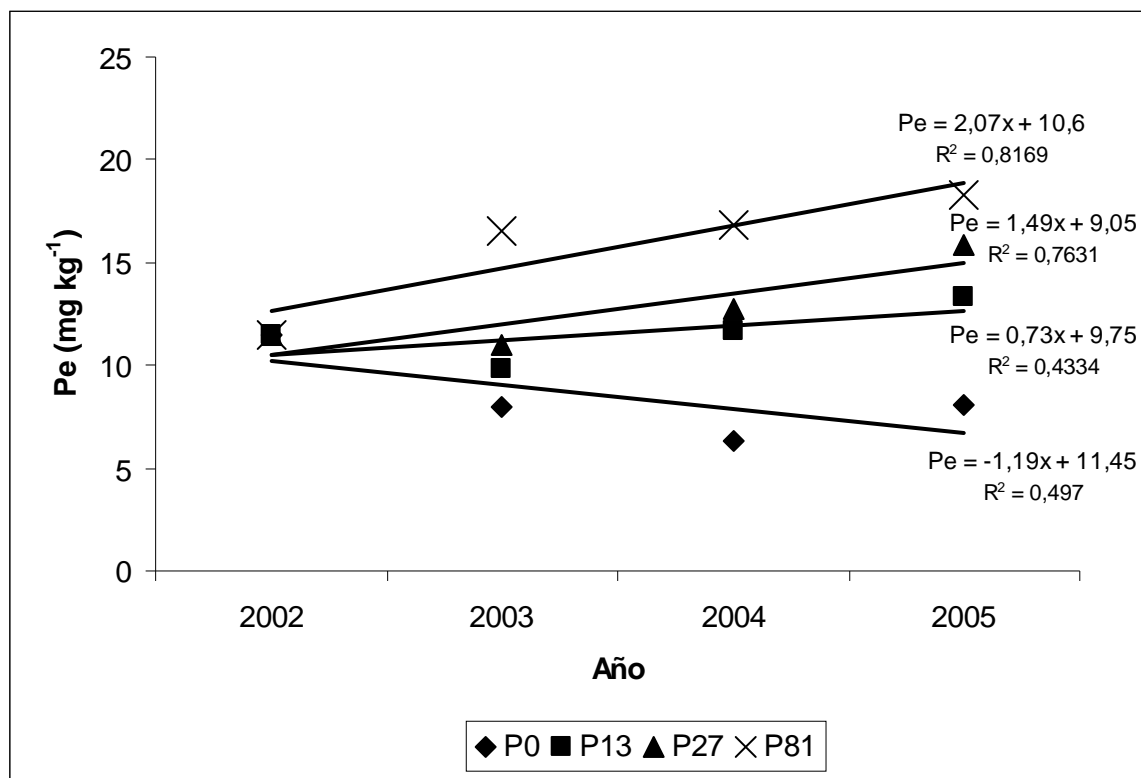


Figura 13. Evolución del contenido de fósforo extractable (Pe) medido a 0-20 cm de profundidad en cada tratamiento principal durante los tres primeros años de rotación.

Se pudo observar que, luego de tres años, la aplicación de 81 kg P ha^{-1} por única vez al inicio del experimento produjo el mayor incremento anual de Pe, a razón de algo más de 2 mg

$\text{kg}^{-1} \text{año}^{-1}$ (Figura 12). Las fertilizaciones anuales con 13 y 27 kg P ha^{-1} se correspondieron con aumentos menores de Pe (0,73 y 1,49 $\text{mg kg}^{-1} \text{año}^{-1}$ respectivamente), y como consecuencia de no agregar fertilizante fosfatado durante igual período de tiempo, el Pe disminuyó a razón de 1,2 $\text{mg kg}^{-1} \text{año}^{-1}$.

Si bien al cabo del tercer año la disminución del contenido de Pe en el tratamiento P0 estuvo relacionada con un balance total negativo de fósforo del orden de los 70 kg ha^{-1} , el Pe medido en los tratamientos donde se agregó fertilizante fosfatado no tuvo relación con el ΔP (Tabla XIII). En el tratamiento P13, a pesar de haberse acumulado una pérdida de entre 34,7 y 40,4 kg P ha^{-1} , el Pe registró un ligero aumento; en los tratamientos P27 y P81, no obstante haberse calculado un ΔP muy cercano a cero, se obtuvieron valores de Pe sensiblemente mayores al medido previamente a la instalación del experimento. Adicionalmente, pese a haberse agregado en total igual cantidad de fósforo y de tener un ΔP prácticamente igual, el Pe medido en el tratamiento P81, aunque sin significancia estadística, fue mayor al evaluado en el tratamiento P27.

Contenido de Pe a 20 – 40 y 40 – 60 cm de profundidad:

A mayores profundidades también se hallaron diferencias significativas entre tratamientos en el valor de Pe medido (Tabla XII). En la profundidad de 20-40 cm, las diferencias obtenidas fueron significativas solamente entre todos los tratamientos que recibieron agregado de fósforo y el tratamiento testigo (P0), mientras que a la profundidad de 40-60 las diferencias se obtuvieron entre el tratamiento que recibió la mayor dosis de fósforo (P81) al inicio del ensayo respecto de los demás tratamientos.

3.2.5 Cambios en las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo del suelo

En la Tabla XIV se muestran los datos obtenidos del fraccionamiento de fósforo según Hedley *et al.* (1984) modificado por Tiessen y Moir (1993), sobre muestras de suelo tomadas al final del segundo (0-20 cm de profundidad) y del tercer año del experimento (0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad).

Tabla XIV. Contenidos de las diferentes fracciones de P (Hedley *et al.*, 1982, modificado por Tiessen y Moir, 1993) al final del segundo año (0-20 cm) y del tercer año (0-20, 20-40 y 40-60 cm) de rotación.

Año 2 - 2004 (0-20 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO ₃ H	Po- NaCO ₃ H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P0	5,6	9,4	25,7	20,0	99,5	149	160	469,4
P13	8,3	11,9	26,8	23,8	110,3	158	149	488,7
P27	12,5	13,8	33,6	22,5	109,6	145	148	485,5
P81	24,8	22,0	25,4	25,9	108,2	139	152	497,4
Año 3 - 2005 (0-20 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO ₃ H	Po- NaCO ₃ H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P0	9,4	7,0	22,1	20,0	116,8	147	188	510,3
P13	12,9	13,1	21,7	25,8	128,4	158	184	543,9
P27	13,0	11,1	22,8	25,8	124,2	153	184	533,9
P81	14,2	13,0	20,3	25,3	122,9	155	185	535,7
Año 2005 3 - (20-40 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO ₃ H	Po- NaCO ₃ H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P0	8,4	3,6	13,2	11,8	43,4	180	222	482,4
P13	9,2	6,6	12,0	14,1	50,4	179	225	496,3
P27	8,7	6,3	17,1	14,5	56,5	168	227	498,1
P81	9,0	5,7	14,7	13,8	53,7	179	222	497,9
Año 2005 3 - (40-60 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO ₃ H	Po- NaCO ₃ H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P0	13,5	7,0	8,6	17,3	30,7	218	220	515,1
P13	13,2	7,6	11,0	14,1	31,2	213	211	501,1
P27	13,5	7,1	8,6	13,8	39,9	211	216	509,9
P81	16,9	8,0	11,8	15,6	34,4	204	211	501,7

Valores expresados en mg kg⁻¹

A su vez, en las Tablas XV y XVI se presentan las diferencias absolutas y porcentuales respectivamente, calculadas para las distintas fracciones de fósforo, entre los tratamientos con fertilización fosfatada respecto del tratamiento testigo sin fertilizar.

Tabla XV. Diferencias absolutas de los contenidos de las diferentes fracciones de P (Hedley *et al.*, 1982, modificado por Tiessen y Moir, 1993) entre los tres tratamientos que recibieron fósforo (P13, P27 y P81) respecto al testigo sin fertilizar.

Año 2 - 2004 (0-20 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	2,7	2,5	1,1	3,8	10,8	9,3	-10,8	19,3
P27	6,9	4,4	7,9	2,5	10,1	-3,6	-12,0	16,1
P81	19,2	12,6	-0,3	5,9	8,7	-10,1	-8,0	28,0
Año 3 - 2005 (0-20 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	3,5	6,1	-0,4	5,8	11,6	11,0	-4,0	33,6
P27	3,6	4,1	0,7	5,8	7,4	6,0	-4,0	23,6
P81	4,8	6,0	-1,8	5,3	6,1	8,0	-3,0	25,4
Año 3 - 2005 (20-40 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	0,8	3,0	-1,2	2,3	7,0	-1,0	3,0	13,9
P27	0,3	2,7	3,9	2,7	13,1	-12,0	5,0	15,7
P81	0,6	2,1	1,5	2,0	10,3	-1,0	0,0	15,5
Año 3 - 2005 (40-60 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	-0,3	0,6	2,4	-3,2	0,5	-5,0	-9,0	-14,0
P27	0,0	0,1	0,0	-3,5	9,2	-7,0	-4,0	-5,2
P81	3,4	1,0	3,2	-1,7	3,7	-14,0	-9,0	-13,4

Tabla XVI. Diferencias porcentuales de los contenidos de las diferentes fracciones de P (Hedley *et al.*, 1982, modificado por Tiessen y Moir, 1993) entre los tres tratamientos que recibieron fósforo (P13, P27 y P81) respecto al testigo sin fertilizar.

