

DINÁMICA DE LAS FORMAS DEL P EN SUELOS DE LA REGIÓN SUDOESTE PAMPEANA: ESTUDIO DE LA INCUBACIÓN CON FERTILIZANTE FOSFATADO

LILIANA G SUÑER* & JUAN A GALANTINI

Recibido: 12-09-12

Recibido con revisiones: 28-02-13

Aceptado: 22-03-13

RESUMEN

Las distintas formas de P en el suelo se encuentran en equilibrio dinámico, dependiente del ambiente edáfico (textura, materia orgánica y el pH) y del manejo agronómico (como la rotación de cultivos y la fertilización). El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de P al suelo sobre los equilibrios de este elemento. Se seleccionaron nueve suelos y se les agregó 0, 50 y 100 μg de P g^{-1} de suelo, seguidamente se los sometió a incubación durante 0, 90, 180 y 360 días. El agregado de P produjo una caída inicial de las formas de P analizadas. Esta disminución fue más marcada y prolongada en los suelos poco profundos. La cantidad de P-Fe+Al formado durante el período estudiado dependió de la relación Fe+Al:Ca del suelo, con valores máximos cuando la relación fue alrededor de 15, y fue variable en el tiempo alcanzando el máximo a los 180 días. Por otro lado, la formación de P-Ca fue mucho más variable y presentó cambios importantes en el tiempo. Los equilibrios del P en los suelos someros se fueron modificando con el transcurso de la incubación, de manera tal que el P no cuantificado a los 90 y 180 días es detectado a los 360. Estas muestras fueron analizadas con microscopía electrónica y se observó la presencia de sustancias cristalizadas (90 y 180 días) indicando la formación de compuestos meta estables de P que podrían ser una de las transformaciones que sufre este elemento en el tiempo.

Palabras clave. Fracciones de fósforo, suelos calcáreos, recuperación de fósforo.

DYNAMIC OF P FORMS IN SOILS OF THE THE SOUTHWESTERN PAMPEAN REGION: INCUBATION WITH PHOSPHORUS FERTILIZER

ABSTRACT

Different soil P forms exist in a dynamic equilibrium, which depends on the edaphic atmosphere (texture, MO and pH) and on the agronomic management practices (crop rotation and fertilization). The objective of the study was to assess the effect of P application on a soil on the equilibrium of this element. Nine soils were selected and 0, 50 and 100 μg of P g^{-1} were added to these soils. Subsequently, the soil-P mixtures were incubated during 0, 90, 180 and 360 days. The P addition produced an initial decrease of the analyzed P forms. This decrease was more pronounced and persistent in time in the shallow soils. The amount of P-Fe+Al formed during the studied period depended on the soil Fe+Al:Ca relationship, reaching maximum values when the ratio was around 15. In addition, the amount of P-Fe+Al was variable in time and reached maximum values after 180 days of incubation. On the other hand, the formation of P-Ca was much more variable and presented important changes in time. The P balances in shallow soils changed throughout the incubation period; P that was not detected at days 90 and 180 was detected at day 360. These samples were analyzed by electron microscopy and the presence of crystallized substances was observed on days 90 and 180, indicating the formation of P metastable compounds which could be one of the transformations that this element suffers in time.

Key words. Phosphorus fractions, Calcareous soils, P recovery.

INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado del fósforo (P) aumenta la productividad de los cultivos y la eficiencia en el uso del resto de los insumos (Colomb *et al.*, 2007). Las principales desventajas del uso de fertilizantes fosfatados están relacionadas con los costos de producción, la contaminación de ambientes acuáticos y el agotamiento de las reservas de roca fosfórica (Sharpley *et al.*, 1993; Withers & Sharpley, 1995; Stewart *et al.*, 2005). Una fertilización en exceso acarrea cierto peligro de contaminación del ambiente a través de los procesos de erosión o redistribución de P dentro del relieve que pueden ser relevantes por su mayor acumulación en los primeros centímetros del suelo (Heredia & Fernández Cirelli, 2007). Galantini *et al.* (2005) observaron que cantidades excesivas de fosfatos, debido a las aplicaciones de fertilizante y/o descomposición de la materia orgánica, producen una disminución del contenido inicial de P poniendo en evidencia la complejidad de estos equilibrios. Bajo las condiciones existentes en el suelo, los iones fosfato que se liberan a través de la disolución de fertilizantes fosfatados no son estables, no permanecen en su forma original, sino que son objeto de un sinnúmero de transformaciones de adsorción y precipitación (Delgado & Torrent, 2000; Pizzeghello *et al.*, 2011). La reacción de sorción de P inorgánico en el suelo puede describirse mediante una reacción más rápida y reversible (adsorción reversible sobre sitios superficiales) y otra más lenta e irreversible (precipitación o sorción dentro de los agregados, McGechan, 2002). Los procesos de precipitación ocurren bajo altas concentraciones de P y largos períodos de tiempo, donde se forma una nueva fase sólida. Es difícil distinguir claramente entre ambos mecanismos de adsorción y precipitación (Bolland *et al.*, 2003).

Teniendo en cuenta la residualidad de las aplicaciones de P es posible manejar la fertilización de la rotación o del suelo, y no solamente la fertilización del cultivo, buscando alcanzar y/o mantener un determinado nivel de P disponible en el suelo para satisfacer la demanda de los cultivos siguientes (Berardo, 2003; Mallarino, 2005; García *et al.*, 2006).

El control periódico del contenido de P en el suelo permite ajustar su aplicación para mantenerlo en niveles que no limiten la producción de los cultivos. Para ello es importante conocer en que medida el P aplicado modificará la dinámica de éste elemento en el suelo (Gutiérrez Boem *et al.*, 2002; Rubio *et al.*, 2004; Rubio *et al.*, 2008). La hipótesis planteada es que la fertilización con P modifica los equi-

librios entre las distintas formas del P presente en el suelo, dependiendo de las características del ambiente edáfico. Como objetivo del presente trabajo se ha propuesto estudiar los equilibrios de las diferentes formas de fósforo cuando se aplica P como fertilizante soluble a suelos con diferentes características físico químicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron nueve suelos pertenecientes al Criadero de Semillas de la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) de Cabildo (Buenos Aires). Se tomaron muestras compuestas (12 submuestras) a la profundidad de 0-20 cm, se secaron y se tamizaron por 2 mm para los análisis posteriores.

Los sitios se seleccionaron en base a la profundidad del perfil. Se tomaron muestras en lugares de solum profundos (más de un metro de profundidad), medianamente profundos (50 a 80 cm de profundidad) y someros (menos de 40 cm de profundidad). Se pesaron 5 g de suelo por muestra, con tres repeticiones, que una vez mezclados con las distintas dosis de P se incubaron en recipientes plásticos de 30 ml de capacidad a 25 °C, con reposición periódica de la humedad, para mantenerla a capacidad de campo, utilizando como variables:

- **Dosis de P aplicada:** Para cada suelo y para cada uno de los tratamientos, se aplicó P con una solución de KH_2PO_4 a las concentraciones 0, 50 y 100 μg de P g^{-1} de suelo.

