

FERTILIZACIÓN FOSFORADA EN SUELOS CULTIVADOS CON TRIGO DE LA REGIÓN SUDOESTE PAMPEANA

LILIANA G SUÑER; JUAN A GALANTINI

Recibido: 02-07-11

Recibido con revisiones: 11-11-11

Aceptado: 20-11-11

PHOSPHORUS FERTILIZATION IN WHEAT CROPS IN SOUTH WEST OF PAMPAS REGION

ABSTRACT

Phosphorus (P) fertilization modifies the balances between the different forms of soil P, altering P availability and plant uptake. The objectives of this study were to determine the influence of some soil properties on the P rate required to increase a unit of extractable phosphorus (D_e) and the effect of P application on wheat (*Triticum aestivum* L.) dry matter production, crop response and the balance with other nutrients. A wheat fertilization pot experiment was carried out with P rates of 0, 25, 50 and 100 kg ha⁻¹ using nineteen different soils (sampled at a 0-0.20 m-depth). Extractable P (Pe) was determined at the beginning of the experiment and at the time of plant sampling (heading complete). Total N, P, K, S were determined in plant and the P balance with other nutrients was calculated. DRIS methods were also determined. Average D_e was 2,7 kg P ha⁻¹ per mg Pe kg⁻¹ soil (with values between 1,2 and 4,8). Initial Pe and organic matter associated with the mineral fraction (MOM) were the properties that best explained D_e variability. Dry matter and P concentration in plant increased with P rate. These changes were associated with initial Pe, which was, in turn, reflected in the nutrient balance. Concentration of other nutrients in plant (N, K and S) was not modified by P fertilization, but total quantity increased significantly. In conclusion, the factors that affect P dynamics and the fate of applied P were the P physical - chemical balances and the soil characteristics, especially Pe and MOM. Concerning the crop, P fertilization modified P uptake and the balance with other nutrients.

Keywords. Phosphorus, DRIS, dry matter.

RESUMEN

La fertilización con fósforo (P) modifica los equilibrios entre las distintas formas en que se encuentra en el suelo y altera la disponibilidad y la nutrición del cultivo. Los objetivos fueron determinar la influencia de algunas propiedades del suelo sobre la dosis necesaria para aumentar una unidad el P disponible (D_e) y de la aplicación de P sobre la producción de materia seca, la respuesta y el balance con otros nutrientes en trigo (*Triticum aestivum* L.). Se realizó un ensayo de fertilización de trigo con P (0, 25, 50 y 100 kg ha⁻¹) en macetas con 19 suelos (0-0,20 m) diferentes. Se analizó el P extraíble (Pe) al iniciar el ensayo y al momento en que las plantas se encontraron en espigazón. Se determinó N, P, K, S en planta y se calculó el balance con los otros nutrientes. Se determinaron además los índices DRIS. La D_e media fue 2,7 kg P ha⁻¹ (con valores entre 1,2 y 4,8 kg ha⁻¹). El Pe inicial y el contenido de materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOM) fueron las propiedades que mejor explicaron la variabilidad encontrada. El aumento de la dosis de P aplicado aumentó la materia seca producida y la concentración de P en planta. Estos cambios estuvieron asociados al nivel de Pe inicial, aspecto que se reflejó en el balance de nutrientes en planta. La concentración de N, K y S no se modificó, pero aumentó significativamente la cantidad. En base a estos resultados se concluye que, desde el punto de vista de los equilibrios físico-químicos del P, las características del suelo, en especial Pe y MOM, determinan la dinámica y el destino final del fósforo aplicado. Desde el punto de vista del cultivo, la fertilización fosforada modifica la respuesta, la absorción de P y el balance con los otros nutrientes.

Palabras clave. Fósforo, dosis equivalente, DRIS, materia seca.

INTRODUCCIÓN

La producción de trigo en la Argentina se ha caracterizado por una baja restitución de los nutrientes exportados con las cosechas. Esta continua extracción sumado a potenciales de rendimientos cada vez mayores ha mostrado una disminución importante en la disponibilidad de P en áreas de la Región Pampeana originalmente bien provistas (García, 2003). El manejo adecuado del P aumenta la productividad de los cultivos y la eficiencia en el uso del resto de los insumos (García *et al.*, 2006). Por este motivo, debe existir un balance entre los requerimientos del cultivo, la disponibilidad del suelo y los fertilizantes aplicados. Las aplicaciones excesivas de fertilizantes no son aconsejables, ya que éstas darían lugar a una mayor e innecesaria concentración de P en grano o en forraje (Colomb *et al.*, 2007). Las principales desventajas del uso de fertilizantes fosfatados están relacionadas con los costos de producción, la contaminación de ambientes acuáticos y el agotamiento de las reservas de roca fosfórica (Sharpley *et al.*, 1993; Withers & Sharpley, 1995.; Stewart *et al.*, 2005). Una fertilización en exceso aumenta el riesgo de contaminación del ambiente a través de los procesos de erosión o redistribución de P dentro del relieve que pueden ser relevantes por su mayor acumulación en los primeros centímetros del suelo (Heredia & Fernández Cirelli, 2007). Galantini *et al.* (2005) observaron que cantidades excesivas de fosfatos, debido a las aplicaciones de fertilizante y/o descomposición de la materia orgánica, producen una disminución del contenido inicial de algunas formas de P lábil, poniendo en evidencia la complejidad de estos equilibrios. Bajo las condiciones existentes en el suelo, los iones fosfato que se liberan a través de la disolución de fertilizantes fosfatados no son estables, no permanecen en su forma original, sino que son objeto de un sinnúmero de transformaciones de adsorción y precipitación (Delgado & Torrent, 2000; Pizzeghello *et al.*, 2011).