Año 2 - 2004 (0-20 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	47,3	26,9	4,2	18,8	10,8	6,2	-6,7	4,1
P27	122,3	47,4	30,5	12,3	10,1	-2,4	-7,5	3,4
P81	342,9	134,8	-1,2	29,3	8,7	-6,7	-5,0	6,0
Año 3 - 2005 (0-20 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	37,2	87,1	-1,8	29,0	9,9	7,5	-2,1	6,6
P27	38,3	58,6	3,2	29,0	6,3	4,1	-2,1	4,6
P81	51,1	85,7	-8,1	26,5	5,2	5,4	-1,6	5,0
Año 3 - 2005 (20-40 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	9,5	83,3	-9,1	19,5	16,1	-0,6	1,4	2,9
P27	3,6	75,0	29,5	22,9	30,2	-6,7	2,3	3,3
P81	7,1	58,3	11,4	16,9	23,7	-0,6	0,0	3,2
Año 3 - 2005 (40-60 cm)								
T	P-MIA	Pi- NaCO₃H	Po- NaCO₃H	Pi- NaOH	Po- NaOH	Pi-HCl	P- Residual	P total
P13	-2,2	8,6	27,9	-18,5	1,6	-2,3	-4,1	-2,7
P27	0,0	1,4	0,0	-20,2	30,0	-3,2	-1,8	-1,0
P81	25,2	14,3	37,2	-9,8	12,1	-6,4	-4,1	-2,6

Año 2004 – 0-20 cm de profundidad:

En todos los tratamientos pudo observarse que el P-Residual fue la mayor fracción de fósforo, siguiéndole en orden de magnitud el Pi-HCl y el Po-NaOH (Tabla XIV).

Frente a la fertilización fosfatada, las diferentes fracciones de fósforo registraron cambios en muy diferentes magnitudes, algunas de las cuales prácticamente no se modificaron ante las adiciones o las extracciones de fósforo. Los contenidos de Pt en los tratamientos que recibieron fósforo adicional fueron entre el 4,1% y el 6,0 % superiores al medido en el

tratamiento P0 (Tabla XVI). El mayor valor de Pt se midió en el tratamiento P81, donde se había agregado la mayor cantidad de fósforo hasta ese momento. Este aumento se sustentó a través del incremento registrado en algunas fracciones, principalmente las inorgánicas de mayor labilidad (P-MIA y Pi-NaCO₃H), y en las fracciones inorgánica y orgánica extraídas con NaOH. El Po-NaCO₃H manifestó un comportamiento errático, ya sea de aumento, disminución o prácticamente sin cambios para cada uno de los tres tratamientos fertilizados con fósforo. Las fracciones inorgánicas no lábiles (Pi-HCl y P-Residual) mostraron cambios porcentuales de menor magnitud, implicando en todos los tratamientos fertilizados (exceptuando la fracción Pi-HCl en el tratamiento P13) disminuciones respecto al tratamiento testigo.

Año 2005 – 0-20 cm de profundidad:

Luego de finalizada la rotación, si bien las distintas fracciones de fósforo mantuvieron tendencias similares con las observadas durante el año anterior, es necesario destacar ciertos aspectos diferenciales.

Primeramente, si bien continuaron en magnitudes porcentuales similares (4,6%-6,6%) las diferencias positivas en los contenidos de Pt entre los tratamientos con agregado de fósforo respecto al testigo sin fertilizar, las mismas no se incrementaron con el aumento en la dosis de fósforo agregada, donde incluso la mayor diferencia respecto al testigo se observó en el tratamiento P13 (Tabla XVI).

Al igual que lo observado en el año anterior, este incremento en el contenido de Pt en las parcelas con agregado de fósforo se sustentó principalmente en un mayor incremento porcentual de las fracciones inorgánicas más lábiles (P-MIA y Pi-NaCO₃H); sin embargo, las diferencias respecto al P-MIA fueron de menor magnitud. El resto de las fracciones de fósforo manifestó comportamientos similares al observado el año anterior.

Cabe destacarse la estrecha relación hallada entre el contenido de Pe y los contenidos de las fracciones inorgánicas más lábiles (P-MIA y Pi-NaCO₃H) tanto al fin del segundo como del tercer año. Relación similar pudo también observarse entre el Pe y el Pi-NaOH, que de acuerdo con Hedley *et al.* (1982) es una fracción inorgánica de menor labilidad (Tabla XVII).

Tabla XVII. Coeficientes de correlación de Pearson entre el fósforo extractable (Pe) y las diferentes fracciones de fósforo (Hedley *et al.*, 1984, modificado por Tiessen y Moir, 1993) para la profundidad 0-20 cm.

Año	P-MIA	Pi-NaCO ₃ H	Po-NaCO ₃ H	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-HCl	P-Residual
2004	0,905	0,924	0,089	0,952	0,758	-0,514	-0,677
2005	0,965	0,825	-0,456	0,846	0,548	0,664	-0,755

Año 2005 – 20-40 cm de profundidad:

Se mantuvieron, aunque de menor magnitud (2,9%-3,3%), las diferencias porcentuales positivas en los contenidos de Pt entre tratamientos fertilizados con fósforo y el testigo. Las fracciones que mostraron mayores aumentos relativos fueron las inorgánicas extraídas con NaCO₃H y NaOH, mientras que los cambios en el P-MIA fueron menores (Tabla XVI).

Las diferencias porcentuales en los contenidos de Po extraídos con NaCO₃H y NaOH entre tratamientos fertilizados y testigo fueron de mayor magnitud respecto de lo ocurrido en el horizonte superficial en ambos años evaluados. Tanto el Pi-HCl como el P-Residual mostraron en general pocas diferencias entre tratamientos.

Año 2005 – 40-60 cm de profundidad:

El aspecto más importante observado en esta profundidad fue que se invirtió el sentido de las diferencias en el contenido de las fracciones Pi-NaOH, Pi-HCl y Residual Pt, y

finalmente también en el Pt, entre los tratamientos que tuvieron agregado de fósforo y el tratamiento testigo (Tablas XV y XVI).

Entre las fracciones de mayor labilidad, el P-MIA sólo mostró un incremento en el tratamiento P81 con respecto al tratamiento testigo. Las fracciones tanto inorgánicas como orgánicas extraídas con NaCO_3H y el Po-NaOH fueron en general mayores en los tratamientos fertilizados con fósforo, aunque en magnitudes menores respecto a las otras profundidades.

4. DISCUSIÓN

4.1 Evaluación de los contenidos de las diferentes formas de fósforo en perfiles de suelo ubicados en el distrito Villa Eloisa

4.1.1 Fósforo total

El contenido de Pt de los suelos del mundo es variable; en la mayoría de ellos oscila entre 100 y 2450 kg ha⁻¹ (aproximadamente 40 y 1000 mg kg⁻¹) en sus primeros 20 cm (Darwich, 1998). Morrás (1999) cita para principios del siglo pasado la existencia de un amplio rango de valores (18 y 3290 mg kg⁻¹) de contenidos de Pt en los primeros 30 cm de los suelos pampeanos, cuando la agricultura extensiva en la Argentina estaba recién en sus inicios. Considerando esto, queda establecido que dicha variabilidad está asociada con la diferencia entre los materiales genéticos de los suelos (Vazquez, 2002).

En el presente estudio se midieron contenidos de Pt en el horizonte superficial de los cuatro suelos con uso agrícola que oscilaron entre 445 y 505 mg kg⁻¹. Estos valores son semejantes al promedio de 503 mg kg⁻¹ hallado para trece suelos (Hapludoles y Argiudoles) bajo producción agrícola de la provincia de Buenos Aires por Vazquez (2001). Diferentes autores reportan para otros suelos Argiudoles pampeanos bajo explotación agrícola contenidos de Pt para el horizonte superficial situados entre 381 y 612 mg kg⁻¹ (Vazquez, 1991; Vivas *et al.*, 2004; Zamuner *et al.*, 2004).

Las diferencias encontradas en los contenidos de Pt superficiales entre los suelos agrícolas y aquellos que no tuvieron un manejo productivo concuerda con lo observado por otros autores en cuanto al efecto depresor de la agricultura sobre el contenido de fósforo en los suelos (Vazquez, 1991; Buschiazzo *et al.*, 2000; Vazquez, 2001; Suñer *et al.*, 2001, Urioste *et al.*, 2002; Suñer *et al.*, 2005). De acuerdo con Tiessen *et al.* (1983) este efecto se

produce por medio de dos mecanismos principales: uno directo, mediante la remoción de fósforo por parte de los cultivos, y otro indirecto, que afecta el horizonte superficial, a través de una mayor pérdida de suelo debida a la erosión hídrica. Debe tenerse presente que, de los aproximadamente sesenta años de agricultura que tienen cuatro de los suelos evaluados, al menos cincuenta años transcurrieron con el empleo de labranzas convencionales. Michelena *et al.* (1989) midieron en suelos pertenecientes a la serie Villa Eloisa las pérdidas de suelo anuales provocadas por la erosión hídrica; los resultados indicaron, dependiendo del grado de pendiente y del tipo de manejo productivo, pérdidas de entre 0,1 y 52,9 t ha⁻¹. Suñer *et al.* (2001) citan también que en la pérdida de Pt en suelos bajo cultivo hay otros mecanismos involucrados, tales como la lixiviación de formas orgánicas de fósforo, la adsorción sobre óxidos de hierro y sobre sitios activos liberados por la descomposición de la materia orgánica, y la formación de minerales fosfatados de baja solubilidad.

