

Eficiencia agronómica de fósforo: efecto de fuentes líquidas y sólidas en
suelos con presencia de calcáreo de Entre Ríos

*Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de Buenos Aires.
Área Ciencias del Suelo.*

Juan Manuel Pautasso

Ingeniero Agrónomo – Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de
Entre Ríos – 1998.

Lugar de trabajo: Agencia de Extensión Rural INTA Diamante. EEA INTA Paraná.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO:

Director:

Flavio Gutiérrez Boem.

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo - Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Doctor of Philosophy, Soil Science Program, University of Kentucky, USA.

Codirectores:

Ricardo Melchiori

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Entre Ríos, Argentina.

Magister Scientiae en Ciencias Agrarias - Universidad de Mar del Plata, Argentina.

Pedro Aníbal Barbagelata.

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Entre Ríos, Argentina.

Doctor of Philosophy, Iowa State University, USA.

JURADO DE TESIS:

Director de Tesis:

Flavio Gutiérrez Boem.

Jurado:

Hernán Rene Sainz Rozas

Ingeniero Agrónomo - Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Doctor en Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata.

Humberto Carlos Dalurzo

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

Doctor – Universidad de Lleida, España.

FECHA DE DEFENSA DE LA TESIS:

5 de junio 2013

DEDICACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

A los Héroes de Malvinas, a 30 años de la gloriosa Gesta.

A Cristina, mi mamá de la tierra y a María Santísima, que me cuidan desde el Cielo.

*A Alfredo, mi papá, y a mis hermanos: Néstor, Magdalena, Laura, Rosario, Mercedes, José, Inés,
Ángeles y Cecilia.*

Este trabajo requirió también esfuerzos y sacrificios de personas a las que quiero agradecer:

- A mi esposa: Carina; y a mis hijos José Gabriel, Milagros del Rosario, Francisco Javier, María de Jesús y Pedro Julián. Por la paciencia y el tiempo que les quité.
- A mis directores de Tesis: Flavio Gutiérrez Boem, Ricardo Melchiori y Pedro Barbagelata. Por su tiempo, conocimiento y paciencia.
- A José Pautasso, Javier Kuhn, Simón Giacinti. Por la ayuda en el trabajo de campo y por su amistad.
- Al personal de laboratorio y del área de suelos del INTA Paraná: Luis Cappellacci, Enrique Alva, Carlos Maffini, Carlos Porciel, José Pires, Sebastián Velazquez, Carlos Hasenauer, Marcelo Cappellacci, Valeria Ormaechea, Héctor Capelachi. Por su incondicional esfuerzo.
- A la Dra. Graciela Boschetti por sus valiosos aportes, fundamentalmente en el tema fraccionamiento de fósforo.
- A los productores y empleados: Evaristo Schneider, Alfredo y Francisco Gutiérrez, Lali Guzmán y Ángel Lencina. Por su gran ayuda.
- A mis superiores del INTA: César Valentinuz, Rubén Isaurralde y Osvaldo Paparotti. Y a mis compañeros de la AER Diamante: Silvia, Ernesto y Luciana. Porque favorecieron generosamente que pueda alcanzar esta meta.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifiquen explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	I
INDICE DE FIGURAS	III
ABREVIATURAS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Hipótesis y objetivos.	4
Bibliografía	5
CAPÍTULO II: FIJACIÓN DEL FÓSFORO AGREGADO AL SUELO CON DISTINTAS FUENTES EN CONDICIONES CONTROLADAS	8
1. Introducción.	8
2. Materiales y métodos.	12
2.1 Características generales del ensayo.	12
2.2 Diseño del experimento.	13
2.3 Análisis de suelo.	13
2.4 Análisis estadístico.	14
3. Resultados y discusión.	14
3.1 Características edáficas. Resultados antes de la incubación.	14
3.2 Resultados luego de la incubación.	15
3.2.1 Fósforo extraíble mediante los métodos Bray I y Mehlich III.	15
3.2.2 Fraccionamiento del P para dos tipos de suelos con distintas fuentes de P.	19
3.2.3 Análisis por fuente.	22
4. Conclusión.	24
Bibliografía.	25
CAPÍTULO III: CRECIMIENTO DE TRIGO Y RECUPERACIÓN DEL FÓSFORO AGREGADO CON DISTINTAS FUENTES EN CONDICIONES CONTROLADAS	29
1. Introducción.	29
2. Materiales y métodos.	30
3. Resultados y discusión.	31
3.1 Resultados de los análisis de suelos antes de la fertilización.	31
3.2 Producción de materia seca.	31
3.3 P en materia seca y eficiencia de recuperación de P.	33
4. Conclusión.	37
Bibliografía.	38
CAPÍTULO IV: EFICIENCIA AGRONÓMICA DE DISTINTAS FUENTES DE FÓSFORO EN CONDICIONES DE CAMPO	40
1. Introducción	40
2. Materiales y métodos	41
2.1 Características generales de los ensayos.	41

2.2 Diseño del experimento.	41
2.3 Muestreo de suelo.	41
2.4 Cosecha y análisis en el cultivo.	42
2.5 Cálculo de eficiencia de recuperación de P y eficiencia agronómica.	42
2.6 Análisis de los resultados.	43
3. Resultados y discusión	43
3.1 Resultados de los análisis de suelos antes de la fertilización.	43
3.2 Rendimiento de trigo.	44
3.3 Fósforo en grano y eficiencia de la fertilización.	49
3.4 Residualidad de la aplicación con distintas fuentes y fraccionamiento secuencial.	53
4. Conclusión.	58
Bibliografía	59
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES GENERALES	63
Necesidades futuras de investigación.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultado del análisis de suelos antes de la incubación.	15
Tabla 2. Pendientes y ajustes encontrados con cada extractante y para cada fuente. Suelo Vertisol.	18
Tabla 3. Fósforo recuperado para las disitntas fuentes en los suelos Molisol y Vertisol.	19
Tabla 4. Valores de P _{mia} y P _{iHCl} en suelos sin fertilizar incubados durante 45 días a humedad y temperatura constantes.	20
Tabla 5. Fracción P _{mia} : análisis de varianza y significancia del efecto de cada variable y sus interacciones con el modelo.	20
Tabla 6. Fracción P _{i HCl} : análisis de varianza y significancia del efecto de cada variable y sus interacciones con el modelo.	20
Tabla 7. Valores de P _{mia} para las distintas fuentes en las muestras fertilizadas con las dosis de 480 mg P kg ⁻¹ , suelo incubado durante 45 días a humedad y temperatura constantes. Suelo Molisol y Vertisol.	21
Tabla 8. Producción de materia seca de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.	31
Tabla 9. P absorbido en plantas de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.	33
Tabla 10. Concentración de P en materia seca de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.	34
Tabla 11. Eficiencia de recuperación de P en materia seca de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.	36
Tabla 12. Valores promedios de las variables de suelo medidas y sus parámetros de dispersión. Profundidad de muestreo 10 cm.	43
Tabla 13. Estadísticos descriptivos del rendimiento de trigo para los dos suelos y campañas.	45
Tabla 14. Respuesta agronómica del agregado de P por ensayo.	45
Tabla 15. Rendimiento de trigo según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.	48
Tabla 16. Concentración de P en grano para el suelo Molisol.	50

Tabla 17. Porcentaje de P en grano de trigo según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.	50
Tabla 18. Extracción de P ha ⁻¹ según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.	51
Tabla 19. Eficiencia de recuperación de la fertilización fosfatada en grano de trigo según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.	52
Tabla 20. Eficiencia agronómica de la fertilización fosfatada según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.	53
Tabla 21. P total del suelo para cada fuente. Suelo Vertisol.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del movimiento del fosfato desde un gránulo de SFT (Hedley & McLaughlin, 2005).	10
Figura 2: Diagrama de flujo de la extracción secuencial de fósforo (Adaptado de Tiessen y Moir, 1993).	14
Figura 3. Dosis de P agregado y P extraídos luego de la incubación en el suelo Molisol: a) P Bray I; b) P Mehlich III.	16
Figura 4. Comparación entre el P extraíble determinado por los métodos Bray I y Mehlich III en muestras de suelo Molisol incubadas 45 días con distintas cantidades de fertilizante fosfatado.	16
Figura 5. Dosis de P agregado y P extraídos luego de la incubación en el suelo Molisol: a) P Bray I; b) P Mehlich III. Todas las fuentes.	17
Figura 6. Dosis de P agregado y P extraídos luego de la incubación en el suelo Vertisol: a) P Bray I; b) P Mehlich III.	17
Figura 7. Comparación entre el P extraíble determinado por los métodos Bray I y Mehlich III en muestras de suelo Vertisol incubadas 45 días con distintas cantidades de fertilizante fosfatado.	18
Figura 8. Comparación entre el P en la fracción P _{mia} y el P extraíble determinado por los métodos Bray I y Mehlich III. Tratamientos con dosis máximas de P en suelo Vertisol y Molisol incubadas 45 días.	22
Figura 9. Relación entre el P adicionado con FDA y PFA y la producción de materia seca de trigo. Modelo combinado en una única función. Cada punto corresponde a una repetición. Suelo Molisol y Vertisol.	32
Figura 10. Relación entre el P agregado con FDA y PFA y el P absorbido (mg de P en plantas de trigo por maceta). Cada punto corresponde al promedio de las cuatro observaciones para cada fuente y dosis, a) suelo Molisol; b) suelo Vertisol.	34
Figura 11. Relación entre el P agregado con FDA y PFA y la concentración de P en hojas. Cada punto corresponde al promedio de las cuatro observaciones para cada fuente y dosis, a) suelo Molisol; b) suelo Vertisol.	35
Figura 12. Relación entre el P agregado con FDA y PFA y la eficiencia de recuperación de P. Cada punto corresponde al promedio de las cuatro observaciones para cada fuente y dosis; a) suelo Molisol; b) suelo Vertisol.	36
Figura 13. Esquema de muestreo de suelos para cada parcela luego de la cosecha.	42
Figura 14. Relación entre el nivel de carbonatos y el pH en suelo. Todos los sitios.	44

- Figura 15. Efecto de las distintas dosis de P en el rendimiento de trigo: a) Suelo Vertisol, campaña 2007; b) Suelo Molisol, campaña 2007; c) Suelo Vertisol, campaña 2008. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). 46
- Figura 16. Efecto de las distintas fuentes fosfatadas en el rendimiento de trigo, Suelo Vertisol, campaña 2007. T: Testigo. AF: ácido fosfórico. PFA: polifosfato de amonio. SFT: súper fosfato triple. FDA: fosfato di amónico. 48
- Figura 17. Relación entre el contenido de carbonato del suelo y rendimiento de trigo. Símbolos llenos, corresponde a testigos y símbolos vacíos a los tratamientos fertilizados con 24 kg P ha^{-1} . 49
- Figura 18. Concentración de P en granos para distintas fuentes de P. Suelo Vertisol, Campaña 2007. FDA: fosfato diamónico; PFA: polifosfato de amonio; SFT: súper fosfato triple. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). 51
- Figura 19. Extracción de P por hectárea en el suelo Vertisol según fuente. FDA: fosfato di amónico; PFA: polifosfato de amonio; SFT: súper fosfato triple. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). 52
- Figura 20. Pendientes de P extraíble correspondiente al promedio de las diferencias entre las dos mediciones de P extraíble para cada sitio y dosis: a) P Bray I; b) P Mehlich III. 54
- Figura 21. Fracciones de P para cada fuente: a) P mia, “P disponible”; b) Pt NaHCO_3 , “P lábil”; c) Pt NaOH , “P moderadamente lábil”; d) Pt HCl , “P unido al calcio”. Campaña 2007, suelo Vertisol. T: Testigo; SFT: súper fosfato triple; PFA: polifosfato de amonio y FDA: fosfato di amónico. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Test LSD Fisher. 56
- Figura 22. Relación P mia y P extraíble por Bray I y Mehlich III. 57
- Figura 23: Relación entre el contenido de P en las fracciones estables, unidas al calcio (Pt HCl) y P total con el contenido de carbonato de los suelos. 57

ABREVIATURAS

Ácido fosfórico	AF
Capacidad de intercambio catiónico	CIC
Calcio intercambiable	Ca _{int}
Eficiencia agronómica del fósforo	EAGR
Eficiencia de recuperación de P	EREC
Fósforo	P
Fósforo absorbido	P ABS
Polifosfato de amonio	PFA
Fosfato di amónico	FDA
Fósforo extraído con membrana de intercambio aniónica	P _{mia}
Fósforo en grano	P grano
Fósforo inorgánico extraído con ácido clorhídrico	P _{iHCl}
Fósforo inorgánico extraído con bicarbonato de sodio	P _{i NaHCO₃}
Fósforo inorgánico extraído con hidróxido de sodio	P _{i NaOH}
Fosfato mono amónico	FMA
Fósforo orgánico extraído con bicarbonato de sodio	P _{o NaHCO₃}
Fósforo orgánico extraído con hidróxido de sodio	P _{o NaOH}
Fósforo residual extraído con ácido sulfúrico y agua oxigenada	P res
Fósforo total	P t
Súper fosfato triple	SFT
Súper fosfato simple	SFS
Testigo	T

RESUMEN

Eficiencia agronómica de fósforo: efecto de fuentes líquidas y sólidas en suelos con presencia de calcáreo de Entre Ríos

La respuesta a la fertilización fosfatada es generalizada en la región pampeana argentina. Los fertilizantes, al ser aplicados al suelo, se disuelven y reaccionan con constituyentes del suelo y con compuestos del fertilizante, dando fosfatos menos solubles. Las fuentes de P utilizadas también determinan las reacciones producidas, lo que podría influir en la disponibilidad de P para las plantas. En Entre Ríos existen sectores dentro de los lotes donde el pH es alcalino y la presencia de carbonato de calcio es importante, pudiendo afectar la disponibilidad de P, tanto en suelos del orden Molisol como Vertisol. Para evaluar el efecto de distintas fuentes de P se realizaron ensayos de campo, invernadero y laboratorio; incluyendo análisis de suelos y mediciones en el cultivo de trigo. En el suelo Vertisol (con alrededor de 10% de carbonato de calcio) el P extraído con extractantes suaves (P Bray I y Pmia) fue menor con una fuente de reacción alcalina (fosfato di amónico – FDA), correspondiéndose con mayor cantidad de P unido al calcio. En el suelo Molisol (con 3% de carbonato) las diferencias inducidas por fuentes no fueron significativas al evaluar los valores de Bray I y Mehlich III frente al agregado de P. Sin embargo, al igual que en el suelo Vertisol, el Pmia fue mayor cuando se utilizaron las fuentes súper fosfato triple (SFT) y polifosfato de amonio (PFA) frente a FDA, y esta última presentó mayor P unido al Ca. Para ambos suelos, no se observaron ventajas en el crecimiento, rendimiento y eficiencia agronómica del cultivo de trigo por el uso de alguna fuente en particular; pero el P absorbido por el cultivo, la concentración de P en tejido y la eficiencia de recuperación del P del fertilizante fue mayor cuando se agregó P con las fuentes SFT y PFA. Estos resultados sugieren que la reacción que produce el fertilizante al disolverse en el suelo con alta presencia de carbonato de calcio libre es la que condiciona la cantidad de P que queda en la solución del suelo.

Palabras Claves: fertilización fosfatada, reacción del fertilizante, análisis de suelos, fijación de P, eficiencia agronómica de P.

ABSTRACT

**Phosphorus agronomic efficiency: effect of fluid and granular P sources in soils
with calcium carbonate of Entre Ríos**

Crop response to P fertilization is generalized in Argentina's Pampean region. Once applied to soil, P fertilizers are dissolved and react with soil constituents forming less soluble phosphates. The source of P fertilizer used also control the reactions produced, affecting plant P availability. In Entre Rios province there are areas within fields where soil pH and calcium carbonate contents are high, which may affect P availability in both, Molisol and Vertisol soils. Field, greenhouse, and laboratory experiments were conducted to evaluate the effect of different fertilizer P sources, including soil test P and crop measurements. In a Vertisol soil (around 10% calcium carbonate content) less P was measured with weak extractants (Bray I and Pmia) when diamonic phosphate (DAP) was used, explained by a higher calcium bonded P. In a Molisol soil (around 3% calcium carbonate content) the comparison among fertilizer P sources did not show differences on Bray I or Mehlich III soil extracted P. However, as in vertisol soil, more P was measured with Pmia when the source of P used was triple superphosphate (TSP) and ammonium polyphosphate (APP) compared to DAP, with higher calcium bonded P for DAP. There were no differences in wheat growth, wheat yield, and crop P use efficiency among P sources evaluated in both soils, but crop P uptake and P recovery efficiency was higher when TSP and APP were used. These results suggest that fertilizer P reaction produced when dissolving into soils with high free calcium carbonates contents is influencing the amounts of P that remains in soil solution.

Key words: phosphorus fertilization, fertilizer reaction, soil test P, P retention, P agronomic use efficiency.

Capítulo I

Introducción General

El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los vegetales, siendo considerado uno de los macronutrientes más importantes. Las deficiencias de P en las plantas se relacionan con su rol en la transferencia y almacenaje de energía. Los cultivos que presentan deficiencias de P muestran un crecimiento inicial menor (Rodríguez et al., 2000).

El incremento en la extracción de nutrientes en los granos cosechados ha dado como resultado balances negativos (mayores remociones en granos que reposición por fertilización) para la región pampeana (García et al., 2005; Barbagelata & Melchiori, 2007) siendo la reposición un poco más del 50% del P exportado por los cultivos (Rubio & Álvarez, 2010) lo que ha derivado en una disminución del P extraíble de los suelos entre un 65% y 75% (Heredia et al., 2003) y si bien, esta realidad no continuó agravándose en los últimos años (Sainz Rozas & Echeverría, 2009), las respuestas a la aplicación de fertilizantes fosfatados son generalizadas en diversos cultivos en la región (Álvarez et al., 2000; García et al., 2005; Quintero et al., 1995; Mistrorigo et al., 1993), pasando a ser el P un nutriente deficitario (Correndo & García, 2011).

Por diversas limitaciones, Entre Ríos (Argentina) posee una baja proporción de tierras aptas para uso agrícola (15%, según lo informado por Tasi & Bedendo, 2008). La aptitud del resto de la superficie está condicionada al uso de tecnologías como la siembra directa, adecuada rotación y nutrición de los cultivos. Entre otras limitantes, se presenta la baja fertilidad fosfatada de estos suelos, siendo la deficiencia generalizada (Quintero et al., 2000; Tasi, 2000) debido a los bajos contenidos de este elemento en los materiales originarios (Boschetti et al., 2000). Internacionalmente se citan valores de P total de los suelos en un rango entre menos de 100 mg P kg⁻¹ para suelos arenosos tropicales hasta 6000 mg P kg⁻¹ para suelos derivados de rocas ígneas ricas en apatitas en zonas semiáridas (Tiessen, 2005). En la región pampeana el contenido de P es variable, con un rango entre 120 y 1200 mg P kg⁻¹ para el horizonte subsuperficial, que es el menos afectado por acción antrópica y refleja más fielmente el aporte del material original (Vázquez, 2002). Los suelos de Entre Ríos presentan contenidos medios a bajos de P total; Boschetti et al. (2000) informa un rango entre 200 y 300 mg P kg⁻¹ para los suelos Vertisoles y cercanos a 300 mg P kg⁻¹ para Molisoles en el horizonte superior.

Las cantidades de P requeridas por los cultivos, la frecuencia en las que se presentan deficiencias, la dinámica de este nutriente en el sistema suelo – planta y las respuestas al agregado del mismo son objetivos de estudio en muchos trabajos de investigación (García et al., 2005).

La principal entrada de P al agro-ecosistema está dada por la adición de fertilizantes o enmiendas. Los fertilizantes fosfatados, al ser aplicados al suelo, se disuelven en presencia de agua. Las reacciones que ocurren alrededor del fertilizante con constituyentes del suelo y con compuestos del fertilizante disminuyen la concentración de P de la solución, dando fosfatos menos solubles. El fenómeno involucrado es la fijación, sorción o retención de P y comprende procesos de adsorción, precipitación e inmovilización biológica (Hedley & McLaughlin, 2005, Sims & Pierzynski, 2005). Estos procesos son los responsables de que sólo entre 10 y 30% del fósforo aplicado al suelo como fertilizante sea absorbido por las plantas durante la primera estación de

crecimiento o ciclo agrícola, permaneciendo el resto como productos de la reacción fertilizantes – suelo, y quedando potencialmente disponible para los próximos cultivos, declinando la respuesta a este fosfato residual en los años siguientes (Rubio & Álvarez, 2010).

El P que absorben las plantas es el que se encuentra en la solución del suelo en forma de fosfato mono y di ácido. Su concentración en la solución es muy baja, variando ampliamente entre suelos, siendo en general menor al 1% del P total, por lo que para satisfacer la demanda de los vegetales el P debe ser repuesto a la solución del suelo varias veces durante el ciclo del cultivo (Pierzynski et al., 2005); siendo la difusión la principal forma en que se mueve dentro del suelo (Sims & Pierzynski, 2005). La remoción de P desde la solución del suelo luego de la adición de fertilizantes fosfatados es más probablemente un continuo de procesos, desde la adsorción a la precipitación, que resultan en un continuo de estados químicos (Fixen & Grove, 1990). El abastecimiento desde los distintos equilibrios (P orgánico e inorgánico lábil) hacia la solución del suelo varía también de acuerdo a condiciones del suelo y clima: textura, materia orgánica, pH, temperatura y humedad, entre otros (Pierzynski et al., 2005). Uno de los fenómenos estudiados en estos equilibrios es la capacidad buffer, que indica la capacidad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de P en solución al extraer o agregar P (Holford & Mattingly, 1979). Los suelos de Entre Ríos, en general, presentan una capacidad buffer de media a baja en relación a otros suelos de la Mesopotamia y de media a alta comparado con el resto de la Pampa Húmeda (Quintero et al., 2003, Quintero et al., 1999).

El proceso de precipitación del P involucra reacciones más permanentes que el de adsorción, lo que genera compuestos fosfatados no disponibles para los cultivos en el corto/mediano plazo. El carbonato de calcio e hidróxidos de hierro y aluminio juegan un rol clave en la fijación de P en los suelos (Sample et al., 1980). La fijación por adsorción es la que se produce sobre superficies coloidales (arcillas, hidróxidos de hierro y aluminio, carbonatos y materia orgánica) y la fijación por precipitación se produce por la formación de compuestos prácticamente insolubles (fosfatos de calcio, de hierro, de aluminio o manganeso) (Fixen & Grove, 1990).

El pH de los suelos afecta la reactividad de los componentes del suelo con el ortofosfato, y establece la presencia y abundancia relativa de los cationes que pueden precipitar con el P (Sims & Pierzynski, 2005). En condiciones neutras a alcalinas los minerales secundarios principalmente formados son fosfatos de calcio y en condiciones ácidas, el P precipita con hierro y aluminio (Fixen & Grove, 1990). Con el aumento del pH los fosfatos de aluminio y hierro aumentan su solubilidad mientras que los de calcio, disminuyen, alcanzando la mayor concentración de P en la solución del suelo a pH entre 6 – 6.5 (Engelstad & Terman, 1980).

Además de las características químicas y físicas de los suelos, las fuentes de P utilizadas determinan las reacciones suelo – fertilizante, lo que podría influir también en la disponibilidad de P para las plantas (Havlin et al., 1999; Hedley & McLaughlin, 2005). En el mercado encontramos fertilizantes fosfatados de reacción en el suelo ácida o alcalina; y por su forma física, fertilizantes líquidos además de los granulares. De los fertilizantes de reacción ácida en el suelo, utilizados en la región pampeana, están el superfosfato simple de calcio (SFS), superfosfato triple de calcio (SFT) y fosfato mono amónico (FMA). El SFT produce un pH en la zona de disolución del gránulo igual a 1,

el SPS 1,5 y el FMA de alrededor de 3,5. En cuanto a los de reacción alcalina, el fosfato diamónico (FDA) eleva el pH alrededor del gránulo a valores cercanos a 8. (Sample et al., 1980; Hedley & McLaughlin, 2005). Los fertilizantes líquidos, de reciente aparición en el mercado local son polifosfato de amonio (PFA) y ácido fosfórico (AF). Polifosfato es un término que se usa para describir un compuesto formado por dos o más iones de fosfatos, combinados entre sí, con la pérdida de una molécula de agua cada dos iones ortofosfatos, estos compuestos se combinan con amonio para producir el fertilizante. Usualmente son una mezcla de 50% ortofosfatos y 50% pirofosfato y tripolifosfato (Hedley & McLaughlin, 2005). Los ácidos fosfóricos, por lo común, son productos derivados de la industria, conteniendo iones ortofosfatos y en menor proporción polifosfatos, su pH en solución es muy ácido. El PFA, a diferencia del ácido fosfórico, tiene una reacción neutra a levemente ácida (Hedley & McLaughlin, 2005).