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en el suelo, así como de otras propiedades edáficas, del cultivo y del manejo del fertilizante. Entre las propiedades del suelo, se destacan la textura, el contenido de materia orgánica y el pH. Entre los parámetros asociados al cultivo deben mencionarse el requerimiento de cada cultivo y el rendimiento potencial. En relación con el manejo del fertilizante, hay que tener en cuenta la solubilidad de la fuente de P aplicada y la localización del fertilizante (Zingore *et al.*, 2007). En el sudoeste bonaerense se determinaron diferentes valores críticos de P según la textura del suelo: 12 mg de P kg⁻¹ para

suelos de textura fina, 16 mg kg⁻¹ para los francos y 20 mg de P kg⁻¹ para los arenosos (Loewy & Ron, 2001). Teniendo en cuenta la residualidad de las aplicaciones de P es posible manejar la fertilización de la rotación, y no solamente la fertilización del cultivo, buscando alcanzar y/o mantener un determinado nivel de P disponible en el suelo para satisfacer los cultivos siguientes (Berardo, 2003; Mallarino, 2005; García *et al.*, 2006). El control periódico del contenido de P disponible en el suelo, por medio del análisis del mismo, permite ajustar la dosis a aplicar para mantenerlo en niveles que no limiten la producción de los cultivos. Para ello es importante conocer en que medida el P aplicado aumentará el nivel de P disponible. En la Argentina, existe información específica acerca de la cantidad de P que hay que agregar para lograr un determinado aumento del P disponible en la región húmeda, donde los rendimientos son mayores (Berardo & Grattone, 2000; Gutiérrez Bohem *et al.*, 2002; Quintero *et al.*, 2003), Rubio *et al.* (2008) incluyeron además suelos de la zona semiárida. La dosis necesaria para aumentar un mg kg⁻¹ el P disponible se denomina dosis equivalente (D_e) y está estrechamente relacionada con aquellas características del suelo que hacen a su poder de adsorción de P, tales como el contenido de arcillas u óxidos libres (Quintero *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2010).

Una evaluación real de la disponibilidad se logra a través del análisis foliar que determina cuanto efectivamente ha tomado el cultivo, pudiendo relacionar el contenido de un elemento en la planta, con su apariencia física, la velocidad de crecimiento, el rendimiento y la calidad del producto cosechado. La concentración óptima de P varía en función del estado fenológico del cultivo, dificultando la comparación con valores de referencia (Galantini *et al.*, 2000a). El Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (Diagnosis and Recommendation Integrated System, DRIS) confronta las relaciones entre la concentración de nutrientes en el cultivo con aquellas obtenidas en poblaciones de rendimiento máximo u óptimo, a las que denomina normas DRIS para esos nutrientes y cultivos. A partir de ellas, el método provee un medio para ordenar las relaciones de nutrientes en expresiones llamadas Índices DRIS. Estos índices permiten clasificar los factores de rendimiento considerados según su importancia relativa (Sumner, 2000). Esta técnica ha sido utilizada para detectar desbalances entre los macronutrientes (especialmente nitrógeno (N) y azufre (S)), y micro nutrientes (Gupta, 1976; Haneklaus *et al.*, 1992). Las principales ventajas del sistema DRIS sobre otros métodos es su habilidad para

realizar diagnósticos foliares independientemente de la edad, variedad y parte de la planta utilizada (Sumner, 2000). Esto se debe a la utilización de una amplia base de datos en la obtención de las normas DRIS. Se puede mejorar la precisión del diagnóstico DRIS utilizando normas provenientes de estudios locales que tomen en cuenta la variabilidad de los nutrientes y cultivos estudiados (características climáticas, nivel de producción, etc.). Se puede hacer un mejor diagnóstico de la nutrición de un cultivo, cuando se consideran las relaciones entre ciertos pares de elementos y no la concentración en forma aislada. Beaufigli (1973) sugirió que como las concentraciones nutricionales decrecen con el tiempo, sus relaciones se deberían mantener relativamente constantes. Se ha utilizado esta metodología para evaluar el balance de N, P, K (Landriscini *et al.*, 1990; Landriscini, 1992; Rosell *et al.*, 1992) y S (Rosell *et al.*, 1987; Landriscini *et al.*, 2001) en trigo en diferentes momentos del ciclo del cultivo y en diferentes rotaciones (Landriscini *et al.*, 1990). Las normas regionales generadas en la Región Semiárida Pampeana (Landriscini *et al.*, 1997) han sido aplicadas en diferentes sistemas de producción (Galantini *et al.*, 2000 b). Los estudios realizados en trigo han demostrado la sensibilidad de esta metodología para detectar cambios en el balance de nutrientes del cultivo (Landriscini *et al.*, 1997; Galantini *et al.*, 2000 b; Landriscini *et al.*, 2001).

En el país se han realizado numerosos estudios en los que se ha evaluado el efecto de la fertilización con P sobre el rendimiento del cultivo. Sin embargo, en pocos casos se ha realizado un análisis completo del P en el sistema, en el que se consideren los equilibrios de este nutriente cuando es aplicado al suelo, el aporte de los excesos al pool lábil y el balance de P en el cultivo. Por este motivo se planteó la siguiente hipótesis: la fertilización con P, dependiendo del ambiente edáfico, altera la disponibilidad de P y la nutrición del cultivo. La predicción es que en los suelos con diferente disponibilidad inicial de P y con aplicación de dosis creciente de fertilizante modificarán el desarrollo del trigo y el balance de P en planta.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) evaluar el efecto del fertilizante sobre la disponibilidad de P, a través del cálculo de la dosis equivalente y su relación con otras propiedades del suelo, y b) determinar el efecto de la aplicación de P en suelos con diferente disponibilidad inicial de P sobre la producción de materia seca, la respuesta y el balance con otros nutrientes en el cultivo de trigo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 19 suelos pertenecientes a campos de productores de la región semiárida y subhúmeda pampeana y al Criadero de Semillas de la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) de Cabildo (Buenos Aires). Se tomaron muestras compuestas a la profundidad de 0-20 cm, se secaron y se tamizaron por 2 mm para los análisis posteriores. Los suelos fueron seleccionados teniendo en cuenta la variabilidad de las principales propiedades edáficas (Tabla 1), a saber: pH, relación suelo:agua 1:2,5; fósforo extraíble (Bray & Kurtz, 1945); carbono orgánico total y carbono orgánico asociado a la fracción mineral, por combustión seca en un analizador automático LECO. El carbono orgánico asociado a la fracción mineral corresponde al carbono orgánico presente sólo en la fracción fina del suelo y por último se determinó la fracción fina mediante tamizado en húmedo (Galantini, 2005).