Respecto a la distribución de Pt en todo el perfil, Boschetti *et al.* (2000) también observaron valores mínimos entre los 20 y 40 cm de profundidad en diferentes suelos de la provincia de Entre Ríos, situación que es atribuible al mayor consumo de fósforo por parte de las plantas en dicho sector del perfil de suelo. Fenton *et al.* (1967) citan un comportamiento similar del Pt en profundidad en diferentes perfiles de suelos ubicados en el estado de Iowa, Estados Unidos.

El empobrecimiento de Pt evaluado en el horizonte superficial y relacionado a la actividad productiva con escasa o nula fertilización fosfatada, se observó también en profundidad, principalmente hasta el inicio del horizonte C. Las plantas pueden desarrollar extensos sistemas radicales, un aspecto posiblemente relacionado a suelos que poseen baja concentración de nutrientes disponibles (Syers, Johnston y Curtin, 2008). Así, Lajtha (1994) encontró que, en lugar de mecanismos más eficientes en la absorción de fósforo, las plantas

adaptadas a bajos niveles de este nutriente desarrollan cambios en la estructura radical y una mayor eficiencia en la exploración del suelo. Si bien más de la mitad del total de las raíces de los cultivos anuales se concentra en las capas más superficiales del perfil, en suelos profundos bajo condiciones de buena humedad y clima templado, cultivos como maíz, sorgo, soja y trigo pueden desarrollar raíces más allá de 1,5 m (Gil, 2007), sustentando la posibilidad de que los mismos hayan extraído fósforo en todo el perfil de suelo a lo largo de los años.

Es importante destacar que los distintos perfiles presentaron valores similares de Pt en el horizonte C (600 a 700 mg kg⁻¹); este sería un valor muy similar al original de los sedimentos, dado que a esa profundidad los efectos de la pedogénesis son escasos.

Esta extracción de fósforo realizada por los cultivos en los suelos con manejo agrícola condujo además a que los mayores contenidos de Pt en los mismos se hayan medido en el horizonte inferior, en forma opuesta a lo observado en los suelos sin cultivar. La situación observada en cuanto a que el contenido de Pt en el horizonte superficial del Lote 6 representó el 70% del que se midiera en el Lote 5, estaría demostrando la extracción de fósforo realizada por el monte de eucalipto que el primero sostuvo por al menos durante 45 años.

Al igual que lo observado por Vazquez *et al.* (1991), la disminución de Pt registrada en el horizonte superficial de los suelos bajo agricultura respecto al Lote 5 (46,5%) fue mayor que la medida para el carbono orgánico (31,5%) y que, según estos autores, es atribuible a que el fósforo no es repuesto en forma natural, a diferencia de lo que sucede con el carbono orgánico y con el nitrógeno.

4.1.2 Fracciones de fósforo total

Si bien se puede generalizar expresando que el contenido de Po en el horizonte superficial oscila alrededor del 50% del Pt (Giuffré, 2005), el rango de valores que puede hallarse en la mayor parte de los suelos varía entre el 20% y el 90% (Stevenson, 1986).

El Po está asociado a la materia orgánica y a los restos animales y vegetales en descomposición, los que al ser degradados por los microorganismos del suelo liberan los compuestos fosfatados (Johnston, 2000). La cantidad, distribución, formas y dinámica del carbono orgánico y del Po del suelo están influenciadas por una serie de factores combinados, que incluyen el tipo de suelo y de vegetación, las condiciones del ambiente y el manejo antrópico (Turner *et al.*, 2005). Así, diferentes autores han mostrado como el contenido de Po aumenta con el avance del proceso de evolución de los suelos (Tiessen *et al.*, 1984; Sharpley *et al.*, 1987; Boschetti *et al.*, 2003) y con el incremento en el contenido de arcilla (Harrison, 1987).

Los contenidos de Po medidos en el horizonte superficial en los seis suelos evaluados representaron entre el 30% (Lote 5) y el 47% (Lote 2) del Pt. En concordancia con lo expresado en el párrafo anterior, son valores intermedios entre los hallados por Turner *et al.* (2003) en dieciocho suelos de la región semiárida del oeste estadounidense (3-36%) para los primeros 30 cm de suelos ligeramente evolucionados y a los reportados por Boschetti *et al.* (2000) para ocho suelos entrerrianos (56-75%). Por su parte, Vazquez (2001) midió un rango de valores de Po más amplio en trece suelos Argiudoles y Hapludoles de la provincia de Buenos Aires con historia agrícola prolongada, que varió entre el 28% y 74% del Pt.

La disminución del Po conjuntamente con la de carbono orgánico en profundidad también fue reportado por Boschetti *et al.* (2000) en su análisis de contenidos de fósforo para suelos de la provincia de Entre Ríos. No obstante, la relación entre el Po y el carbono orgánico tienden a incrementarse con el aumento de profundidad dentro del perfil (Harrison, 1987), aspecto observado en los seis perfiles evaluados.

Según Berardo (2003), el empobrecimiento de fósforo de los suelos pampeanos debido a la actividad productiva debe ser atribuido a la pérdida de la fracción orgánica. Siguiendo

esta misma línea, Tiessen *et al.* (1982) determinaron en suelos arcillosos y franco-limosos que las pérdidas de fósforo debidas a la actividad agrícola se explican por la disminución de la fracción orgánica. En el presente estudio, si bien los menores contenidos de Pt en el horizonte superficial en los suelos con historia agrícola se corresponden con pérdidas tanto de las formas orgánicas como inorgánicas de fósforo, la disminución de esta última fracción fue más marcada.

El Pocl es la fracción que no es extraída como fósforo orgánico e inorgánico, y que representa formas poco disponibles para las plantas en el corto plazo (Galantini y Rosell, 1997). La cuantificación de esta fracción de fósforo en el horizonte superficial permitió agrupar a los seis suelos evaluados en dos grupos, sin importar la historia productiva. En efecto, en el grupo formado por los Lotes 1 y 5 el Pocl promedio fue de 183 mg kg^{-1} , mientras que para el resto fue sensiblemente menor ($70,5 \text{ mg kg}^{-1}$).

En profundidad, la proporción de Pocl respecto al Pt tuvo un comportamiento muy diferente entre perfiles, de modo tal que no se pudo determinar una tendencia. Este aspecto no concuerda con lo observado por Boschetti *et al.* (2000) en ocho suelos de la provincia de Entre Ríos, donde observaron un aumento en porcentaje del Pocl respecto al Pt con el aumento de la profundidad.

4.1.3 Fósforo extractable

Estudios previos llevados a cabo en suelos pertenecientes a lotes agrícolas situados en el distrito Villa Eloisa indicaron, para el horizonte superficial, contenidos de Pe menores en estos suelos respecto a otros suelos ubicados en distritos aledaños (Novello y Quintero, 2006) y disminuciones en sus valores respecto a lotes vírgenes o poco alterados ubicados dentro del mismo distrito (Michelena *et al.*, 1989). Por su parte, Suñer *et al.* (2004) en la región semiárida pampeana evaluaron disminuciones significativas del Pe tras doce años de cultivo

sin agregado de fertilizante fosfatado respecto a suelos de referencia sin cultivar (Pe inicial de 39 mg kg^{-1}).

Si bien en los cuatro suelos con historia agrícola pudo observarse la existencia de dos grupos definidos (Lotes 1 y 2 con Pe promedio cercano a 10 mg kg^{-1} y Lotes 3 y 4 con contenidos de Pe superficiales superiores a los 20 mg kg^{-1}), los suelos que no tuvieron uso productivo en los últimos sesenta años mostraron contenidos de Pe muy superiores (133 y $57,7 \text{ mg kg}^{-1}$).

Este marcado descenso de los contenidos de Pe debidos a la actividad productiva se visualiza además a través de importantes disminuciones relativas del Pe respecto al Pt. En los suelos agrícolas, el Pe en promedio representó el 4,1% del Pt, mientras que en los dos suelos sin uso productivo representó el 11,9%. Teniendo en cuenta que el Pe determinado por el método Bray y Kurtz N° 1 es de origen inorgánico (Suñer *et al.*, 1999), se puede observar que gran parte de la pérdida del Pi medida está relacionada con la disminución en el valor de Pe en los suelos con uso agrícola. Vazquez *et al.* (1991) también determinaron en suelos Argiudoles típicos de Carcarañá (Santa Fe) pérdidas de Pe debidas a la agricultura; sin embargo, mientras el Pe de un suelo de referencia representó el 13,4% del Pt, en suelos con historia agrícola el contenido de Pe se mantuvo en valores cercanos al 10% respecto al Pt.

En cuanto a la distribución del Pe en profundidad, se pudo comprobar que el uso agrícola de los suelos no solamente disminuyó su contenido en los primeros 40 cm sino que también modificó su patrón de distribución dentro del perfil.