Distintas propiedades de los fertilizantes fosfatados han sido estudiadas relacionándolas con posibles efectos en la disponibilidad del P del fertilizante para los cultivos. Engelstad & Terman (1980) informan que, las soluciones o suspensiones (aplicadas en bandas o pulverizadas) y los fertilizantes sólidos (finamente molidos o granulados) con similar solubilidad, a igual tasa de aplicación de P y ubicación en el suelo, muestran una similar disponibilidad para los cultivos. Sin embargo, con respecto a los polifosfatos detallan que para ser utilizados por las plantas deben hidrolizarse a ortofosfatos, lo que podría tener menor eficiencia con bajas temperaturas. Finalmente sugieren que el principal criterio para elegir entre fertilizantes es el precio por unidad de P aplicado. En igual sentido, Havlin et al. (1999) informan que, en general, no se han observado diferencias en la eficiencia de uso del P del fertilizante, ya que cuando la solubilidad del fertilizante en agua es mayor al 80% las reacciones de los mismos en el suelo dependen mayormente de las características de los suelos y en menor medida de las del fertilizante. Estudios recientes realizados en Estados Unidos en suelos alcalinos calcáreos y no calcáreos demostraron que la fertilización fosfatada líquida no tuvo beneficios, en la producción de materia seca de alfalfa (*Medicago sativa L.*) irrigada, comparados con fertilizantes granulados (Reid et al., 2004; Ottman et al., 2006). No obstante, en trabajos conducidos a campo y en laboratorio durante la última década, en suelos calcáreos de zonas áridas de Australia se informan beneficios de las fuentes líquidas (AF, PFA y FMA) frente a las granuladas (FMA, FDA y SFT). Hettiarachchi et al. (2006); Lombi et al. (2004) y Lombi et al. (2006) observaron que en la interface suelo – fertilizante existe una mayor cantidad de fosfatos precipitados cuando se utilizaron fertilizantes granulados frente a formulaciones líquidas, explicando que dicho fenómeno ocurre al producirse el flujo de humedecimiento del gránulo, por la reacción entre el P del gránulo y el carbonato de calcio libre de la solución del suelo. Esta observación coincidió con una mayor eficiencia agronómica de los fertilizantes líquidos en el cultivo de trigo (Bertrand et al., 2006; McBeath et al., 2005; Holloway et al., 2001).

Por otro lado, Hedley & McLaughlin (2005) afirman que la tasa de hidrólisis de los PFA es baja en los suelos alcalinos calcáreos o con baja actividad microbiana. En estos casos el movimiento de P en el suelo es predominantemente como polifosfato. Esto podría ser importante en la difusión de P, en los productos de reacción con el P y en la eficiencia de absorción de P por parte de los cultivos. Finalmente McBeath et al. (2007) afirman que el incremento de la producción de materia seca de trigo puede predecirse al usar fertilizantes líquidos frente a los granulares sólo con el valor de carbonato de calcio libre de los suelos; en dicho trabajo los valores de carbonato de calcio libre tuvieron un

rango entre valores por debajo de la detección hasta 68%. Estos trabajos sugieren que la estrategia de utilizar fertilizantes fosfatados líquidos podría aplicarse con éxito también en un amplio rango de suelos en otras partes del mundo con clima seco (Bertrand et al., 2006) o con suelos calcáreos (Holloway et al., 2001).

En Entre Ríos es común encontrar en suelos Vertisoles y Molisoles sectores con presencia de concreciones de carbonatos calcáreos y carbonato libre en la masa en prácticamente todo el perfil. Esta situación está relacionada con la erosión natural en las lomas y/o por degradación generada por las labranzas en suelos con pendientes debido a que son suelos desarrollados sobre materiales calcáreos consolidados muy antiguos. En dichas zonas, donde prácticamente se ha perdido el horizonte superficial, se han medido valores máximos de CaCO_3 , con el calcímetro de Bernard, de 29% (Plan Mapa de Suelos, 1991). Estos valores de carbonato pueden afectar la disponibilidad de P.

A diferencia de las regiones donde se evaluaron respuestas a distintas fuentes de P, Entre Ríos posee un clima templado húmedo, con lluvia promedio anual de 1.000 mm y en general no se emplea riego complementario en los sistemas de producción de cultivos extensivos. Para estos suelos no se han realizado estudios comparativos sobre la eficiencia de uso del P para distintas fuentes.

Hipótesis:

La **forma física de la fuente de P** (líquida o sólida) afecta la eficiencia agronómica del P en suelos con presencia de calcáreo.

La **reacción de la fuente de P** (ácida o alcalina) afecta el cambio en la disponibilidad del P por unidad de P agregado en suelos con presencia de calcáreo, que podría afectar también la eficiencia agronómica.

Objetivos:

Cuantificar los cambios en la disponibilidad de P y en las fracciones de P del suelo (lábil y no lábil) provocados por el agregado de P con fuentes líquidas y granuladas.

Determinar el efecto de fuentes líquidas y granulares de P sobre la absorción de P.

Determinar la absorción de P en grano y el rendimiento de trigo utilizando fuentes líquidas y granulares.

Determinar la residualidad de la fertilización fosfatada a campo con fuentes de P líquidas o granulares.

Bibliografía

- Álvarez R., Álvarez, C. y Steinbach, H. 2000. Fertilización de trigo y maíz. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires (Argentina).
- Barbagelata, P. y Melchiori, R. 2007. Balance de nutrientes en campos agrícolas de la provincia de Entre Ríos. En Agricultura Sustentable En Entre Ríos. Ediciones INTA: ISBN 978-987-521-253-4. Pag. 89- 94.
- Bertrand, I.; Mclaughlin, M; Holloway, R.; Armstrong, R. and Mcbeath, T. 2006. Changes in p bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. *Nutrient Cycling in Agro Ecosystems* (2006). 74: 27-40.
- Boschetti, N; Valenti, R.; Vesco, C. y Sione, M. 2000. Contenidos de fósforo total en suelos con características vérticas de la provincia de Entre Ríos. *Revista Facultad De Agronomía*, 20 (1): 53-58.
- Correndo, A. y García, F. 2011. Relevamiento de fertilidad de suelos. Base de datos ASP Argentina 1995-2003. En Simposio Fertilidad 2011. IPNI – Fertilizar. Pg. 268-275.
- Engelstad, O. and Terman, G. 1980. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizer. Pp 311-332. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA.
- Fixen, P. and Grove J. 1990. Testing soils for phosphorus. Pp 141-180. In Westerman, R. (Ed.) *Soil testing and plant analysis*. Third edition. SSSA Book series.
- García, F.; Piconi, L. y Berardo, A. 2005. Fósforo. Pág. 99-121. En: H. Echeverría y F. García (Eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires. Argentina.
- Havlin, J; Beaton, J.; Tisdale, S. and Nelson, W. 1999. *Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management*. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 499 p.
- Hedley, M. and McLaughlin, M. 2005. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soil. Pp. 181-252. In J. T. Sims and A. N. Scharpley (Ed) *Phosphorus: Agriculture and Environment*. Agronomy Monograph N° 46.
- Heredia, O; Duffau, V. y Conti, M. 2003. Cambios en la fertilidad edáfica en suelos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, INPOFOS 19: 22-44.
- Hettiarachchi, G.; Lombi, E.; Mclaughlin, M.; Chittleborough, D. and Self, P. 2006. Density changes around phosphorus granules and fluid bands in calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 960-966. 2006.
- Holford, I. and Mattingly, G. 1979. Effects of phosphate buffering on the extraction of labile phosphate by plants and by soil tests. *Australian Journal of Soil Research*. 17, 511–514.

- Holloway, R., Bertrand, I.; Frischke, A.; Brace, D.; McLaughlin, M. and Shepperd, W. 2001. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil* 236: 209–219.
- Lombi, E.; Scheckel, K.; Armstrong, R.; Forrester, S.; Cutler, J. and Paterson, D. 2006. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil; a synchrotron-based investigation. Published In *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 2038-2048 (2006).
- Lombi, E., McLaughlin, M.; Johnston, C.; Armstrong, R. and Holloway, R. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. Published In *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 682-689
- Mcbeath, T., Armstrong, R.; Lombi, E.; McLaughlin, M. and Holloway, R. 2005. Responsiveness of wheat to liquid and granular phosphorus fertilisers in southern Australian soils. *Australian Journal of Soil Research* 43:203-212.
- McBeath, T.M.; Mclaughlin M.J.; Armstrong R.D., Bell, M.; Bolland M.; Conyers M.; Holloway, R. and Mason, S. 2007. Predicting the response of wheat to liquid and granular phosphorus fertilizers in Australian soils. *Australian Journal of Soil Research* 43:203-212.
- Mistrorigo, D.; Valentinuz, O.; Moresco, R. Y Kahn, N. 1993. Diagnóstico de fertilización nitrogenada y fosfatada en girasol. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Mendoza. Pag. 117-118.*
- Ottman, M.; Thompson, T. and Doerge, T. 2006. Alfalfa yield and soil phosphorous increased with top dresses granular compared with fluid phosphorus fertilizer. *Agronomy J.* 98: 899-906.
- Pierzynski, G.; McDowell, R. and Sims, T. 2005. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. P. 53-86. In J.T.Sims and A. N. Scharpley (Eds.) *Phosphorus: Agriculture and Environment. Agronomy Monograph N° 46.*
- Plan Mapa De Suelos, Convenio INTA – Gobierno de E. R. 1991. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Diamante, Provincia de Entre Ríos. Acuerdo Complementario del Convenio INTA – Gobierno de E. R. EEA INTA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 9. 258 Pág.
- Quintero, C; Boschetti, G. Y Benavidez, R. 1995. Fertilización fosfatada en pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 13: 60-65.
- Quintero C.; Boschetti, G. and Benavides, R. 1999. Phosphorus retention in some soils of the argentinean Mesopotamia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (9 And 10), 1449-1491.
- Quintero C. 2000. Estado de fertilidad de los suelos de Entre Ríos. Principales Limitaciones. En: *Revista Facultad de Agronomía. UBA*, 20: 15-19.
- Quintero C.; Boschetti G.; Benavides R. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis. Vol.34: 1435-1450.*

- Reid, Ch.; Winward, D. and Koenig R. 2004. A comparison of liquid phosphoric acid and dry phosphorus fertilizer sources for irrigated alfalfa production on calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol. 35: 39-50.
- Rodriguez, D; Andrade, F. and Goudriaan, G. 2000. Does assimilate supply limit leaf expansion in wheat grown in the field under low phosphorus availability? *Field Crops Research* 67: 227-238.
- Rubio, G. y Álvarez, C. 2010. Fósforo: dinámica y evaluación en agroecosistemas. Pp. 311-336. En R. Álvarez; R. Rubio; C. Álvarez y R. Lavado (eds). *Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la región pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía (EFA-UBA) 2010 – ISBN 978-950-29-1234-9.
- Sainz Rozas, H. y H. Echeverría. 2009. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeanas. *Simposio Fertilidad 2009. IPNI – Fertilizar*. Pg. 221-223.
- Sample E.; Soper R. Y Racz G. 1980. Reactions of phosphate fertilizer in soils. Pp. 263-310. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.). *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA.
- Sims J. and G. Pierzynski. 2005. Chemistry of Phosphorus in Soils. Pp. 151 to 192. In M. Tabatabay and D. Sparks (Eds.) *Chemical Processes in Soils*. SSSA Book. Series 8.
- Tasi, H. 2000. Aptitud de uso y estado de degradación de suelos vertisoles y vérticos de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía (UBA)* 20(1):1-6
- Tasi, H. y Bedendo, D. 2008. Aptitud agrícola de las tierras de la provincia de Entre Ríos. *Estación Experimental Agropecuaria Paraná. Serie Extensión No 47*. Marzo 2008.
- Tiessen, H. 2005. Phosphorus dynamics in tropical soils. Pág. 253-262. In J.T. Sims And A. N. Scharpley (Ed) *Phosphorus: Agriculture and Environment*. Agronomy Monograph N° 46.
- Vázquez, M. 2002. Balance y Fertilidad Fosfatada en Suelos Productivos de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur No 16*. INPOFOS Simposio de Fósforo: “Enfoque sistémico de la Fertilización Fosfatada”. Pp. 3–7.

Capítulo II

Fijación del fósforo agregado al suelo con distintas fuentes en condiciones controladas

1. Introducción

Cuando los fertilizantes fosfatados son aplicados y se disuelven por el agua del suelo, ocurren reacciones entre los fosfatos del fertilizante, constituyentes del suelo y otros compuestos del fertilizante que eliminan los fosfatos de la solución y producen compuestos menos solubles (Sample et al., 1980).

La disolución se inicia cuando el agua del suelo se mueve hacia el gránulo tanto por capilaridad como por vapor; alrededor del gránulo o banda de fertilizante se origina una solución saturada de P que, dependiendo de la fuente utilizada, posee un pH entre 1 y 8,5. Luego que se produce la disolución completa, el pH del suelo alrededor del gránulo o banda tiende a regresar a los valores originales. Cuando la solución concentrada de P deja el gránulo, gota o banda de fertilizante, los componentes del suelo son alterados por la solución y al mismo tiempo los componentes de la solución cambian en contacto con el suelo. Minerales del suelo pueden disolverse, lo que originaría reacciones del ortofosfato del fertilizante con cationes como hierro, aluminio, manganeso, potasio, calcio y magnesio. Cationes intercambiables también podrían ser desplazados por esta solución concentrada y reaccionar con los fosfatos (Havlin et al., 1999).

La forma, la reacción y la solubilidad de los fertilizantes usados afectan la tasa y la magnitud de las reacciones del P de los fertilizantes en el suelo (Hedley & McLaughlin, 2005). En este sentido, las fuentes de P utilizadas podrían determinar las reacciones del suelo con el fertilizante, lo que influiría también en la disponibilidad de P para las plantas. Posteriormente, los factores que afectan la disponibilidad del P del fertilizante están sujetos a la dinámica involucrada en las reacciones del P nativo (Havlin et al., 1999; Hedley & McLaughlin, 2005).

Los fertilizantes fosfatados, comúnmente utilizados, presentan una alta solubilidad por lo que al ser aplicados al suelo se disuelven rápidamente en presencia de agua y se inician reacciones en la interface suelo - fertilizante. Las reacciones ocurren alrededor y dentro del gránulo entre compuestos del fertilizantes y constituyentes del suelo (Hedley & McLaughlin, 2005,). Están implicadas en este fenómeno tanto la adsorción, la inmovilización y la precipitación, que disminuyen la concentración de P en la solución (Sample et al., 1980). Con respecto a los fertilizantes líquidos no existe el flujo de humedecimiento hacia el fertilizante, por lo que las reacciones del P del fertilizante con componentes del suelo se inician fuera de la banda de aplicación, no produciéndose precipitaciones in situ (Hettiarachchi et al., 2006).

Havlin et al. (1999) y Sample et al. (1980) informan que, en general, cuando la solubilidad del fertilizante en agua es mayor al 80% las reacciones de los mismos en el suelo dependen mayormente de las características de los suelos y en menor medida de las del fertilizante, jugando la retención del suelo un rol fundamental en la disponibilidad final del P de los fertilizantes para las plantas.

Bendi & Gilkes (1987) estudiando suelos con distinta capacidad de fijación, describieron tres zonas alrededor del fertilizante (citado por Hedley & McLaughlin, 2005) (Figura 1).

La primera zona comprende los límites del gránulo y la interface gránulo – suelo. Es la zona donde se verifican precipitaciones del P del fertilizante con compuestos insolubles presentes originariamente en el fertilizante y compuestos que han precipitado en la solución concentrada del fertilizante; los compuestos formados dependieron de las formas químicas del P en el fertilizante, de los compuestos que acompañan al P en el fertilizante y de la cantidad de agua conferida desde el suelo y en menor medida de las propiedades químicas del suelo (Moody et al., 1995). Pero en suelos calcáreos el humedecimiento del gránulo produjo más precipitados dentro del mismo debido al ingreso de calcio junto al agua (Hettiarachchi et al., 2006).

En la segunda zona, una franja saturada de P cercana al gránulo, la capacidad de adsorción de P es excedida y se verifican reacciones de precipitación entre la solución concentrada de P con iones metálicos y materia orgánica liberados desde el suelo. La extensión de esta zona saturada de P está inversamente relacionada con la capacidad máxima de adsorción de fosfatos de los suelos (Moody et al., 1995; Bendi & Gilkes, 1987). Williams (1971) informa que el tamaño de esta zona y la distribución de la concentración de fosfatos alrededor del gránulo fue gobernada por la capacidad de sorción de los suelos, del tamaño del gránulo y de la humedad del suelo, siendo también el contenido de carbonato de calcio la variable más importante en suelos calcáreos. Esta solución saturada se mueve por flujo masal y difusión hasta una distancia que puede ser de alrededor de 10 mm desde el gránulo, donde se van registrando precipitaciones con calcio, hierro, aluminio y sustancias húmicas. En esta zona también se registran las variaciones de pH debidas a las reacciones de los distintos fertilizantes. El pH que se registra en esta solución saturada depende de la fuente utilizada (Sample et al., 1980). Para los fertilizantes fosfatados comúnmente utilizados varía desde fuertemente ácido (pH 1 – 1,5) hasta pH 8. El pH de la solución saturada depende de la concentración de iones fosfatos en la solución, del grado de protonación del anión fosfato en el fertilizante y el grado de disociación en agua del fertilizante. La solución saturada de P es un fuerte extractante de aniones, cationes y materia orgánica de los suelos (Havlin et al., 1999; Hedley & McLaughlin, 2005).

La tercera zona, más alejada, es una zona no saturada de P donde dominan procesos de adsorción, ya que en esta zona la concentración de P no excede la capacidad máxima de sorción del suelo. En esta zona los procesos de adsorción fijan más P que los de precipitación (Hedley & McLaughlin, 2005). El movimiento del P en esta zona es fundamentalmente por difusión. Para que un ión de fosfato se mueva debe estar en solución, por lo que la humedad del suelo tiene un marcado impacto sobre la difusión de P. También la difusión depende del tipo de suelo, de la estación (más seca o más lluviosa) y del poder buffer de P de los suelos (Hedley & McLaughlin, 2005).

Suelos con mayor poder buffer reducen fuertemente la concentración de P a medida que nos alejamos del gránulo, por ejemplo Bendi & Gilkes (1987) en un suelo Laterítico, con alto poder buffer, encontraron que la zona no saturada tuvo un rango entre 10 a 30 mm desde el gránulo y en un suelo Podosol, con menor poder buffer, dicha zona se ubicó entre los 20 y 40 mm desde el gránulo. Suelos con menor poder buffer poseen mayor volumen de suelo con P disponible para las raíces que los suelos con alto poder buffer. En el suelo Laterítico el porcentaje de P del fertilizante fue de 18% en esta zona y en el suelo con menor poder buffer (Podosol) el porcentaje fue de 40% a las cuatro semanas desde la fertilización, quedando el resto del P del fertilizante en las zonas más cercanas al gránulo.

En la Figura 1, se muestra el comportamiento de un fertilizante granular en contacto con el suelo, graficando las reacciones antes descriptas.

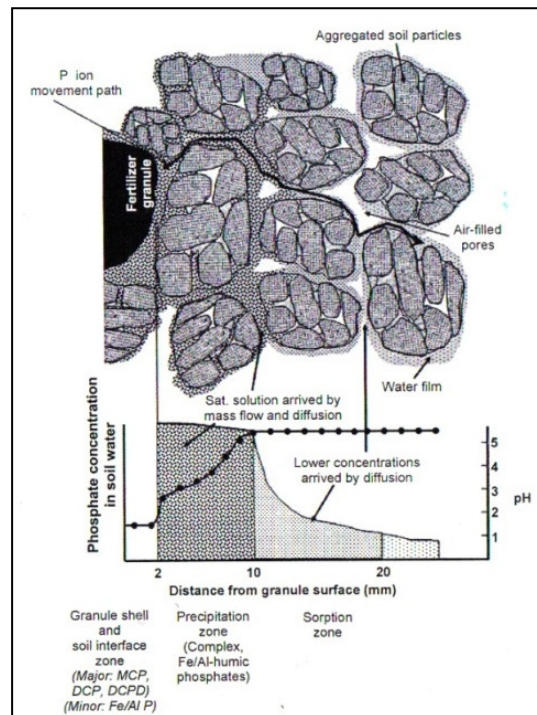


Figura 1. Representación del movimiento del fosfato desde un gránulo de SFT (Hedley & McLaughlin, 2005).

Los antecedentes indican que las distintas fuentes fosfatadas pueden tener efectos distintos en la zona del gránulo y en la zona saturada de P (aproximadamente hasta los 10 mm desde el gránulo).

Con respecto a los cambios de pH en la cercanía del gránulo o banda de fertilizante el súper fosfato triple (SFT) y el súper fosfato simple (SFS) producen una fuerte acidificación (pH alrededor de 1,5) al igual que el fosfato mono amónico (FMA) (pH 3.5) pudiendo movilizar silicio, hierro, aluminio, calcio, magnesio y potasio desde el suelo a la solución saturada. El fosfato di amónico (FDA) eleva el pH en la zona saturada a valores cercanos a 8; a estos valores los fosfatos de la solución pueden formar minerales con el calcio, como fosfato di cálcico di hidratado en etapas iniciales para luego ir formando minerales de menor solubilidad. El polifosfato de amonio (PFA) posee un pH de alrededor de 6 (Havlin et al., 1999) y es esperable que a menores valores de pH los fosfatos de calcio que pueden formarse en esta zona saturada poseen mayor solubilidad.

Holloway et al. (2001); Hettierachchi et al. (2006); Lombi et al. (2003) y Lombi et al. (2006) proveen evidencias que en suelos calcáreos las reacciones químicas observadas cercanas al gránulo o banda son distintas cuando formas fluidas o sólidas son agregadas al suelo, condicionando la difusión, solubilidad y disponibilidad del P del fertilizante.

Manejar con precisión los nutrientes debe incluir el satisfacer las necesidades de nutrientes de los cultivos y no producir efectos secundarios en el medio ambiente. Los criterios principales de este sistema están relacionados a la aplicación de fertilizantes de

acuerdo a las necesidades del cultivo teniendo en cuenta las características del suelo, procurando reducir las pérdidas de nutrientes (incluyendo la formación de compuestos no lábiles) y aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes (Varallyay, 1994).

En el suelo el P está presente en distintas formas y se encuentran en un equilibrio dinámico, el P de la solución es agotado rápidamente por las plantas y es repuesto desde el pool lábil en forma continua. En este equilibrio no existe un límite claro entre el P lábil y el no lábil (P que no está en equilibrio con la solución y constituye la reserva de P en formas minerales y orgánicas); ello hace que el P disponible para las plantas no sea fácil de cuantificar. Se han desarrollado métodos empíricos para estimar este P disponible, comúnmente se trata de soluciones que extraen una parte del P lábil. La cantidad de P que pueden extraer las distintas soluciones es una función directa del P lábil e inversa de la capacidad de cada suelo de amortiguar los cambios de P en la solución a partir del P presente en la fase sólida (Quintero et al., 2003). La técnica de extracción mayormente utilizada, como método de diagnóstico en la región pampeana, es la de Bray I (Bray & Kurtz, 1945). Otra técnica, también con relevancia internacional, es el método Mehlich III (Mehlich, 1984), que es señalado como adecuado para un amplio rango de suelos, a diferencia de Bray I que se desarrolló para suelos ácidos y neutros (Ebeling et al., 2008). Trabajos nacionales e internacionales muestran una fuerte correlación lineal entre ambos métodos en suelos ácidos y neutros (Barbagelata, 2011; Atia & Mallarino, 2002; Melchiori et al., 2008; Gutiérrez Boem et al., 2011), pero débilmente correlacionados para suelos alcalinos (Mallarino, 1997; Zamuner et al., 2006).

Las diferentes fracciones en las que se encuentra el P del suelo se pueden evaluar a través de métodos de fraccionamiento secuencial, utilizando extractantes químicos selectivos, aplicados a una misma muestra de suelo (Hedley et al., 1982). La técnica de fraccionamiento desarrollada por Hedley et al. (1982), y modificada por Tiessen & Moir (1993) es la de más amplia difusión, la misma separa las formas orgánicas e inorgánicas de P en fracciones que varían en su disponibilidad para las plantas. Primero se extraen las formas de P más disponibles con extractantes más suaves y luego las más resistentes con el uso de extractantes más fuertes. La primera extracción corresponde al uso de resina de intercambio o membrana de intercambio aniónico, que extrae el P que se considera biológicamente más disponible (P-resina ó P-mia) ya que está directamente intercambiable con la solución del suelo. La segunda extracción que se realiza con bicarbonato de sodio cuantifica P lábil, tanto como fracción orgánica (Po-NaHCO₃), que corresponde a la biomasa microbiana y P orgánico fácilmente hidrolizable, e inorgánica (Pi-NaHCO₃), cuantifica el P débilmente sorbido; estas fracciones estarían disponibles en un corto período de días o semanas. Las fracciones orgánicas e inorgánicas moderadamente lábiles, Po-NaOH y Pi-NaOH respectivamente, son extraídas con hidróxido de sodio. Estas fracciones, químicamente adsorbidas en compuestos de Fe y Al y asociado a sustancias húmicas, estarían disponibles en un período intermedio de tiempo, meses o años. El P extraído con ácido clorhídrico (Pt-HCl) se considera que es el P ligado al Ca, constituyendo el P no lábil. El P residual es extraído con ácido sulfúrico y agua oxigenada, siendo la fracción de P insoluble y químicamente muy estable.