Los valores obtenidos en cuanto a pH, Pe, carbono orgánico total y contenido de fracción fina ponen de manifiesto la amplia variabilidad característica de los suelos de la región en estudio.

Ensayo en macetas

Con dichos suelos se realizó un ensayo en macetas con plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.), a las que se les aplicó P como superfosfato triple, en dosis correspondientes a: 13,8, 27,7 y 55,5 mg P kg⁻¹ suelo (25, 50 y 100 kg P ha⁻¹), con cuatro repeticiones de cada tratamiento. Se realizó además un tratamiento testigo sin aplicación de P, siendo utilizadas un total de 304 macetas. Se sembraron 15 semillas por maceta, y al alcanzar el estadio de dos hojas se hizo un raleo dejando sólo ocho plantas por maceta. Las macetas, con 1,45 kg de suelo, se regaron periódicamente para mantener la humedad en condiciones próximas a capacidad de campo. Para que el N no fuera limitante en la nutrición del cultivo, una semana posterior a la siembra se fertilizó con 26,6 mg N kg⁻¹ suelo (48 kg N ha⁻¹) aplicado como urea. Se repitió esta fertilización en macollaje. No se fertilizó con K ni con S, los suelos de la región en general están bien provistos de K y los valores de S adsorbido+orgánico oscilaron entre 10 y 27 mg S kg⁻¹.

Se analizó el P extraíble (Pe) en los suelos al iniciar y al finalizar el ensayo. Con estos datos se realizaron curvas de regresión para cada suelo en función de la dosis aplicada, obteniéndose la correspondiente ecuación lineal. De esta manera, la inversa de la pendiente de estas curvas indicaría la dosis necesaria para aumentar el Pe del suelo en una unidad, es decir la De. La ordenada al origen indica la concentración de P disponible que tiene el testigo al finalizar el ciclo del cultivo. La función utilizada fue:

$$Pe = ax + b$$

donde x es la dosis de P aplicada.

Tabla 1. Características edáficas de los suelos utilizados.
Table 1. Properties of the soils used in the study.

Suelo	pH	Fósforo extraíble mg kg ⁻¹	Carbono orgánico total	Carbono orgánico asociado a la fracción mineral	Fracción Fina
			g kg ⁻¹		%
1	6,5	12,2	18,6	15,7	32
2	6,3	16,3	16,2	12,2	22
3	6,6	17,6	18,6	13,9	22
4	6,4	22,3	24,9	21,5	42
5	6,7	4,8	13,3	10,4	11
6	7,0	6,8	12,2	12,2	21
7	6,8	50,2	20,9	16,8	34
8	6,4	32,6	20,3	17,4	27
9	6,8	13,1	16,8	12,2	19
10	6,2	8,8	16,8	12,2	32
11	8,0	1,2	11	9,9	68
12	6,6	9,1	7,5	8,7	70
13	6,7	8,3	9,7	9,3	76
14	6,5	6,7	7	6,4	58
15	7,2	6,4	11	9,3	75
16	8,0	8,2	7,5	6,4	54
17	6,3	13,7	11	9,9	65
18	6,3	30,0	11,6	10,4	80
19	7,9	12,6	11,6	9,9	62

Se aplicó el método de aproximaciones sucesivas (Stepwise) para obtener los modelos que mejor explicaron la variabilidad de la D_e a partir de las variables edáficas determinadas.

De esos diecinueve suelos, se seleccionaron diez con sus respectivos tratamientos y se muestreó la parte aérea de las plantas de trigo en macollaje (F 4) y espigazón (F 10.5) (Miller, 2000), y se realizó una evaluación temprana (durante macollaje) midiendo la producción y la nutrición y una tardía (en espigazón) midiendo la producción. Se hicieron 4 réplicas por tratamiento y por muestra. El material vegetal se molió (< 1 mm) y se determinó P total mediante digestión con ácidos nítrico y perclórico (relación 2:1, Johnson & Ulrich, 1959) y posterior cuantificación del P mediante colorimetría (Murphy & Riley, 1962). Se determinaron N (semimicro Kjeldahl), K (espectrofotómetro de llama) y S totales (digestión con perclórico y detección con espectroscopia de emisión por *plasma* acoplado inductivamente (ICP).

Conocer la dinámica de las diferentes formas de P presentes en el suelo y del agregado como fertilizante es importante para estimar los equilibrios con las formas disponibles para las plantas. Por este motivo, un conocimiento integral de la disponibilidad debe contemplar a los estimadores químicos, así como la verdadera disponibilidad medida a través de la planta.