4.2 Experimento a campo

4.2.1 Rendimientos de los cultivos durante el ciclo de rotación

Si bien la respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende de distintos aspectos, relacionados con el tipo de suelo, del cultivo y de manejo del fertilizante, el nivel de Pe medido a 0-20 cm de profundidad es un importante factor a considerar (García, 2003). De acuerdo con Ferraris y Couretot (2003), en suelos del norte de la provincia de Buenos Aires y del sur de Santa Fe, se pueden esperar aumentos de rendimientos en el cultivo de soja cuando el nivel de Pe en los primeros 20 cm de suelo es inferior a 12 mg kg^{-1} . Gutiérrez Boem *et al.* (2006), luego de analizar los resultados sobre la respuesta del cultivo de soja al agregado de fósforo de dos redes de experimentos realizados en la provincia de Buenos Aires, en el sudeste de Córdoba y en el sur de Santa Fe, obtuvieron un modelo que indicó que, con contenidos de Pe de $8,0 \text{ mg kg}^{-1}$ y $12,4 \text{ mg kg}^{-1}$ se alcanzaría el 90% y 95% respectivamente del rendimiento relativo. Respecto a los cultivos de maíz y de trigo, para suelos ubicados en el norte de la provincia de Buenos Aires y el sur de Santa Fe, García (2003) reportó a través de una recopilación de datos provenientes de diferentes experiencias, valores críticos de Pe a 0-20 cm de profundidad de $13-14 \text{ mg kg}^{-1}$.

Estos datos concuerdan con la relación establecida por Hanway y Olson (1980) entre el contenido de Pe del suelo y el rendimiento relativo de estos cultivos, donde puede interpretarse que la soja es el cultivo menos sensible ante deficiencias de fósforo, siguiéndole en orden creciente de sensibilidad el maíz y el trigo. Entonces, los niveles críticos de Pe en suelo, debajo de los cuales pueden esperarse respuestas significativas al agregado de fósforo, son menores para el cultivo de soja respecto a otros cultivos, tales como maíz y trigo (García, 2005).

De acuerdo con el nivel de Pe medido al inicio de la experiencia ($11,5 \text{ mg kg}^{-1}$), y al finalizar el primer ($8,0 \text{ mg kg}^{-1}$) y segundo año ($6,3 \text{ mg kg}^{-1}$) de rotación, y teniendo en cuenta aquellos niveles de Pe críticos citados por la bibliografía, debería esperarse que la fertilización fosfatada haya incrementado los rendimientos de los cultivos implantados. Sin embargo, solamente en trigo se midieron incrementos significativos de rendimiento frente a la fertilización fosfatada, habiéndose evaluado una eficiencia de uso del fertilizante fosfatado agregado a la siembra de 24,9 y 45,7 kg grano/kg P para los tratamientos P27 y P13 respectivamente, y de 5,1 kg grano/kg P para el fertilizante agregado el año anterior (P81).

Tanto en maíz como en ambos cultivos de soja no se determinaron incrementos significativos ante la adición de fósforo, con lo cual quedó evidenciado que tres años de rotación aún no fueron suficientes para poder determinar diferencias entre este tipo de evaluaciones y aquellas que contemplan un solo ciclo de cultivo. Considerando que el maíz fue implantado al inicio de la experiencia, momentos en los cuales no era posible esperar efectos residuales del fósforo agregado, fue la soja el cultivo que no presentó respuestas frente a un hipotético efecto residual del fertilizante, teniendo en cuenta además que la mayor parte del fósforo agregado remanente permaneció bajo formas de alta y media disponibilidad para las plantas (P-MIA, Pi- NaCO_3H y Pi- NaOH).

Entre otras experiencias de media y larga duración llevadas a cabo en el país puede citarse a Berardo y Grattone (1998), donde tras siete años de monocultivo de trigo en el sudeste bonaerense encontraron una eficiencia de uso acumulada de fósforo que varió entre 70 y 164 kg grano/kg P. Por su parte, en once experiencias instaladas en el sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba, García *et al.* (2007) luego de seis años determinaron eficiencias de uso del fósforo agregado de 11 y 43 kg grano/kg P en maíz, de 12 y 21 kg grano/kg P en trigo y entre 5 y 7 kg grano/kg P en soja. En cambio, Vivas *et al.* (2007) en una experiencia instalada

en el centro de la provincia de Santa Fe, si bien midieron tras tres años de fertilización fosfatada aumentos significativos de rendimiento en trigo y maíz, las respuestas medidas en soja 1ª y 2ª no tuvieron significancia estadística.

En experiencias de duración anual llevadas a cabo en lotes ubicados en el centro sur de la provincia de Santa Fe, generalmente se pueden observar aumentos significativos en el rendimiento de trigo debido a la fertilización fosfatada, mientras que en maíz y en soja los resultados obtenidos son más erráticos. Por ejemplo, Capurro *et al.* (2005) determinaron en trigo, como promedio de dos sitios (Pe de 9,0 mg kg⁻¹ y 5,0 mg kg⁻¹), eficiencias de uso del fósforo agregado ubicadas entre 7 y 21kg grano/kg P, dependiendo de la cantidad de fertilizante nitrogenado y azufrado empleado. Por su parte, también en trigo, Gerster y Novello (2003) evaluaron un incremento de rendimiento de 369 kg ha⁻¹ como promedio de dos sitios (Pe de 14,3 mg kg⁻¹ y 11 mg kg⁻¹). En tanto Gerster *et al.* (2005) para dos sitios (Pe de 11,5 mg kg⁻¹ y 8 mg kg⁻¹) midieron aumentos de rendimiento por unidad de P aplicada situados entre 13 y 38 kg de grano.

Como ejemplo de experiencias en maíz, puede citarse a Capurro *et al.* (2004, 2007) donde para ocho sitios (Pe entre 6,0 mg kg⁻¹ y 17 mg kg⁻¹), y ante el agregado de diferentes dosis de nitrógeno, solamente hallaron respuestas significativas fertilizando con 20 kg P ha⁻¹ en tres sitios, para los niveles de Pe más altos y cuando se agregó la menor dosis de nitrógeno (60 kg ha⁻¹). Por su parte y también en maíz, Prystupa *et al.* (2004) para cuatro sitios (Pe entre 6,3 mg kg⁻¹ y 21,1 mg kg⁻¹) midieron aumentos de rendimiento ante el agregado de 30 kg P ha⁻¹ ubicados entre 250 y 1500 kg de grano ha⁻¹. Prystupa *et al.* (2006) evaluando finalmente dieciocho experimentos instalados en el norte de la provincia de Buenos Aires y en el centro sur de Santa Fe, señalaron que no hubo en realidad una clara asociación entre el nivel de Pe y la respuesta a la fertilización fosfatada en maíz.

En soja, algunas experiencias locales (departamentos Iriondo y Belgrano) indican una tendencia de ausencia de respuesta ante la fertilización fosfatada, aún incluso con contenidos de Pe inferiores al nivel crítico citado por la bibliografía. Por ejemplo, en soja de segunda, Gerster y Novello (2003) no hallaron respuestas significativas en dos sitios (Pe de $11,0 \text{ mg kg}^{-1}$ y $14,3 \text{ mg kg}^{-1}$) al agregado de fósforo realizado tanto previamente a la siembra del trigo antecesor como antes de la siembra del cultivo de soja. Por su parte, el aumento de rendimiento en soja del 17% debido a la fertilización fosfatada medido por Salvagiotti *et al.* (2004) fue en una experiencia instalada en un suelo con Pe de 4 mg kg^{-1} .

4.2.2 Evolución del fósforo extractable durante los tres primeros años de duración del experimento

La declinación en la parcela P0 del contenido de Pe en los primeros 20 cm de profundidad, a razón de $1,2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se pudo explicar por el importante ΔP negativo calculado ($-70,6 \text{ kg ha}^{-1}$). Vivas *et al.* (2008) en un experimento instalado en el centro de la provincia de Santa Fe (Pe inicial de 11 mg kg^{-1}) y García *et al.* (2007) en el sur de de la misma provincia (promedio de seis sitios) también midieron disminuciones de Pe en parcelas testigo sin fertilizar, de $0,17 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $1,31 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respectivamente.

En contraposición a lo mencionado en el párrafo anterior, diferentes autores no observaron cambios en el contenido de Pe en la capa superficial de suelo de parcelas testigo sin agregado de fósforo. Tal es el caso de Berardo y Grattone (1998) tras ocho años de trigo (Pe inicial de 10 mg kg^{-1}), Berardo y Marino (2000) luego de cuatro años de alfalfa (Pe inicial de 11 mg kg^{-1}), ambos en Balcarce, Selles *et al.* (1995) en Saskatchewan (Canadá) después de 24 años de rotaciones de cultivos y Zhang *et al.* (2004) en Montreal (Canadá) (Pe inicial medido por Mehlich-3 de 32 mg kg^{-1}) después de diez años de maíz continuo.

Zhang *et al.* (2004) consideran que el nivel de Pe se puede sostener sin el agregado de fósforo a través de la mineralización de los rastrojos y del Po, por mecanismos de desorción y disolución del Pi nativo y por el reciclado de fósforo a partir de profundidades fuera del alcance del muestreo. En relación a este último aspecto, la existencia al tercer año en la parcela P0 de un menor contenido de Pe con significancia estadística a 20-40 cm de profundidad, podría indicar una extracción de fósforo mayor por parte de los cultivos para suplir la deficiencia del elemento presente a nivel superficial.