- **Tiempo de incubación:** las muestras se incubaron, con el fin de que se alcance el equilibrio dinámico de los distintos procesos fisicoquímicos, durante 0, 90, 180 y 360 días. El sentido de realizar una incubación fue simular los procesos que suceden en el campo, bajo condiciones más controladas, ante el agregado de fertilizante fosfatado; además al mantener el suelo a temperatura constante durante un determinado tiempo, se aceleran los procesos que habitualmente se producen en el medio ambiente natural.

Luego de la incubación se analizaron las formas de P, mediante el método de fraccionamiento para suelos calcáreos de Olsen y Sommers (1982). Este procedimiento involucra la extracción secuencial teniendo en cuenta la Figura 1.

No se detectaron niveles de P al analizar los sobrenadantes cuando se realizó la extracción con NaCl-citrato-bicarbonato o con citrato-ditionito-bicarbonato; verificando este procedimiento con el agregado de concentraciones conocidas de P. Estas fracciones de P dan idea del grado de meterización del suelo y están en relación directa con la piedra caliza y no representan más del 20% del fósforo lábil total (Wandruska, 2006). A modo de ejemplo, Domínguez *et al.* (2001) reportaron valores de 127 y 37 mg kg^{-1} para las fracciones de bicarbonato o con citrato-ditionito-bicarbonato, respectivamente.

| 1g de suelo | Extracto | Fracción de P |
|-------------|--|--|
| ↓ | Agitar con NaOH 0,1M-NaCl 0,1 M 17 h centrifugar | P-Fe+Al P ligado al Fe y Al |
| Residuo | ↓ | |
| | Lavar dos veces con NaCl 1M y agitar con citrato 0,3 M y NaHCO ₃ 1M Calentar y centrifugar | P-CB P lábil pedogenético enriquecido con Ca |
| Residuo | ↓ | |
| | Agitar con citrato 0,3M, NaHCO ₃ 1M y 1g Na ₂ S ₂ O ₄ 2H ₂ O. Calentar y centrifugar. Lavar el residuo con NaCl saturado, centrifugar | P-CDB P ocluido a los óxidos e hidróxidos de Fe |
| Residuo | ↓ | |
| | Agitar con HCl 1M 1 h centrifugar | P-Ca P ligado al Ca |

Figura 1. Fraccionamiento secuencial de fósforo (Olsen y Sommers, 1982).

Figure 1. Sequential phosphorus fractionation (Olsen and Sommers, 1982).

El P-Fe+Al extraído con NaOH proviene de fosfatos de Fe, tal como strengita, o los fosfatos no ocluidos enlazados por reacciones de sorción a la superficie de minerales ricos en Fe, tales como los óxidos de Fe hidratados. El P-Ca extraíble con ácido clorhídrico se relaciona con la apatita (Olsen & Sommers, 1982). El fósforo de cada extracto se cuantificó mediante colorimetría (Watanabe & Olsen, 1965). En los casos que el extracto era ácido se neutralizó previamente con NaOH 1N utilizando para-nitrofenol como indicador.

Porcentaje de P formado

Para estimar el destino del P aplicado se calculó el porcentaje de P formado en cada una de las fracciones en las diferentes fechas (90, 180 y 360 días) utilizando como referencia el testigo correspondiente a cada fecha. Por ejemplo, el porcentaje de P asociado al Fe+ Al no ocluido formado luego del agregado de P se calculó de la siguiente forma:

$$\% \text{ P formado} = (\text{P Dosis 50} - \text{P Dosis 0}) * 100 / 50$$

donde: P Dosis 50, es el P asociado al Fe+Al cuantificado luego de aplicado 50 µg de P g⁻¹ de suelo y P Dosis 0 es el P asociado al Fe +Al en el testigo para la misma fecha.

50: dosis de P (µg de P g⁻¹) aplicada.

El % de P asociado al Ca se calculó de la misma forma que el anterior.

Se determinó pH (relación suelo:agua 1:2,5), fósforo extraíble (Pe, Bray y Kurtz, 1945), Contenido de carbono orgánico total (COT) y el asociado a la fracción mineral, por combustión seca en un analizador automático LECO (Galantini, 2005), nitrógeno (N-NO₃⁻, Mulvaney, 1996). La fracción fina del suelo (FF, 0-100 µm), que contiene arcilla, limo, arenas muy finas y la materia orgánica asociada a la fracción mineral, se determinó por medio de un fraccionamiento físico por tamaño de partícula mediante tamizado en húmedo (Galantini, 2005).

El contenido total de Fe, Al y Ca de los suelos estudiados fue determinado por el método de digestión de Sommers & Nelson (1972) y posterior determinación por espectrometría por emisión por plasma (ICP).

Con el objeto de confirmar la presencia de compuestos de P se realizaron micrografías electrónicas y espectros asociados EDAX de las muestras incubadas. Para ello se utilizó un equipo Jcol 35 cf., sistema de microanálisis dispersivo en energía (EDAX), 10 KV, con ventana ultra delgada y detección desde Boro hasta Uranio.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) considerando los factores tiempo, profundidad y dosis, usando el software estadístico INFOSTAT 2009 (Di Renzo *et al*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características químicas y físicas de los suelos utilizados en la incubación se presentan en la Tabla 1. Los valores obtenidos en cuanto a pH, Pe, materia orgánica y contenido de fracción fina ponen de manifiesto la amplia variabilidad característica de los suelos de la región en estudio.

Los valores de pH oscilaron entre 6,3 y 8,0 (en los suelos someros). La variación del Pe fue muy amplia, desde 1,2 a 30 $\mu\text{g g}^{-1}$. Las diferentes características texturales de los suelos analizados se reflejó en los contenidos de materia orgánica, ya sea el total como el asociado a la fracción mineral del suelo (desde 11 a 18 g kg^{-1}) y de contenido de fracción fina (del 54 al 80%).

Los suelos utilizados en el ensayo de incubación presentaron niveles de Ca que oscilaron entre 1,4 y 11 g Ca kg^{-1} (Tabla 2). La relación Fe:Ca, fue del mismo orden de

magnitud que las de Al:Ca por lo que las relaciones (Fe+Al):Ca prácticamente fueron el doble.

Dinámica del P en los suelos incubados

El análisis estadístico del conjunto de los datos puso en evidencia comportamientos diferentes de las dos formas de P estudiadas. En el caso del P-Ca se encontraron diferencias significativas entre momentos (Tpo) y entre profundidades (Prof), pero no entre dosis de P aplicadas (Dosis). La interacción Tpo x Prof x Dosis fue no significativa.