El efecto de la aplicación de P sobre las distintas fracciones ha mostrado distintos resultados; en general las fracciones lábiles aumentaron frente a las aplicaciones de P (Picone et al., 2007), y el efecto sobre las fracciones dependió de la solubilidad de la

fuentes de P utilizadas (Boschetti et al., 2001), de la génesis y estado de evolución de los suelos (Boschetti et al., 2003); de la textura del suelo (O'Halloran, 1993) y del sistema de labranzas (Selles et al., 1999).

El objetivo del trabajo, desarrollado en este capítulo, fue determinar la disponibilidad y el destino en fracciones lábiles y no lábiles del P agregado con distintas fuentes de fertilizantes fosfatados en suelos con presencia de calcáreo de Entre Ríos.

2. Materiales y métodos.

2.1 Características generales del ensayo.

De dos sitios con presencia de calcáreo en superficie se extrajeron muestras de suelo de 0-10 centímetros de profundidad en julio de 2008. Se seleccionó un suelo del orden Molisol: (Argiudol rendólico, Serie La Juanita, 32°02'46.82" S - 60°34'57.33" O) y otro Vertisol (Peluderte árgico crómico¹, Serie Las Mercedes, 32°12'40.34" S - 60°32'48.70" O). Para ambos suelos se ubicaron sectores con presencia de carbonato libre en superficie mediante pruebas de diagnóstico con ácido clorhídrico.

Las muestras se secaron al aire y se pasaron por tamiz de 2 mm. Cien gramos de suelo de las muestras tamizadas se colocaron en recipientes plásticos (unidades muestrales). Las dosis de P (mg de P por kg suelo) que se utilizaron fueron: 0, 30, 60, 120, 240 y 480 para las fuentes SFT, FDA y PFA; para el ácido fosfórico (AF) las dosis de P, por problemas en la formulación comercial, fueron 0, 11, 22, 44, 87 y 174 mg P por kg de suelo. El FDA y SFT se utilizó finamente molido (pasado por tamiz de 0,5 mm) y el PFA y AF se aportó con fuentes líquidas.

El aporte de nitrógeno se niveló a 43 mg por recipiente, utilizando como fuente nitrato de amonio. En cada recipiente se homogeneizaron los aportes de P y de N con el suelo, y posteriormente se humedecieron con 30 cc de agua destilada. Las muestras de suelo con fertilizante se dejaron reaccionar durante 45 días en ambiente controlado de humedad (30% peso/peso) y temperatura (25°C). Luego de este tiempo las muestras se secaron al aire para realizar las mediciones.

¹ Si bien el gran grupo Pelludertes se dejó de usar desde 1999, en Entre Ríos debido a la heterogeneidad de suelos Vertisoles se sigue conservando la clasificación original desarrollada por G.W. van Barneveld en 1974 (Dante Bedendo, comunicación personal). En la nueva clasificación este suelo se clasifica como Hapluderte típico.

2.2 Diseño del experimento.

Los recipientes se dispusieron en un arreglo factorial de 2 suelos, 4 fuentes y 5 dosis de P, completamente aleatorizados con dos repeticiones por tratamiento más testigos para cada suelo (4 repeticiones por suelo). La fuente AF por problemas en la formulación comercial tuvo distintas dosis agregadas. De la combinación de fuentes y dosis se obtuvieron 21 tratamientos para cada suelo, por lo que se contó con un total de 88 recipientes. Para evitar efectos de bordes los recipientes se rotaron completamente cada tres días durante el periodo de incubación.

2.3 Análisis de suelo.

Al inicio del ensayo, luego de tamizar el suelo secado al aire se extrajeron 5 submuestras para cada suelo. En cada una se determinó P extraíble (relación suelo – extractante 1:7, agitado durante 5 minutos) con los extractantes Bray I y Mehlich III, Capacidad de Intercambio Catiónico (Acetato de amonio 1 N pH 7), Calcio intercambiable por complejometría EDTA (Jackson, 1976), pH mediante una relación suelo: agua 1:2,5 y porcentaje de carbonato de calcio por determinación manométrica.

Luego de la incubación las muestras se secaron al aire y se tamizaron (2 mm) y se les realizó nuevamente las determinaciones de P extraíble por los métodos Bray I y Mehlich III.

Para conocer el destino del P de cada fuente se realizó un análisis de fraccionamiento de P para los testigos y las dosis mayores utilizadas en cada suelo y para cada fuente de fertilizante. Para este procedimiento, las muestras fueron molidas con un mortero y tamizadas por una malla de 0,5 mm.

Se empleó el método de fraccionamiento secuencial (Figura 2) originalmente propuesto por Hedley et al. (1982), y posteriormente modificado por Tiessen & Moir (1993) para extraer las fracciones Pi (P inorgánico) y Po (P orgánico).

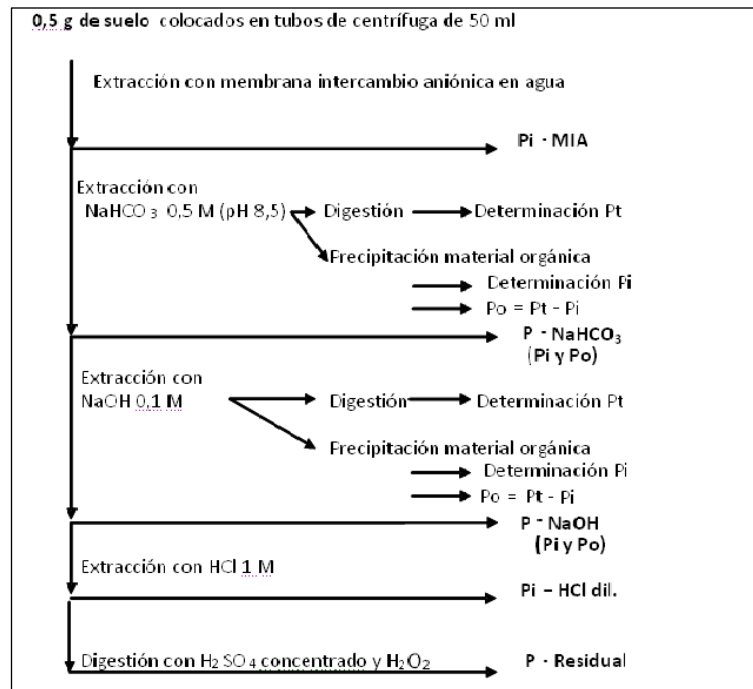


Figura 2: Diagrama de flujo de la extracción secuencial de fósforo (Adaptado de Tiessen y Moir, 1993).

Se calculó el fósforo recuperado para cada fuente de P, utilizando la fórmula propuesta por Sattell & Morris (1992):

$$\text{Fósforo Recuperado} = \frac{(F_i P_1 - F_i P_0)}{(P_1 \text{total} - P_0 \text{total})} * 100\%$$

Donde $F_i P_1$ es el P en la fracción i para la fuente 1 y $F_i P_0$ es el P de la fracción i del testigo. El denominador de la fórmula es la diferencia entre el P total de la fuente 1 y el P total del testigo.

2.4 Análisis estadístico

Se realizó el análisis de la varianza (Test de LSD Fisher) para comparar medias y comparación de las pendientes de las regresiones (pruebas de t) en las relaciones entre el P extraíble y la dosis de P agregada. El nivel de significancia utilizado fue siempre del 5%. Se utilizó el programa de análisis estadístico InfoStat versión 2011 (Di Rienzo et al., 2011).

3. Resultados y discusión

3.1 Características edáficas. Resultados antes de la incubación.

La Serie Las Mercedes corresponde a un suelo del orden Vertisol (Hapluderte típico); en general son suelos poco profundos y moderadamente erosionados, desarrollados en limos calcáreos, franco arcillo limosos a arcillo limosos, sobre tosca calcárea a poca profundidad (50-60 cm) que a veces aflora en superficie.

El otro suelo, Serie La Juanita, corresponde al orden Molisol (Argiudol rendólico) que también son suelos pocos profundos, moderadamente bien drenados y presenta concreciones de carbonatos y calcáreo libre en la masa en prácticamente todo el perfil, son suelos desarrollados en materiales loessoides muy heterogéneos, que se han depositado sobre materiales calcáreos (Plan Mapa de suelos, 1991).

Se encontraron diferencias en la mayor parte de los parámetros de cada suelo para las muestras al inicio del ensayo, los valores hacen referencia a la muestra extraída a una profundidad de 0-10 cm (Tabla 1).

Tabla 1. Resultado del análisis de suelos antes de la incubación.

Suelo	P Bray I mg kg ⁻¹	P Mehlich III mg kg ⁻¹	pH	CaCO ₃ %	CIC cmol kg ⁻¹	Ca _{int} %
Molisol	12,0 a	23,0 a	7,7 a	2,8 b	33,4 b	89,2 a
Vertisol	8,1 b	22,9 a	7,5 b	11,2 a	40,1 a	79,1 b

CIC (Capacidad de intercambio catiónico) y Ca_{int} (porcentaje de saturación de calcio en la CIC). Para cada columna, medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Test LSD Fisher.

3.2 Resultados luego de la Incubación.

3.2.1 Fósforo Extraíble mediante los métodos Bray I y Mehlich III.

La evaluación de las distintas fuentes se realizó comparando las pendientes obtenidas en la relación P extraíble y las dosis de P con los extractantes Mehlich III y Bray I. Estas relaciones tienen una importante implicancia agronómica ya que la inversa de las pendientes de las rectas logradas expresa los kilos de fertilizante que se requieren para lograr el incremento en el fósforo extraíble en una unidad, valor que se denomina dosis equivalente (Quintero, 2002).

Debido a las diferencias entre suelos para los distintos parámetros evaluados antes de la incubación (Tabla 1), se procedió a analizar cada suelo por separado.

Molisol

Los valores de P extraíble obtenidos con Mehlich III y Bray I no fueron diferentes estadísticamente al evaluar las fuentes (Figura 3). Indicando que todas las fuentes tuvieron la misma eficiencia para elevar el P extraíble.

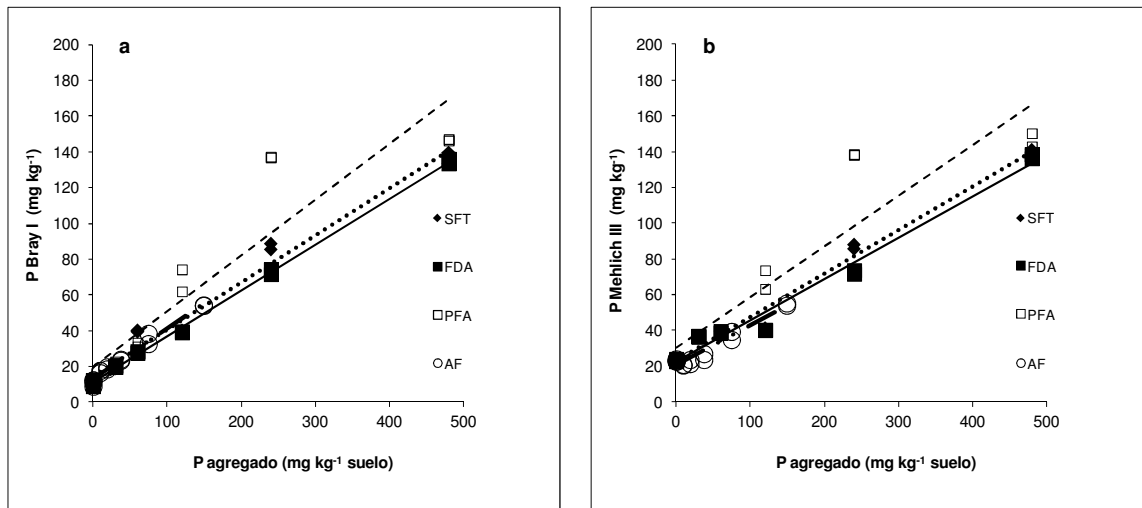


Figura 3. Dosis de P agregado y P extraídos luego de la incubación en el suelo Molisol: a) P Bray I; b) P Mehlich III.

Ambos métodos de extracción pudieron diferenciar los efectos de las distintas dosis no existiendo diferencias estadísticas entre ambas pendientes, a pesar que el método Mehlich III extrajo un 3% más de P que Bray I (Figura 4). Esta diferencia es levemente inferior a la encontrada por Gutiérrez Boem et al. (2011) cuando compararon ambos métodos utilizando la misma relación suelo – extractante. Estos datos no son coincidentes con lo informado por González et al. (2007), quienes hallaron que ambos métodos no se diferencian a valores bajos de P extraíble pero a valores altos Mehlich III sobrestimaría el valor de P extraído.

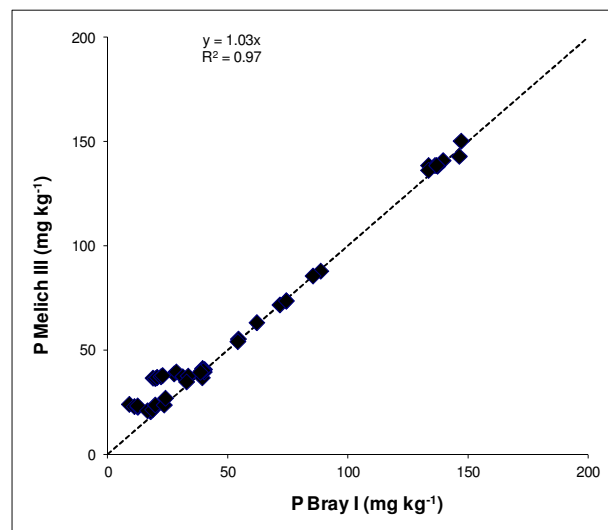


Figura 4. Comparación entre el P extraíble determinado por los métodos Bray I y Mehlich III. Tratamientos en suelo Molisol incubados 45 días con distintas cantidades de fertilizante fosfatado.

No habiendo ventajas por el uso de alguna fuente en particular, se analizaron el conjunto de los datos para ambos extractantes (Figura 5). Las pendientes obtenidas no se diferenciaron estadísticamente entre sí y están entre los valores mínimos observados por Rubio et al. (2008) para los suelos Molisoles de la región ampeana.

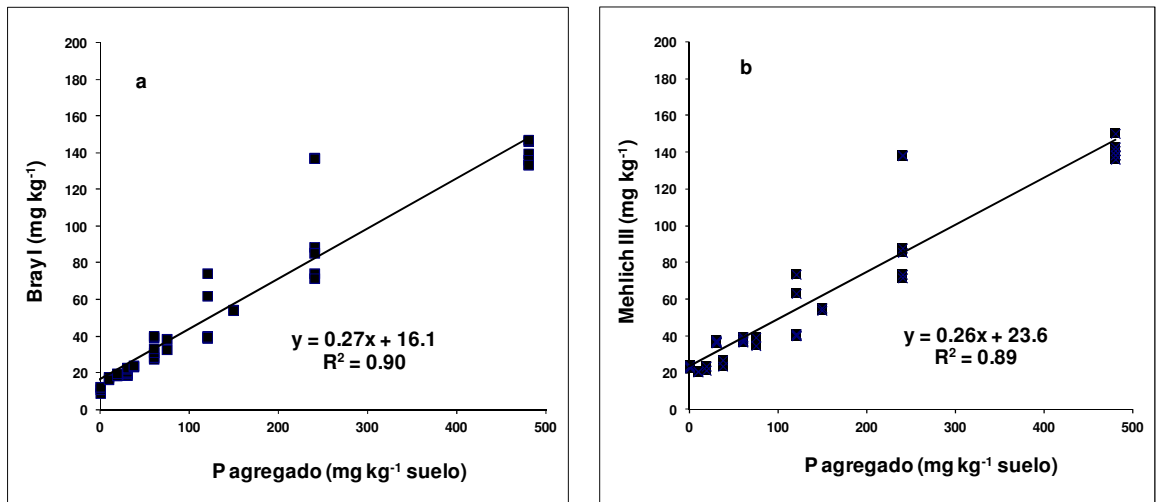


Figura 5. Dosis de P agregado y P extraídos luego de la incubación en el suelo Molisol: a) P Bray I; b) P Mehlich III. Todas las fuentes.

Vertisol

Para este suelo tampoco se encontraron diferencias entre las pendientes para las distintas fuentes al extraer el P con el método Mehlich III pero sí con Bray I (Figura 6).

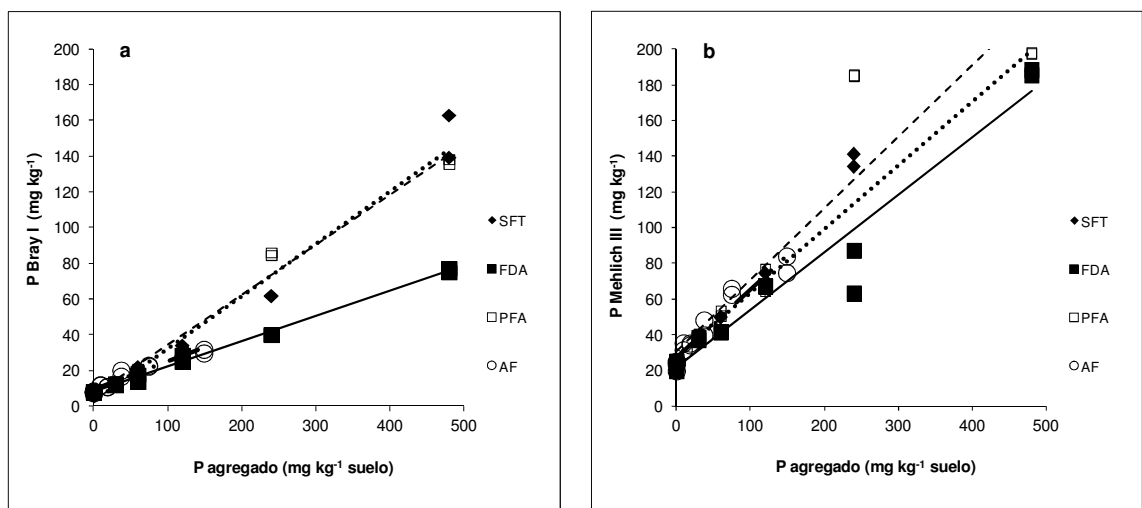


Figura 6. Dosis de P agregado y P extraídos luego de la incubación en el suelo Vertisol: a) P Bray I; b) P Mehlich III.

En la tabla 2 se muestran las distintas pendientes para cada fuente con su respectivo ajuste.

Tabla 2. Pendientes y ajustes encontrados con cada extractante y para cada fuente. Suelo Vertisol.

Bray I			Mehlich III		
Fuente	Modelo Lineal	R ²	Fuente	Modelo Lineal	r ²
PFA	$y = 0,28 x + 6,1$	98%	PFA	$y = 0,40 x + 31,1$	86%
SFT	$y = 0,29 x + 3,0$	97%	SFT	$y = 0,36 x + 27,9$	96%
FDA	$y = 0,14 x + 8,1$	99%	FDA	$y = 0,32 x + 22,0$	95%
AF	$y = 0,15 x + 9,6$	93%	AF	$y = 0,38 x + 27,1$	92%

PFA: Polifosfato de Amonio; SFT: súper fosfato triple; FDA: Fosfato diamónico; AF: Acido Fosfórico.

Ambos métodos tuvieron una estrecha correlación, siendo el método Mehlich III el que más P extrajo (Figura 7), lo que era esperable ya que Bray I utiliza como extractante un ácido más diluido que Mehlich III y es neutralizado por los carbonatos en esta clase de suelos (Ebelin et al., 2008).

Por otra parte, Gutiérrez Boem et al. (2011) informaron una alta correlación entre ambos métodos en la bibliografía internacional, especialmente para suelos no calcáreos, pero reportando relaciones distintas entre ambos: en algunos casos Bray I extrae más P que Mehlich III, en otros igual y en otros menos. En dicho trabajo demostraron que la mayor parte de esta variación se debe a las distintas relaciones suelo – extractante utilizadas para cada método.

Cuando ambos métodos fueron realizados en una relación 1:10, Ebeling et al. (2008) encontraron que Mehlich III extrajo 16% más de P que Bray I en suelos calcáreos, logrando un buen ajuste entre métodos. En cambio Mallarino (1997) obtuvo muy baja correlación cuando comparó ambos métodos en suelos con pH mayores a 7,3.

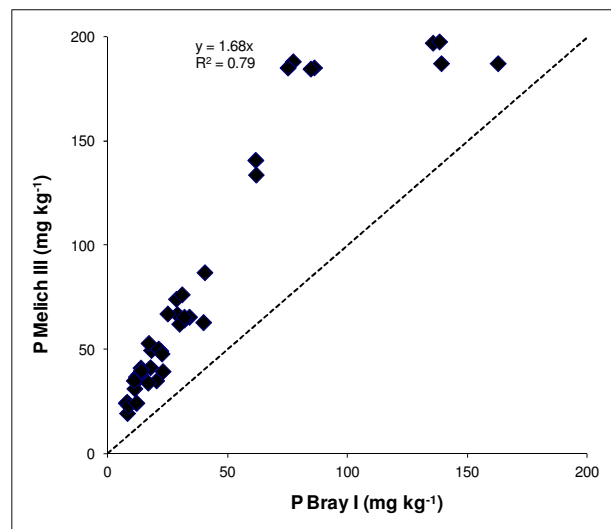


Figura 7. Comparación entre el P extraíble determinado por los métodos Bray I y Mehlich III. Tratamientos en suelo Vertisol incubados 45 días con distintas cantidades de fertilizante fosfatado.

Las pendientes (variación de P extraíble por kilo de P adicionado) en estudios de incubación relativamente cortos (alrededor de 40-60 días), señalan valores en P Bray I

de 0,21 a 0,40 (mg kg^{-1}) en suelos franco limosos y distintos climas, con los valores más bajos en climas más fríos y suelos con textura más fina (Sneller & Laboski, 2009); 0,27 a 0,74 (mg kg^{-1}) para suelos Molisoles de la Región Pampeana, donde el valor de la pendiente se relacionó negativamente con el contenido de arcilla, el pH, carbono y P total y el índice de retención de P (Rubio et al., 2008); entre 0,35 y 0,51 (mg kg^{-1}) cuando se separaron los suelos por el valor de pH, donde la menor pendiente correspondió a los suelos con pH mayores a 7 y la mayor pendiente con suelos de pH menores a 6 (Bair & Davenport, 2012), señalando un rango de pendientes similares para Mehlich III (0,39 mg kg^{-1} a 0,51 mg kg^{-1}); Quintero et al. (2003) señala valores entre 0,29 y 0,31 (mg kg^{-1}) para Vertisoles y Argiudoles, respectivamente.

En este trabajo, las distintas pendientes encontradas se hallan dentro de los valores antes revisados en la bibliografía, excepto para el suelo Vertisol cuando se utilizaron las fuentes FDA y AF, donde las pendientes estuvieron por debajo de los rangos informados, en la extracción con P Bray I.

3.2.2 Fraccionamiento del P para los dos suelos con distintas fuentes de P.

Para los testigos, coincidente con la bibliografía, se encontró mayor P total en el suelo Molisol (1112 mg kg^{-1}) comparado con el Vertisol (879 mg kg^{-1}) (Quintero et al., 1999; Boschetti et al., 2003; Boschetti et al., 2000).

Posterior a la incubación, la distribución del P recuperado en las distintas fracciones para cada fuente se informa en la Tabla 3. Los valores en las muestras fertilizadas se expresan como porcentaje de P recuperado, utilizando la fórmula propuesta por Satell & Morris (1992). Los resultados negativos se deben a errores experimentales y están en el rango mostrado por Satell & Morris (1992) en su trabajo.

Debido al tiempo de incubación evaluado, la fracción residual y las fracciones Pi y Po de los extractantes NaHCO_3 y NaOH no fueron destinos importantes del P del fertilizante como sí lo fueron las fracciones Pmia y PiHCl. Esta situación es descripta en estudios similares (Boschetti et al., 2001).

Tabla 3. Fósforo recuperado para las distintas fuentes en los suelos Molisol y Vertisol.

Suelo	Fuente	Pi		Po		PiHCl	P res	
		Pmia	NaHCO_3	NaHCO_3	NaOH			NaOH
		%						
Molisol	SFT	54,6	7,3	0,6	4,1	3,3	28,8	1,4
	FDA	43,0	6,0	1,4	2,3	-5,1	51,2	1,2
	PFA	56,0	9,2	2,5	8,0	2,0	18,2	4,0
	AF	36,1	6,5	-1,6	3,2	0,6	57,0	-1,8
Vertisol	SFT	64,8	6,8	-2,7	3,0	4,5	26,1	-2,5
	FDA	45,5	6,8	-0,5	2,1	2,3	44,6	-0,7
	PFA	60,8	9,3	-0,6	4,8	6,7	20,6	-1,5
	AF	54,5	13,4	0,4	2,2	6,4	29,1	-6,0

En el suelo Molisol el orden encontrado de P recuperado en la fracción más disponible fue PFA>SPT>FDA>AF, similar al encontrado en el Vertisol: SPT>PFA>AF>FDA.