La existencia de estos y de otros resultados que muestran tanto una disminución en el contenido de Pe como la ausencia de cambios en el mismo luego de varios años de agricultura

sin agregado de fósforo, estarían relacionados con el tipo de suelo y con el nivel inicial de Pe (Zhang *et al.*, 2004).

Respecto a los incrementos medidos en el contenido de Pe en los primeros 20 cm de suelo al final del tercer año en los tratamientos P13, P27 y P81, los mismos se produjeron aún cuando el ΔP final fue negativo o ligeramente positivo (entre $-40,4 \text{ kg ha}^{-1}$ y $1,3 \text{ kg ha}^{-1}$). En los resultados reportados por Vivas *et al.* (2008) se puede observar también tras siete años este aumento del Pe en parcelas donde el balance de fósforo fue negativo. La misma situación fue observada por Gelderman y Gerwing (2003) en un experimento instalado en South Dakota (EE.UU.). En el mismo y luego de cinco años de fertilizaciones fosfatadas, se midieron incrementos de Pe (medidos por el método Olsen) aún cuando la extracción de fósforo por parte de los cultivos fue mayor que el adicionado. Los autores sugieren, si bien la razón no está totalmente establecida, que los cultivos podrían estar translocando fósforo desde partes más profundas del perfil hacia la superficie del suelo o la posibilidad de que mayor cantidad de fósforo pudiera encontrarse en formas medibles por el método de extracción utilizado.

En cambio, los incrementos de Pe medidos por García *et al.* (2007) de 11 a 24 mg kg^{-1} y de 25 a 38 mg kg^{-1} en diferentes rotaciones se presentaron en parcelas fertilizadas con dosis de fósforo superiores en un 10% a la extracción en granos.

Las diferencias significativas observadas respecto al contenido de Pe a 40-60 cm de profundidad entre las parcelas P13 y P27 respecto a P81 podrían también indicar una mayor extracción de fósforo en profundidad por los cultivos; esto permitiría que el Pe en superficie no haya disminuido o incluso haya aumentado. De todos modos, este aspecto no resuelve el incremento de Pe en la parcela P81 a pesar de haberse calculado un ΔP al final del tercer año de sólo $1,7 \text{ kg ha}^{-1}$.

La cantidad de fósforo necesaria para aumentar el contenido de Pe en 1 mg kg^{-1} en los primeros 20 cm de suelo fue muy similar para cada uno de los tres años, oscilando entre 9,1 y $9,7 \text{ kg P ha}^{-1}$. Estos valores son similares al medido en un suelo de Tandil ($9,4 \text{ kg P ha}^{-1}$) y superiores a las evaluadas para tres suelos argiudoles ubicados en la provincia de Córdoba en fertilizaciones fosfatadas en trigo ($4,0$ a $5,7 \text{ kg P ha}^{-1}$) (Echeverría *et al.*, 2004). Por su parte Berardo *et al.* (2000) encontraron, tras cuatro años de haber agregado por única vez 100 kg P ha^{-1} en una pastura, que la cantidad de fósforo necesaria para incrementar el Pe en 1 mg kg^{-1} aumentó progresivamente de $4,5$ a $17,5 \text{ kg P ha}^{-1}$ año tras año.

El cálculo de la cantidad de fósforo a agregar por unidad de incremento del Pe sin tener en cuenta la extracción de fósforo por los cultivos, considerando solamente la cantidad de fósforo agregada y el cambio en el valor de Pe, puede arrojar resultados dispares entre distintos experimentos. En este caso, emplear el valor neto de fósforo agregado, es decir la diferencia entre el fósforo adicionado y el fósforo removido por el cultivo, sería de mayor utilidad (Zhang *et al.*, 2004). Sin embargo, debe tenerse presente que en los tratamientos donde se agregó la mayor dosis de fertilizante (P27 y P81) solamente se cubrieron las necesidades de extracción de fósforo por parte de los cultivos, con lo cual el fósforo neto agregado fue cercano a cero.

La necesidad de incrementar en un suelo la dosis de fósforo para elevar el contenido de Pe indica una mayor capacidad buffer de fósforo (Echeverría *et al.*, 2004). Esta capacidad buffer de fósforo o poder amortiguador del suelo tiene entonces un efecto directo sobre la cantidad de fertilizante fosfatado que pasará a formas no disponibles para las plantas, y por lo tanto, dependiendo del tipo de suelo, la cantidad de fósforo que habrá que aplicar para alcanzar un determinado valor de Pe será diferente (Quintero, 2003).

En diferentes suelos de la pampa ondulada se llevaron a cabo determinaciones de las dosis teóricas necesarias para elevar el contenido de Pe en los primeros 20 cm en 1 mg kg^{-1} , donde para dos suelos provenientes del departamento Iriondo (Santa Fe) se calcularon valores de 4,13 y $4,49 \text{ kg P ha}^{-1}$ (Cabello *et al.*, 2004; Rubio *et al.*, 2006). Es conocido que la capacidad reguladora de fósforo se incrementa con el contenido de arcilla, determinando una mayor retención del fósforo agregado (Rubio *et al.*, 2004), pero además, esta capacidad buffer varía enormemente con la agregación del suelo, donde suelos con alta proporción de agregados pequeños tienden a fijar más fósforo (Dobermann *et al.*, 2002). Por tanto, debería tenerse presente que la medición de estos requerimientos de fertilización fosfatada puede tener un limitado valor cuando se emplean muestras de suelo molidas (Dobermann *et al.*, 2002). Además, se destaca que estos valores experimentales se obtuvieron en suelos sin cultivar, empleando fertilizantes no comerciales uniformemente distribuidos (Rubio *et al.*, 2004).

Debe considerarse también que los suelos bien provistos de fósforo poseen su capacidad reguladora de fósforo cubierta en una mayor proporción que aquellos menos provistos, con lo cual la dosis de fósforo necesaria para lograr el mismo incremento de Pe es menor (Cabello *et al.*, 2004).

4.2.3 Cambios en las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo del suelo

Las fracciones más importantes en cuanto a contenido absoluto en los primeros 20 cm de suelo fueron el P-Residual y el Pi-HCl, siguiéndole en orden de importancia el Po-NaOH, hecho que concuerda con las mediciones realizadas por Boschetti *et al.* (2003) y Zamuner *et al.* (2004) en suelos Argiudoles de Entre Ríos y de Buenos Aires. Por su parte, en cuatro suelos Hapludoles bonaerenses, Faggioli *et al.* (2004) midieron que la fracción inorgánica más importante fue el P-HCl, mientras que el Po-NaOH fue la fracción orgánica más relevante.

De acuerdo con Sharpley *et al.* (1987), con el aumento en el grado de evolución de los suelos se produce un aumento de las fracciones de fósforo extraídas con hidróxido de sodio y asociadas con el aluminio y el hierro, en detrimento de las formas unidas al calcio extractables con ácido clorhídrico. En suelos donde el porcentaje de calcio intercambiable es superior al 70%, aumenta marcadamente esta última fracción (Boschetti *et al.*, 2003).

Fracciones inorgánicas de fósforo a 0-20 cm de profundidad:

En general diferentes autores concuerdan en que el fósforo extraído con resinas o membranas de intercambio aniónico (P-MIA) es una fracción de fósforo de alta disponibilidad para las plantas (Guo *et al.*, 2000); durante su proceso de extracción no se modifica químicamente la solución del suelo (Tiessen y Moir, 1993). Por su parte, el Pi-NaCO₃H es una fracción de probable disponibilidad para las plantas, ya que los cambios químicos que se producen en su determinación son menores y serían en parte representativos de la actividad radical (Tiessen y Moir, 1993). De hecho, Sharpley *et al.* (1987) determinaron una estrecha relación entre estas dos fracciones y el fósforo extraído por el método Bray y Kurtz N° 1 en suelos de medio y alto grado de evolución.

Respecto al Pi-NaOH, se considera que es una fracción de más lenta disponibilidad para los vegetales a través de mecanismos de desorción (Tiessen *et al.*, 1984). Según Beck y Sánchez (1994) se presume que el Pi-NaOH puede contribuir al Pe a través del equilibrio con el P-MIA, mientras que Zhang *et al.* (2004) indican que esta fracción es capaz de suministrar fósforo disponible cuando la absorción de los cultivos agota el Pi-NaCO₃H.

De esta forma se puede explicar la estrecha relación medida entre las fracciones más lábiles de fósforo inorgánico y el Pe; además, las mismas fueron las más sensibles a los cambios ante la adición de fertilizante fosfatado. En efecto, al final del tercer año, los contenidos de P-MIA, de Pi-NaCO₃H, y en menor medida de Pi-NaOH, fueron mayores en todos los tratamientos fertilizados respecto al testigo sin fertilizar en magnitudes que variaron entre el 26,5% y el 87,1%, dependiendo de la fracción de fósforo y de la dosis de fertilizante agregada. Es decir, que estas fracciones inorgánicas de fósforo fueron el principal destino del fertilizante aplicado remanente. Conociendo que la actividad productiva sustentada en una escasa o nula fertilización fosfatada disminuye las reservas de fósforo de los suelos, y que los cultivos ante deficiencias de este nutriente lo extraen a partir de estas fracciones más lábiles, Vazquez (2001) cita que el fósforo que aún conservan estos suelos luego de muchos años de agricultura continua es biológicamente menos disponible.