El P unido al Ca fue la forma más abundante, y la variación del P-Ca en el tiempo, por efecto de la incubación demostró que esta forma del P presenta una dinámica muy importante. Cuando no se agregó fertilizante, el P-Ca fue semejante en los suelos con diferente profundidad mostrando una tendencia a valores más bajos a los 90 días que con el tiempo vuelven a los niveles originales (Fig. 2).

Tabla 1. Propiedades edáficas de los suelos utilizados.

Table 1. Soil properties of the soils used in this study.

| Suelo | Clasificación USDA | Profundidad | pH | Fósforo extraíble $\mu\text{g g}^{-1}$ | Carbono orgánico total | Carbón orgánico asociado a la fracción mineral | N-NO ₃ $\mu\text{g g}^{-1}$ | Fracción fina |
|-------|------------------------------|-------------|-----|---|------------------------|--|---|---------------|
| | | | | | g kg^{-1} | | | % |
| 1 | Haplustol petrocálcico | somero | 8,0 | 1,2 | 19 | 17 | 23,5 | 68 |
| 2 | Argiustol típico fase somera | medio | 6,6 | 9,1 | 13 | 15 | 38 | 70 |
| 3 | Argiustol típico | profundo | 6,7 | 8,3 | 17 | 16 | 30,5 | 76 |
| 4 | Argiustol típico | profundo | 6,5 | 6,7 | 12 | 11 | 1,0 | 58 |
| 5 | Argiustol típico fase somera | medio | 7,2 | 6,4 | 19 | 16 | 3,5 | 75 |
| 6 | Haplustol petrocálcico | somero | 8,0 | 8,2 | 13 | 11 | 30,0 | 54 |
| 7 | Argiustol típico | profundo | 6,3 | 13,7 | 19 | 17 | 39,5 | 65 |
| 8 | Argiustol típico fase somera | medio | 6,3 | 30,0 | 20 | 18 | 25,0 | 80 |
| 9 | Haplustol petrocálcico | somero | 7,9 | 12,6 | 20 | 17 | 30 | 62 |

Tabla 2. Contenido total de Ca, Fe y Al, relaciones Fe:Ca, Al: Ca, (Fe+Al):Ca, de los suelos estudiados.

Table 2. Total content of Ca, Fe, Al, and relationships Fe:Ca, Al: Ca (Fe + Al):Ca, of the studied soils.

| Suelo | Ca | Fe g kg^{-1} | Al | Fe:Ca | Al:Ca | (Fe + Al):Ca |
|-------|-----|--------------------------|----|-------|-------|--------------|
| 1 | 11 | 20 | 24 | 1,8 | 2,2 | 4,0 |
| 2 | 2,7 | 24 | 26 | 9,0 | 9,8 | 18,8 |
| 3 | 2,7 | 24 | 28 | 8,8 | 10,3 | 19,1 |
| 4 | 1,7 | 18 | 17 | 10,6 | 10,1 | 20,7 |
| 5 | 2,7 | 20 | 23 | 7,3 | 8,4 | 15,7 |
| 6 | 5,7 | 18 | 28 | 3,1 | 3,5 | 6,6 |
| 7 | 2,1 | 22 | 21 | 10,4 | 10,0 | 20,4 |
| 8 | 2,8 | 15 | 18 | 5,3 | 6,0 | 11,3 |
| 9 | 3,5 | 16 | 16 | 4,6 | 4,6 | 9,1 |