La cantidad de P recuperada en la fracción ligada al calcio (estimado a partir del P recuperado en la fracción obtenida con HCl), que conforma el P no lábil, también tuvo diferencias entre fuentes, siendo el orden inverso al encontrado para P_{mia}.

Al comparar los valores absolutos de P_{mia} y P_{iHCl} se encontraron diferencias significativas en los testigos para cada suelo (Tabla 4), verificando la importancia que tiene en estos suelos el porcentaje de saturación de Ca en la CIC, también encontrado en otros trabajos (Boschetti et al., 2001), donde a mayor porcentaje de saturación de Ca en el complejo de intercambio mayor de P unido al calcio (P_{iHCl}). De igual manera se observó en las muestras fertilizadas (Tabla 6).

Tabla 4. Valores de P_{mia} y P_{iHCl} en suelos sin fertilizar incubados durante 45 días a humedad y temperatura constantes.

Suelo	P _{mia} mg kg ⁻¹	P _{iHCl} mg kg ⁻¹
Molisol	25 b	483 a
Vertisol	37 a	247 b

Medias con letras distintas para cada fracción indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Test LSD Fisher.

La fracción P_{mia} no se diferenció entre suelos mientras que la fracción P_{iHCl} fue mayor en el suelo Molisol (655 mg kg⁻¹) que en el Vertisol (402 mg kg⁻¹); para ambas fracciones no se verificó interacción fuentes * suelo y se midió en ambas un efecto fuente significativo (Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Fracción P_{mia}: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Valor F	p-value
Suelo	1	0,53	0,49
Fuente	2	6,36	0,03
Suelo*Fuente	2	0,02	0,98

Tabla 6. Fracción P_{iHCl}: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Valor F	p-value
Suelo	1	662,41	<0,01
Fuente	2	61,45	<0,01
Suelo*Fuente	2	1,29	0,34

El PFA fue la fuente que mayor P_{mia} obtuvo y se diferenció significativamente de la fuente FDA, sin diferencias entre ambas se ubicó el SFT (Tabla 7). No se realizaron las comparaciones para la fuente AF ya que se utilizaron distintas cantidades de P adicionados al suelo. La fracción unida al calcio tuvo mayores valores cuando la fuente usada fue FDA (Tabla 7).

Tabla 7. Valores de P_{mia} y P_{iHCl} para las distintas fuentes en las muestras fertilizadas con las dosis de 480 mg P kg⁻¹, suelo incubado durante 45 días a humedad y temperatura constantes. Suelo Molisol y Vertisol.

Fuente	P _{mia} mg kg ⁻¹	P _{i HCl} mg kg ⁻¹
PFA	398 a	487 b
SFT	302 a b	491 b
FDA	255 b	608 a

Medias con letras distintas para cada fracción indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Test LSD Fisher.

Según los resultados de la tabla 5, 6 y 7 las fuentes que generaron mayor disponibilidad fueron el PFA y el SFT. En suelos con alto contenido de carbonato, Bertrand et al. (2003), afirman que durante el proceso de extracción los métodos con reactivos más potentes pueden disolver cantidades significativas de P precipitado y sobrestimar el P disponible, sugiriendo que el P extraído con membrana de intercambio aniónico (P_{mia}) podría ser el mejor predictor del P disponible para las plantas. De igual manera Fixen & Grove (1990), realizando una amplia revisión, encontraron que la utilización de membrana intercambiable fue el método con mejor ajuste en un amplio rango de suelos para estimar el P disponible para las plantas. Según los resultados obtenidos en el presente trabajo las fuentes más apropiadas para ser usadas son SFT y PFA en suelos con presencia de carbonato, por dejar más cantidad de P en fracciones lábiles (P_{mia}) y menores cantidades en fracciones no disponibles (P_{iHCl}), frente a un fertilizante de reacción fuertemente alcalina como el FDA.

Por otro lado, se encontró una relación significativa entre P_{mia} y el fósforo obtenido con los extractantes Bray I y Mehlich III. Se graficaron los datos en un mismo modelo, ya que no hubo diferencias significativas ($p \geq 0.05$) en las pendientes entre suelos y entre extractantes (Figura 8). La Figura indica que estos métodos extraen una parte del P lábil de los suelos (P lábil).

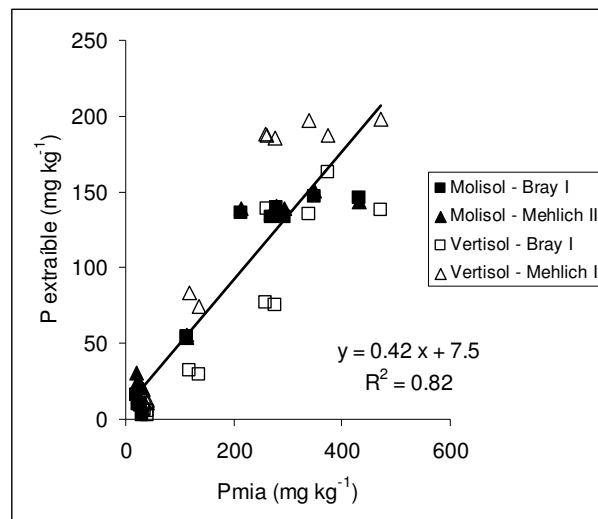


Figura 8. Comparación entre el P en la fracción P_{mía} y el P extraíble determinado por los métodos Bray I y Mehlich III. Tratamientos con dosis máxima de P en suelo Vertisol y Molisol incubadas 45 días.

3.2.3 Análisis por fuente.

Súper Fosfato Triple:

Esta fuente fue la que presentó, junto al PFA, el mayor cambio de P extraíble en función del P agregado y además presentó la mayor cantidad de P recuperado en fracciones lábiles. Este comportamiento se puede deber a la disminución del pH que se origina en la solución saturada de P en la cercanía del fertilizante provisto por esta fuente y por lo tanto la reducción de la cantidad de P del fertilizante que precipita con calcio, ya que en estos suelos con pH mayor a 7, la fijación de P está explicada fundamentalmente por la precipitación en fase sólida de P-Ca y la disminución del pH provoca una disolución de estos compuestos y por lo tanto una mayor solubilidad de fosfatos (Sim & Pierzinski, 2005). Lombi et al. (2004), experimentando en suelos calcáreos de Australia, informaron que el efecto significativo en los cambios de pH alrededor de los fertilizantes y para los suelos estudiados ocurría hasta una distancia de 13,5 mm, similar a la zona saturada definida por Hedley & McLaughlin (2005).

Fosfato Diamónico:

Esta fuente tuvo las menores pendientes de P recuperado en ambos suelos pero sólo se diferenciaron estadísticamente sus pendientes en el suelo Vertisol y con el P extraído mediante Bray I. Este comportamiento fue coincidente con el menor P lábil (fracción P_{mía}) recuperado con respecto al resto de las fuentes y con la mayor fracción recuperada unida al calcio (fracción P_{iHCl}). La menor disponibilidad de P desde esta fuente puede relacionarse con el aumento del pH cercano al fertilizante y una consecuente mayor precipitación con calcio ya que a pH altos la distribución del P está en su mayoría asociada al calcio. Estos datos coinciden con los resultados de Lombi et al. (2003) y Lombi et al. (2004), quienes informaron que el P del FDA fue el de menor

solubilidad comparado con PFA, AF, SFT, FMA; ellos señalaron que el alto pH medido en la sección central que rodea al fertilizante fue la causa de la precipitación.

Polifosfato de Amonio:

La mayor recuperación luego de la incubación de P en fracciones lábiles para ambos suelos del PFA se relacionó a mayores pendientes del P extraíble con Bray I y Mehlich III.

La capacidad de esta fuente para mantener más ortofosfatos en solución en comparación con otras fuentes fue informada por Amer & Mostafá (1981) y Ahmad & Kelso (2001), sugiriendo que el polifosfato inhibe la formación de cristales y por lo tanto la precipitación de P con calcio y además la adición simultánea de ortofosfatos con polifosfatos redujo la adsorción del carbonato de calcio, ocupando los polifosfatos los sitios de adsorción. Y si bien la longevidad del ión polifosfato no se conoce en detalle (Hedley & McLaughlin, 2005) y existen numerosas interacciones involucradas en la hidrólisis del mismo (Hons et al., 1986; McBeath et al. (2007a), Ahmad & Kelso (2001) encontraron que el polifosfato tenía menor hidrólisis en suelos calcáreos que en suelos ácidos y que con la adición de ortofosfatos junto a los polifosfatos también la hidrólisis decrecía. Khasawneh et al. (1973) informan una mayor extracción de P en zonas más cercanas a la columna fertilizada cuando la fuente usada fue FDA (el máximo lo encontraron a los 3 mm) frente al PFA (el pico lo registraron a 8 mm de la columna), concluyendo que la precipitación del P se producía en una zona más cercana a la zona tratada cuando se adicionaba P con FDA frente al PFA.

Los resultados obtenidos en esta experiencia evidencian una menor cantidad de P ligado al calcio cuando se utilizó PFA en comparación con FDA. McBeath et al. (2007b) informaron que al adicionar polifosfato a los suelos fue menor la concentración de Ca en solución comparado con fuentes que proveen ortofosfatos, siendo la precipitación el principal mecanismo de retención de P en suelos calcáreos, dejando más P en formas lábiles y moderadamente lábiles. También en dicho estudio McBeath et al. (2007b) sugieren que la adición de polifosfato solubiliza ortofosfatos nativos de la fase sólida del suelo. y Lombi et al. (2003) encontraron mayor cantidad de P lábil en suelos alcalinos con el agregado de P con PFA frente a otros fertilizantes sólidos y líquidos.

Ácido Fosfórico:

Los resultados informados para esta fuente deben relativizarse debido a que las cantidades de P adicionadas fueron menores que para las otras fuentes. Del análisis de P recuperado en las distintas fracciones se observó una importante cantidad de P del fertilizante recuperado en la fracción unida al calcio en el suelo Molisol. En suelos con presencia de carbonato Lombi et al. (2003) determinaron que esta fuente produjo igual o mayor acidificación que el SFT en la zona cercana al fertilizante, y el P lábil del AF no tuvo diferencias con respecto al FDA y fue menor al resto de los fertilizantes líquidos. La mayor recuperación en la fracción PiHCl en el suelo Molisol podría deberse a la mayor saturación con Ca de la CIC en este suelo, este comportamiento ha sido señalado por Boschetti et al. (2003).

Por otra parte los fertilizantes que producen una fuerte acidificación, como el AF, pueden causar disolución de materia orgánica y la formación de complejos coloidales húmicos fosfato – calcio (Heldey & McLaughlin, 2005) y también la solución

concentrada puede desplazar cationes intercambiables y reaccionar con los fosfatos (Havlin et al.; 1999). Estas reacciones podrían explicar las diferencias entre fuentes.

4. Conclusión.

Se encontró una fuerte correlación entre los valores de P determinados mediante los extractantes de Bray I y Mehlich III para los suelos evaluados. El P extraído por Mehlich III fue 3% mayor en el suelo Molisol y 68% mayor en el suelo Vertisol, comparado con P Bray I. Para el suelo Molisol las fuentes de P evaluadas se comportaron de manera similar y produjeron incrementos del P extraído por unidad de P adicionado dentro del rango informado para los suelos de la región pampeana. En cambio en el suelo Vertisol, las fuentes FDA y AF tuvieron una menor pendiente comparada con el SFT y PFA, cuando el extractante utilizado fue Bray I.

Se estableció una relación significativa entre el P extraído por los métodos Bray I y Mehlich III y el P medido en la fracción más disponible (P_{mia}), confirmando que estos métodos extraen parte del P lábil.

Se determinaron valores absolutos y de recuperación del P del fertilizante unidos al calcio claramente mayores para la fuente FDA y esta fuente también tuvo la menor cantidad de P en la fracción P_{mia}. La fuente AF también tuvo menor P recuperado en la fracción P_{mia} y mayor valor de P recuperado en la fracción PiHCl, en comparación con SFT y PFA. Este comportamiento explica las diferencias entre fuentes del P extraído con Bray I en el suelo Vertisol

Estos resultados sugieren que la reacción que produce el fertilizante en el suelo con presencia de carbonato de calcio libre es la que condiciona la cantidad de P que queda en solución.

Bibliografía

- Ahmad, F. and Kelso, W.. 2001. Pyrophosphate as a source of phosphorus: Hydrolysis under different conditions. *Journal of Research (Science)*, Bahauddin Zakariya University, Multan, Pakistan. Vol.12, No.2. Pp. 130-139
- Amer, F., and Mostafa, H. 1981. Effect of pyrophosphate on orthophosphate reactions in calcareous soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 45: 842-846.
- Atia, A. M., and Mallarino, A. 2002. Agronomic and environmental soil phosphorus testing in soils receiving liquid swine manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1696-1705.
- Bair, K. and Davenport, J. 2012. Influence of recent acidification on available phosphorus indices and sorption in Washington State Soils. *SSSAJ: Volume 76: Number 2.* 515-521.
- Barbagelata, P. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. Simposio Fertilidad 2011. IPNI – Fertilizar. Pg. 90-97.
- Bendi, D. K. and Gilkes, J. 1987. The movement into soil of from superphosphate grains and its available to plants. *Fertilizer Research.* 12: 21-36.
- Bertrand, I.; Holloway, R.; Armstrong, R.; McLaughlin, M. 2003. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41, 61-76.
- Boschetti, N; Valenti, R.; Vesco, C. y Sione, M. 2000. Contenidos de fósforo total en suelos con características vérticas de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Facultad De Agronomía*, 20 (1): 53-58. 2000.
- Boschetti, N.; Quintero, C.; Benavidez, R. y Giuffre, L. 2001. Destino del fósforo proveniente de diferentes fuentes de fertilizante fosfatado en suelos de la provincia de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria No 5.* FCA UNER. 2001. Pp. 23-30.
- Boschetti, N.; Quintero, C.; Benavidez, R. y Giuffre, L. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. *Ciencias del Suelo* 21 (1) 2003. Pp. 1-8.
- Bray R. and Kurtz L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-44.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. *InfoStat versión 2011.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Ebeling A. M.; Bundy, L.; Kittell, A. and Ebeling, D. 2008. Evaluating the Bray P1 Test on Alkaline, Calcareous Soils. *Soil Sci Soc Am J.*; 72: 985-991
- Fixen, P. and Grove J. 1990. Testing soils for phosphorus. Pp 141-180. In Westerman, R. (Ed.) *Soil testing and plant analysis.* Third edition. SSSA Book series.

- González, M.; López, M.; Moreno, G.; Comese, R. y Madero, M. 2007. Comparación de los métodos Bray I y Mehlich III en la determinación de la disponibilidad de fósforo en suelos con fertilizaciones continuas. *Ciencias del Suelo (Argentina)*. 25 (1) 23-29.
- Gutierrez Boem, F.; Rubio, G. and Barbero, D. 2011. Soil phosphorus extracted by Bray1 and Mehlich3 soil test as affected by the soil solution ratio in mollisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42:220–230, 2011
- Hedley, M. and McLaughlin, M. 2005. Reactions of Phosphate Fertilizers and By-Products in Soil. Pp. 181-252. In J.T.Sims and A. N. Scharpley (Ed) *Phosphorus: Agriculture and Environment*. Agronomy Monograph N° 46.
- Havlin, J; Beaton, J.; Tisdale, S. and Nelson, W. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers; An Introduction to Nutrient Management*. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 499 p.
- Hedley, M. J.; Stewart, J. and Chauhan, B. 1982. Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 46 (5): 970-976.
- Hettiarachchi, G.; Lombi, E.; McLaughlin, M.; Chittleborough, D. and Self, P. 2006. Density changes around phosphorus granules and fluid bands in calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 960-966. 2006.
- Holloway, R.E., Bertrand, I.; Frischke, A.; Brace, D.; McLaughlin, M. and Shepperd, W. 2001. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil* 236: 209–219.
- Hons, F.; Stewart, W. and Hossner, L. 1986. Factor interactions and their influence on hydrolysis of condensed phosphates in soils. *Soil Sc.* 25: 242-255
- Jackson, M. L. 1976. *Análisis químico de suelos*. Ediciones Omega S. A. Barcelona.
- Khasawneh, F.; Sample, E. and Hashimoto, I. 1973. Reactions of ammonium ortho and polyphosphate fertilizers in soils: I. Mobility of Phosphorus. *Soil Sc. Soc. Am.* Vol. 38 No. 3, p. 446-451
- Lombi, E.; Holloway, R.; Armstrong, R. and McLaughlin, M. 2003. Reaction products of granular and fluid monoammonium phosphate fertilizers in calcareous soil: evidence from spectroscopic and isotopic techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 682-689.
- Lombi, E.; Scheckel, K.; Armstrong, R.; Forrester, S.; Cutler, J. and Paterson, D. 2006. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil; a synchrotron-based investigation. Published In *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 2038-2048 (2006).
- Lombi, E.; McLaughlin, M.; Johnston, C.; Armstrong, R. and Holloway, R. 2004. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of p fertiliser in calcareous and non- calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil* 269:25-34.
- Mallarino, A. 1997. Interpretation of soil phosphorus tests for corn in soil, which varying pH and calcium carbonate content. *J. Prod. Agric.* 10: 163-167.

- McBeath, T.M.; Lombi, E.; McLaughlin, M. and Bunemann, E. 2007a. Polyphosphate-fertilizer solution stability with time, temperature, and pH. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2007. 170, 387-391.
- McBeath, T.M.; Lombi, E.; McLaughlin, M. and Bunemann, E. 2007b. Polyphosphate and orthophosphate addition to soils: cation concentrations, and dissolved organic carbon. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45, 237-245.
- Melchiori R.; Ferrari, M.; Fontanetto, H. y Albarenque, S. 2008. Fertilidad fosfatada en soja en siembra directa: aporte de la fracción orgánica lábil. *Actas XXI Congreso Argentino de Ciencias del Suelo*.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 Soil Test Extractant: A Modification of Mehlich 2 Extractant. *Comm. Soil Sci. And Plant Analysis*. 15 (12), 1409-1416.
- Moody, P.; Yo, S.; Edwards, D. and Bell, L. 1995. Effect of banded fertilizers on soil solution composition and short-term root growth: III Monocalcium phosphate with and without gypsum. *Aust. J. Soil Res.* 33: 899-914.
- O'Halloran, I. P. 1993. Effect of tillage and fertilization on inorganic and organic soil phosphorus. *J. Soil Sci.* 73: 359-369
- Picone; L.; Capozzi, I.; Zamuner, E.; Echeverría, H. y Sainz Rozas, H. 2007. Transformaciones de fósforo en un Molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Ciencias del suelo*. Vol. 25 N° 2. Pp. 99-107.
- Plan Mapa De Suelos, Convenio INTA – Gobierno de E. R. 1991. Carta de suelos de la República Argentina. Departamento Diamante, Provincia de Entre Ríos. Acuerdo Complementario del Convenio INTA – Gobierno de E. R. EEA INTA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 9. 258 Pág.
- Quintero C.; Boschetti, G. and Benavides, R. 1999. Phosphorus retention in some soils of the Argentinean Mesopotamia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (9 And 10), 1449-1491.
- Quintero, C. 2002. Dosificación del fósforo según tipos de suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. N° 16. Pp. 8-10
- Quintero, C.; Boschetti, G. and Benavidez, R. 2003. Effect of Soil Buffer Capacity on Soil Test Phosphorus Interpretation and Fertilizer Requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol. 34, Nos. 9 & 10, pp. 1435–1450.
- Rubio, G; Cabello, M.; Gutiérrez Boem, F. and Munaro, E. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Sci Soc Am J* 72:1721-1727.
- Sample E.; Soper R. and Racz G. 1980. Reactions of phosphate fertilizer in soils. Pp. 263-310. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.) *The Role Of Phosphorus In Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA.
- Sattell, R. R. and Morris, R. A. 1992. Phosphorus fractions and availability in Sri Lanka Alfisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1510-1515.

- Selles, F; McConkey, B. and Campbell, C. 1999. Distribution and forms of P under cultivator and zero tillage for continuous and fallow wheat cropping systems in the semiarid Canadian prairies. *Soil Tillage Res.* 51: 47-59.
- Sneller, E. and Laboski, C. 2009. Phosphorus source effects on corn utilization and changes in Soil Test. *Agronomy Journal*. Volume 101. Issue 3. Pp. 663-670.
- Sims J. and G. Pierzynski. 2005. Chemistry of phosphorus in soils. Pp. 151 to 192. In M. Tabatabay and D. Sparks (Eds.) *Chemical Processes in Soils*. SSSA Book. Series 8.
- Tiessen, H and Moir, J. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. Pp. 75-86. En: MR Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Soc. Soil Sci. Lewis Publ., Boca Raton, FL, USA.
- Varallyay, G. 1994. Precision nutrient management impact on the environment and needs for the future. *En commun. Soil Sci. Plant anal.* 25 (7-8), 1994: 909-930.
- Williams, C. H. 1971. Reaction of surface applied superphosphate with soil: II. Movement of the phosphorus and sulphur into the soil. *Aust. J. Soil Res.* 9: 95 – 106.
- Zamuner, E.C., L.I. Picone and H.E. Echeverría. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnosis methods for wheat under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 89: 70-77

Capítulo III

Crecimiento de trigo y recuperación del fósforo agregado con distintas fuentes en condiciones controladas

1. Introducción

Los suelos de la provincia de Entre Ríos presentan deficiencias generalizadas de fósforo extraíble (P), en particular las áreas con suelos del orden Vertisol (Tasi, 2000; Boschetti et al., 2000). El P es un nutriente sin vías de reposición natural, por lo que la extracción continua por los cultivos sólo puede ser repuesta mediante la fertilización fosfatada. Los incrementos en los rendimientos de los cultivos han sido acompañados por un mayor consumo de fertilizantes. Sin embargo, este mayor consumo no ha llegado a compensar las extracciones de nutrientes de los cultivos, originándose balances negativos de fósforo en la mayor parte del país (García, 2001; García et al., 2005; Barbagelata & Melchiori, 2007).

El fósforo es un nutriente poco móvil, de baja solubilidad y de baja concentración en la solución del suelo, desde donde llega a las raíces de las plantas principalmente mediante el mecanismo de difusión.

Los fertilizantes fosfatados al ser aplicados al suelo se disuelven en presencia de agua, aumentan la concentración del P en solución y generan reacciones con los constituyentes del suelo dando fosfatos menos solubles. Este fenómeno se denomina fijación o retención de P. El carbonato de calcio e hidróxidos de hierro y aluminio juegan un rol clave en la fijación de P en los suelos (Sample et al., 1980). Las reacciones de fijación con calcio predominan en suelos alcalinos, mientras que en suelos ácidos a neutros, las reacciones de fijación están relacionadas con el hierro y el aluminio (McLaughlin et al., 1981)

Trabajos recientes realizados en suelos con alta presencia de carbonato, mostraron una mayor eficiencia en la remoción de fósforo por la planta de trigo (*Triticum aestivum L.*) cuando se utilizaron fertilizantes fosfatados líquidos en comparación con sólidos, que se tradujeron en mayores eficiencias agronómicas en el cultivo (Holloway et al., 2001; McBeath et al., 2005, McBeath et al., 2007). Este comportamiento estaría relacionado con una precipitación in situ del P del gránulo al reaccionar con el carbonato libre del suelo durante el proceso de humedecimiento (Hettarachchi et al., 2006; Lombi et al., 2006; Lombi et al., 2004).

La estrategia de utilizar fertilizantes fosfatados líquidos podría aplicarse con éxito en un amplio rango de suelos en otras partes del mundo con clima seco o altos contenidos de calcáreo (Holloway et al., 2001; Bertrand et al., 2006). Sin embargo, otros estudios sobre suelos alcalinos calcáreos y no calcáreos demostraron que la fertilización fosfatada líquida no tuvo beneficios, en producción de materia seca de alfalfa, comparados con fertilizantes sólidos granulares (Reid et al., 2004; Ottman et al., 2006).

El objetivo del trabajo en este capítulo fue evaluar el efecto de dos fuentes de P (una líquida y una sólida) sobre el crecimiento del trigo y la eficiencia de recuperación del P agregado, en dos suelos con presencia de calcáreo, correspondientes a los órdenes Molisol y Vertisol, representativos de la provincia Entre Ríos.

2. Materiales y métodos

El experimento se realizó en invernadero utilizando macetas de 1 dm³ donde se ubicó 1 kg de suelo. Los tipos de suelos empleados fueron Molisol (Argiudol rendólico, Serie La Juanita) y Vertisol (Peluderte árgico crómico², Serie Las Mercedes). El suelo utilizado se extrajo de los 10 cm superficiales, se secó al aire y se tamizó (6 mm). La ubicación geográfica de las muestras es la misma que la señalada en el capítulo 2.

Previo a la siembra de las macetas se extrajeron 5 sub muestras de cada suelo para realizar análisis químico de pH, P extraíble (relación suelo – extractante 1:7, agitado durante 5 minutos) por los métodos Bray I y Mehlich III y carbonatos de calcio por determinación manométrica (%).