Aumento relativo del rendimiento en materia seca (ARMS)

Para evaluar el comportamiento promedio de los suelos con diferente disponibilidad de P y rendimientos variables, se calculó el aumento relativo del rendimiento en materia seca en macollaje como el incremento de cada uno de los tratamientos (dosis) respecto al testigo (sin P) en porcentaje:

$$ARMS = 100 * (MS_{(dosisX)} - MS_{(testigo)}) / MS_{(testigo)}$$

Aumento relativo en la absorción de P (ARAP)

De la misma forma se procedió para analizar la cantidad de P en la materia seca aérea de la planta en macollaje, donde para cada dosis se calculó el aumento porcentual respecto del testigo:

$$ARAP = 100 * (P-MS_{(dosisX)} - P-MS_{(testigo)}) / P-MS_{(testigo)}$$

Cálculo de los índices DRIS

Matemáticamente, los índices se basan en la desviación media de cada relación respecto a su valor óptimo. Por ello, el índice DRIS óptimo debería ser cero para cualquier nutriente.

Los índices negativos indican deficiencias relativas, mientras que los positivos evidencian excesos respecto a los nutrientes considerados en el diagnóstico (Walworth & Sumner, 1987). Debido a que los índices DRIS son una medida de las desviaciones relativas a partir de un punto único su suma es siempre igual a cero.

Se compararon las relaciones encontradas en el cultivo con las normas obtenidas en cultivos altamente productivos (Sumner, 1981). Cuanto mayor es la diferencia entre estas relaciones mayor es el desequilibrio entre los nutrientes (valores más negativos o más positivos). Se obtuvieron los índices DRIS para cada N, P, K y S. De acuerdo a los valores obtenidos para cada uno de estos nutrientes se los ordenó en base a su orden de requerimientos nutricionales. De esta forma se los dispuso desde el que se encontraba en mayor grado de deficiencia al que se encontraba en exceso, siempre en forma relativa al resto de los nutrientes considerados. Posteriormente, se calculó el índice de balance nutricional a partir de la suma de los índices (en valor absoluto) el cual es una medida del balance relativo de los nutrientes analizados. En general, el balance mejora cuando el índice de balance nutricional se acerca al valor cero, mientras que cuanto más alto es este valor

indica mayor grado de desbalance relativo entre los nutrientes analizados. Se seleccionaron cuatro suelos con diferente disponibilidad para analizar el efecto de la aplicación de P sobre el balance de nutrientes

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferentes características texturales de los suelos analizados se reflejó en la variabilidad de los contenidos de carbono orgánico, ya sea el total como el asociado a la fracción mineral del suelo y de contenido de material menor de 100 μm o fracción fina.

En base a los valores de P_e remanentes en el suelo después de la aplicación de las diferentes dosis de P se obtuvieron los parámetros de las ecuaciones lineales resultantes en cada caso y el ajuste del modelo que se presentan en la Tabla 2. A partir de esta ecuación se obtuvieron los valores de dosis equivalente. Los valores de D_e obtenidos en los diferentes suelos oscilaron entre 1,2 y 4,8

Tabla 2. Parámetros de las relaciones lineales del fósforo extraíble en función de la dosis aplicada para cada suelo y dosis a aplicar para aumentar en una unidad el fósforo extraíble (dosis equivalente).

Table 2. Linear function parameters of extractable P as a function of the P rate applied to each soil and the rate needed to increase the extractable P in one unit (equivalent rate).

Suelo	Parámetro a	Parámetro b	R ²	Dosis equivalente (kg ha ⁻¹)
1	0,21	25,9	0,86	4,8
2	0,416	21,9	0,90	2,4
3	0,429	25,45	0,98	2,3
4	0,34	26,81	0,96	3,0
5	0,31	10,65	0,98	3,2
6	0,42	25,88	0,97	2,4
7	0,28	56,85	0,96	3,6
8	0,289	45,48	0,88	3,5
9	0,55	14,85	0,97	1,8
10	0,51	20,41	0,98	2,0
11	0,39	7,73	0,84	2,5
12	0,62	6,75	0,95	1,6
13	0,48	33,12	0,85	2,1
14	0,30	17,58	0,92	3,3
15	0,25	7,68	0,99	4,0
16	0,83	2,40	0,92	1,2
17	0,51	17,89	0,98	2,0
18	0,39	12,44	0,98	2,6
19	0,46	9,1	0,94	2,2
Media				2,7
Desvío estándar				0,896

$P_e = a P \text{ aplicado} + b$; P_e : Fósforo extraíble

$P_e = a * \text{applied P} + b$; P_e : Extractable P

kg P ha⁻¹. Otros estudios en diferentes suelos de la Argentina han reportado dosis equivalente entre 1,5 y 7,0 kg P ha⁻¹ (Quintero, 2003) y entre 3,2 y 6,0 kg P ha⁻¹ (Rubio *et al.*, 2008).

En promedio sería necesario agregar 2,7 kg P ha⁻¹ como fertilizante para aumentar 1 mg kg⁻¹ el valor de Pe. La variabilidad encontrada fue de ± 1,4 kg ha⁻¹.

Se ha informado que la cantidad de P necesaria para aumentar un mg el Pe por cada kg de suelo está relacionada con el índice de sorción de P (Quintero, 2003) y con el nivel inicial de Pe (Rubio *et al.*, 2008). En este trabajo las características del suelo que mejor explicaron la variabilidad en la D_e fueron el nivel inicial de Pe y el contenido de Carbono Orgánico asociado a la fracción mineral (COM) (Ecuaciones 1 y 2). En el primer caso indicaría que cuanto mayor es el Pe del suelo, es necesario aplicar mayor cantidad de P para lograr aumentar un mg kg⁻¹ (Ecuación 1).

$$D_e = 2,01 + 0,035 * P_{\text{e inicial}} \quad (R^2=0,50, p \leq 0,05) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Lo que indicaría que el P aplicado pasa a formar parte del exceso de P disponible y precipitaría como compuestos de baja solubilidad. Es decir, que el agregado de P como fertilizante en condiciones de alta disponibilidad aumentaría el flujo de las formas disponibles a las menos disponibles, particularmente en estos suelos precipitaría como fosfatos de Ca (Galantini *et al.*, 2005).