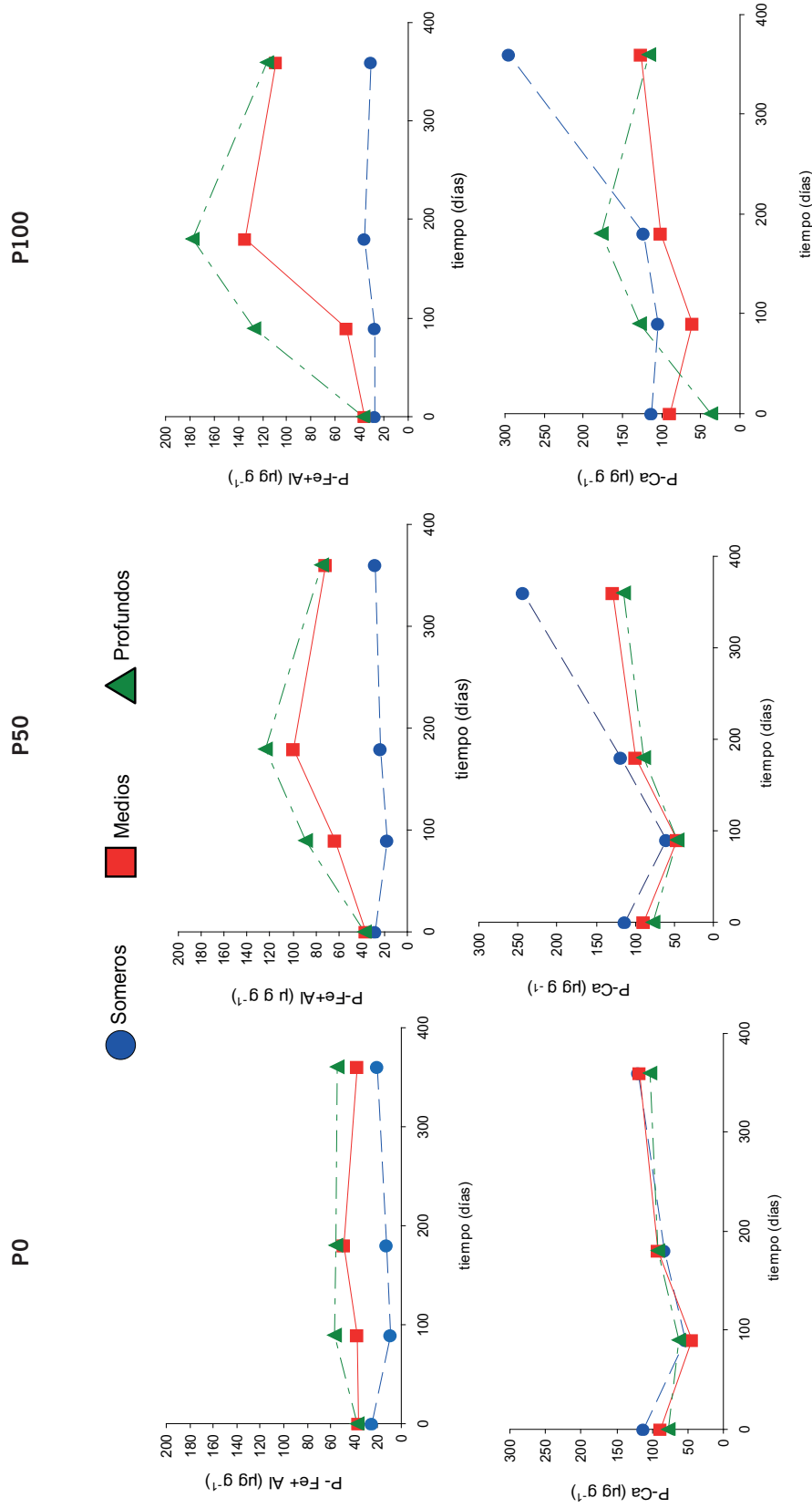


Figura 2. Dinámica del P unido al Ca (P-Ca) y al Fe+Al no occludidos (P-Fe+Al) sin agregado de P (P0, testigos), con agregado de 50 (P50) y 100 (P100) µg P g⁻¹ en suelos someros, medios y profundos. Figure 2. Dynamics of P bound to Ca (P-Ca) and non-occluded Fe + Al (P-Fe + Al) without added P (P0), with addition of 50 (P50) and 100 (P100) µg P g⁻¹ in shallow, medium and deep soils.

Todos estos cambios en el tiempo, podrían relacionarse a la compleja dinámica de los compuestos de P con el Ca (Castro & Torrent, 2003; Delgado & Torrent, 2000; Delvasto *et al.*, 2006), y además pueden verse favorecidos aún más por la liberación de P orgánico en el proceso de mineralización de la materia orgánica (Franzluebbers, 2002; Galantini & Suñer, 2008), que al quedar libre puede unirse al Ca.

En el caso del P-Fe+Al la interacción Tpo x Prof x Dosis fue altamente significativa ($P < 0,0001$), por lo que se analizaron cada una de las dosis por separado o cada dosis + momento cuando existió interacción Tpo x Prof (Tabla 3).

Por otro lado, el P-Fe+Al claramente se comportó diferente según la profundidad del suelo (Fig. 2) con el siguiente orden: profundo > medio > somero.

Si bien no se observó efecto del momento al analizar entre profundidades, en el momento inicial fueron no significativos y el final altamente significativos.

Cuando se agrega P, el P-Ca cambió significativamente y mostró una tendencia a valores diferentes entre profundidades con P50, mientras que con P100 no se detectaron diferencias estadísticas (Fig. 2, P-Ca P50 y P100). Si bien las diferencias entre los valores obtenidos con ambas dosis fue semejante, con la dosis más alta la variabilidad fue mayor.

Por otro lado, el P-Fe+Al presentó diferencias altamente significativas y variables entre momentos y suelos (interacción Prof x Tpo con $P < 0,0001$).

Con ambas dosis se observó que el valor inicial fue semejante entre suelos.

Posteriormente, en los suelos someros el P-Fe+Al se mantiene sin variaciones, mientras que en el suelo medio se observó un rápido incremento hasta los 180 días, el que fue mayor en los suelos profundos. Finalmente, a los 360 días los valores en el suelo medio y profundo fue semejante y mayor que en los someros.

Esto indicaría que los cambios que se producen en la dinámica de las formas de P presentes en los distintos pools serían continuos y en función de las características físico químicas de los suelos. La aplicación de P produce efectos diferentes según la profundidad del suelo. En los someros el P unido al Ca y al Fe+Al inicialmente disminuye. Por otro lado, en los suelos profundos el principal destino del P soluble fue el adsorbido a los compuestos de Fe y Al (P-Fe+Al) evidenciado por el importante aumento registrado en esta fracción hasta los 180 días de incubación. Posteriormente se produce un pasaje hacia formas menos disponibles ligadas al calcio, que indican una retrogradación del fertilizante soluble agregado.

En términos generales, se observó que el agregado de P a estos suelos produjo una caída inicial en la forma de P ligada al Ca. Esta disminución fue más marcada y prolongada en los suelos poco profundos. Esto tiene implicancias desde el punto de vista de la fertilización (Wang *et al.*, 2010), ya que habría que tener en cuenta el tiempo que transcurre desde que se fertiliza hasta el momento en que el P estaría disponible, siendo la velocidad de reposición del P lábil absorbido variable según los suelos (Nwoke *et al.*, 2003). Esta velocidad depende de su capacidad «buffer» (Bolland & Allen, 2003), es decir de la medida en que se desplazan los equilibrios frente a modificaciones del nivel de P en la solución edáfica (Quintero *et al.*, 2003), la cuál en estos suelos osciló entre 5,9 y 14,1 mg kg⁻¹ (Suñer, 2007).

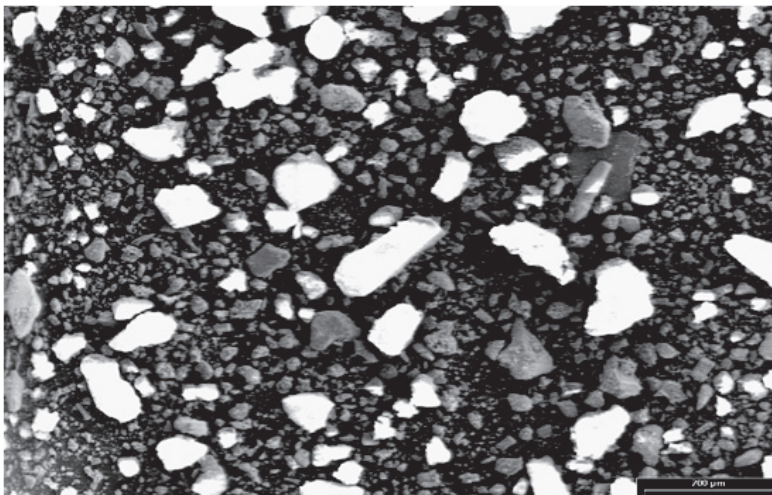
En la Figura 2 se observa que el P relacionado con el Ca analizado en esta sección «desapareció» a los 90 y 180 días de incubación en suelos poco profundos, y en menor medida en los de profundidad intermedia o profundos. En esta instancia surge el cuestionamiento de qué sucede con el fósforo no detectado en estas fracciones, hacia dónde se desplazan los equilibrios? Una de las posibilidades propuestas es que el P agregado cristalice en otros minerales. Cole *et al.* (1953), en interacciones de P con Calcita observaron una adsorción inicial y posterior precipitación de fosfato dicálcico, pudiéndose formar alternativamente fos-

Tabla 3. Resultados de Análisis Estadístico ANOVA de dos factores profundidad y tiempo para cada dosis de P y para cada forma de P.
Table 3. Statistical Analysis Results of a two-factor ANOVA; depth and time for each rate and P form.

| | P- Fe + Al | | | P-Ca | | |
|----------------------|------------|---------|---------|-------|---------|-------|
| | P0 | P50 | P100 | P0 | P50 | P100 |
| Profundidad | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | ns | <0,06 | ns |
| Tiempo | ns | <0,0001 | <0,0001 | <0,08 | <0,0001 | <0,07 |
| Profundidad x Tiempo | ns | <0,0001 | <0,0001 | ns | ns | ns |

Figura 3.
Micrografía electrónica (SEM) de una
de las muestras analizadas a los
180 días de incubación (Muestra 11A).