El experimento se dispuso en un diseño factorial de 2 fuentes y 4 dosis completamente aleatorizado con cuatro repeticiones por tratamiento, más un testigo por suelo (también con 4 repeticiones). Se evaluaron 9 tratamientos en cada suelo, resultantes de las combinaciones de dos fuentes de P, una líquida: polifosfato de amonio (PFA) (11% N, 16 % P, densidad 1,4 gr/cm³, pH 6,5) y una sólida: fosfato diamónico (FDA) (18% N, 20 % P) y cuatro niveles de P: 30; 60; 120; 240 mg de P kg⁻¹ de suelo, más un testigo sin P agregado. Para evitar efectos de bordes las macetas se rotaron completamente cada tres días durante todo el periodo de crecimiento.

Los demás nutrientes se consideraron no limitantes, para lo cual se aplicó a cada maceta una mezcla conteniendo 250 mg de nitrógeno, 151 mg de potasio, 68 mg de azufre, 50 mg de magnesio, 4 mg de manganeso, 4 mg de zinc, 2 mg de hierro, 1,3 mg de cobre, 0,3 mg de boro y 0,1 mg de molibdeno. Todos los fertilizantes se homogenizaron con el suelo cuatro días antes de la siembra.

Se sembraron 10 semillas del cultivar de trigo Bio INTA 3000 y al estadio de 1 hoja, se dejaron 6 plantas por maceta. El experimento se regó cada tres días por capilaridad, manteniendo la humedad cercana a capacidad de campo.

Se determinó la materia seca aérea acumulada mediante el corte de las plantas al nivel del suelo a los 46 días desde la siembra. Las plantas se secaron en estufa a 65°C hasta peso constante, luego se pesó en balanza de precisión y se molieron para medir concentración de P total, previa digestión nitroperclórica.

² Si bien el gran grupo Pelludertes se dejó de usar desde 1999, en Entre Ríos debido a la heterogeneidad de suelos Vertisoles se sigue conservando la clasificación original desarrollada por G.W. van Barneveld en 1974 (Dante Bedendo, comunicación personal). En la nueva clasificación este suelo se clasifica como Hapluderte típico.

La eficiencia de la fertilización con P se evaluó a través del procedimiento sugerido por Steinbach (2005) y Syers et al. (2008) a partir de la eficiencia de recuperación del P del fertilizante (EREC):

$$\text{EREC (\%)} = \frac{\text{P ABS}(t_{\text{fert}}) - \text{P ABS}(t_0)}{\text{Dosis de P}} * 100$$

Donde PABS (t_{fert}) es el P absorbido del tratamiento fertilizado y PABS (t_0) es el nutriente absorbido en el tratamiento testigo. El P absorbido corresponde al P total de las 6 plantas que crecieron en cada maceta.

Se realizó el análisis de la varianza (Test de LSD Fisher) para comparar medias. Para establecer si las respuestas en materia seca de trigo, P absorbido, concentración de P en hojas y EREC debían representarse en cuatro modelos (una regresión para cada fuente y suelo) o podían combinarse en menos funciones, se efectuaron pruebas de “F” (Mead et al., 1993). Para las comparaciones de los modelos se realizó la prueba de F con todas las repeticiones, en las figuras se graficaron los promedios para cada dosis y fuente. El nivel de significancia utilizado fue siempre del 5%. Se utilizó el programa de análisis estadístico InfoStat versión 2011 (Di Rienzo et al., 2011).

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados de los análisis de suelos antes de la fertilización.

El pH para ambos suelos fue de 7,9. En el Vertisol los valores de P extraíble promediaron 10,7 mg kg⁻¹ con el extractante Bray I y 33,2 mg kg⁻¹ con Mehlich III. Para el Molisol los valores de P extraíble fueron de 16,0 y 39,9 mg kg⁻¹ para Bray y Mehlich III, respectivamente. Los valores de carbonatos de calcio fueron de 8,9 % para el Vertisol y de 2,9 % para el Molisol. Salvo el pH, las otras mediciones difirieron significativamente entre suelos.

3.2 Producción de Materia seca.

El trigo respondió a la aplicación de P en ambos suelos. En la tabla 8 se muestra el análisis de varianza, donde la dosis de P fue la única variable que afectó significativamente la producción de materia seca. Ni el tipo de suelo ni la fuente de P tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento de trigo. No se verificaron tampoco interacciones entre las variables.

Tabla 8. Producción de Materia seca de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Valor F	p-value
Suelo	1	0,46	0,50
Fuente	1	0,98	0,33
Dosis de P	3	22,70	<0,0001
Suelo*Fuente	1	0,71	0,40
Suelo*Dosis de P	3	1,98	0,13
Fuente*Dosis de P	3	0,52	0,67
Suelo*Fuente*Dosis de P	3	1,66	0,19

Se realizó la prueba de F para comparar los cuatro modelos obtenidos (cada fuente en cada suelo) y se encontró que las curvas obtenidas no eran estadísticamente diferentes entre sí ($p > 0.05$), por lo que una función común sustituye los modelos individuales, aumentando la robustez de la relación encontrada entre la respuesta de rendimiento en materia seca y la fertilización con P (Figura 9).

Ambas fuentes fueron igual de eficientes para aumentar la producción de materia seca del trigo, hasta el agregado de 87 mg de P por kilo de suelo.

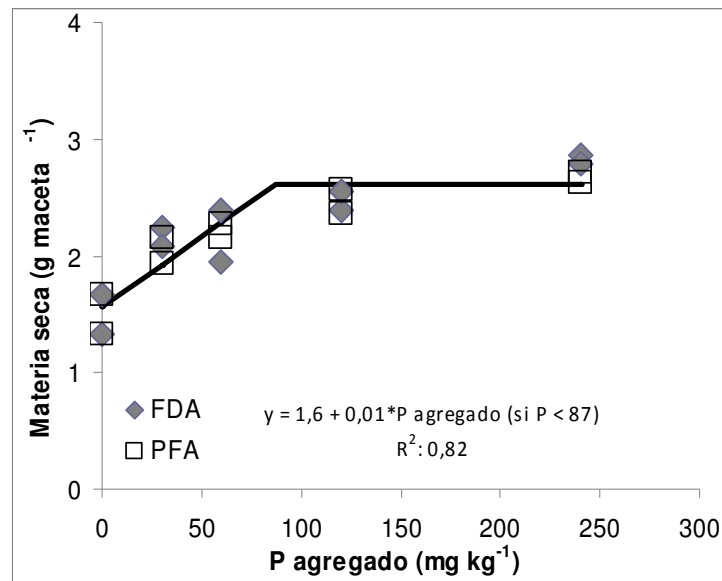


Figura 9. Relación entre el P adicionado con FDA y PFA y la producción de materia seca de trigo. Modelo combinado en una única función. Cada punto es el promedio de las repeticiones. Suelo Molisol y Vertisol.

Quintero et al. (2003), trabajando con 13 suelos de las provincias de la Mesopotamia Argentina, con distinta capacidad buffer, encontraron que con la adición de 92 (+- 41) mg P kg⁻¹ de suelo se alcanzó el 90% del rendimiento máximo de materia seca de trigo creciendo durante 6 semanas en condiciones controladas de invernadero. Este resultado es similar al encontrado en el modelo combinado; sugiriendo que la fertilización fosfatada es una variable de manejo más importante que el tipo de suelo donde crece el cultivo y que la fuente utilizada.

Por otra parte, en suelos del sur de Australia, trabajos de la última década señalan una mayor producción de materia seca de trigo cuando la fertilización fosfatada fue adicionada en forma líquida frente a la granular: Holloway et al. (2001) determinaron beneficios con fuentes de P fluidas frente a las granulares, en suelos con carbonato de calcio entre 20% y 60%. Bertrand et al. (2006) evaluando la eficiencia relativa de fertilizantes fosfatados líquidos y granulares en suelos Calcáreos y Vertisoles del sur de Australia determinaron un aumento de la producción de materia seca de trigo en invernadero cuando los fertilizantes se adicionaron líquidos, sugiriendo que la mejor eficiencia de las formulaciones fluidas se explica por una mayor difusión del P y por una menor precipitación del P con el calcio del suelo. McBeath et al. (2005) en ensayos en invernadero, encontró que 18 de 29 suelos evaluados tuvieron mayor producción de

materia seca de trigo cuando se fertilizó con P en forma líquida, informando una relación positiva entre el contenido de carbonato de calcio del suelo y la respuesta de trigo a la fertilización líquida. McBeath et al. (2007) lograron entre un 15 y un 50% más de biomasa en trigo cuando adicionaron el P en forma líquida frente a los fertilizantes granulares, obteniendo las mayores respuestas con alto contenido de carbonato en el suelo (el rango de carbonato de calcio de los suelos por ellos evaluado estuvo entre 0 y 61%). Armstrong et al. (2008) señala que la mayor eficiencia de las formas líquidas para mejorar el crecimiento de trigo en suelos de Australia se debe a una mayor difusión del P y a una menor fijación del P adicionado.

Los valores más bajos de carbonato de calcio de los suelos del presente ensayo frente a lo informado por los trabajos antes citados puede ser la causa de ausencia de diferencias en la respuesta en producción de materia seca de trigo al fertilizante líquido frente al granular.

3.3 P en materia seca y eficiencia de recuperación de P.

El P absorbido (miligramos de P en las plantas de trigo en cada maceta) fue significativamente mayor ($p < 0,05$) en el suelo Vertisol ($10,3 \text{ mg maceta}^{-1}$) que en el Molisol ($8,7 \text{ mg maceta}^{-1}$). En la Tabla 9 se informa el análisis de varianza y las interacciones para esta variable. No se determinó interacción entre suelo y fuente, ni fuente y dosis, concluyendo que la fuente PFA estuvo relacionada a una mayor absorción de P en hojas de trigo creciendo en macetas con suelo con presencia de calcáreo.

Tabla 9. P absorbido en plantas de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Valor F	p-value
Suelo	1	9,56	<0,001
Fuente	1	12,30	<0,001
Dosis de P	3	10,26	0,002
Suelo*Fuente	1	38,27	0,81
Suelo*Dosis de P	3	0,05	0,64
Fuente*Dosis de P	3	0,97	0,41
Suelo*Fuente*Dosis de P	3	0,46	0,72

De la comparación de las regresiones, mediante una prueba de F se determinó que en cada suelo se debía representar a cada fuente por separado, simplificar en menos modelos (menor cantidad de curvas) implicaba un aumento significativo del error ($p < 0.05$). En la Figura 10 se grafica cada fuente en cada suelo y el P absorbido.

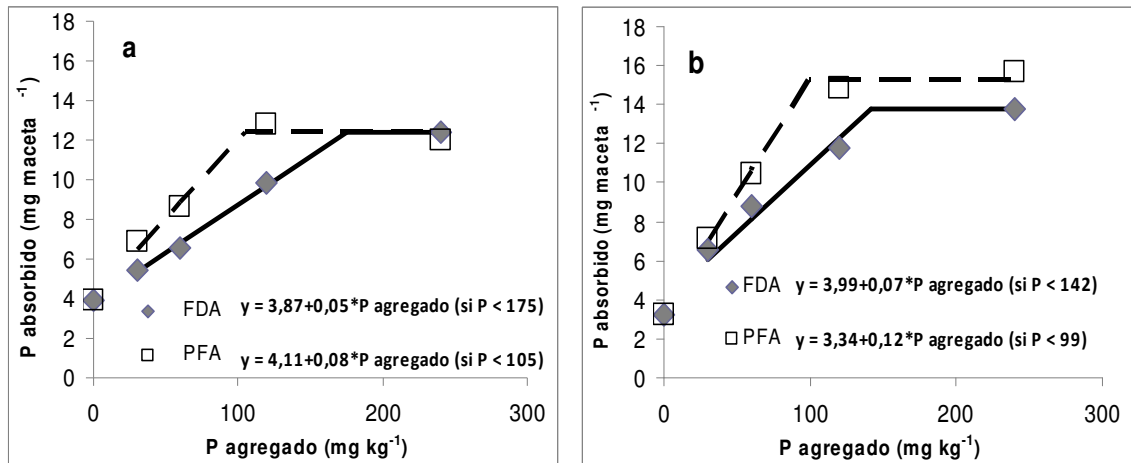


Figura 10. Relación entre el P agregado con FDA y PFA y el P absorbido (mg de P en plantas de trigo por maceta). Cada punto corresponde al promedio de las cuatro observaciones para cada fuente y dosis; a) Suelo Molisol; b) Suelo Vertisol.

El porcentaje de P en la materia seca fue diferente según tipo de suelo, fuente y dosis (Tabla 10). En el suelo Vertisol fue en promedio 0,46%, mayor al Molisol que fue 0,39%. Este resultado puede explicarse, en parte, porque el trigo creciendo en el suelo Vertisol incrementó la cantidad de P absorbido a medida que aumentó las dosis de fertilizante y la inflexión en la relación crecimiento y porcentaje de P en los tejidos ocurrió cuando otros factores limitaron primero el crecimiento que la absorción de P (Kamprath & Watson, 1980), ya que los testigos no tuvieron diferencias en la concentración de P según suelo, con un promedio de 0.24%.

Tabla 10. Concentración de P en materia seca de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Valor F	p-value
Suelo	1	12,90	< 0,001
Fuente	1	17,70	< 0,001
Dosis de P	3	22,10	< 0,001
Suelo*Fuente	1	0,47	0,50
Suelo*Dosis de P	3	0,27	0,85
Fuente*Dosis de P	3	0,69	0,56
Suelo*Fuente*Dosis de P	3	0,47	0,70

En ambos suelos, la fuente PFA produjo mayores concentraciones en tejido de trigo que el FDA. En la Figura 11 se graficaron 4 curvas, una por fuente en cada suelo, ya que tampoco para esta variable se pudieron unificar modelos sin aumentar el error significativamente (prueba de F, $p < 0.05$).

Kamprath & Watson (1980) informan que a un mismo nivel de rendimiento puede existir distintas concentraciones de P para una misma especie. Este comportamiento es coincidente con las diferencias entre suelos y fuentes en la concentración de P en hojas y no en la producción de materia seca.

El resultado encontrado en el presente trabajo no coincide con lo informado por Holloway et al. (2001), ellos comunican que a bajas tasas de P adicionado los fertilizantes líquidos tuvieron mayores concentraciones de P que las fuentes granulares pero a altas tasas este comportamiento se invertía.

Según lo medido y presentado en el Capítulo II, el fosfato de la fuente FDA se fijó con el calcio en mayor medida que el fosfato de la fuente PFA y a su vez produjo menor cantidad de P extraíble por el método Bray I y Pmia, que si bien abasteció al trigo de manera que no condicionó la producción de materia seca proveyó más lentamente el P desde las formas ligadas con el calcio a la solución del suelo y por lo tanto disminuyó la cantidad de P finalmente absorbido por el cultivo. Este escenario puede ser el responsable de una menor absorción finalmente del P desde la fuente FDA por parte de las plantas de trigo en suelos con carbonato.

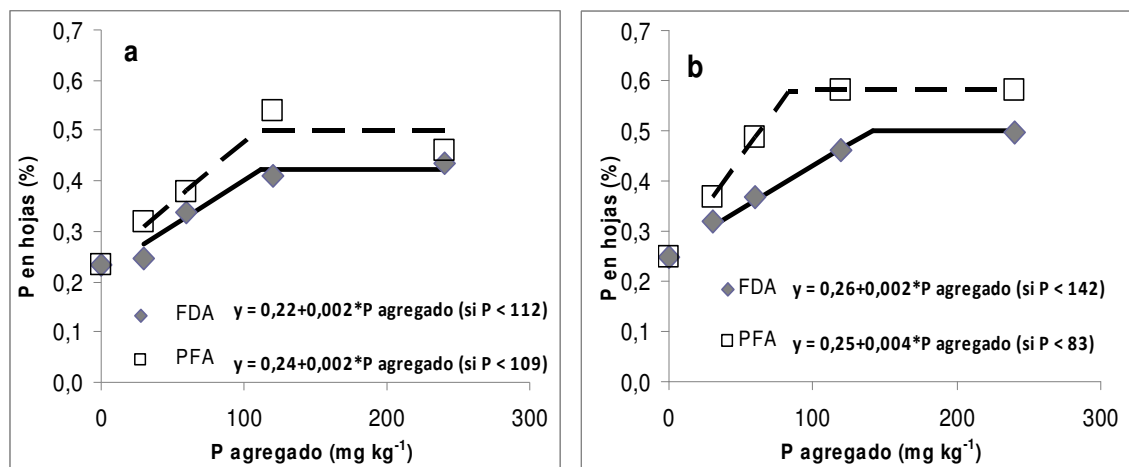


Figura 11. Relación entre el P agregado con FDA y PFA y la concentración de P en hojas. Cada punto corresponde al promedio de las cuatro observaciones para cada fuente y dosis; a) Suelo Molisol; b) Suelo Vertisol.

Los valores de P en hojas encontrados, tanto si tomamos el promedio como los umbrales (valores donde se produce la inflexión en la Figura 11), son superiores a los informados por Rodríguez et al. (2000) como umbral crítico para la fotosíntesis y para maximizar la eficiencia de intercepción de la radiación en trigo (0,34%) y por Quintero et al. (2003) para obtener la máxima producción de rendimiento en trigo (0,35%); y en general están dentro del rango informado como concentraciones adecuadas en tejido vegetal de trigo por García et al. (2005) y Havlin et al. (1999).

Los valores de P en tejido de trigo, encontrados en los testigos, son similares a los informados en los testigos y en los tratamientos fertilizados con fuentes granulares en trabajos realizados de manera similar en Australia, con mayor contenido de carbonato en suelo (McBeath et al., 2005). El incremento en la concentración de P en tejidos cuando se agrega P con una fuente granular (FDA), para el presente trabajo, puede deberse a una menor cantidad de carbonato en los suelos ensayados.

En la Tabla 11 se informa el análisis de varianza para la eficiencia de recuperación del P del fertilizante, concluyendo de igual manera que con la concentración de P en tejido.

Tabla 11. Eficiencia de recuperación de P en materia seca de trigo: análisis de la varianza y la significancia del efecto de cada variable y sus interacciones en el modelo.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Valor F	p-value
Suelo	1	13,71	< 0,001
Fuente	1	7,39	0,001
Dosis de P	3	7,85	< 0,001
Suelo*Fuente	1	0,15	0,70
Suelo*Dosis de P	3	0,92	0,44
Fuente*Dosis de P	3	0,65	0,59
Suelo*Fuente*Dosis de P	3	0,23	0,87

La fertilización con la fuente PFA fue más eficiente que el FDA, medido como P recuperado del fertilizante en tejido vegetal de trigo. El PFA presentó una eficiencia promedio de recuperación de 8,5% y el FDA de 6,2%.

La eficiencia de recuperación del P disminuyó al aumentar la dosis de P en el suelo (Figura 12). Al igual que lo informado en la bibliografía a medida que se incrementa la fertilización, el P agregado es usado menos eficientemente (Syers et al., 2008).

El rango de eficiencia informado por Steinbach (2005) y Syers et al. (2008) se sitúa entre 10 y 30%, dichos valores son superiores a los valores promedios encontrados en el suelo Molisol (5,8%), mientras que en el suelo Vertisol las eficiencias estuvieron cercanas al rango antes informado (9%).

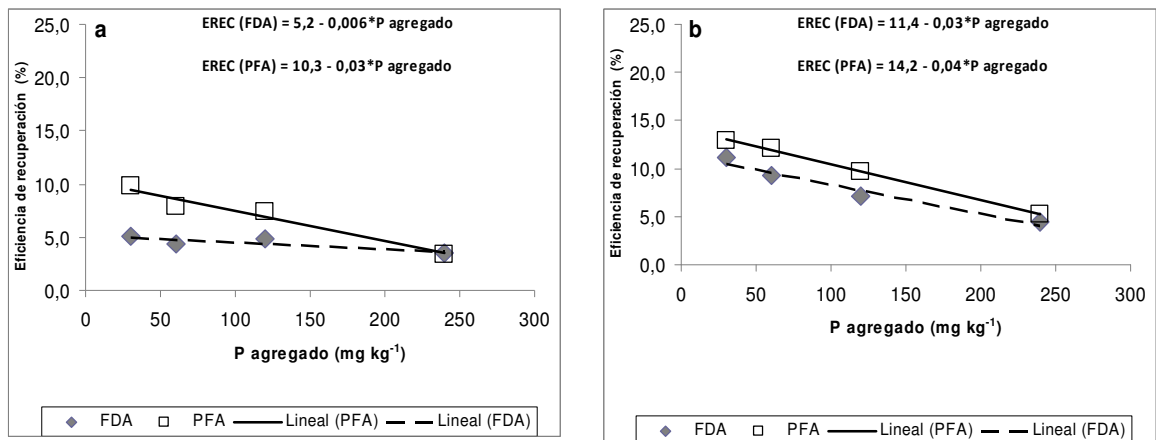


Figura 12. Relación entre el P agregado con FDA y PFA y la eficiencia de recuperación de P. Cada punto corresponde al promedio de las cuatro observaciones para cada fuente y dosis; a) Suelo Molisol; b) Suelo Vertisol.

Resultados semejantes encontraron McBeath et al. (2005) para suelos con alto contenido de carbonato y McBeath et al. (2007) concluyen que hay ventajas en el uso de fuentes líquidas sobre las granulares claramente con valores de carbonatos superiores a 5% en las zonas superficiales del suelo. En el presente trabajo hay evidencia que la fuente PFA fue utilizada más eficientemente que el FDA, pero se conjetura que estas ventajas están más relacionadas a la reacción de la fuente en el suelo y no tanto a la forma física en que se encuentra. Esta información es contundente con lo encontrado en el capítulo II, donde la fuente FDA aumentó significativamente la fracción de P recuperada con $P_i HCl$ (fracción no lábil).

4. Conclusión.

Frente al agregado de P con distintas fuentes hubo respuesta a la dosis de P agregada en la producción de materia seca de plantas de trigo pero sin diferencias entre suelos ni fuentes.

Por otro lado se midió que la concentración de P en tejido, el P absorbido y la eficiencia de recuperación de P agregado fue mayor cuando se agregó el P con la fuente PFA frente a FDA.

En relación con lo concluido en el Capítulo II, la fuente que alcaliniza el medio, como es el caso del FDA, provee fosfatos menos solubles (y por lo tanto menos disponibles) que una fuente como el PFA, que si bien no condiciona la producción de materia seca, sí afecta la absorción de P por parte del trigo.

Bibliografía

- Armstrong, R.; Nuttall, J.; Holloway, B.; Lombi, E. and McLaughlin, M. 2008. How effective are fluid phosphorus fertilizers in the Wimmera and Mallee region of Victoria? Proceedings of the 14th Australian Agronomy Conference. September 2008, Adelaide South Australia. Australian Society of Agronomy. www.agronomy.org.au.
- Barbagelata, P. y Melchiori, R. 2007. Balance de nutrientes en campos agrícolas de la Provincia de Entre Ríos. Agricultura Sustentable en Entre Ríos. Ediciones INTA. Isbn 978-987-521-253-4. Pp. 89- 94.
- Bertrand, I.; McLaughlin, M.; Holloway, R.; Armstrong, R. and McBeath, T. 2006. Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. *Nutrient cycling in agro ecosystems* 74: 27-40.
- Boschetti N. Valenti R. Vesco C. y Sione M. 2000. Contenido de fósforo total en suelos con características vérticas de la Provincia de Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía (UBA)* 20 (1): 53-58.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- García F. 2001. Phosphorus Balance in the Argentinean Pampas. *Better Crops International* 15 (1), 22 – 24.
- García, F.; Piconi, L. y Berardo, A. 2005. Fósforo. En: H. Echeverría y F. García (Eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires. Argentina. Pp. 99-121.
- Havlin, J; Beaton, J.; Tisdale, S. and Nelson, W. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers; An Introduction To Nutrient Management*. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 499 p.
- Hettiarachchi, G.; Lombi, E.; McLaughlin, M.; Chittleborough, D. and Self, P. 2006. Density changes around phosphorus granules and fluid bands in calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 960-966.
- Holloway, R.E.; Bertrand, I.; Frischke, A.; Brace, D.; McLaughlin, M. and Shepperd, W. 2001. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil* 236: 209–219.
- Kamprath, E. and Watson, M. 1980. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soil. P. 433- 469. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA.
- Lombi, E.; Scheckel, K.; Armstrong, R.; Forrester, S.; Cutler, J. And Paterson, D. 2006. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil; a synchrotron-based investigation. Published In *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 2038-2048 (2006).
- Lombi, E.; McLaughlin, M.; Johnston, C.; Armstrong, R. and Holloway, R. 2004. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non- calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil* 269:25-34.