Diferentes autores concluyeron en términos similares. Por ejemplo, Boschetti *et al.* (2001) determinaron, para un suelo Vertisol, que el 70% del fósforo agregado en forma de superfosfato triple de calcio (0-46-0) permaneció en el suelo como P-MIA y Pi-NaCO₃H, mientras que para un suelo Inceptisol este valor superó el 80%. Por su parte, Schmidt *et al.* (1996) determinaron en dos suelos Ultisoles que estas tres fracciones de mayor labilidad representaron fuentes de fósforo para los cultivos bajo condiciones de deficiencia de fósforo,

y en una de las situaciones analizadas destino del fertilizante excedente, concluyendo además que existe una fuerte relación entre las mismas.

En igual sentido, Blake *et al.* (2003) determinaron en suelos cultivados sin adición de fósforo que los mayores cambios se produjeron en las fracciones de fósforo extraídas con resina, NaCO_3H y NaOH , situación que sugiere que el fósforo extraído bajo estas fracciones es de fácil disponibilidad para los cultivos o que potencialmente puede llegar a serlo.

Guo *et al.* (2000) también midieron en diferentes suelos disminuciones de estas tres fracciones de fósforo inorgánico debidas a catorce años de cultivo, aunque a magnitudes y tasas diferentes, siendo el Pi-NaOH la fracción menos sensible de las tres.

Para suelos Argiudoles argentinos, Mestelán *et al.* (1998) encontraron que si bien el agregado de fósforo aumentó significativamente tanto el contenido de P-MIA y de Pe como de formas inorgánicas más estables, las dos primeras lo hicieron en mayor magnitud, mientras que Capozzi *et al.* (2006) midieron aumentos significativos en el P-MIA y el $\text{Pi-NaCO}_3\text{H}$ debido a la fertilización fosfatada, remarcando que ambas fracciones son fuente importante de fósforo para las plantas en el corto plazo. Vivas *et al.* (2004), en un suelo Argiudol de la provincia de Santa Fe, observaron cambios significativos solamente en el P-MIA y en las fracciones orgánicas e inorgánicas extraídas con hidróxido de sodio.

También Zheng *et al.* (2002) evaluaron que los mayores incrementos debido al agregado de una fuente de fósforo inorgánico se produjeron en las fracciones P-MIA, $\text{Pi-NaCO}_3\text{H}$ y Pi-NaOH . En dicho estudio la variación del P-MIA se derivó en un 97% de la adición de fósforo inorgánico, mientras que el $\text{Pi-NaCO}_3\text{H}$ estuvo también directamente afectado por el fósforo agregado e indirectamente a través del Pi-NaOH . Esta última fracción actuó tanto como destino del fertilizante aplicado como fuente para la fracción $\text{Pi-NaCO}_3\text{H}$.

Por su parte, Richards *et al.* (1995) midieron luego diez años de fertilización fosfatada que los incrementos significativos se produjeron en estas mismas fracciones inorgánicas de fósforo.

Para un suelo Oxisol, Buehler *et al.* (2002) concluyeron también que ante fertilizaciones fosfatadas regulares, el fósforo se acumula en las fracciones P-MIA, Pi-NaCO₃H y Pi-NaOH, mientras que las plantas deberían tomarlo de estas mismas fracciones.

En contraposición a estos resultados, Xhang *et al.* (2004) no encontraron cambios en las fracciones Pi-NaCO₃H y Pi-NaOH luego de diez años de cultivo de maíz sin adición de fósforo, indicando que la producción se sostuvo a través del fósforo proveniente tanto de profundidades del perfil más allá de las alcanzadas por el muestreo como de fracciones orgánicas de fósforo vía mineralización. Pero ante adiciones de fósforo, el fertilizante residual se transformó rápidamente en Pi-NaCO₃H y lentamente pasó a formas evaluadas como Pi-NaOH.

En cuanto al Pi-HCl, se considera que es una fracción de fósforo de muy baja disponibilidad para las plantas, representada por los minerales primarios de fósforo tales como la apatita (Tiessen y Moir, 1993). No obstante, según citan Guo *et al.* (2000), en estudios bajo invernadero o en experimentos a largo plazo se han determinado disminuciones en su contenido como consecuencia de la extracción de fósforo por parte de los cultivos.

En el presente estudio, luego de tres años, se midieron aumentos de poca magnitud en esta fracción debido al agregado de fósforo (entre 4,1% y 7,5%). Para igual período de tiempo, Capozzi *et al.* (2006) concluyeron que, si bien el contenido de P-HCl aumentó ligeramente con la fertilización fosfatada, esta fracción no aportó a la disponibilidad de fósforo. En los resultados reportados por Schmidt *et al.* (1996), Zhang *et al.* (2004) y Vivas *et al.* (2004) esta fracción tampoco fue sensible al agregado de fósforo.

En cambio, Guo *et al.* (2000) luego de catorce años de agricultura encontraron para el grupo de suelos menos evolucionado que analizaron (dos suelos Vertisoles y un suelo Molisol), que el P-HCl disminuyó supuestamente por su conversión hacia formas más disponibles, como P-MIA y el $Pi-NaCO_3H$, con lo cual dicha fracción actuó como buffer de fósforo disponible.

La conversión del fósforo remanente en el suelo hacia formas estables, tales como el P-HCl, es un proceso lento, con lo cual una gran proporción del fósforo agregado permanecerá disponible para los cultivos durante los años siguientes de su aplicación (Zhang *et al.*, 2004).

Fracciones orgánicas de fósforo a 0-20 cm de profundidad:

Al finalizar el tercer año, los cambios medidos en las fracciones de fósforo orgánicas extraídas con bicarbonato de sodio e hidróxido de sodio fueron de mucha menor magnitud que los observados en las fracciones inorgánicas, e incluso en algunos tratamientos tuvieron diferente sentido. El $Po-NaOH$ registró un aumento ubicado entre el 5,2% y el 9,9%, denotando que esta fracción fue también destino del fósforo excedente, mientras que el $Po-NaCO_3H$ presentó disminuciones en dos tratamientos fertilizados, fundamentalmente en P81 (-8,1%).

Según Guo *et al.* (2000) las fluctuaciones irregulares registradas por las fracciones orgánicas de fósforo pueden relacionarse con diferencias interanuales en la actividad microbiana, o pueden deberse a aspectos relacionados con la preparación de la muestra de suelo previa a su análisis. Los mismos autores concluyeron que el Po puede ser importante en la fertilidad fosfatada en suelos no fertilizados o en suelos con elevados contenidos de materia orgánica; en suelos minerales no parece afectar significativamente a la disponibilidad de fósforo.

Además, los cambios que han podido observarse en el contenido de P_o-NaCO_3H en suelos franco arenosos puede atribuirse a los bajos contenidos de arcilla y a su consecuente baja capacidad de adsorción de fósforo (Blake *et al.*, 2003). En igual sentido, Faggioli *et al.* (2004) determinaron que las fracciones orgánicas de fósforo fueron importantes para cubrir los requerimientos de este nutriente por parte de los cultivos en suelos con predominio de arena y bajo contenido de fósforo.

Si bien los cambios que pueden medirse en las fracciones orgánicas de fósforo son generalmente pequeños en relación al tamaño total de las mismas, tras varios años de observaciones pueden llegar a detectarse cambios significativos (Picone y Zamuner, 2002).

Fracción residual de fósforo a 0-20 cm de profundidad:

La metodología de fraccionamiento propuesta por Hedley *et al.* (1982) no diferencia entre fracciones orgánicas e inorgánicas dentro del P-Residual, no obstante lo cual puede inferirse que la mayor parte del mismo contiene P_o (Zamuner *et al.*, 2004).

Respecto a la labilidad de esta fracción, Guo *et al.* (2000) determinaron en suelos Oxisoles y Ultisoles que el P-Residual no aportó a la disponibilidad de fósforo ya que la misma se acumuló tras catorce años de extracción por parte de los cultivos; en cambio, para suelos menos evolucionados evaluaron su disminución en respuesta a la absorción de fósforo por los cultivos. Zhang y MacKenzie (1997) determinaron que la variación que muestra el P-Residual tras un largo período de tiempo de fertilización se debe a la presencia de compuestos orgánicos. De acuerdo con Capozzi *et al.* (2006), el P-Residual es un material orgánico e inorgánico muy estable que no es afectado en el corto plazo.

En el presente estudio, luego de tres años de fertilización y remoción de fósforo por parte de los cultivos, el contenido de P-Residual fue prácticamente el mismo en todos los tratamientos, pudiéndose solamente observar una ligera disminución del orden del 1,6% -

2,1% cuando se adicionó fósforo. Vivas *et al.* (2004), para igual período de tiempo, también determinaron que el P-Residual fue una fracción muy poco sensible ante el agregado o remoción de fósforo, al menos durante el lapso de tiempo considerado. En igual sentido, Boschetti *et al.* (2001) evaluaron que el agregado de diferentes tipos de fertilizantes fosfatados aumentó los niveles de fósforo en todas las fracciones a excepción del P-Residual.