De la misma forma, cuanto mayor es la cantidad de COM es más grande la cantidad de fertilizante a aplicar (Ecuación 2). Esto confirma el importante papel de la materia orgánica sobre los equilibrios de adsorción - desorción de las

formas disponibles de P (Barrow, 1979, Börling, 2003, Castro & Torrent, 1998)

$$D_e = 0,38 + 1,57 * COM \quad (R^2=0,55, p \leq 0,05) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Efecto de la fertilización sobre el cultivo de trigo

El aumento de la dosis de P aplicada produjo un incremento en la materia seca producida por el trigo durante el macollaje (Tabla 3). La concentración de P también aumentó con el incremento de la dosis aplicada, llegando a duplicarse con la más alta. La concentración del resto de los nutrientes analizados, N, K y S, se mantuvo sin grandes cambios. Sin embargo, la mayor producción de materia seca producida por el aumento en la disponibilidad de P se reflejó en un incremento sustancial de la absorción de N, K y S, particularmente importante hasta la dosis de 50 kg P ha⁻¹. Como ha sido destacado en diferentes estudios (Galantini *et al.*, 2000a; García *et al.*, 2006), cualquier mejora en el rendimiento implica un incremento en la exportación de nutrientes, aún aquellos que no fueron aplicados, por lo que las sucesivas fertilizaciones tendrían que ser más balanceadas. El aumento en la concentración de P en planta fue de mayor magnitud que el aumento en el rendimiento, aspecto que modificó la calidad del material y podría tener consecuencias sobre la disponibilidad para los cultivos posteriores.

El efecto de la aplicación de P en los diferentes suelos sobre la producción de materia seca como sobre la absorción de P fue semejante, por lo que es válido analizar los valores medios del ARMS y ARAP. El Pe inicial no modificó el ARMS pero sí el ARAP (P ≤ 0,01, R² = 0,68) (Fig. 1a). Es decir,

Tabla 3. Producción media de materia seca de trigo en macollaje, concentración de nutrientes en materia seca y contenido de nutrientes en maceta en función de la dosis de P.

Table 3. Dry wheat biomass production during tillering, nutrient concentration in dry biomass and total nutrient content per pot as a function of the P rate.

Dosis kg P ha ⁻¹	MS g mac ⁻¹	N	P %	K	S	N	P mg mac ⁻¹	K	S
0	0,65b	2,55	0,21c	3,54	0,17	16,37b	1,48	23,51b	1,15b
25	0,75b	2,32	0,29b	3,39	0,17	17,09b	2,21	25,88b	1,28b
50	0,90a	2,38	0,33b	3,41	0,17	21,68a	3,02	31,05 ^a	1,56ab
100	0,96a	2,34	0,40a	3,51	0,19	22,67a	3,74	33,57a	1,85a
LSD	0,11	ns	0,06	ns	ns	4,0	0,6	5,0	0,4

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas para cada columna LSD (α=0,05).
Different letters represent least significant differences within columns (α=0.05).

en todos los suelos hubo aumento semejante de la MS producida al aplicar P, pero la cantidad de P absorbido dependió de la disponibilidad de este elemento (Pe + fertilizante). Este aspecto tiene mucha importancia ya que la mayor absorción de P se realiza en los primeros estadios de crecimiento (Takahashi & Anwar, 2007). Parte de la variabilidad en el ARMS promedio para las distintas dosis de P fue explicada significativamente por el valor de la dosis equivalente (Fig. 1b). Como ya se analizó, son varios los factores que determinan la cantidad de fertilizante requerida para aumentar una unidad de Pe debido a los complejos equilibrios del P en el suelo. Es decir, el ARMS estaría más relacionado con los equilibrios del P aplicado mientras que el ARAP lo estaría con la disponibilidad inicial de Pe en el suelo. Cuando se analizaron las relaciones para cada una de las dosis aplicadas (datos no presentados), la única diferencia fue que con la dosis más baja (25 kg P ha⁻¹) el ARMS fue mayor en suelos de baja disponibilidad y disminuyó cuando los valores de Pe fueron más altos. Para las dosis mayores de P (50 y 100 kg P ha⁻¹), la respuesta relativa tendió a ser la misma independientemente de la disponibilidad inicial. En todos los casos la disponibilidad se relacionó con el ARAP en forma significativa (P<0,01) y alta explicación (R²=0,67 a 0,76). Además, el ARAP fue mayor en la medida que la dosis aplicada aumentó.

La variabilidad de la materia seca producida oscila entre 1,63 y 6,35 g maceta⁻¹. En este caso, con N y agua sufi-

cientos, el aumento relativo con altas dosis de P tuvo una media de 1,35 g maceta⁻¹, pero osciló desde valores en que no superaron al testigo hasta un 98% más que el mismo. El desvío estándar fue más bajo a dosis más altas (Tabla 4).

La variabilidad de las características de los suelos utilizados y las diferentes dosis de P aplicadas se reflejaron en respuestas variables en etapas avanzadas del cultivo. Se observaron tres tipos diferentes de respuesta a la aplicación de diferentes dosis de P. En cinco de los suelos se encontró el rendimiento máximo aproximadamente con la dosis de 50 kg ha⁻¹. Otro de los comportamientos observados fue en el que no se observó respuesta a la fertilización en las primeras dosis aplicadas, pero si en la tercera o cuarta dosis, mientras que en el suelo 8, el cual partió de un valor de Pe de 32,6 µg g⁻¹, la respuesta a la fertilización fue negativa para todas las dosis aplicadas.