- McBeath, T.M.; Armstrong, R.; Lombi, E.; McLaughlin, M. and Holloway, R. 2005. Responsiveness of wheat to liquid and granular phosphorus fertilisers in southern Australian soils. *Australian Journal of Soil Research* 43:203-212.
- McBeath, T.M.; McLaughlin M.J.; Armstrong R.D., Bell, M.; Bolland M.; Conyers M.; Holloway, R. and Mason, S. 2007. Predicting the Response of wheat to liquid and granular phosphorus fertilizers in Australian soils. *Australian Journal of Soil Research* 43:203-212.
- McLaughlin, J; Ryden, J.; Syers J. 1981. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminum containing components. *Journal of soil science* 32, 365-377.
- Mead R., R. Curnow and A. Hasted. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology*. 2nd edition, Chapman and Hall, London, 415 p.
- Ottman, M.; Thompson, T. and Doerge, T. 2006. Alfalfa yield and soil phosphorous increased with top dresses granular compared with fluid phosphorus fertilizer. Published in *Agron. J.* 98: 899-906.
- Plan Mapa De Suelos, Convenio INTA – Gobierno De E. R. 1991. Carta de Suelos de La República Argentina. Departamento Diamante, Provincia De Entre Ríos. Acuerdo Complementario Del Convenio INTA – Gobierno de E. R. EEA INTA Paraná, Serie Relevamiento De Recursos Naturales N° 9. 258 Pág.
- Quintero C.; Boschetti N.; Benavides R. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol.34. Nos. 9 Y 10. Pp 1435-1450.
- Reid, Ch.; Winward, D. and Koenig R. 2004. A comparison of liquid phosphoric acid and dry phosphorus fertilizer sources for irrigated alfalfa production on calcareous loils. *Communications in soil science and plant analysis*. Vol. 35, No 1 and 2. Pp. 39-50.
- Rodriguez, D; Andrade F. and Goudriaan, J. 2000. Does Assimilate Supply Limit Leaf Expansion In Wheat Grown In The Field Under Low Phosphorus Availability? *Field Crops Research* 67: 227-238.
- Sample E.; Soper R. and Racz G. 1980. Reactions of phosphate fertilizer in soils. Pp. 263-310. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA.
- Steinbach, H. S. 2005. Funciones de Producción. Pág.13-25. En Alvarez R. (Coordinador). *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Syers J.; Johnston, A. and Curtis, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. *FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin* No 18.
- Tasi, H. 2000. Aptitud de uso y estado de degradación de suelos Vertisoles y Vérticos de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía (UBA)* 20(1):1-6

Capítulo IV

Eficiencia agronómica de distintas fuentes de fósforo en condiciones de campo

1. Introducción

El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los vegetales. En la Pampa Húmeda se han verificado respuestas en diversos cultivos y pasturas a la aplicación de fertilizantes fosfatados (Álvarez et al., 2005; García et al., 2005; Quintero et al., 1995; Mistrorigo et al., 1993; Barbagelata, 2011), pasando a ser el P un nutriente deficitario en la región (Correndo & García, 2011).

El aporte de P a las plantas se realiza por el agregado de fertilizantes o abonos ya que es un nutriente sin reposición natural. Los fertilizantes fosfatados, al ser aplicados al suelo, se disuelven en presencia de agua. Las reacciones que ocurren alrededor del fertilizante entre los constituyentes del suelo y los compuestos del fertilizante disminuyen la concentración de P de la solución, dando fosfatos menos solubles. El fenómeno involucrado es la fijación, sorción o retención de P y comprende procesos de adsorción, precipitación e inmovilización biológica (Hedley & McLaughlin, 2005). Estos procesos son los responsables de que sólo entre el 5 y el 30% del fósforo aplicado al suelo como fertilizante sea absorbido por las plantas durante el ciclo agrícola, permaneciendo el resto como productos de la reacción fertilizante-suelo, quedando potencialmente disponible para los próximos cultivos y declinando la respuesta a este fosfato residual en los años siguientes.

El pH de los suelos afecta la reactividad de los componentes del suelo con los ortofosfatos y establece la presencia y abundancia de los cationes que precipitan con el P. También las fuentes de P utilizadas determinan las reacciones suelo-fertilizante, lo que influiría en la disponibilidad de P para las plantas (Havlin et al., 1999; Hedley & McLaughlin, 2005).

Distintas propiedades de los fertilizantes fosfatados han sido estudiadas y relacionadas con posibles efectos en la disponibilidad del P para los cultivos. Engelstad & Terman (1980) informan que las soluciones o suspensiones y los fertilizantes sólidos con similar solubilidad, a igual tasa de aplicación de P y ubicación en el suelo, muestran una similar disponibilidad para los cultivos. Havlin et al. (1999) informan que, en general, no se han observado diferencias en la eficiencia de uso del P del fertilizante, cuando la solubilidad del fertilizante en agua es mayor al 80%. No obstante, en trabajos conducidos a campo y en laboratorio durante la última década, en suelos calcáreos de zonas áridas de Australia se observó que en la interface suelo-fertilizante existía una mayor cantidad de fosfatos precipitados cuando se utilizaron fertilizantes granulados frente a formulaciones líquidas. Esta observación coincidió con una mayor eficiencia agronómica del fertilizante en el cultivo de trigo (Holloway et al., 2001). De igual manera Bertrand et al. (2006) sugieren que la estrategia de utilizar fertilizantes fosfatados líquidos podría aplicarse con éxito en un amplio rango de suelos en otras partes del mundo con clima seco o suelos calcáreos.

En Entre Ríos es común encontrar sectores con carbonato de calcio en superficie en suelos Vertisoles y Molisoles, situación relacionada con la génesis de los suelos de la región, con la erosión natural en las lomas y con la degradación generada por las

labranzas en suelos con pendientes. En algunos de estos casos, se verifica la presencia de carbonato libre que podría afectar la disponibilidad de P.

El objetivo principal del trabajo en este capítulo fue determinar la respuesta en producción de grano de trigo y la concentración de P en grano utilizando fuentes líquidas y granulares en condiciones de campo. Como objetivos secundarios, determinar la residualidad de la fertilización fosfatada a campo según fuentes líquidas o granulares de P y relacionar el rendimiento de trigo con distintas variables de suelo.

2. Materiales y métodos

2.1 Características generales de los Ensayos.

En sectores próximos de donde se extrajeron las muestras de suelo para los ensayos de invernadero (Capítulo III) y laboratorio (Capítulo II), se instalaron los ensayos de campo (sitio suelo Vertisol en dos campañas: 2007 y 2008; y sobre el suelo Molisol una campaña: 2007).

Veinte días previos a la siembra se agregaron las distintas dosis y fuentes fosfatadas en superficie: en bandas cada 25 cm (fertilizantes líquidos) y al voleo (granulares).

Las fuentes fosfatadas fueron FDA, PFA, SFT y AF y las dosis 12 y 24 kg P ha⁻¹, excepto el AF que tuvo las dosis de 12 kg de P ha⁻¹ solamente.

Además del P se adicionó N y S a tasas no limitantes (184 kg de N ha⁻¹ y 28 kg ha⁻¹ de S, como urea y sulfato de calcio respectivamente). La siembra se realizó con maquinaria comercial del productor y el resto del manejo del cultivo fue el realizado por el productor. En la campaña 2007 en el suelo Vertisol se utilizó la variedad Baguette Premium 13 y en la campaña 2008, Klein Tauro. En el suelo Molisol la variedad sembrada fue ACA 901 (Campaña 2007).

2.2 Diseño del experimento.

Cada ensayo tuvo un arreglo factorial de cuatro fuentes por dos dosis más un testigo por bloque, completamente aleatorizados con seis repeticiones. Por problemas de formulación comercial, para la fuente AF sólo se instaló el tratamiento con la dosis de 12 kg P ha⁻¹. Por lo tanto se obtuvieron un total de 48 parcelas o unidades muestrales por sitio. En la campaña 2008 se perdió un bloque del ensayo, logrando 40 parcelas.

Con el objetivo de que cada bloque se disponga en sitios lo más homogéneo posible, las parcelas fueron pequeñas, abarcando una superficie correspondiente a 8 líneas del cultivo de trigo y un largo de 2 metros.

2.3 Muestreo de suelo.

De cada parcela se obtuvo muestras de suelo con calador cilíndrico (muestra compuesta de por lo menos 10 sub muestras) antes de la aplicación de los fertilizantes a una profundidad de 0 a 10 centímetros. Luego de tamizar las muestras por un tamiz de 2 mm se determinó P extraíble (relación suelo – extractante 1:7, agitado durante 5 minutos) por los métodos Bray I y Mehlich III, los carbonatos se determinaron con el calcímetro de Bernard y el pH en una relación suelo: agua de 1:2,5.

Luego de la cosecha de las parcelas se tomaron muestras de suelo a 10 cm de profundidad. De manera de abarcar tanto los tratamientos fertilizados en bandas (fertilizantes líquidos) como al voleo (fertilizantes granulados), la toma de muestra se realizó extrayendo suelo de todo el ancho de la parcela, tal como se señala en la Figura 13.

Con los valores de P extraíble (Bray I y Mehlich III) antes de la siembra y después de la cosecha se calculó la diferencia en cada parcela y se graficaron los valores promedios para cada sitio y dosis.

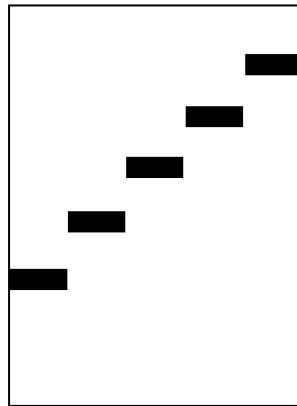


Figura 13. Esquema de muestreo de suelos para cada parcela luego de la cosecha.

En el ensayo sobre el suelo Vertisol (campaña 2007) se realizó el fraccionamiento secuencial de P (Hedley et al., 1982, modificado por Tiessen & Moir, 1993) en cuatro de los bloques, en las muestras tomadas luego de la cosecha, seleccionando las parcelas testigos y las que recibieron la dosis de 24 kg de P por hectárea.

2.4 Cosecha y análisis en el cultivo.

En cada parcela se cosecharon en forma manual 4 líneas centrales por 1,5 metros. La trilla se realizó con máquina experimental estática. El rendimiento se expresó en kilos por hectárea, corregido a 13,5% de humedad.

2.5 Cálculo de eficiencia de recuperación y agronómica.

De los granos cosechados, en los ensayos de la campaña 2007, se midió la concentración de P en grano mediante digestión nitroperclórica. Se calculó la eficiencia de recuperación del P agregado (EREC) a través de un procedimiento similar al sugerido por Steinbach (2005) y Syers et al. (2008) a partir del P acumulado en el grano:

$$\text{EREC (\%)} = \frac{\text{Pgrano}(t_{\text{fert}}) - \text{Pgrano}(t_0)}{\text{Dosis de P}} * 100$$

Donde $\text{Pgrano}(t_{\text{fert}})$ es el P acumulado en grano del tratamiento fertilizado y $\text{Pgrano}(t_0)$ es el P acumulado en grano del tratamiento testigo. El cálculo del P extraído o exportado por la cosecha se realizó a partir de la concentración de P en grano y el rendimiento de trigo en cada parcela.

La eficiencia agronómica (EAGR) se estimó a partir de la diferencia entre el rendimiento del tratamiento fertilizado y el testigo, dividido por la cantidad de P agregada.

$$EAGR \left(\frac{\text{kg grano}}{\text{kg P}} \right) = \frac{\text{Rendimiento } (t_{\text{fert}}) - \text{Rendimiento } (t_0)}{\text{Dosis de P}}$$

2.6 Análisis de los resultados.

Para medir el efecto en el rendimiento de trigo y las eficiencias de las distintas fuentes y dosis se realizaron análisis de varianza y de contrastes. Entre las distintas variables del suelo y del cultivo se realizaron regresiones y se compararon mediante pruebas de F. El nivel de significancia fue del 5%, utilizando el Test LSD Fischer. Se utilizó el programa de análisis estadístico InfoStat versión 2011 (Di Rienzo et al., 2011).

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados de los análisis de suelos antes de la fertilización.

En la Tabla 12 se observan los valores promedios encontrados para cada suelo y campañas, con sus desvíos y valores máximos y mínimos. Para el año 2008 se utilizaron los datos de 5 bloques ya que en uno no se pudo establecer el cultivo por la gran sequía registrada ese año.

Tabla 12. Valores promedios de las variables de suelo medidas y sus parámetros de dispersión. Profundidad de muestreo 10 cm.

Campaña	Suelo	Variable	n	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
2007	Molisol	pH	48	8,0	0,09	7,8	8,1
		P Bray I	48	13,1	3,59	7,3	26,4
		P Mehlich III	48	27,0	6,55	18,3	49,3
		% CaCO ₃	48	2,93	1,40	0,3	5,3
2007	Vertisol	pH	48	8,1	0,08	8,0	8,3
		P Bray I	48	3,4	1,44	0,6	6,0
		P Mehlich III	48	9,5	2,44	5,7	17,0
		% CaCO ₃	48	12,5	10,34	1,7	39,5
2008	Vertisol	pH	40	8,0	0,08	7,8	8,1
		P Bray I	40	3,2	1,82	0,8	8,0
		P Mehlich III	40	9,7	2,94	5,4	18,9
		% CaCO ₃	40	9,8	6,18	0,6	24,4

El pH medido estuvo por encima de los valores óptimos para el cultivo de trigo (Havlin et al., 1999) y es calificado como medianamente básico a básico (Vázquez, 2005). Vázquez (2005) si bien señala que el pH óptimo de la solución del suelo para el cultivo de trigo debe tener un rango entre 6 y 7, el cultivo tiene tolerancia y puede obtener un rendimiento satisfactorio en un rango de pH entre 5,8 y 8,5.

El P Bray I fue medio a bajo en el suelo Molisol y muy bajo en el Vertisol, máxime al tratarse de muestras extraídas de los primeros 10 cm de profundidad de lotes donde se

realiza siembra directa desde al menos 7 años. En estos sistemas se debería producir un incremento mayor del P en los primeros centímetros del suelo (García et al., 2005; Rubio & Álvarez, 2010; Lauer, 1988).

Los valores de carbonato de calcio encontrados fueron relativamente bajos en el Molisol y mayores en el Vertisol, mostrando una gran variabilidad en este último suelo. Los valores encontrados están en conformidad con lo informado por Van Lierop (1990) que señala que suelos con pH entre 7 y 8,5 contiene carbonato libre.

En la Figura 14 se muestra la relación entre el nivel de carbonatos de cada parcela y el pH, tomando la totalidad de los datos.

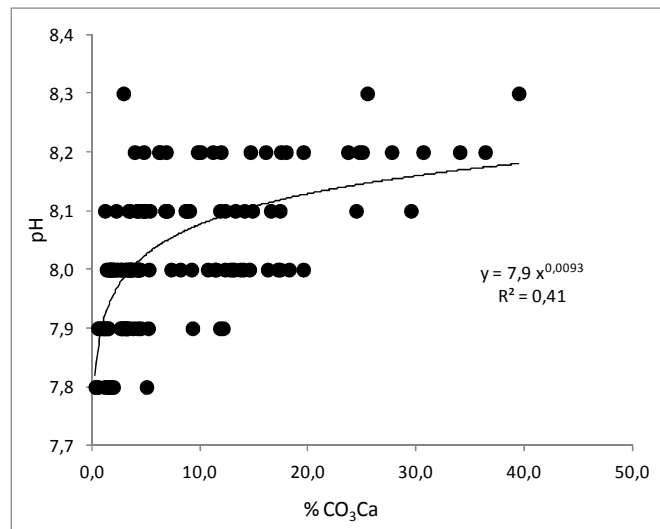


Figura 14. Relación entre el nivel de carbonatos y el pH en suelo. Todos los sitios.

La relación encontrada es significativa pero se observa una gran dispersión de los datos. El pH, si bien es una de las características químicas individuales más importante de un suelo (Bloom et al., 2005), es una medida de intensidad y no de cantidad por lo que suelos alcalinos con igual pH pueden contener grandes diferencias en las cantidades de carbonato (Van Lierop, 1990). En la Figura 14 se observa que con altos valores de carbonato el pH del suelo mostró siempre valores más altos.

3.2 Rendimiento de trigo

En la Tabla 13 se detallan los rendimientos obtenidos en cada campaña y para cada tipo de suelo. Los rendimientos de trigo logrados en la campaña 2007 fueron superiores a los obtenidos en el promedio departamental (2848 kg ha⁻¹, según datos de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos). En dicha campaña las reservas hídricas y las lluvias durante el ciclo del cultivo fueron adecuadas para lograr altos rendimientos. Las lluvias desde febrero a noviembre totalizaron 1165 mm (Bolsa de Cereales de E. R., 2012), siendo el promedio histórico para la zona 811mm (Plan Mapa de Suelos, 1991). En cambio la campaña siguiente tuvo un importante déficit hídrico (en los meses antes citados llovieron sólo 579 mm), midiendo en el ensayo rendimientos levemente inferiores al informado por la Bolsa de Cereales de E. R. para el promedio departamental (1640 kg ha⁻¹).

No se encontró asociación entre los valores de pH y rendimiento de los testigos, posiblemente por el estrecho rango (entre 7,8 y 8,2). Para nuestros ensayos el efecto año fue más significativo que el efecto pH: en el año con buenas precipitaciones (2007) el rendimiento fue mayor que en el año seco (2007) con similares valores de pH. Estos resultados confirman que el cultivo de trigo puede tener rendimientos satisfactorios hasta pH 8,5 (Vázquez, 2005).

Tabla 13. Estadísticos descriptivos del rendimiento de trigo para los dos suelos y campañas.

Campaña	Suelo	Variable	N	Media	D.E.	kg ha ⁻¹	
						Mínimo	Máximo
2007	Molisol	Rendimiento	48	4.810 a	356	3.919	5.781
2007	Vertisol	Rendimiento	48	3.378 b	387	2.357	4.061
2008	Vertisol	Rendimiento	40	1.395 c	252	930	1.943

Para los rendimientos, medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Test LSD Fisher.

La eficiencia agronómica también fue significativamente distinta para cada sitio (Tabla 14), sin diferencias entre dosis ($p = 0.53$).

Tabla 14. Respuesta agronómica al agregado de P por ensayo.

Ensayo	EAGR	
	(kg grano/kg P agregado)	n
Vertisol 2007	324,3 a	48
Molisol 2007	82,5 b	48
Vertisol 2008	-2,6 b	40

Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Test LSD Fisher.

Debido a las diferencias en los rendimientos y en las respuestas se continuó el análisis por sitio (Figura 15).

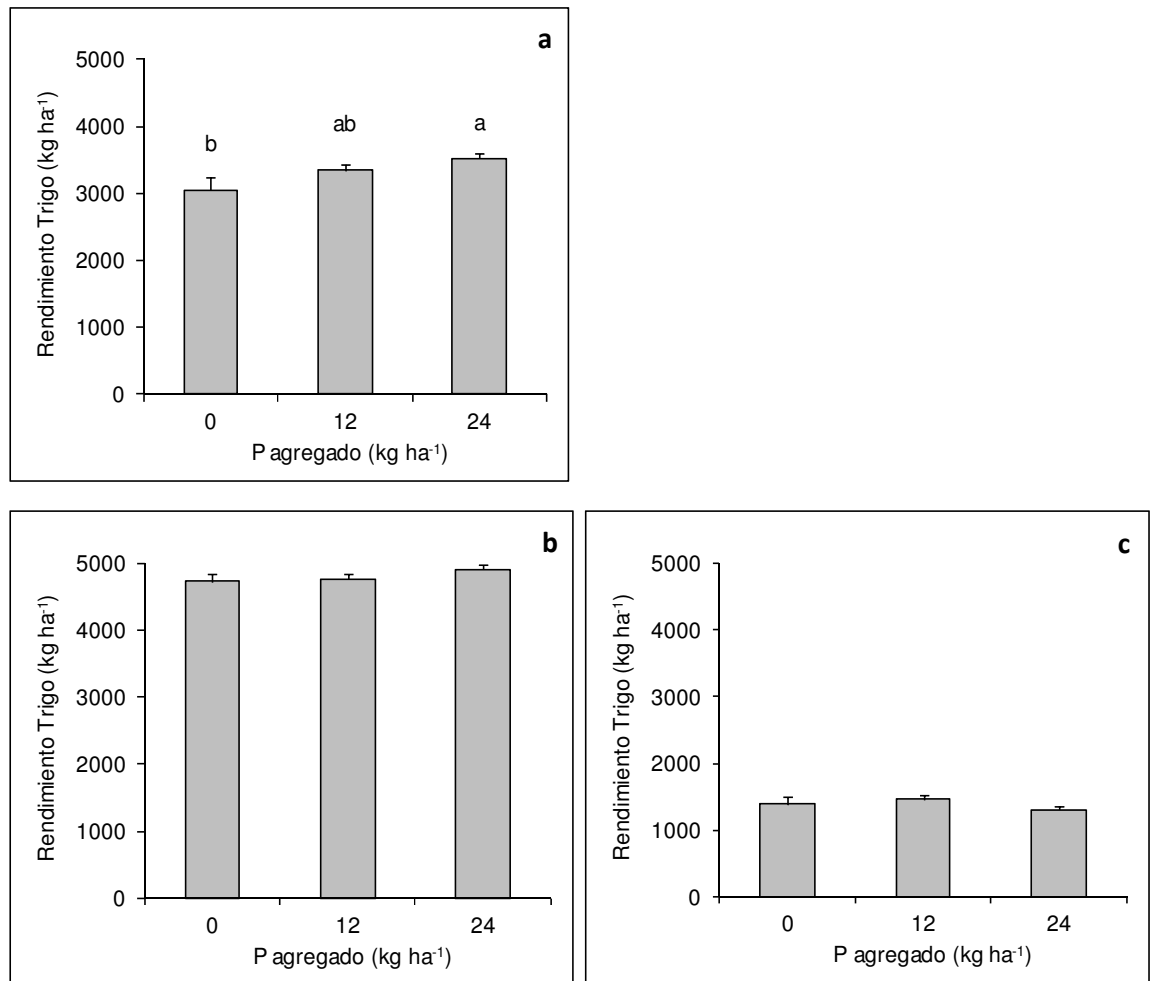


Figura 15. Efecto de las distintas dosis de P en el rendimiento de trigo: a) Suelo Vertisol, campaña 2007; b) Suelo Molisol, campaña 2007; c) Suelo Vertisol, campaña 2008. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Contrariamente a lo informado por Álvarez (2005) sobre la independencia comúnmente observada entre la respuesta a P y disponibilidad de agua para el cultivo, el año con importante déficit hídrico (campaña 2008) no tuvo respuesta significativa a la fertilización fosfatada a pesar de haber medido valores bajos de P extraíble. Vera Candioti et al. (2010) no encontraron beneficios al fertilizar con P en un año seco sobre el rendimiento de maíz, concluyendo que el efecto positivo del P sobre el rendimiento no es independiente de las condiciones hídricas. En un trabajo realizado en macetas con plantas de trigo creciendo durante 38 días, Gutiérrez Boem & Thomas (1998) encontraron interacción entre la nutrición fosfatada y déficit hídrico, siendo la adecuada nutrición fosfatada una herramienta que mejora la habilidad de la planta para tolerar un estrés hídrico cuando ocurre en niveles moderados. Es probable que debido a la severidad de la deficiencia hídrica ocurrida durante este ensayo, no se haya observado efecto positivo de la fertilización sobre el rendimiento del cultivo en la campaña 2008 (Figura 15).

La disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo es referida en la bibliografía como un factor externo que limita la capacidad de las plantas para absorber P. La difusión del P de la solución del suelo es el principal mecanismo de llegada de P a las raíces. La

difusión disminuye en condiciones de sequía o de baja humedad en los suelos (Syers et al., 2008). Como la difusión ocurre a través de poros llenos de agua, el coeficiente de difusión está directamente relacionada con el contenido volumétrico de agua del suelo (Kovar & Claassen, 2005).

En el año con buena disponibilidad hídrica (2007) el rendimiento del cultivo fue mayor al agregar P en ambos sitios (Figura 15), pero sólo en el sitio con menor nivel de P extraíble (suelo Vertisol) hubo un incremento significativo ($p < 0.05$) del rendimiento al aumentar la dosis de P. Álvarez (2005) en un resumen de distintas redes de ensayos realizados en la Pampa húmeda de los modelos obtenidos entre la respuesta de trigo a la fertilización fosfatada señaló que las menores respuestas se registraron en sitios con mayores niveles de P extraíble. En 43 ensayos de fertilización fosfatada conducidos durante cuatro campañas, Barbagelata (2011) informó respuestas de 381 y 503 kg ha⁻¹ de trigo para dosis de 12 y 24 kg P ha⁻¹, resultados similares a los observados en el ensayo con respuesta al agregado de P. Considerando los tres ensayos se midió un aumento promedio de rendimiento de trigo sobre el testigo de 137 y 201 kilos por hectárea, con las dosis de 12 y 24 kg de P ha⁻¹. En el ensayo de mayor respuesta (Vertisol 2007), los aumentos registrados fueron de 297 y 468 kilos de trigo por hectárea para las dosis de 12 y 24 kg de P ha⁻¹, respectivamente. Para la misma campaña y dosis para el suelo Molisol, con mayor P extraíble, las diferencias (no significativas) con el testigo fueron 35 y 174 kilos de trigo para la menor y mayor dosis de P, respectivamente.