Figure 3.
Electron micrograph (SEM) of one
of the samples tested at 180 days of
incubation (Sample 11A).

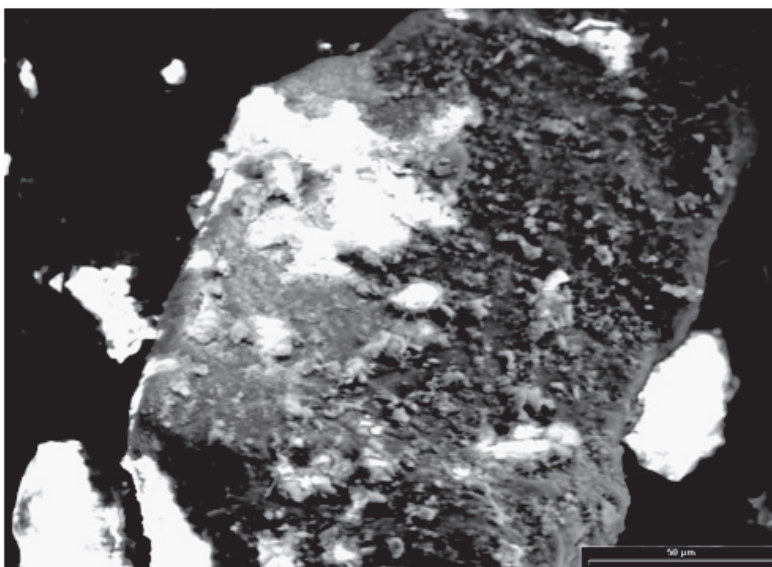


fato octocalcico (Clark & Peech, 1955). Otros autores han observado la recristalización de Brushita a partir de la solubilización de hidroxiapatita (Delvasto *et al.*, 2006). Los equilibrios del P en los suelos someros se fueron modificando con el transcurso de la incubación, de manera tal que el P no cuantificado a los 90 y 180 días es detectado a los 360. Una vista general de una muestra analizada con microscopía electrónica a los 180 días (Fig. 3) se caracterizó por tener una mayor refracción de la luz, lo que indicaría la presencia de sustancias adsorbidas sobre las partículas minerales (Hedley & McLaughlin, 2005). En un análisis más detallado de estas estructuras que producen mayor refracción de la luz se observó la presencia de sustancias cristalizadas sobre estas partículas del tamaño de las arenas (Fig. 4).

El análisis de la composición de estas estructuras cristalizadas indicó la presencia de los elementos P y Ca entre otros (Fig. 5). Es decir, la formación de compuestos meta estables de P podría ser una de las transformaciones que sufre este elemento en el tiempo (Castro & Torrent, 1998). Es importante volver a mencionar que el método utilizado cuantifica el P-Ca relacionado a la apatita, no incluyendo otros posibles compuestos como los que podrían estar cristalizando sobre las partículas de mayor tamaño mencionadas. Al final del período de incubación, las muestras presentaron una menor refracción de la luz, sugiriendo la disminución de estas sustancias cristalizadas con P que coincidentemente fueron determinadas en la fracción P-Ca la cual tiene relación con el P de la apatita (Fig. 6).

Figura 4.
Micrografía electrónica (SEM) de
la misma muestra a los 180 días
con mayor aumento (Muestra 11, 20X).

Figure 4.
Electron micrograph (SEM) of
the same sample at 180 days
with higher magnification
(Sample 11, 20X).



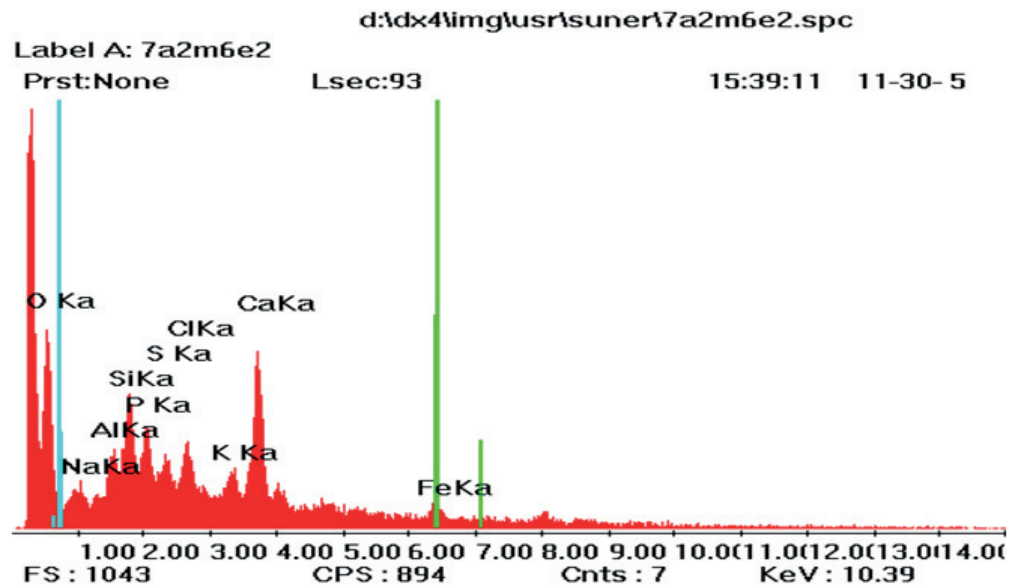


Figura 5. Espectro cualitativo EDAX asociado (Muestra 11A).
Figure 5. EDAX spectrum associated qualitative (Sample 11A).