Aplicación de la metodología DRIS

La aplicación de la metodología a los ensayos de fertilización sobre los distintos suelos mostró sensibilidad para detectar variabilidad de las deficiencias relativas del P (Tabla 5). En la medida que el Pe inicial del suelo aumentó, el índice de P del tratamiento testigo pasó a ser menos negativo (menor deficiencia relativa). Como referencia, al-

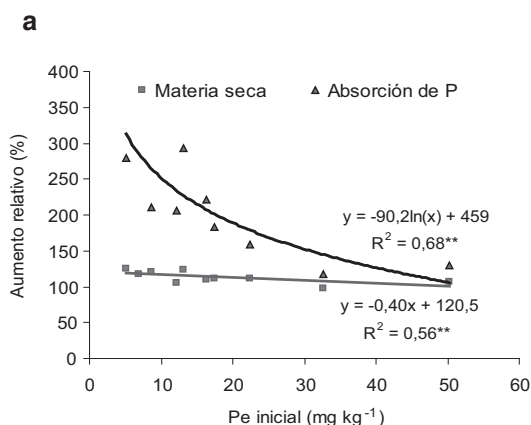


Figura 1 a. Aumento relativo del promedio de todas las dosis de la materia seca y de la absorción de P del cultivo de trigo macollaje en función del fósforo extraíble (Pe).

Figure 1 a. Average relative increase in dry biomass and wheat P uptake during tillering across all P rates as a function of the extractable P.

** indica que la regresión es altamente significativa, $p \leq 0,01$

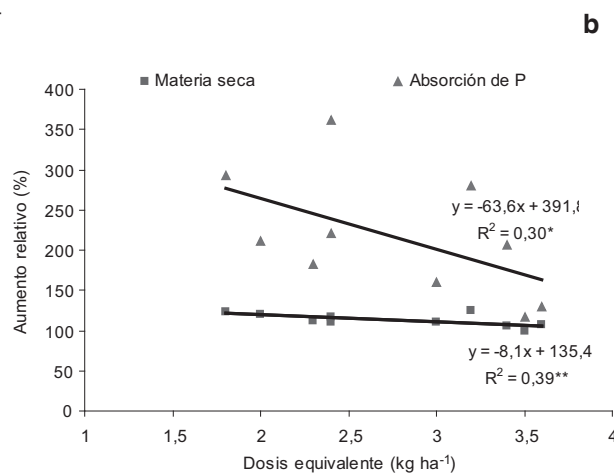


Figura 1 b. Aumento relativo del promedio de todas las dosis de la materia seca y de la absorción de P en trigo en función de la dosis equivalente

Figure 1 b. Average relative increase in dry biomass and wheat P uptake across all P rates as a function of the equivalent rate.

*indica que la regresión es significativa, $p \leq 0,05$; ** indica que la regresión es altamente significativa, $p \leq 0,01$

**indicates that the regression model was highly significant ($p \leq 0,01$)

*Indicates that the regression model was significant, ($p \leq 0,05$)

Tabla 4. Materia seca de trigo en espigazón y aumento relativo de la materia seca con las diferentes dosis de P aplicadas

Table 4. Dry wheat biomass in floral initiation and relative increase in dry biomass according to the different applied P rates.

Suelo	Materia Seca (g maceta ⁻¹) Dosis (mg P kg ⁻¹ suelo)				Aumento relativo (g maceta ⁻¹) Dosis (mg P kg ⁻¹ suelo)		
	0	25	50	100	25	50	100
1	3,17a	4,10b	4,53b	4,13b	129,5	143,0	130,4
2	5,10a	5,10a	5,40 ^a	6,30b	103,0	108,1	127,6
3	3,83a	4,07a	4,43 ^a	3,77a	107,9	116,6	98,4
4	6,35a	6,28a	6,80 ^a	6,73a	98,9	107,1	106,1
5	1,63a	1,93a	2,65b	3,15b	120,2	171,2	197,7
6	3,05a	4,45b	6,43c	5,33b	147,5	213,9	178,1
7	6,10a	6,55a	7,00b	8,00b	107,5	115,6	131,3
8	5,80a	5,70a	5,40 ^a	5,30a	99,2	95,2	93,0
9	2,15a	2,58a	2,53 ^a	3,18b	120,8	118,9	149,3
10	4,35a	4,45a	5,55b	6,03b	102,4	127,8	139,4
Media	4,15	4,52	5,07	5,19	113,7	131,8	135,4
Desvío estándar	1,66	1,47	1,46	1,42	-	-	-

Letras distintas indican diferencias significativas para cada fila, LSD ($\alpha=0,05$).Different letters represent least significant differences within rows ($\alpha=0,05$).

Tabla 5. Balance nutricional DRIS con normas internacionales de trigo en suelos con niveles contrastantes de P extraíble inicial y dosis de fósforo aplicadas.

Table 5. DRIS nutritional balance according to the International wheat conventions in soils with contrasting levels of initial extractable P and applied P rates.