Ensayos sobre suelos calcáreos y alcalinos informan aumentos de rendimientos con el agregado de 20 kg de P ha⁻¹ de 230 y 480 kilos de trigo por hectárea cuando la fuente usada fue granular ó líquida respectivamente (Holloway et al., 2001). Cabe señalar que los tratamientos controles rindieron alrededor de 500 kg de trigo ha⁻¹, y el suelo de dicho ensayo tuvo valores de carbonato muy superiores al del presente trabajo (entre 60 y 70%). Los mismos autores en un suelo con menos de 5% de carbonato no obtuvieron respuesta clara a la fertilización fosfatada líquida sobre las granulares, en situaciones donde el rendimiento del testigo fue de 1697 kg trigo ha⁻¹ y los tratamientos con 10 kg P ha⁻¹, con fuentes líquidas y granulares rindieron 2101 y 1943 kg trigo ha⁻¹, respectivamente.

La comparación de fuentes de P se enfocó en el sitio Vertisol 2007, donde la respuesta a la fertilización fosfatada fue significativa. En la Figura 16 se muestran los rendimientos obtenidos para cada fuente y dosis, para dicho ensayo.

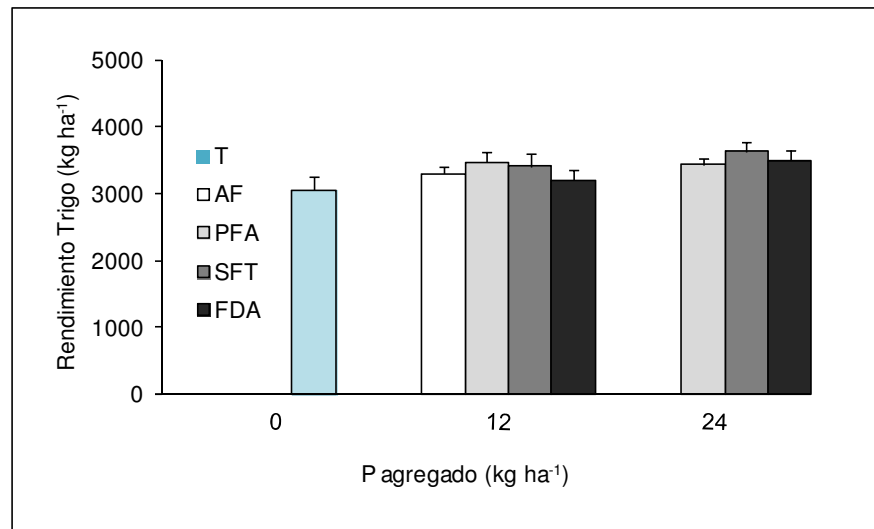


Figura 16. Efecto de las distintas fuentes fosfatadas en el rendimiento de trigo, Suelo Vertisol, campaña 2007. T: Testigo. AF: ácido fosfórico. PFA: polifosfato de amonio. SFT: súper fosfato triple. FDA: fosfato di amónico.

Para este experimento (suelo Vertisol, campaña 2007) se realizaron contrastes para evaluar el efecto de las fuentes y las dosis en el rendimiento de trigo (Tabla 15). Los tratamientos fertilizados se diferenciaron significativamente del testigo no encontrando ventajas en el uso de alguna fuente en particular para agregar P al cultivo de trigo.

Tabla 15. Rendimiento de trigo según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.

Efecto Dosis	p-value	Efecto Fuentes	p-value	Fuente * Dosis	p-value
Testigo vs Fert.	0,03	FDA vs PFA	0,49	FDA vs PFA	0,29
12 vs 24	0,15	FDA vs SFT	0,26	FDA vs SFT	0,79
Testigo vs 12	0,09	SFT vs PFA	0,67	SFT vs PFA	0,42
Testigo vs 24	0,01	AF vs FDA*	0,64		
		AF vs SFT*	0,60		
		AF vs PFA*	0,43		

* Contrastes realizados para la dosis de 12 kg P ha⁻¹.

La cantidad de carbonato de calcio libre de los suelos tuvo una relación negativa con el rendimiento logrado en los testigos. La fertilización anuló el efecto negativo del carbonato sobre el rendimiento cuando las condiciones de crecimiento del cultivo de trigo fueron adecuadas (Figura 17). Centrando el estudio en el suelo Vertisol, donde hay un rango importante de carbonatos, se afirma que la fertilización suple la inmovilización del P que produce el carbonato y la respuesta es mayor a mayores contenidos de carbonato en el suelo. En cambio para el ensayo 2008 (sin respuesta al agregado de P), la tendencia del tratamiento fertilizado y testigo fue similar. Las pendientes obtenidas entre los tratamientos fertilizados con 24 kg P ha⁻¹ y testigos de la Figura 17 en el suelo Vertisol 2007 son estadísticamente diferentes ($p < 0,03$). En este suelo cada incremento en una unidad del porcentaje de carbonato de calcio significó una disminución de 25 kilos de trigo ha⁻¹ cuando no se agrega P.

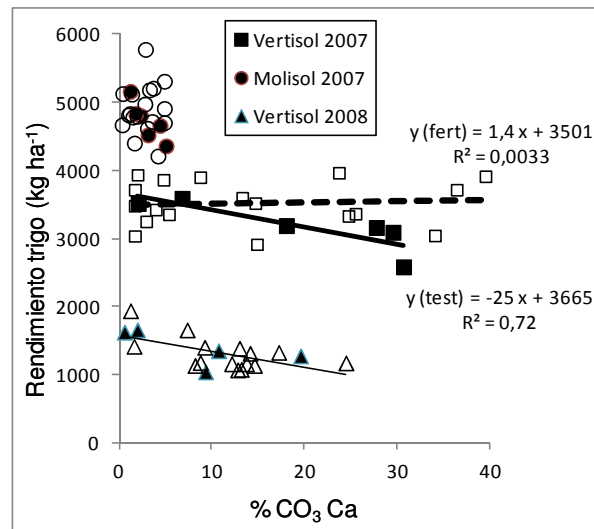


Figura 17. Relación entre el contenido de carbonato del suelo y rendimiento de trigo. Símbolos llenos, corresponde a testigos y símbolos vacíos a los tratamientos fertilizados con 24 kg P ha⁻¹.

3.3 Fósforo en grano y eficiencia de la fertilización fosfatada.

Estas variables fueron evaluadas sólo para los experimentos de la campaña 2007. El tipo de suelo influyó significativamente ($p < 0.05$) en el porcentaje de P en grano y fue de 0,24% para el suelo Vertisol y de 0,27% para el Molisol, debido probablemente al mayor nivel de P extraíble en el suelo Molisol. Los valores determinados en los experimentos están por debajo del informado por García & Correndo (2011) y por Syres et al. (2008) para el cultivo de trigo (0,33% - 0,38%); en cambio Holloway et al. (2001) encontró valores inferiores, con un rango entre 0,20% y 0,24% de P en grano con fertilizaciones entre 0 y 24 kg P ha⁻¹.

Kamprath & Watson (1980) y Duru & Thelie-Huche (1995) informan que a un mismo nivel de rendimiento puede existir distintas concentraciones de P en una misma especie, o puede haber interacciones con otros nutrientes y también rendimientos más altos pueden diluir el P absorbido, lo que dificulta el uso de la concentración de P en grano como test de nutrición fosfatada. A pesar de estas dificultades el análisis de plantas fue desarrollado para proveer información del estado nutricional de las plantas, y entre sus usos está el poder identificar cuánto del fertilizante adicionado fue tomado por los vegetales (Westermann, 2005).

En el suelo Molisol (Tabla 16) la concentración de P en grano registró un mayor porcentaje con la mayor dosis de P pero no se correspondió con un aumento significativo en el rendimiento, este comportamiento podría estar indicando un “consumo de lujo” de P. El “consumo de lujo” de algunos nutrientes se verifica en la zona de “suficiencia” del nutriente (Duru & Thelie-Huche, 1995; Munson & Nelson, 1990) donde mayores concentraciones no se corresponden con aumentos en los rendimientos (Westerman, 2005; Kamprath & Watson, 1981).

Tabla 16. Concentración de P en grano para el suelo Molisol.

P agregado Kg ha ⁻¹	P grano %
0	0,26 ab
12	0,25 b
24	0,29 a

Para cada suelo, medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Test LSD Fisher.

La extracción de P en los granos cosechados para este suelo fue en promedio de 12,8 kg P ha⁻¹, sin diferencias entre fuentes ni dosis. La eficiencia de recuperación y la eficiencia agronómica fueron muy bajas, 1,4% y 4,6 kg de grano por kilo de P agregado, respectivamente. Esto es esperable, ya que el cálculo de ambas eficiencias se basa en la diferencia de rendimiento entre el tratamiento testigo y fertilizado, y si no hay respuesta en rendimiento o esta es muy baja también lo serán las eficiencias.

Debido a los resultados informados se centró el estudio en el sitio Vertisol, ya que es el que presenta respuesta al agregado de P.

Para evaluar el efecto de dosis y fuentes sobre el porcentaje de P en grano se realizaron diversos contrastes (Tabla 17), no hallando interacción fuente * dosis, ni efecto dosis significativo, pero sí efecto de fuentes. En la Figura 18 se grafican los valores de porcentaje de P en grano para cada fuente de P. Se midió menor concentración de P en grano cuando se fertilizó con FDA.

Tabla 17. Porcentaje de P en grano de trigo según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.

Efecto Dosis	p-value	Efecto Fuentes	p-value	Fuente * Dosis	p-value
Testigo vs Fert.	0,29	FDA vs PFA	0,10	FDA vs PFA	0,58
12 vs 24	0,23	FDA vs SFT	0,01	FDA vs SFT	0,22
Testigo vs 12	0,51	SFT vs PFA	0,38	SFT vs PFA	0,50
Testigo vs 24	0,16	AF vs FDA*	0,22		
		AF vs SFT*	0,64		
		AF vs PFA*	0,98		

* Contrastes realizados para la dosis de 12 kg P ha⁻¹.

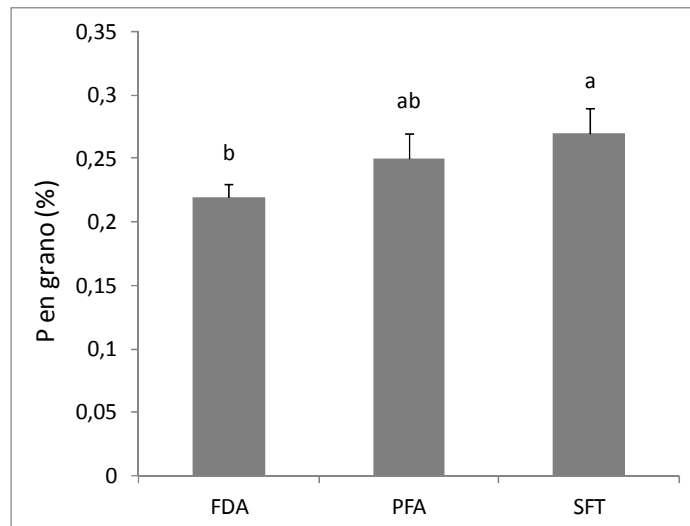


Figura 18. Concentración de P en granos para distintas fuentes de P. Suelo Vertisol, Campaña 2007. FDA: fosfato diamónico; PFA: polifosfato de amonio; SFT: súper fosfato triple. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

La extracción de P en los granos cosechados fue significativamente menor en el Vertisol que en el Molisol, en promedio en el Vertisol fue $8,5 \text{ kg P ha}^{-1}$, sin diferencias de extracción por dosis de P, pero sí por fuentes (Figura 19 y Tabla 18); este resultado se debe a rendimientos similares para cada fuente y menores concentraciones de P en la fuente FDA.

Tabla 18. Extracción de P ha^{-1} según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.

Efecto Dosis	p-value	Efecto Fuentes	p-value	Fuente * Dosis	p-value
Testigo vs Fert.	0,07	FDA vs PFA	0,10	FDA vs PFA	0,96
12 vs 24	0,08	FDA vs SFT	<0,01	FDA vs SFT	0,36
Testigo vs 12	0,22	SFT vs PFA	0,22	SFT vs PFA	0,33
Testigo vs 24	0,02	AF vs FDA*	0,25		
		AF vs SFT*	0,92		
		AF vs PFA*	0,89		

* Contrastes realizados para la dosis de 12 kg P ha^{-1} .

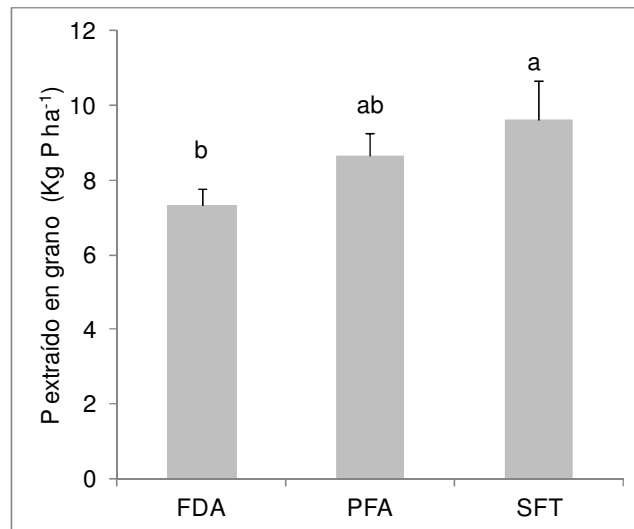


Figura 19. Extracción de P por hectárea en el suelo Vertisol según fuente. FDA: fosfato di amónico; PFA: polifosfato de amonio; SFT: súper fosfato triple. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

En el suelo Vertisol, la eficiencia de recuperación y la eficiencia agronómica fueron mayores que en el suelo Molisol: 9,1% y 22 kilos de grano por kilogramo de P agregado, respectivamente.

La eficiencia de recuperación del P agregado en grano (Tabla 19) no fue afectada por la dosis de P y fue dependiente de la fuente, el orden encontrado fue SFT (14%) > PFA (10%) > FDA (2%).

Tabla 19. Eficiencia de recuperación de la fertilización fosfatada en grano de trigo según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.

Efecto Dosis	p-value	Efecto Fuentes	p-value	Fuente * Dosis	p-value
12 vs 24	0,95	FDA vs SFT	0,02	FDA vs SFT	0,55
		FDA vs PFA	0,11	FDA vs PFA	0,90
		SFT vs PFA	0,41	SFT vs PFA	0,47
		AF vs FDA*	0,15		
		AF vs SFT*	0,91		
		AF vs PFA*	0,85		

* Contrastes realizados para la dosis de 12 kg P ha⁻¹.

En la Tabla 20 se muestra la significancia de cada contraste evaluado para comparar la eficiencia agronómica. No se encontraron efecto de las dosis ni de fuentes en esta variable.

Tabla 20. Eficiencia agronómica de la fertilización fosfatada según fuente y dosis. Significancia de cada contraste y sus interacciones. Suelo Vertisol, campaña 2007.

Efecto Dosis	p-value	Efecto Fuentes	p-value	Fuente * Dosis	p-value
12 Vs 24	0,51	FDA Vs SFT	0,32	FDA Vs SFT	0,42
		FDA Vs PFA	0,26	FDA Vs PFA	0,70
		SFT Vs PFA	0,90	SFT Vs PFA	0,68
		AF Vs FDA*	0,56		
		AF Vs SFT*	0,32		
		AF Vs PFA*	0,53		

* Contrastes realizados para la dosis de 12 kg P ha⁻¹.

Estos resultados son coincidentes con lo que se ha encontrado en los capítulos anteriores: un fertilizante de reacción alcalina (FDA) genera un aumento de pH en la zona de reacción del gránulo y los fosfatos de la solución pueden formar minerales con el calcio, como fosfato di cálcico di hidratado en etapas iniciales para luego ir formando minerales de menor solubilidad que no pueden aprovechar los vegetales (Hedley & McLaughlin; 2005). Las diferencias por fuentes, más claramente observadas en el Capítulo II (fraccionamiento de P luego de una incubación) se tradujeron en este ensayo en una mayor concentración de P en grano a partir de las fuentes SFT y PFA, sin embargo estas diferencias no se expresaron en un mayor rendimiento ni en la eficiencia agronómica en el cultivo de trigo.

Este resultado puede explicarse a partir de los modelos informados de respuesta de rendimiento de un cultivo frente al aumento de la concentración de un nutriente en tejido; en los mismos se muestran que existe un rango crítico de concentración del nutriente; siendo en esta zona mayor el rango de concentración del nutriente en el tejido que las diferencias en rendimiento o crecimiento del cultivo producidas (Westermann, 2005; Kamprath & Watson, 1981).

3.4 Residualidad de la aplicación con distintas fuentes y fraccionamiento secuencial.

Para estimar la residualidad del P agregado, las muestras de suelo de las parcelas fueron extraídas en forma inmediata a la cosecha del cultivo. El tiempo transcurrido entre la fertilización y el muestreo fue de 180 días. No se encontraron diferencias en el aumento de P extraíble por fuentes, observándose gran dispersión en los resultados. En la Figura 20 se graficaron los promedio de las diferencias entre las dos mediciones de P extraíble (P final – P inicial) en cada parcela de cada ensayo.

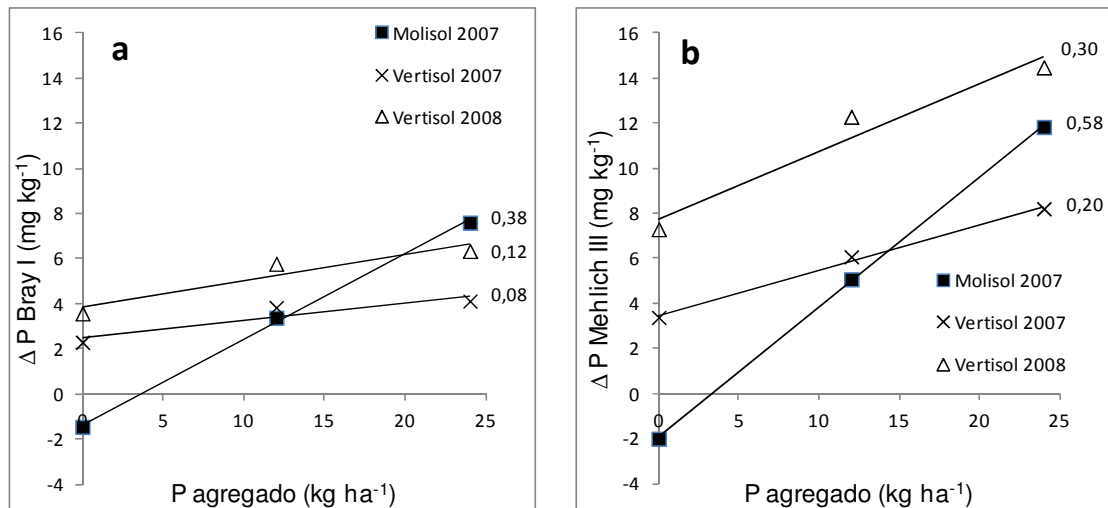


Figura 20. Pendientes de P extraíble correspondiente al promedio de las diferencias entre las dos mediciones de P extraíble para cada sitio y dosis: a) P Bray I; b) P Mehlich III.

Sneller & Laboski (2009) comparando distintas fuentes de P, orgánicas e inorgánicas, tampoco encontraron diferencias en los niveles finales de P Bray I a la cosecha del cultivo de maíz, concluyendo que los cambios en los niveles de P extraíble dependen de los kilos de P adicionados y no de la fuente utilizada.

La inversa de las pendientes de las rectas de la Figura 20, expresa los kilos de fertilizante que se requieren para lograr un incremento en el fósforo extraíble de un mg P kg⁻¹, valor que se denomina dosis equivalente (Quintero, 2002). De esta manera, la cantidad de fósforo a adicionar cuando se realiza el cálculo tomando los valores con el extractante Mehlich III es significativamente menor al obtenido con Bray I. Este resultado es esperable ya que el primero extrae más P en estos suelos con presencia de carbonato. Las pendientes en estudios de incubación relativamente cortos (alrededor de 40-60 días), señalan valores en P Bray I entre 0,21 y 0,74 (mg kg⁻¹) (Sneller & Laboski, 2009; Rubio et al., 2008; Bair & Davenport, 2012 y Quintero et al., 2003). En cambio en los trabajos donde las mediciones se realizan en períodos más largos (6 meses a un año) las pendientes son en general menores, señalando que se necesitan mayores cantidades de P para aumentar un mg kg⁻¹ de P extraíble en este plazo. Para períodos similares a esta experiencia y con extractante Bray I, Sneller & Laboski (2009) señalan un rango de pendiente entre 0,28 y 0,12 (mg kg⁻¹); Barbagelata (2011) entre 0,15 y 0,06 (mg kg⁻¹) para suelos Molisoles y Vertisoles, respectivamente y Ferraris et al. (2012) obtuvo una pendiente de 0,12 (mg kg⁻¹) para un suelo Argiudol típico. Con el extractante Mehlich III, Cox (1994) obtuvo pendientes entre 0,83 y 0,11 (mg kg⁻¹) para suelos desde arenosos a arcillosos;

Las distintas pendientes entre mediciones con distintos tiempos (en general mayores en el corto plazo frente a mediano – largo plazo) se explican por las reacciones que ocurren luego de la adición del fertilizante con constituyentes del suelo y con compuestos del fertilizante, disminuyendo en el tiempo la concentración de P de la solución, dando fosfatos menos solubles (Hedley & McLaughlin, 2005; Sims & Pierzynski, 2005). También debe considerarse que se pierde P del sistema por la extracción del cultivo (García et al., 2005). Estos fenómenos registrados durante el período de evaluación, sumado a la potencial reposición entre las distintas fracciones de P (Zamuner et al.,

2012; Ventimiglia et al., 2012; García et al., 2005) son los responsables de que los valores medidos al principio y al final en los tratamientos testigos no siempre coincidan. Los resultados muestran que en el suelo Vertisol la dosis equivalente es mayor que para el suelo Molisol, con valores que están dentro de los rangos esperables para los suelos de la región.

En general los autores antes citados señalan que, tanto para estudios a corto como a mediano plazo, la variable tipo de suelo y/o clima son los factores más importantes que determinan la dosis equivalente de P.

Fraccionamiento secuencial para el suelo Vertisol a los 6 meses de la fertilización con P.

El contenido de P en las distintas fracciones se evaluó en el experimento con respuesta al agregado de P y para la dosis de 24 kg P ha⁻¹ en cuatro bloques. Los valores promedios del P total para las parcelas fertilizadas no mostraron diferencias significativas con el testigo (Tabla 21). Estos valores son mayores a los informados por Boschetti et al. (2003) para suelos mesopotámicos, que en general no superan los 700 mg P kg⁻¹ suelo.

Tabla 21. P total del suelo (0-10 cm) para cada fuente. Suelo Vertisol, 180 días luego de la fertilización.

Fuente	P total (mg kg ⁻¹)
FDA	795 a
SFT	780 a
PFA	779 a
T	766 a

Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Test LSD Fisher.

Las parcelas fertilizadas tuvieron en promedio 19 mg más de P que el testigo. Esta cantidad es similar a la agregada con el fertilizante, que fue de alrededor de 22 mg kg⁻¹ de suelo (considerando la aplicación de 24 kg P ha⁻¹, un muestreo a 10 centímetros de profundidad y una densidad aparente de 1,1).

El P_{mia} mostró efecto significativo por el agregado de P y sin diferencia entre fuentes, para las fracciones menos disponibles no se encontró diferencias ni por dosis ni por fuentes (Figura 21). La falta de diferencias en la mayoría de las mediciones efectuadas puede deberse a la baja cantidad de P agregado con respecto al P total de estos suelos. En este trabajo el valor encontrado en las fracciones más lábiles (P_{mia} más P_t NaHCO₃) fue de 36, 59 y 113% para FDA, SPT y PFA, respectivamente (promedio 68%). Si se considera sólo la fracción P_{mia}, la recuperación del P agregado es del 36, 54 y 59% para FDA, SPT y PFA, respectivamente. Para suelos calcáreos Bertrand et al. (2003) sugieren que el P obtenido en la fracción P_{mia} es el mejor predictor de la disponibilidad de P para el cultivo. Hedley & McLaughlin (2005) citan que en suelos cultivados, desde neutros a calcáreos, entre el 64% y 75% del P adicionado con fertilizantes solubles tuvo como destino las fracciones fácilmente extraíbles (P_{mia} y PNaHCO₃) al año de aplicación, contrastando fuertemente con lo que sucede en suelos ácidos donde alrededor de sólo el 9% del P aplicado tuvo este destino. También en suelos ácidos de Corrientes y Misiones (Argentina), Fernández López et al. (2006) y Vázquez et al.

(2011) encontraron que la mayor cantidad de P tuvo como destino las fracciones moderadamente lábiles. Quintero et al. (1999) encontraron en suelos de la Mesopotamia que entre el 50% y el 70% del P adicionado se recuperó en las fracciones fácilmente extraíbles luego de dos meses de incubación, concluyendo también que dichos suelos tuvieron valores de retención de P de medios a muy bajos.