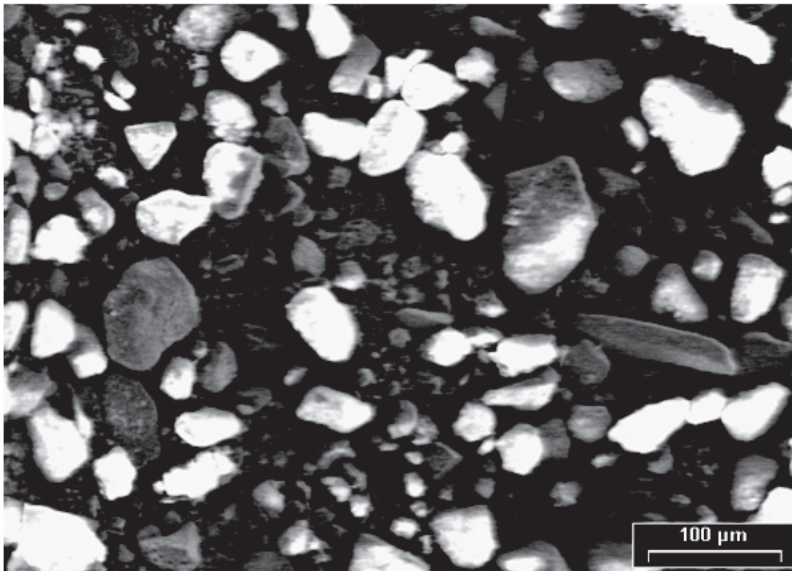


Figura 6.
Micrografía electrónica (SEM) de la misma muestra a los 360 días (Muestra 11A, 10X).
Figure 6.
Electron micrograph (SEM) of the same sample at 360 days (Sample 11A, 10X).

Fósforo formado en el tiempo de incubación

Varios trabajos relacionan el P en una solución en función del contenido de Fe, Al, ó Ca (Lindsay, 1979; Kuo, 1996; Delgado & Torrent, 2000). En este trabajo sin embargo, se consideró la relación (Fe+Al):Ca, en lugar de los elementos respectivos, porque presentó mejores ajustes. Por otro lado, la relación (Fe+Al):Ca del suelo modificó la dinámica de las dos formas de P estudiadas.

Con relaciones bajas (características de los suelos someros) la formación de P-Fe+Al es inicialmente baja pero se observaron valores mayores al final de la incubación. Con relaciones mayores, la formación de P-Fe+Al aumenta durante la primera parte de la incubación y tiende a disminuir al final, particularmente en suelos con las mayores relaciones (Fe+Al):Ca, lo que pone en evidencia la complejidad de los equilibrios fisicoquímicos que se llevan a

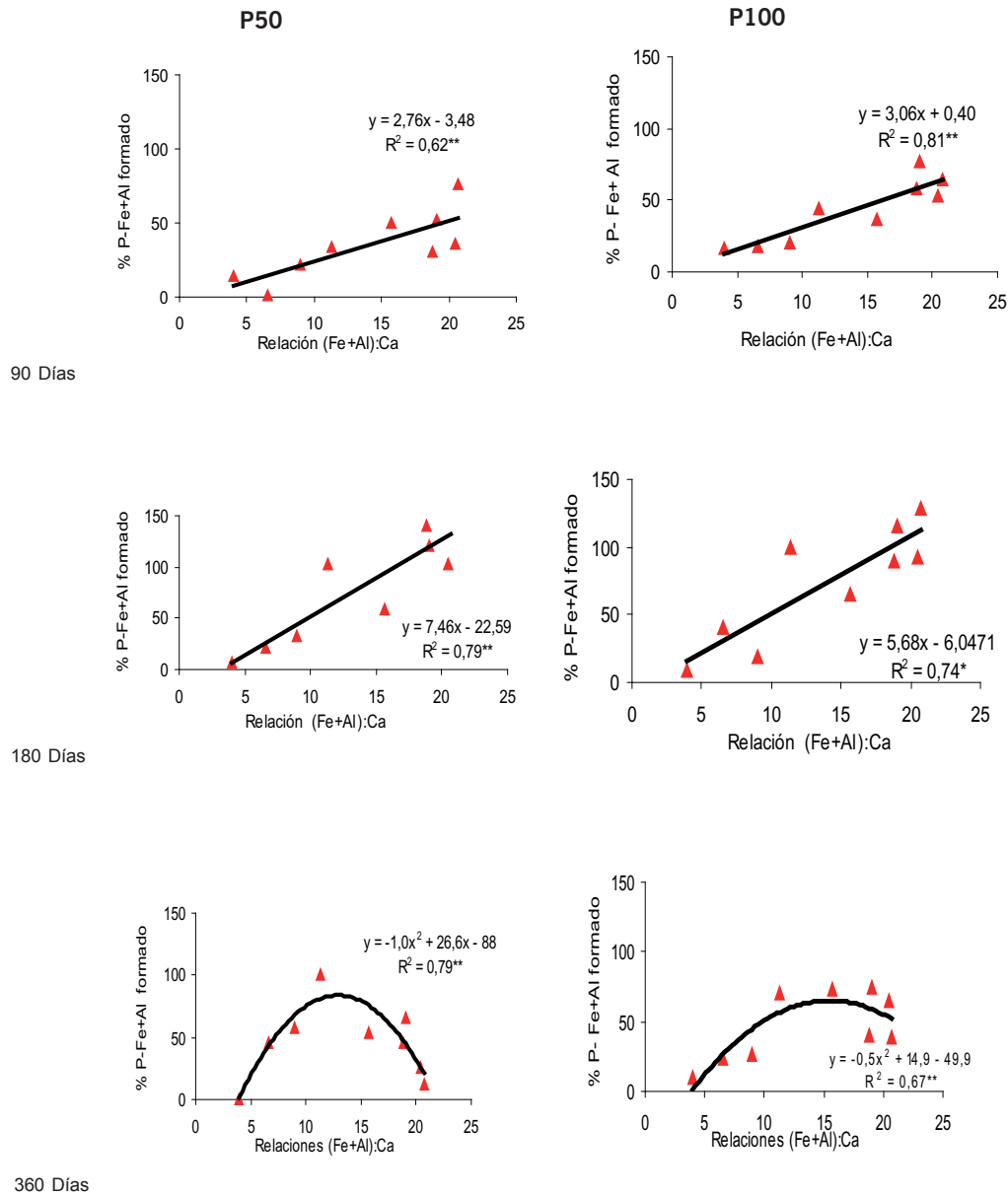


Figura 7. Porcentaje de P formado unido al Fe+Al no ocluido en función de la relación (Fe+Al):Ca en el período de incubación cuando se agregan 50 (P50) y 100 (P100) $\mu\text{g P g}^{-1}$.

Figure 7. Percentage of P formed attached to non-occluded Fe+Al as a function of the (Fe + Al):Ca ratio in the incubation period when adding 50 (P50) and 100 (P100) $\mu\text{g P g}^{-1}$.

cabo en el suelo cuando se agrega fertilizante (Galantini *et al.*, 2005; Gutiérrez Boem *et al.*, 2002). La formación de P-Ca del conjunto de los suelos no mostró un comportamiento definido sino solo tendencias y comportamientos particulares a los 90 y 180 días de incubación. Con P100 se observó una tendencia decreciente del P-Ca formado en la medida que la relación (Fe+Al):Ca aumentó. Esta ten-

dencia fue no significativa por un valor muy bajo. En la segunda fecha todos los valores tienden a ser cercanos a cero.