Suelo	Fósforo extraíble inicial mg kg ⁻¹	Dosis de P (kg ha ⁻¹)	Índices				Orden de requerimientos nutricionales	Índice de balance nutricional	Rendimiento relativo (%)
			N	P	K	S			
5	4,8	0	18	-75	61	-4	P>S>N>K	157	100
		25	16	-21	31	26	S>P>N>K	94	118
		50	-5	20	34	49	S>N>P>K	108	163
		100	28	27	28	27	N>S>P>K	110	194
1	12,2	0	18	-51	80	11	P>N>S>K	160	100
		25	24	-16	44	-4	N>P>S>K	88	129
		50	24	6	32	13	N>S>P>K	75	143
		100	45	22	27	-4	N>S>P>K	98	131
4	22,4	0	22	-22	45	-3	N>P>S>K	90	100
		25	28	7	36	15	N>S>P>K	86	99
		50	28	3	34	-9	N>S>P>K	74	107
		100	26	15	26	14	N>S>P>K	80	124
7	50,2	0	32	32	22	23	N>S>K>P	109	100
		25	44	51	22	29	N>S>K>P	146	107
		50	33	35	23	25	N>S>K>P	115	114
		100	36	39	17	20	N>S>K>P	112	131

gunos autores han sugerido que los valores dentro del rango +/- 15-20 indican un balance relativo del nutriente respecto a los otros considerados (Landriscini *et al.*, 2001). Esto indicaría que por ejemplo, en estos cuatro suelos analiza-

dos, solo el suelo 4 (22,4 mg P kg⁻¹ suelo) es el que está más próximo al balance relativo de P respecto al resto de los nutrientes considerados. El alto nivel de Pe a tener en cuenta en el balance en planta podría explicarse debido a

que los suelos recibieron agua y N periódicamente, y éstos no fueron una condición limitante para el crecimiento del trigo. En otros estudios realizados en diferentes suelos Loewy & Ron (2001) han propuesto niveles críticos menores para suelos con diferentes características texturales. Es decir, los resultados sugerirían que el nivel crítico para el balance en planta estaría asociado al potencial de producción de cada suelo en particular.

Mediante la metodología DRIS fue posible detectar los cambios en el balance de nutrientes debidos a la aplicación de diferentes dosis de P. En la medida que la dosis aumentó su deficiencia relativa pasó a segundo o tercer lugar. En esta situación comenzaron a ser otros los elementos que limitaron el desarrollo del cultivo (el N o el S), cuyos índices tomaron valores más negativos indicando que sus deficiencias relativas se acentuaron. La magnitud del cambio de los índices para el P dependió de la disponibilidad de P edáfico. Este fue bien marcado en el suelo con 4,8-12,2 mg kg⁻¹ de Pe, menos notorio en el de 22,4 mg de Pe kg⁻¹ e insensible para el suelo con 50,2 mg de Pe kg⁻¹.

El índice de balance nutricional, que representa el desbalance total entre los nutrientes analizados, disminuyó al aplicar dosis crecientes de P en aquellos suelos de menor disponibilidad. Las dosis más altas produjeron un nuevo aumento en este índice, consecuencia de la aparición de un nuevo elemento limitante. Es decir, este índice tendió a disminuir con la aplicación de dosis bajas, por un mejor balance de P, y aumentar con dosis altas, por un desbalance de otros nutrientes. Se confirma de esta manera la importancia de utilizar estrategias de fertilización balanceada (García, 2003).

El rendimiento relativo obtenido en cada uno de los suelos con dosis crecientes de fertilizante mostró las diferencias de disponibilidad. En el suelo 5 (4,8 mg P kg suelo⁻¹) llegó a incrementar 94% la materia seca respecto al testigo, mientras que en el suelo 7 (50,2 mg P kg suelo⁻¹) aumentó solo el 31%. Estos resultados estarían indicando que los cambios en el nivel de Pe al momento de la siembra sería un indicador sensible para estimar el balance nutricional obtenido en el cultivo. Sin embargo, la respuesta esperada para cada nivel requeriría de estudios de calibración más profundos. Como se mencionó las diferencias no solo dependen de la cantidad de P agregada sino también de los equilibrios fisicoquímicos de las diferentes formas en el suelo (Galantini *et al.*, 2005).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron aceptar la hipótesis propuesta y analizar dos aspectos diferentes de la fertilización fosfatada del trigo en estos suelos. Desde el punto de vista de los equilibrios físico-químicos del P las características del suelo, como la composición mineralógica, determinan la dinámica y el destino final del P aplicado. Desde el punto de vista de la fertilidad, la reposición de los niveles de Pe requerirán dosis mayores en la medida que el Pe o los contenidos de carbono orgánico sean altos. Desde el punto de vista del cultivo, la disponibilidad inicial de Pe no modifica el aumento relativo de la materia seca producida pero si la absorción relativa de P. Es decir, en este caso, modificó la calidad pero no la tasa de crecimiento del cultivo. Por otro lado, la aplicación del método DRIS es una herramienta complementaria útil para evaluar no solo la disponibilidad de P, sino el balance de este nutriente con el resto. La metodología DRIS fue sensible para detectar el balance del P en las plantas de trigo. Los mejores balances se obtuvieron con buena disponibilidad de Pe a la siembra y con dosis adecuadas de P, ya que los excesos de P generan un nuevo desbalance con el resto de los nutrientes.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrow N J 1979. The description of desorption of phosphate from soil. *J. Soil Sci.* 30:259-270.
- Beaufils, ER. 1973. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. *Soil Sci. Bull.* 1, 130 pp. Univ. of Natal., Pietermaritzburg, South Africa.
- Berardo, A & D Grattone. 2000. Fertilización requerida para alcanzar niveles objetivos de P Bray en un Argiudol. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Berardo, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción Pampeanos. Simposio «El fósforo en la Agricultura Argentina». Rosario. Argentina. INPOFOS Cono Sur pp 38-44.
- Börling, K. 2003. Phosphorus sorption, accumulation and leaching. Effects of long-term inorganic fertilization of cultivated soils. Doctoral thesis Swedish University of agricultural Sciences, 39 pp.
- Bray, RH & LT.Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci* 59: 39-45.
- Castro B & J Torrent. 1998. Phosphate availability in calcareous Vertisols and Inceptisols in relation to fertilizer type and soil properties. *Fert. Res.* 40: 109-119.
- Colomb, B; O Debaeke; C Jouany & JM Nolot. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Eur. J. Agron.* 26: 154-165.