Para períodos de tiempo más largos, diferentes autores han arribado a resultados contrapuestos. Por ejemplo, Zheng *et al.* (2002) luego de catorce años no midieron cambios en esta fracción ante fertilizaciones fosfatadas. Por su parte, Zhang *et al.* (2004) determinaron que diez años de maíz continuo sin fertilización fosfatada provocaron la disminución del P-Residual, con lo cual la mineralización de esta fracción, además del Po-NaOH, contribuyó probablemente con el suministro de fósforo para el cultivo. Estos últimos autores midieron un comportamiento diferente del P-Residual ante diferentes dosis de fósforo; cuando se adicionaron $44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ el P-Residual tendió a disminuir, mientras que a dosis elevadas ($132 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) aumentó en forma lineal, explicándose esto último por el mayor aporte de residuos a través de los incrementos de rendimientos de los cultivos.

Fracciones de fósforo a mayores profundidades:

Existe muy poca información respecto a los cambios que registran las diferentes fracciones de fósforo ante el agregado o remoción de fósforo a profundidades más allá de los 20 cm. Por ejemplo, Zheng *et al.* (2002) comprobaron que los cambios registrados por las diferentes fracciones de fósforo a la profundidad de 30 – 90 cm fueron mucho menores que los determinadas más superficialmente, donde incluso tras ocho años de ciclos agrícolas el contenido de Pt no fue afectado.

Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan parcialmente con esto, solamente para las fracciones inorgánicas, aspecto que podría estar relacionado con la limitada movilidad del fósforo agregado.

Sin embargo, el fósforo orgánico extraído con hidróxido de sodio y con bicarbonato de sodio experimentó cambios mayores respecto a los medidos en superficie, observándose además diferencias importantes para una misma fracción de acuerdo con la cantidad de fósforo agregada. A excepción del tratamiento P13 a 20 – 40 cm de profundidad y del tratamiento P27 a 40 – 60 cm de profundidad, el fósforo remanente proveniente del fertilizante pareció haberse acumulado en estas profundidades en formas orgánicas más que en formas inorgánicas.

5. CONCLUSIONES

Los efectos de la actividad agrícola realizada con escasa o nula fertilización fosfatada durante más de sesenta años, se corresponden con una disminución en el contenido de Pt y de sus fracciones orgánicas e inorgánicas hasta al menos el metro de profundidad en los suelos ubicados en el distrito Villa Eloisa.

Sin embargo, el impacto del agregado de fósforo en el rendimiento de los cultivos de maíz, trigo y soja en un suelo con contenido de Pe por debajo del umbral crítico fue diferente según el cultivo, siendo solamente en trigo donde se determinaron incrementos con significancia estadística. Además, tres años de fertilización fosfatada produjeron un aumento en el contenido de Pe medido a 0-20 cm de profundidad, en una magnitud que dependió de la dosis de fósforo agregada y del momento de su aplicación. Como resultado de no agregar fósforo y de la extracción realizada por los cultivos, el contenido de Pe disminuyó significativamente.

El fósforo proveniente del fertilizante y que no fue absorbido por los cultivos se acumuló principalmente en las fracciones inorgánicas más lábiles (P-MIA, Pi-NaCO₃H y Pi-NaOH), lo que indica que este fósforo remanente queda en formas disponibles para los cultivos siguientes.

Bajo la rotación de cultivos llevada a cabo, se ha demostrado que el balance de fósforo es negativo con agregados anuales inferiores a los 27 kg P ha⁻¹. De continuar esta tendencia, se agravarán las deficiencias del elemento en los suelos del área en estudio, con lo cual serán de esperar respuestas positivas a la fertilización fosfatada en todos los cultivos.

Finalmente, se resalta la necesidad de continuar con la experiencia por varios años más para poder determinar con mayor certeza los efectos residuales de la fertilización fosfatada

sobre los rendimientos de los cultivos y sobre las fracciones de fósforo menos lábiles (P-HCl, P-Residual).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Barber S A. 1962. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.* 93: 39-49.
- Beck M, Sánchez P. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci.* 34: 1424-1431.
- Benavides R, Boschetti G, Quintero C, Barrera R, González A. 2000. Evaluación de la fertilidad fosfatada de los suelos para los principales cultivos extensivos de Entre Ríos. *Ciencia, Docencia y Tecnología* 21: 221-266.
- Berardo A, Grattone F. 1998. Efecto de la aplicación de fósforo y su residualidad sobre la producción de trigo (8 años). *Actas IV Congreso Nacional de Trigo, Mar del Plata.*
- Berardo A, Marino M A. 2000. Efecto de la fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de P y su relación con la producción de forraje en molisoles del sudeste bonaerense. *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.*
- Berardo A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. Simposio “El fósforo en la agricultura Argentina”, INPOFOS Cono Sur, Rosario. 38-45.
- Blake L, Johnston A, Poulton P, Goulding K. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil*, Vol 254 N° 2: 245-261.
- Boschetti N, Valenti R, Vesco C, Sione M. 2000. Contenidos de fósforo total en suelos con características vérticas de la provincia de Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía. UBA.* 20(1): 53-58.

- Boschetti N, Quintero C, Benavidez R, Giuffré L. 2001. Destino del fósforo proveniente de diferentes fuentes de fertilizante fosfatado en suelos de la provincia de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria. UNER.* 5: 23-30.
- Boschetti N, Quintero C, Benavidez R, Giuffré L. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la mesopotamia argentina. *Ciencia del Suelo Vol. 21 N° 1:* 1-8.
- Bowman R A, Cole C V. 1978. Transformations of organic phosphorus substances in soil as evaluated by sodium-bicarbonate extraction. *Soil Sci.* 125: 49-54.
- Bray R H, Kurtz L. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Buehler S, Oberson A, Rao I, Friesen D, Frossard E. 2002. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 868–877.
- Buschiazzo DE, Hevia GG, Urioste AM, Hepper EN. 2000. Cultivation effects on phosphate forms and sorption in loess-soils of Argentina. *Soil Sci.* 165: 427-436.
- Cabello M, Gutierrez Boem F, Rubio G. 2004. Incrementos en el fósforo disponible en suelos fertilizados en el N de la región pampeana. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.*
- Capozzi I, Piccone L, Zamuner E, Echeverría H, Sainz Rosas H. 2006. Transformaciones de fósforo en un suelo Molisol con alta disponibilidad de fósforo. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta - Jujuy.*

- Capurro J, Fiorito C, Pagani R, Arce E, Ferrero L. 2004. Respuesta a la fertilización de maíz en Cañada de Gómez. Maíz, para mejorar la producción N° 26. E. E. A. INTA Oliveros: 93-98.
- Capurro J, Pagani R, Monti J, Fiorito C, González M. 2005. Fertilización del cultivo de trigo; análisis de tres campañas en el área de Cañada de Gómez. Trigo, para mejorar la producción N° 28. E. E. A. INTA Oliveros: 64-67.
- Capurro J, Fiorito C, González M, Casasola E, Zazzarini A, Andriani J, Vernizzi A. 2007. Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre en el sur de Santa Fe. IPNI Informaciones Agronómicas N° 36: 17-21.
- Carta de Suelos de La República Argentina. Hoja 3363-18. INTA. 1998.
- Cordone G, Salvagiotti F, Pagani R, Bacigaluppo S, Gerster G, Martínez F, Méndez J, Trentino N, Novello O. 2004. Comportamiento de dos híbridos de maíz de distinto potencial de rendimiento según la estrategia de manejo de nutrientes; respuesta física y económica. Maíz, para mejorar la producción N° 26. E. E. A. INTA Oliveros: 99-104.
- Darwich N. 1998. Fósforo, un nutriente esencial para las plantas. Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes: 65-94.
- Diez E, Zamuner E, Picone L, Berardo A. 2000. Efecto de la fertilización única o fraccionada sobre el fósforo del suelo. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Dobermann A, George T, Thevs N. 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 652-660.

- Echeverría H, García F. 1998. Guía de la fertilización fosfatada en trigo, maíz, girasol y soja. E.E.A. INTA Balcarce. Boletín Técnico N° 149: 18.
- Echeverría H, Sainz Rozas H, Bianchini A, García F. 2004. Utilización y residualidad de fósforo bajo siembra directa en la region pampeana. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.
- Faggioli V, Gutiérrez Boem F, Scheiner J, Rubio G. 2004. Fracciones de fósforo del suelo absorbidas por soja, maíz y girasol. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.
- Fenton T, Riecken F, Seaholm J. 1967. Effect of vegetation on total phosphorus distribution in some Iowa soils. Agron. Abstr.:117.
- Ferraris G, Couretot L. 2004. Fertilización fosforada en soja. Diagnóstico y tecnología de aplicación. Revista de Tecnología Agropecuaria, EEA INTA Pergamino N° IX: 46-49.
- Fixen P, García F. 2006. Decisiones efectivas en el manejo de nutrientes... mirando más allá de la próxima cosecha. INPOFOS Informaciones Agronómicas N° 32: 1-7.
- Galantini J, Rosell R. 1997. Organic fractions, N, P, and S changes in a semiarid Haplustoll of Argentine under different crop sequences. Soil and Tillage Res. 42: 221-228.
- Galantini J, Suñer L, Krüger H. 2005. Dinámica de las formas de P en un haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. RIA, 34 (2). INTA: 13-31.
- García F. 2003. El manejo del fósforo en la producción de trigo y maíz. Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur, Rosario: 55-61.