Finalmente, al concluir el período de la formación de P-Ca presentó un comportamiento cuadrático en función de la relación (Fe+Al):Ca presentando un mínimo para relaciones cercanas a 15. Un suelo presenta un valor muy alto (el mismo suelo que inicialmente tenía el valor más

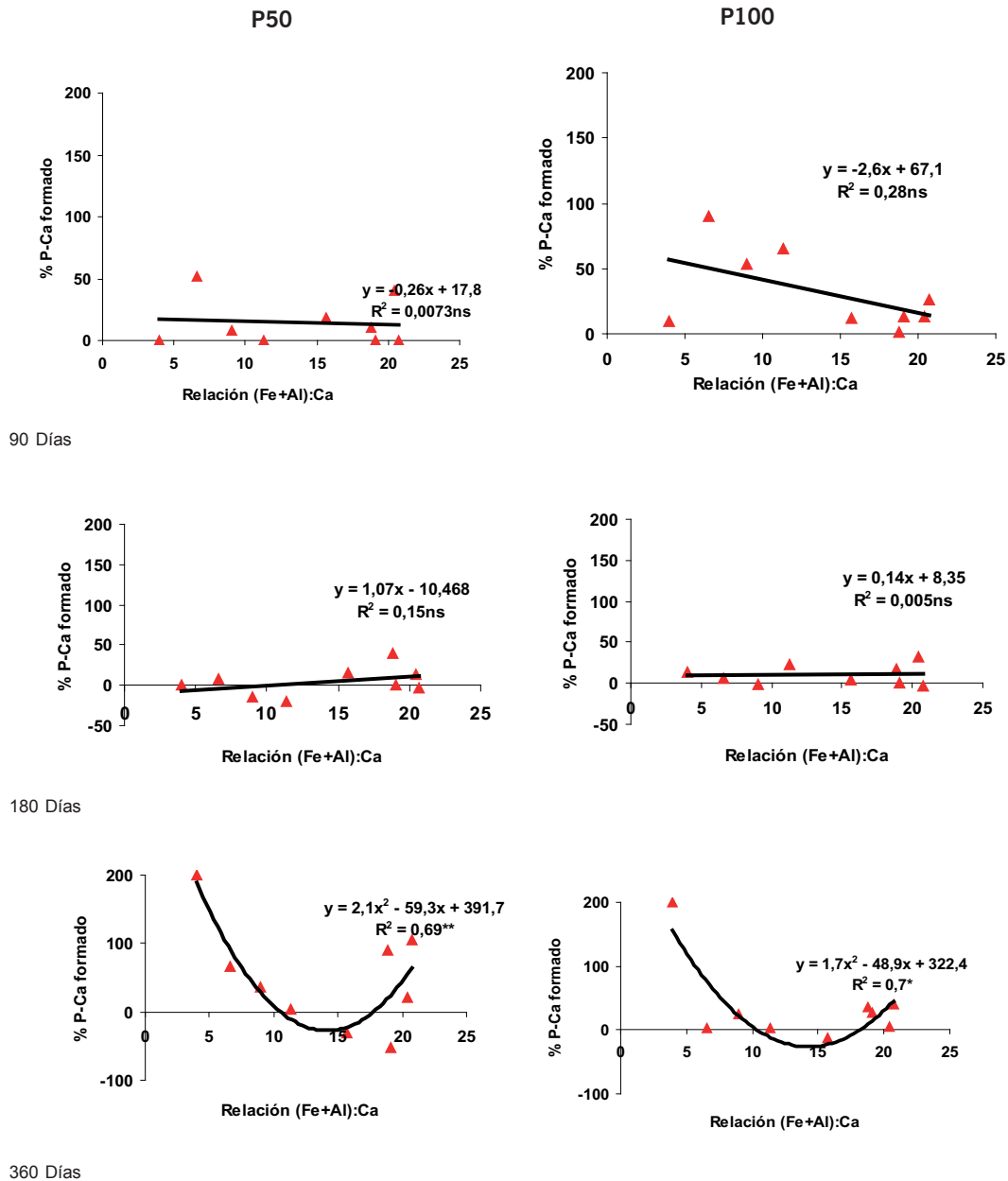


Figura 8. Porcentaje de P formado unido al Ca en función de la relación (Fe+Al):Ca durante el período de incubación cuando se agregan 50 (P50) y 100 (P100) $\mu\text{g P g}^{-1}$.

Figure 8. Percentage of formed P attached to Ca as a function of the (Fe + Al): Ca ratio during the incubation period when adding (P50) and 100 (P100) $\mu\text{g P g}^{-1}$.

bajo). Este suelo (1) tiene la particularidad de tener muy bajo Pe en relación a los otros dos suelos someros. Individualmente analizado podemos decir que el agregado de P inicialmente aumenta el P-Fe+Al el que paulatinamente disminuye, mientras que ocurre lo opuesto con el P-Ca.

En los otros dos suelos someros, con mayor Pe, el agregado de P hace que los equilibrios inicialmente favorezcan la formación de P-Ca. Algunos trabajos analizaron que con valores de P disponible por debajo de 60 mg kg^{-1} P, el P es sorbido fuertemente, mientras que a concentraciones más

altas la energía de absorción es mucho menor y hasta podría producirse la lixiviación de P (Heckrath *et al.*, 1995; Hooda *et al.*, 2000; Maguire & Sims, 2002).

Un análisis semejante se puede realizar al comparar los 4 suelos con mayor relación (Fe+Al):Ca, tres de ellos con valores de 7 a 9 y el otro 14 g kg⁻¹. Los que poseían el Pe más bajo fueron los que terminaron formando más P-Ca. Los resultados permitirían concluir que cuanto mayor es la relación (Fe+Al):Ca del suelo el fertilizante aplicado tenderá a formar más cantidad de compuestos de P unido al Fe+Al. Esto aumentará con el tiempo para después disminuir, en forma más acentuada en los suelos con mayor relación (Fe+Al): Ca.

Los equilibrios en el P-Ca son más variables, más independientes de la cantidad de P aplicada y del nivel original de Pe. Además en base a estos resultados, es posible plantear la hipótesis de que el tiempo requerido para obtener la mayor disponibilidad (o mayor efecto del fertilizante) será mayor en suelos calcáreos que han llegado a niveles muy bajos de Pe.

CONCLUSIONES

La incubación produjo una disminución del P-Fe+Al en suelos someros, no hubo variación apreciable en suelos de profundidad intermedia y un ligero aumento en los profundos.