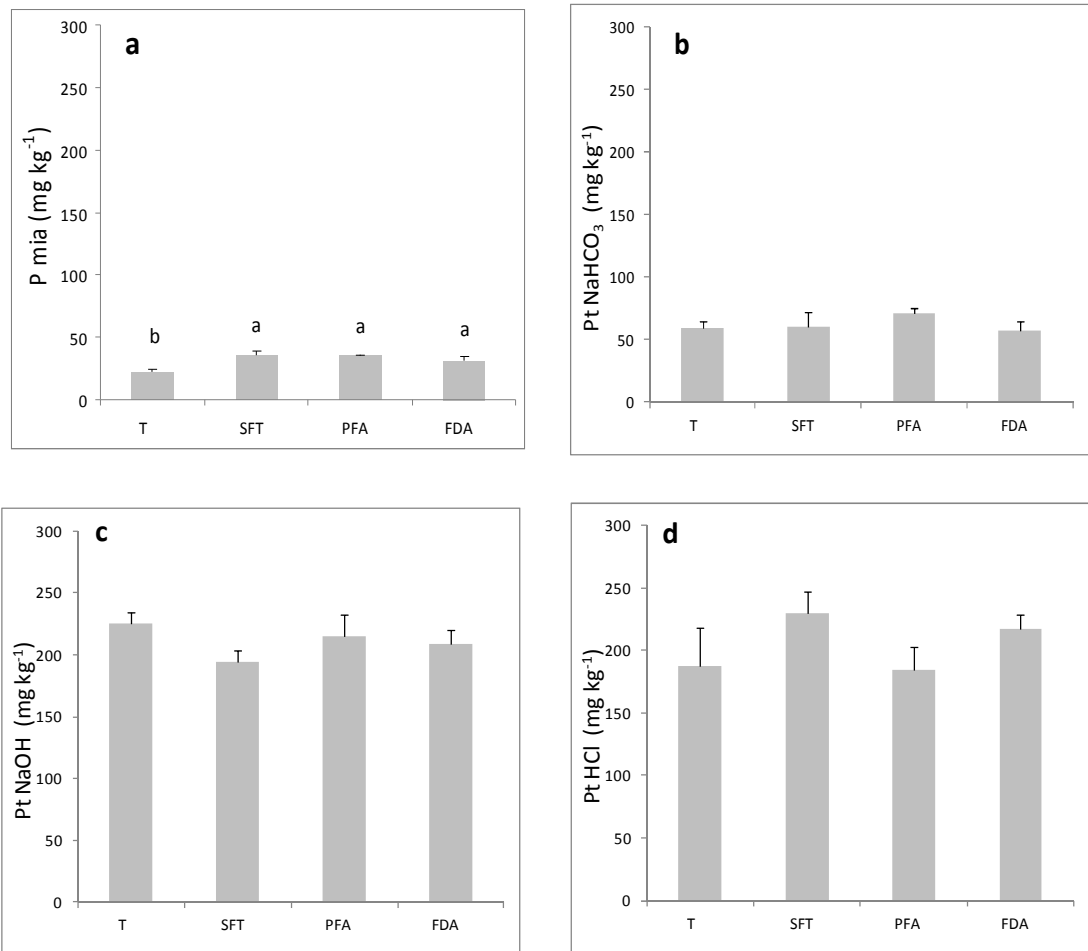


Figura 21. Fracciones de P para cada fuente a seis meses de la fertilización con P: a) P mia, “P disponible”; b) Pt NaHCO₃, “P lábil”; c) Pt NaOH, “P moderadamente lábil”; d) Pt HCl, “P unido al calcio”. Campaña 2007, suelo Vertisol. T: Testigo; SFT: súper fosfato triple; PFA: polifosfato de amonio y FDA: fosfato di amónico. Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Test LSD Fisher.

En la Figura 22 se muestra las relaciones de la fracción P_{mia} con los extractante Bray I y Mehlich III que son los predictores sugeridos en la región para estimar la disponibilidad de P para los cultivos. Sólo se encontró una relación significativa entre P_{mia} y el extractante Mehlich III, confirmando que la membrana también extrae P adsorbido débilmente a carbonatos (Boschetti et al., 2003) que posiblemente no extrae Bray I. La pendiente encontrada es similar a la informada en la misma relación en el Capítulo II (Figura 8).

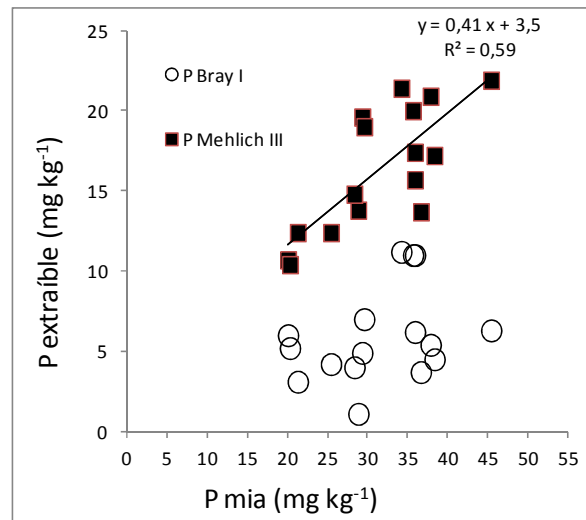


Figura 22. Relación P mia y P extraíble por Bray I y Mehlich III. Campaña 2007, suelo Vertisol.

Al igual que en otros suelos con presencia de calcáreo se encontró una relación significativa entre P total y el contenido de carbonato (Bertrand et al., 2003), que se informa en la Figura 23, en la misma se grafica también la relación del contenido de carbonato con la fracción Pt HCl, sugiriendo que la mayor cantidad de P de estos suelos se encuentra unido al calcio. Boschetti et al. (2003) también encontraron que en suelos con alto contenido de calcio (más de 70% en el complejo de intercambio) la fracción ligada a formas estables (P HCl) era mayor.

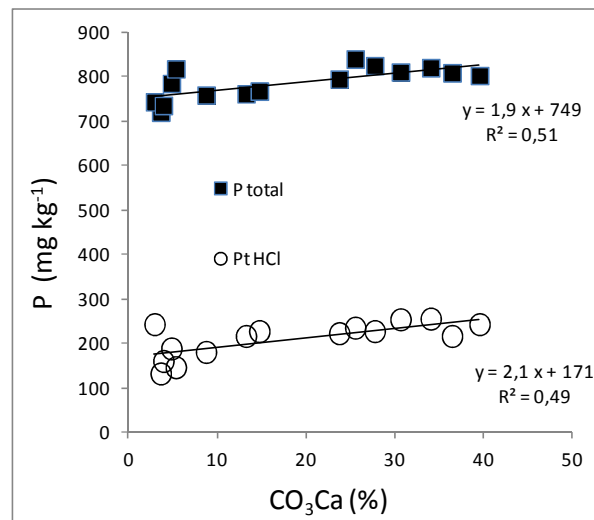


Figura 23: Relación entre el contenido de P en las fracciones estables, unidas al calcio (Pt HCl) y P total con el contenido de carbonato de los suelos.

4. Conclusión.

En condiciones de campo no se encontraron ventajas en el uso de distintas fuentes de P para la producción de trigo en suelos con presencia de carbonato de calcio libre de Entre Ríos.

La respuesta en grano a la fertilización con P estuvo relacionada a los valores iniciales de P extraíble, verificándose aumento de la producción de trigo al agregar P en el suelo Vertisol que contenía muy bajo P extraíble. Esta diferencia no se manifestó en el año seco, donde la limitante mayor fue el agua.

El rendimiento de trigo se relacionó negativamente con el porcentaje de carbonato del suelo, este comportamiento no se verificó cuando se fertilizó con P y el cultivo tuvo buenas condiciones climáticas. Esta información sugiere que la fertilización fosfatada suple la inmovilización del P que produce el carbonato en estos suelos cuando las condiciones de desarrollo del cultivo son adecuadas; a su vez, la respuesta del cultivo al agregado de P estuvo asociada al nivel de carbonato en el suelo, siendo mayor cuando los niveles de carbonato son mayores.

Si bien la fertilización fosfatada aumentó el rendimiento en el suelo Vertisol y sin diferencias entre fuentes, el FDA presentó las menores eficiencias de recuperación aparente, debido a menores concentraciones de P en grano cuando se utilizó esta fuente. A la cosecha, las parcelas fertilizadas también arrojaron valores mayores de P_{mia} que el testigo, sin diferencias entre fuentes, pero con valores promedios que tuvieron el siguiente orden: PFA>SFT>FDA.

En el análisis de residualidad de la fertilización fosfatada se verificó un aumento del P extractable con la dosis y se encontraron pendientes similares a las citadas para suelos con menores contenidos de carbonatos de la región, no encontrando diferencias entre fuentes.

Bibliografía

- Álvarez, R. 2005. Fertilización de trigo. Pág. 55-80. En Alvarez R. (Coordinador). Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Bair, K. and Davenport, J. 2012. Influence of recent acidification on available phosphorus indices and sorption in Washington State Soils. SSSAJ: Volume 76: Number 2. Pp. 515-521.
- Barbagelata, P. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. En Simposio Fertilidad 2011. IPNI – Fertilizar. Pg. 90-97.
- Bertrand, I.; Holloway, R.; Armstrong, R. and McLaughlin, M. 2003. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. Australian Journal of Soil Research, 2003, 41, 61-76.
- Bertrand, I.; McLaughlin, M.; Holloway, R.; Armstrong, R. and McBeath, T. 2006. Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. Nutrient cycling in agro ecosystems 74: 27-40.
- Bloom, P; Skillbert, U. and Sumner, M. 2005. Soil Acidity. Pag. 411 to 459. In M. Tabatabay and Sparks, D. (Eds.). Chemical Processes in Soils. SSSA Booc. Series 8.
- Bolsa de Cereales de Entre Ríos. 2012. <http://www.bolsacer.org.ar/Fuentes/estadisticas.php>
- Boschetti, N.; Quintero, C.; Benavidez, R. y Giuffrè, L. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. Ciencias del Suelo 21 (1), 1-8.
- Correndo, A. y García, F. 2011. Relevamiento de fertilidad de suelos. Base de datos ASP Argentina 1995-2003. En Simposio Fertilidad 2011. IPNI – Fertilizar. Pg. 268-275.
- Cox, F. 1994. Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. Soil Sci. Soc. Am J. 58: 1249-1253.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Duru, M. and Thelier-Huche, L. 1995. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In G. Lemaire and I. Burns (Eds.). Diagnostic procedures for crop N management. INRA Editions. Poitiers (France).
- Engelstad, O. and Terman, G. 1980. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizer. Pp 311-332. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.) The Role of Phosphorus in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA.

- Fernández López, C.; Mendoza, R. y Vázquez, S. 2006. Fracciones de Fósforo e suelos de Corrientes con producción cítrica, arrocería y pastoril. *Ciencia del Suelo* (Argentina) Vol. 24 (2). Pág. 161-168.
- Ferraris, G.; Toribio, M.; Falconi, R. y Couretot, L. 2012. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos y balance de nutrientes. IPNI. *Informaciones Agronómicas* No 6. Pp. 2-6.
- García, F.; Piconi, L. y Berardo, A. 2005. Fósforo. En: H. Echeverría y F. García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires. Argentina. Pp. 99-121.
- García, F. y Correndo, A. 2012. Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes de cereales, oleaginosas, industriales y forrajeras. <http://lacs.ipni.net/>.
- Gutiérrez Boem, F. and Thomas, G. 1998. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit. Published in *Agronomy J.* 90: 166-171.
- Havlin, J.; Beaton, J.; Tisdale, S. and Nelson, W. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers; An Introduction to Nutrient Management*. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 499 p.
- Hedley, M. J.; Stewart, J. and Chauhan, B. 1982. Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 46 (5): 970-976.
- Hedley, M. and McLaughlin, M. 2005. Reactions of Phosphate Fertilizers and By-Products in Soil. P. 181-252. In J.T.Sims and Scharpley, A. (Ed) *Phosphorus: Agriculture and Environment*. *Agronomy Monograph* N° 46.
- Holloway, R.E.; Bertrand, I.; Frischke, A.; Brace, D.; McLaughlin, M. and Shepperd, W. 2001. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil* 236: 209–219.
- Kamprath, E. and Watson, M. 1980. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soil. Pp. 433- 469. In Khasawneh, F.; Sample, E. and Kamprath, E. (Eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA.
- Kovar, J. and Claassen, N. 2005. Soil root interactions and phosphorus nutrition of plant. In J.T.Sims and Scharpley, A. (Eds.) *Phosphorus: Agriculture and Environment*. *Agronomy Monograph* N° 46, pp. 379 - 414.
- Lauer, D. 1988. Vertical distribution in soil of sprinkler applied phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 862-868 (1988).
- Mistrorigo, D.; Valentinuz, O.; Moresco, R. y Kahn, N. 1993. Diagnóstico de fertilización nitrogenada y fosfatada en girasol. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina De La Ciencia Del Suelo. Mendoza. Pag. 117-118.

- Munson, R. and Nelson, W. 1990. Principles and practices in plant analysis. Pp. 359-387. In Westerman, R. (Ed.) Soil testing and plant analysis. Third edition. SSSA Book series.
- Plan Mapa De Suelos, Convenio INTA – Gobierno De E. R. 1991. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Diamante, Provincia De Entre Ríos. Acuerdo Complementario Del Convenio INTA – Gobierno De E. R. EEA INTA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 9. 258 Pág.
- Quintero, C; Boschetti, G. y Benavidez, R. 1995. Fertilización fosfatada en pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos (Argentina). *Ciencia Del Suelo*, 13: 60-65.
- Quintero C.; Boschetti, G. and Benavides, R. 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinean Mesopotamia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (9 And 10), 1449-1491.
- Quintero, C. 2002. Dosificación del Fósforo según Tipos de Suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N°16. Pp. 8-10.
- Quintero, C.; Boschetti, G. and Benavidez, R. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol. 34, Nos. 9 & 10, pp. 1435–1450.
- Rubio, G. y Álvarez, C. 2010. Fósforo: dinámica y evaluación en agro ecosistemas. Pp. 311-336. En Álvarez R., G. Rubio, C. Álvarez y R. Lavado (Eds.). *Fertilidad de Suelos. Caracterización y Manejo en la Región Pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA.
- Sims J. and G. Pierzynski. 2005. Chemistry of Phosphorus in Soils. Pp. 151 to 192. In M. Tabatabay and D. Sparks (Eds.) *Chemical Processes in Soils*. SSSA Book. Series 8.
- Sneller, E. and Laboski, C. 2009. Phosphorus Source Effects on Corn utilization and Changes in Soil Test. *Agronomy Journal*. Volume 101. Issue 3. Pp. 663-670.
- Steinbach, H. S. 2005. Funciones de Producción. Pág.13-25. En Alvarez R. (Coordinador). *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Syers, J.; Johnston, A. and Curtis, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. *FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin* No 18.
- Van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirement determination. Pp. 73-125. In Westerman R. L. (Ed.). *Soil testing and plant analysis*. SSSA Book Series 3.
- Vázquez, M. 2005. Calcio y Magnesio, Acidez y Alcalinidad de suelo. Pp. 161-185. En H. Echeverría y F. García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires. Argentina.
- Vázquez, S.; Morales, L.; Fernández López, C. y Dalurzo, H. 2011. Fertilización fosfatada y fracciones de fósforo en Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles. *AACS*. Volumen 29. No 2. Pp. 161-171.

Ventimiglia, L.; Torrens Baudrix, L. y Saks, M. 2012. Fósforo en la monocultura sojera: efecto de la dosis, forma y momento de aplicación sobre el balance nutricional. IPNI. *Informaciones Agronómicas* No 6. Pp. 23-26.

Vera Candiotti, N.; H. Vivas; G. Rubio; B. Tolosano y A. Cuatrin. 2010. Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de fósforo en condiciones de estrés hídrico. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario. Código 3_254_1.

Westermann, D. 2005. Plant analyses and interpretation. Pp. 415-436. In J.T.Sims and Scharpley, A. (Ed) *Phosphorus: Agriculture and Environment*. Agronomy Monograph N° 46.

Zamuner, E.; Picone, L. and Diez, A. 2012. Effect of long term Phosphorus fertilization on soil phosphorus fractions. *SJSS. Spanish Journal of soil science*. Vol. 2, Issue 2, Pp. 50-60.

Capítulo V

Conclusiones generales

Esta tesis estudió los cambios en la disponibilidad de fósforo y la eficiencia agronómica cuando se adiciona P con distintas dosis y fuentes en suelos con presencia de calcáreo de Entre Ríos. Este estudio se abordó desde tres niveles, según el grado de control de otras variables distintas al agregado de P.

En un primer nivel, en condiciones de laboratorio, se estudiaron los cambios en la disponibilidad de P inducido por la aplicación de este nutriente con distintas fuentes y dosis. Se analizaron y discutieron los resultados obtenidos en base al conocimiento sobre las diferentes reacciones que se producen en la interface suelo-fertilizante. Las herramientas de análisis utilizadas fueron los test de suelos: Bray I; Mehlich III y la técnica de fraccionamiento secuencial.

En el suelo Molisol con menor cantidad de carbonato se determinó que todas las fuentes se comportaron de manera similar y las pendientes obtenidas entre P agregado y P extraíble se situó dentro del rango informado para suelos Molisoles de la región. En cambio, en el suelo Vertisol, con mayor contenido de carbonato, se verificó que el cambio en la disponibilidad de P fue diferente según la fuente utilizada, cuando se utilizó un extractante con un ácido diluido como Bray I, siendo mayor cuando el P se agregó como PFA y SFT que cuando se agregó como FDA y AF.

Para ambos suelos, el fraccionamiento secuencial mostró una mayor cantidad de P biológicamente más disponible (P_{mia}) cuando la fuente utilizada fue PFA, luego SFT y la menor cantidad de P_{mia} correspondió a la fuente FDA. A su vez la fracción unida al calcio, luego del agregado de P, fue mayor en el FDA y menor para SFT y PFA. Estos resultados sugieren que la fuente de reacción alcalina (FDA) aumenta menos la disponibilidad de P en un suelo con presencia de calcáreo debido a que forma compuestos estables con el calcio. Contrariamente a lo observado en suelos con calcáreo de Australia, las diferencias entre fuentes no estuvieron relacionadas a la forma física en que se adiciona el P, ya que en el suelo con mayor cantidad de carbonato las dos fuentes que mejor se comportaron fueron una líquida (PFA) y otra granular (SFT). El P agregado con la fuente AF evidenció una menor disponibilidad en el suelo Vertisol, medida como P Bray I, y en ambos suelos tuvo un valor de P recuperado menor al P de las fuentes SFT y PFA. Teniendo en cuenta en primer lugar que con la fuente AF se adicionaron menores cantidades de P, el resultado encontrado para esta fuente es coincidente con lo informado en otros trabajos, donde se evidencia una fuerte acidificación de esta fuente (mayor a la del SFT) y una consecuente mayor disolución de materia orgánica y formación de complejos coloidales húmicos fosfato - metal.

En el segundo nivel de estudio (con trigo creciendo en macetas en invernadero), se evaluó el crecimiento de trigo y la absorción de P. No se observaron diferencias en crecimiento entre las distintas fuentes de P utilizadas (PFA y FDA), pero sí hubo diferencias en la absorción y concentración de P en la biomasa aérea. La producción de materia seca de trigo se incrementó hasta la dosis de 87 mg P kg^{-1} de suelo, resultado similar al encontrado en ensayos en invernaderos efectuados con suelos de la región.

La absorción total de P, la eficiencia de recuperación del P agregado y la concentración de P en la biomasa aérea fue menor para el FDA en ambos suelos. El resultado

encontrado en el ensayo en invernadero fue consistente con el de incubación y fraccionamiento, ya que la fuente de reacción alcalina (FDA) proveyó menos P disponible (P_{mia}) y mayor P unido al calcio (P_{iHCl}) frente a la fuente PFA. Si bien la fuente FDA no condicionó la producción de materia seca, pudo haber provisto fosfatos a la solución del suelo a una menor tasa que la fuente con reacción débilmente ácida (PFA), lo que redundó en una menor concentración de P en tejido vegetal de trigo, en suelos con presencia de carbonato. Este resultado puede explicarse a partir de los modelos informados de respuesta de rendimiento de un cultivo frente al aumento de la concentración de un nutriente en tejido; en los mismos se muestra que existe un rango crítico de concentración del nutriente; siendo en esta zona, más amplio el rango de concentración del nutriente en el tejido que las diferencias en rendimiento o crecimiento del cultivo producidas.

En condiciones de campo (tercer nivel de estudio), al igual que lo encontrado en invernadero, no se verificaron diferencias en el rendimiento por el uso de distintas fuentes, siendo la respuesta al agregado de P determinada por el nivel de P disponible en el suelo, las condiciones hídricas de la campaña y el nivel de carbonato del suelo.

Debido a que la remoción de P desde la solución del suelo luego de la adición de fertilizantes fosfatados es más probablemente un continuo de procesos, desde la adsorción a la precipitación, que resultan en un continuo de estados químicos, se puede inferir que la fuente FDA si bien abastece al cultivo de trigo de suficiente P para lograr rendimientos similares al logrado con otras fuentes, las menores tasas de reposición desde los distintos equilibrios hacia la solución del suelo, condiciona la absorción final de P por el cultivo.

El rendimiento de trigo tuvo una relación negativa con el porcentaje de carbonato del suelo, este comportamiento no se verificó cuando se fertilizó con P y el cultivo tuvo buenas condiciones climáticas, encontrando que la fertilización fosfatada suple la inmovilización del P que produce el carbonato cuando las condiciones de desarrollo del cultivo son adecuadas, independientemente de la fuente utilizada. A su vez la respuesta al agregado de P fue mayor a medida que el suelo contenía mayor cantidad de carbonato.

En el análisis de recuperación del P agregado, se observó que la fuente de P condiciona la cantidad de P en grano, el FDA mostró la eficiencia más baja, lo que podría asociarse a la menor disponibilidad de P_{mia} y mayor P_{tHCl} que mostró esta fuente en el fraccionamiento en condición de laboratorio. De esta manera la ventaja en el uso de una fuente en particular estaría relacionada al tipo de reacción y no a la forma física en que se agrega el fertilizante, no coincidiendo con lo encontrado en otros suelos con mayor cantidad de carbonato, donde se señala como favorable la utilización de fertilizantes líquidos.

Como conclusión de este trabajo, en sus distintos niveles de estudio, los resultados observados fueron consistentes en cuanto a las diferencias encontradas entre fuentes. En suelos con presencia de carbonato el FDA provoca un menor aumento de la disponibilidad de P que otras fuentes, tanto cuando la disponibilidad fue evaluada mediante extractantes suaves (P Bray I) o fraccionamiento secuencial, o cuando fue evaluada a través de la absorción de P en el cultivo de trigo. Sin embargo, dichas diferencias en disponibilidad no se expresaron en incrementos en el crecimiento y rendimiento, tanto en la escala de macetas como a campo.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis que, en los suelos evaluados, la reacción de la fuente de P afecta el cambio en la disponibilidad de P por unidad de P agregado y la absorción de P por el cultivo, sin afectar la eficiencia agronómica. Se rechaza la hipótesis que es la forma física de la fuente de P (líquida o sólida) la que afecta la eficiencia agronómica de P en suelos con presencia de calcáreo.

Cabe destacar la originalidad de este trabajo ya que no se cuenta con antecedentes donde se comparen distintas fuentes de P en suelos con calcáreo en una zona húmeda, los antecedentes internacionales, mayormente llevados a cabo en Australia, están realizados en suelos con más contenido de calcáreos y donde las lluvias son menores.

Necesidades futuras de investigación:

Profundizar los estudios en suelos con presencia de carbonatos, comparando los métodos de extracción Bray I y Mehlich III, para verificar umbrales de fertilización de los cultivos. Los antecedentes informados en la región pampeana han indicado una estrecha relación entre ambos métodos sin embargo los resultados de este trabajo muestran relaciones que dependieron del tipo de suelo.

Estudiar la relación existente entre la determinación de la dosis equivalentes de P mediante índices de laboratorio y estimaciones derivadas de mediciones a campo. Los resultados observados en incubaciones en el corto – mediano plazo no son comparables con lo observado en las mediciones a campo.

Intensificar los estudios comparando fuentes de P con reacciones químicas contrastantes en mayor diversidad de ambientes con y sin presencia de carbonatos, determinando respuesta de los cultivos y eficiencia de uso del P agregado. Evaluar nuevas fuentes de fertilizantes fosfatados líquidos, presentes en el mercado, con distintas formulaciones (distintas moléculas de P, con iones acompañantes, etc.).

Por otro lado, la problemática de la variabilidad interanual de los valores de pH y carbonatos en estos sectores de los lotes, probablemente asociados a las condiciones hídricas, sería un aspecto relevante a estudiar de manera regional; así como también la distribución espacial de los carbonatos en los lotes (“manchoneo” de los cultivos en suelos “overos”). Algunos antecedentes de la bibliografía para otras regiones muestran una gran variabilidad interanual de los valores de pH y carbonatos en los suelos que pueden afectar la dinámica del P y por lo tanto su aprovechamiento por los cultivos.