- Delgado, A & J Torrent. 2000. Phosphorus forms and Desorption Patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. *Soil Sci. Am. J.* 64: 2031-2037.
- Galantini, JA; L Suñer & H Krüger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años e trigo continuo. *Revista Investigaciones agropecuarias RIA (INTA)* 34: 13-31.
- Galantini, JA. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Manual «Tecnología en Análisis de Suelos: Alcances a laboratorios agropecuarios» (eds. L. Marban y S. Ratto) de la AACs. Capítulo IV parte 2, 103-114.
- Galantini, JA; MR Landriscini & RA Rosell. 2000(b). Patrones de acumulación, Balance y partición de nutrientes en diferentes sistemas de producción con trigo. *RIA (INTA)* 29: 99-112.
- Galantini, JA; MR Landriscini; JO Iglesias; AM Miglierina & RA Rosell. 2000(a). The effects of crop rotations and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil Till. Research* 53: 137-144.
- García, F; L Picone & A Berardo. 2006. Fósforo. Pág. 99-121. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. HE Echeverría y FO García (eds.). Editorial INTA BA, Argentina.
- García, FO. 2003. Introducción. Simposio «El Fósforo en la Agricultura Argentina». pp. 2-3. INPOFOS. Acaassu, Buenos Aires, Argentina.
- Gupta, UC. 1976. Tissue sulfur levels and additional sulfur needs for various crops. *Can. J. Plant Sci.* 56: 651-657.
- Gutiérrez Boem, FH; JD Scheiner, J Moyano & RS Lavado. 2002. Cambios en la disponibilidad de Fósforo del suelo por el agregado de fertilizante. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. P Madryn.
- Haneklaus, S; E Evans & E Sching. 1992. Baking quality and sulphur content of wheat. I. Influence of grain sulphur and protein concentration on loaf volume. *Sulphur in Agriculture* 16: 31-34.
- Heredia, OS & A Fernández Cirelli. 2007. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. *Geoderma* 137: 426-431.
- Johnson, CM & A Ulrich. 1959. II Analytical methods. For use in plant analysis. 26-77. California Agricultural Experimental Station Bulletin 766.
- Landriscini, MR; JA Galantini & RA Rosell. 1997. Determinación de normas para la aplicación del sistema DRIS en cultivo de trigo de la región semiárida bonaerense. *Ciencia del Suelo* 15: 17-21.
- Landriscini, MR 1992. Nivel de Nutrientes edáficos y foliares en trigo en la región semiárida pampeana. Tesis de Magister en Ciencia del Suelo. Universidad Nacional del Sur. 127 pp
- Landriscini, MR; JA Galantini & RA Rosell. 2001. Aplicación de la metodología DRIS al cultivo de trigo en la región semiárida pampeana. Investigaciones Agronómicas. *INPOFOS Cono Sur*, Buenos Aires, 12: 6-11.
- Landriscini, MR; JA Galantini; JO Iglesias; RA Rosell & A Glave. 1990. Balance de N, P y K en trigo en diferentes sistemas de producción en la región semiárida bonaerense. Actas II Congreso Nacional de Trigo, Capítulo I, pp. 245-253, Pergamino, Buenos Aires.
- Loewy, T & MM Ron. 2001. Fertilización en el SO Bonaerense. En: «Trigo Candeal» Manual técnico CEI Barrow (Convenio MAgiar-INTA). Informe Técnico Pp. 46-51.
- Mallarino, A. 2005. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continua con maíz y soja en el cinturón del maíz. *Informaciones Agronómicas* 28: 9-15.
- Miller, T. 2000. Estadios de crecimiento del cultivo de trigo. *INPOFOS* 6: 7-10
- Murphy, J & JP Riley. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
- Pizzeghello, D; A. Berti; S Nardi & F Morari. 2011. Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141(1-2): 58-66.
- Quintero, C. 2003. Capacidad de fijación de P del suelo y su efecto sobre la dosis a aplicar. Simposio El fósforo en la Agricultura. pp 73-75. Rosario. INPOFOS Cono Sur.
- Quintero, C; N Boschetti & R Benavidez. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 34: 1435-1450.
- Rosell, RA; MR Landriscini & JA Galantini. 1992. N, P, and K DRIS balance in winter wheat in pampean semiarid region of Argentina. *Suelo y Planta* 2: 363-371.
- Rosell, RA; MR Landriscini, & AE Glave. 1987. Balance de N, P, K y S en trigo de la región semiárida de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Anales de Edafología y Agrobiología* XLVI: 1167-1180.
- Rubio, G; MJ Cabello; FH Gutiérrez Boem & E Munaro. 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72: 1721-1727.
- Sharpley, AN; TC Daniel & DR Edwards. 1993. Phosphorus movement in the landscape. *Journal of Production Agriculture* 6: 492-500.
- Stewart, WM; DW Dibb; AE Johnston & TJ Smyth 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. Review. *Agronomy Journal* 97: 1-6.
- Sumner, ME 1981. Diagnosing the sulfur requirement of corn and wheat using foliar analysis. *Agron. J.* 45: 87-90.
- Sumner, ME 2000. Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. Informaciones Agronómicas del Cono Sur, 9: Archivo agronómico N° 5. Inpofos, (Pag. ?)
- Takahashi, S & MR Anwar 2007. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Research*. 101(2): 160-171.
- Walworth, JL & ME Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* B.A. Stewart (ed.), 6: 149-188. New York. Inc.
- Wang, J; W LIU; H MU, & T Dang. 2010. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. *Pedosphere* 20: 304-310.
- Withers, PJ & AN Sharpley. 1995. P fertilizers. Pp. 65-107 en Rechcigl, JE (ed.) Soil amendments and environmental quality. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Zingore, S; HK Murwira; RJ Delve & KE Giller. 2007. Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on small holder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 112-126.