El P-Ca fue la forma más abundante y la más dinámica. En los suelos poco profundos los cambios debido a la incubación fueron más pronunciados pero finalizaron con un contenido semejante al inicial. En los suelos profundos y de profundidad intermedia, los cambios fueron menos marcados pero se observó un aumento del P-Ca con el tiempo.

Inicialmente (primeros 6 meses), el agregado de P soluble aumenta la fracción de P-Fe+Al y posteriormente retrograda hacia las formas de P ligadas al Ca de menor disponibilidad, pero que con el transcurso del tiempo van actuando de manera dinámica.

Estos resultados marcan la importancia de profundizar en el conocimiento de las interacciones entre las propiedades del suelo y los equilibrios del P para aumentar la eficiencia en el uso del fertilizante a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Berardo, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción Pampeanos. Simposio El fósforo en la Agricultura. 38-44. Rosario. INPOFOS Cono Sur.
- Bolland M & D Allen. 2003. Phosphorus sorption by sandy soils from Western Australia: effect of previously sorbed P on P buffer capacity a single-point P sorption indices. *Australian Journal of Soil Research* 41: 1369-1388
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Castro, B & J Torrent. 1998. Phosphate availability in calcareous Vertisols and Inceptisols in relation to fertilizer type and soil properties. *Fert. Res.* 40: 109-119.
- Clark, JS & M Peech. 1955. Solubility criteria for the existence of calcium and aluminium phosphates in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 19: 171-174.
- Cole, CV; SR Olsen & CO Scott. 1953. The nature of phosphate sorption by calcium carbonate. *Soil Science Society of America Proceedings* 17: 352-356.
- Colomb, B; O Debaeke; C Jouany & JM Nolot. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Europ. J. Agronomy* 26: 154-165.
- Delgado, A & J Torrent. 2000. Phosphorus forms and Desorption Patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. *Soil Sci. Am. J.* 64: 2031-2037.
- Delvasto, P; A Valverde; A Ballester; JM Igual; JA Muñoz & F González. 2006. Characterization of brushite as a re-crystallization product formed during bacterial solubilization of hydroxyapatite in bath cultures. *Soil biology & Biochemistry* 38: 2645-2654.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2010. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Domínguez, R; C Del Campillo; F Peña & A Delgado. 2001. Effect of soil properties and reclamation practices on phosphorus dynamics in reclaimed calcareous marsh soils from the Guadalquivir Valley, SW Spain. *Arid Land Research and Management* 15: 203-221. doi: 10.1080/15324980152119775.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66: 95-106.
- Galantini, JA; L Suñer & H Krüger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *Revista Investigaciones agropecuarias RIA (INTA)* 34: 13-31.
- Galantini, JA & L Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina *Agriscientia* 25: 41-55.
- Galantini, JA. 2005. Carbono orgánico. Separación y fracciones orgánicas. Tecnologías en análisis de suelos. Marbán L. y Ratto S. (eds) 92-103.
- García, F; L Picone & A Berardo. 2006. Fósforo. Pág. 99-121. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds). Editorial INTA BA, Argentina.
- Gutiérrez Boem, FH; JD Scheiner; J Moyano & RS Lavado. 2002. Cambios en la disponibilidad de Fósforo del suelo por el agregado de fertilizante. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. P Madryn.

- Heckrath, G; PC Brookes; PR Poulton & KWT Goulding. 1995. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality* 24: 904-910.
- Hedley, M & M McLaughlin. 2005. Reactions of phosphate fertilizers and By-Products in soils. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America Soil Science Society of America, 677. S. Segoe Rd. WI 53711, USA. Phosphorus: Agriculture and the Environment, *Agronomy Monograph* N° 46.
- Heredia, OS & A Fernández Cirelli. 2007. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. *Geoderma* 137: 426-431.
- Hooda, PS; AR Rendell; AC Edwards; PJA Withers; MN Aitken & VW Truesdale. 2000. Relating soil phosphorus indices to potential phosphorus release to water. *Journal of Environmental Quality* 29: 1166-1171.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus, pp 894-895. In: DL Sparks; AL Page; PA Helme; RH Loeppert; PN Soltanpour; MA Tabatabai; CT Johnston & ME Sumner, eds., *Methods of soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Lindsay, WL. 1979. *Chemical equilibrium in soils*. John Wiley & Sons, New York. 449 pp
- Maguire, RO & JT Sims. 2002. Soil testing to predict phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality* 31: 1601-1609. [PubMed].
- Mallarino, A. 2005. Criterios de Fertilización Fosfatada en Sistemas de Agricultura Continua con Maíz y Soja en el Cinturón del Maíz. *Informaciones Agronómicas* 28 : 9-15.
- McGechan, MB. 2002. Sorption of phosphorus by soil, part 2: Measurement Methods, results and model parameter values. *Biosystems Engineering*. 82: 115-130.
- Mulvaney, RL. 1996. Nitrogen - Inorganic forms. 1123-1184. In: *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. (ed. DL Sparks), SSSA-ASA, Madison, WI, USA.
- Nwoke, OC; B Vanlauwe; J Diels; N Sanginga; O Osonubi & R Merckx. 2003. Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West African savanna soils. *Agric. Ecosys. Environ.* 100: 285-294.
- Olsen, SR & LE Sommers. 1982. Phosphorus. P.403-430. In: AL Page et al., (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9 ASA and SSSA, Madison, WI.
- Pizzeghello, D; A Berti; S Nardi & F Morari. 2011. Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141(1-2): 58-66.
- Quintero, C; N Boschetti & R Benavidez. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Commun. soil sci. plant anal* 34: 1435-1450.
- Rubio, G; FH Gutiérrez Boem & MJ Cabello. 2004. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? I. Cálculo a partir de propiedades básicas del suelo. *Informaciones Agronómicas* N° 24.
- Rubio, G; MJ Cabello; FH Gutiérrez Boem & E Munaro. 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72: 1721-1727.
- Sharpley, AN; TC Daniel & DR Edwards. 1993. Phosphorus movement in the landscape. *Journal of Production Agriculture* 6: 492-500.
- Sommers, LE & DDW Nelson, 1972. Determinacion de total phosphorus in soil. *Science Society of American Proceedings* 36: 902-904
- Stewart, WM; DW Dibb; AE Johnston & TJ Smyth 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Review. Agronomy Journal* 97: 1-6.
- Suñer, LG. 2007. Dinámica del fósforo en suelos agrícolas de la región semiárida pampeana. Universidad nacional del sur. Bahía Blanca, Argentina. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias 136pps.
- Wandruszka, R von. 2006. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical transactions*. 7: 6
- Wang, J; W LIU; H MU & T Dang. 2010. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. *Pedosphere* 20: 304-310.
- Withers, PJ & AN Sharpley. 1995. P fertilizers. Pp. 65-107 en Rehgigl, JE (ed.) *Soil amendments and environmental quality*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.