- García F. 2005. Soja: criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. INPOFOS Informaciones Agronómicas N° 27: 1-6.
- García F. 2006. La nutrición de los cultivos y la nutrición de los suelos. INPOFOS Informaciones Agronómicas N° 29: 13-16.
- García F, Boxler M, Minteguiaga J, Pozzi R, Firpo L, Deza Marín G, Berardo A. 2007. Red de nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP: síntesis de resultados de los primeros seis años. Actas Simposio Fertilidad 2007, Rosario: 35-39.
- Gelderman R; Gerwing J. 2003. Long-term residual phosphorus study. Plant Science 9914. South Dakota State University: 77:80.
- Gerster G, Novello O. 2003. Fertilización con nitrógeno, fósforo, azufre y micronutrientes en la secuencia trigo – soja. INPOFOS Informaciones Agronómicas N° 18: 6 -8.
- Gerster G, Novello O, Salvagiotti F. 2005. Respuesta del cultivo de trigo a la fertilización con fósforo con diferentes antecesores. Trigo, para mejorar la producción N° 28. E. E. A. INTA Oliveros: 76-79.
- Gil R. 2007. El ambiente del suelo y el crecimiento de las raíces. Información Técnica de trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2007. Publicación Miscelánea N° 107. E. E. A. INTA Rafaela.
- Giuffré L. 2005. Capítulo VI Fósforo: El fósforo como elemento crítico. Tecnología en análisis de suelos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo: 147-158.
- Guo F, Yost R, Hue N, Evensen C, Silva J. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1681–1689.

- Gutiérrez Boem F, Prystupa P, Álvarez C. 2006. Comparación de dos redes de ensayos de fertilización fosforada en soja en la región pampeana. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta - Jujuy.
- Hanway J, Olson R. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. The role of phosphorus in agricultura. F. Khasawneh *et al.* (ed.). ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Harrison A. 1987. Soil organic phosphorus. A review of world literatura. CAB International, Oxon, UK.
- Hedley M, Stewart J, Chauhan B. 1982. Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci.* 46: 970-976.
- Johnston A E. 2000. Soil and plant phosphate. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, Francia.
- Johnston A E, Steen I. 2000. Understanding phosphorus and its use in agriculture. European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA). Bruselas, Bélgica.
- Lajtha K. 1994. Nutrient uptake in eastern deciduous tree seedlings. *Plant and Soil* 160: 193-199.
- Larsen S. 1977. Soil phosphorus. *Advan. Agron.* 19: 151-210.
- Lindsay W. 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, New York, USA: 449.
- Lombi E, McLaughlin M, Johnston C, Armstrong R, Holloway R. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 682–689.

- Mestelan S, Culot J, Zamuner C, Eyherabide G, Berardo A. 1998. The fate of fertilizer phosphorus in a Typic Argiudoll of Argentina. Proceedings of the XVI World Congress of Soil Science. Montpellier, Francia. Symposium N° 21.
- Michelena R, Irurtia C, Vavruska F, Mon R, Pittaluga A. 1989. Degradación de suelos en el norte de la región pampeana. Publicación N° 6. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, Pergamino.
- Morrás H. 1999. Geochemical differentiation of quaternary sediments from the Pampean region based on soil phosphorus contents as detected in the early 20th century. *Quaternary International* 62: 57–67.
- Murphy J, Riley H P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
- Nelson D, Sommers L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.*
- Novello O, Quintero C. 2006. Contenidos de fósforo en el distrito Villa Eloisa (Santa Fe). *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta – Jujuy.*
- Picone L, Zamuner E. 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn.*
- Porta J, López Acevedo M, Roquero C. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. 2ª Ed. Ediciones Mundi Prensa, Madrid. Cap. 10: 217-236.

- Prystupa P, Salvagiotti F, Ferraris G, Gutiérrez Boem F, Elisi J, Couretot L. 2004. Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y potasio en cultivos de maíz en la pampa ondulada. INPOFOS Informaciones Agronómicas N° 23: 1-4.
- Prystupa P, Salvagiotti F, Ferraris G, Gutiérrez Boem F, Couretot L, Dignani D. 2006. Fertilización de maíz en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe: II – Interacción fósforo y azufre. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta - Jujuy.
- Quintero C, Boschetti G, Benavides R. 1999. Phosphorus retention in some soils of the Argentinian Mesopotamia. Común. Soil Sci. Plant Anal. 30 (9 y 10): 1449-1461.
- Quintero, C. 2003. Capacidad de fijación de P del suelo y su efecto sobre la dosis a aplicar. Simposio “El fósforo en la agricultura argentina”, INPOFOS Cono Sur, Rosario. 73-75.
- Richards J, Bates T, Sheppard S. 1995. Changes in the forms and distribution of soil phosphorus due to long-term corn production. Can. J. Soil Sci. 75: 311–318.
- Rubio G, Gutiérrez Boem F, Cabello M. 2004. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el nivel crítico de fósforo disponible en el suelo. INPOFOS Informaciones Agronómicas N° 23: 5-8.
- Rubio G, Cabello M, Gutiérrez Boem F. 2006. Estimando la dosis de fósforo necesaria para alcanzar los niveles críticos. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta - Jujuy.
- Salvagiotti F, Gerster G, Bacigaluppo S, Castellarín J, Galarza C, González N, Gudelj V, Novello O, Pedrol H, Vallone P. 2004. Residualidad y fertilización directa con fósforo y azufre en soja de segunda. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.

- Saunders W, Williams E. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. *Soil Sci.* 6: 254-267.
- Selles F, Campbell C, Zentner R. 1995. Effect of cropping and fertilization on plant and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 140-144.
- Sharpley A, Tiessen H, Cole C. 1987. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 362-365.
- Schmidt J, Buol S, Kamprath E. 1996. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation: fractionation analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1168-1172.
- Stevenson F. 1986. The phosphorus cycle. *Cycles of Soil*. John Wiley, New York: 231-246, 258-284.
- Suñer L, Galantini J, Rosell R. 1999. Formas de fósforo y su relación con la textura en suelos de la región semiárida argentina. *Actas XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, Pucón, Chile.
- Suñer L, Galantini J, Rosell R, Chamadoira M. 2001. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 104 (2): 113-119.
- Suñer L, Galantini J, Rosell R. 2004. Fertilización con fósforo en suelos de la región pampeana cultivados con trigo. *Actas. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Paraná.
- Suñer L, Galantini J, Rosell R. 2005. Cambios del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. *INPOFOS Informaciones Agronómicas* N° 25: 5-8.

- Syers J, Johnston A E, Curtin D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* N° 18. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Tiessen H, Stewart J, Battany J. 1982. Cultivation effects on the amounts and concentration of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in grassland soils. *Agron. J.* 74: 831-835.
- Tiessen H, Stewart J. 1983. Particle size fractions and their use in soil organic matter. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 509-514.
- Tiessen H, Stewart J, Cole C. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogénesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 853-858.
- Tiessen H, Moir J. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. *Soil sampling and methods of analysis*. Ed. Carter M R. CASSS Lewis Publishers, Boca Raton, FL: 75-86.
- Turner B, Cade-Menun B, Westermann D. 2003. Organic Phosphorus Composition and Potential Bioavailability in Semi-Arid Arable Soils of the Western United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1168–1179
- Turner B, Frossard E, Baldwin D. 2005. *Organic Phosphorus in the Environment*. CABI Publishing: 295-305.
- Urioste A, Buschiazzo D, Hevia G, Hepper E, Ferranelas L, Bono A. 2002. Distribución de carbono orgánico, nitrógeno total y fracciones de fósforo en la capa arable de suelos de la región semiárida pampeana central. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn*.

- Vázquez M, Noellemeyer E, Coremberg P. 1991. The dynamics of different organic and inorganic phosphorus fractions in soils from the south of Santa Fe province, Argentina. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 1151-1163.
- Vázquez M, Pellegrini A, Millán G, Deak A. 2001. Cambios cuali y cuantitativos en la fertilidad fosforada de algunos suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Agrochimica*, XLV: 120-123.
- Vázquez M. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la Región Pampeana. *INPOFOS Informaciones Agronómicas* N° 16: 3-7.
- Vivas H, Quintero C, Boschetti G, Albrecht R, Befani N. 2004. Fertilización con P y S. Fracciones de P del suelo y rendimiento de soja y maíz. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.*
- Vivas H, Albrecht R, Hotián J, Gastaldi L. 2007. Residualidad del fósforo y del azufre, estrategia de fertilización en una secuencia de cultivos. *IPNI Informaciones Agronómicas* N° 35: 11-16.
- Vivas H, Albrecht R, Hotian J, Quaino O. 2008. Relación del fósforo y del azufre asociada a la respuesta del doble cultivo trigo/soja en un suelo del centro de Santa Fe. *INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano. Campaña 2007. Publicación Miscelánea* N° 108: 75-83.
- Zamuner E, Picone L, Echeverría H. 2004. Formas de fósforo en un suelo bajo labranza convencional y siembra directa. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.*
- Zhang T, MacKenzie A. 1997. Changes of soil P fractions under long-term corn monoculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 485-493.

- Zhang T, MacKenzie A, Liang B, Drury C. 2004. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 519–528.
- Zheng Z, Simard R, Lafond J, Parent L. 2002. Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 999-1007.