

Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación anticipada de fósforo

María Guadalupe Tellería^{1*}, Flavio H. Gutiérrez-Boem² y Gustavo N. Ferraris³

Introducción

La necesidad de fertilizar con fósforo (P) los suelos agrícolas, en virtud de su baja disponibilidad de P, y la enorme difusión que ha tenido la siembra directa en nuestro país, han generado que los estudios referentes a la tecnología de aplicación de P se mantengan activos. Tradicionalmente, el P es colocado en la línea de siembra, aunque las cantidades de P que pueden agregarse son relativamente bajas por razones operativas y riesgos de fitotoxicidad.

Las respuestas a la fertilización en línea suelen ser superiores respecto de aplicaciones al voleo en suelos muy deficientes en P o con alta capacidad de fijación (Mallarino, 1997; Fariña Nuñez, 1997). Sin embargo, a medida que el nivel de P del suelo aumenta o cuando se emplean altas dosis, las diferencias entre voleo y línea disminuyen o son nulas (Mallarino, 1997; Darwich, 1998). Las aplicaciones al voleo usualmente se realizan a la siembra o en periodos de tiempo variables antes de la siembra. Respecto a las aplicaciones antes de la siembra, la mayor parte de las experiencias consisten en comparaciones de distintas dosis al voleo anticipadas con una única dosis en línea y, en la mayoría de los casos, no se hallaron diferencias (Bordoli y Mallarino, 1998; Barbagelata y Melchiori, 2008; Barbieri et al, 2006).

Las experiencias previas realizadas en la región pampeana argentina tienen algunas carencias en el sentido que: i) las comparaciones se realizaron entre aplicaciones al voleo anticipado y la línea de siembra, con lo cual de producirse diferencias no se pueden determinar si son atribuibles al momento de aplicación (siembra vs. anticipado) o a la ubicación del fertilizante (voleo vs. línea); ii) las comparaciones suelen realizarse con una única dosis común en ambos momentos y es sabido que las respuestas y eficiencias no son independientes de las

dosis, y iii) los periodos de anticipación son muy variables y en pocos casos son superiores a los 60 días.

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) evaluar la respuesta del maíz (rendimiento fertilizado – rendimiento testigo) bajo diferentes estrategias de fertilización con P en la línea y al voleo, y ii) comparar la eficiencia agronómica en el uso del P [(rendimiento fertilizado – rendimiento testigo)/kg P aplicado] para distintas dosis y momentos de aplicación de P al voleo.

Materiales y métodos

Se realizaron tres experimentos de fertilización fosfatada a campo (uno por año) en cultivos de maíz, los cuales fueron iniciados en la campaña 2009/10 y finalizados en la 2011/12 a fin de abarcar una mayor variabilidad climática.

Los tres experimentos se realizaron en suelos Hapludoles Típicos: el primero serie Lincoln ubicado en el partido de General Viamonte (Buenos Aires) en la campaña 2009/10, y los dos restantes serie Junín en el partido de Junín (Buenos Aires) en las campañas 2010/11 y 2011/12 (**Tabla 1**).

Los experimentos contaron con diez tratamientos cada uno: ocho correspondieron a un factorial de dos momentos y cuatro dosis de aplicación de P al voleo, un tratamiento con una dosis de P aplicada en bandas incorporado en la línea de siembra (la ubicación y momento habitual que realizan los productores), y el restante a un testigo sin fertilizar con P (**Tabla 2**). El diseño de los experimentos fue en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. La fuente de P utilizada en todos los experimentos fue superfosfato triple de calcio (0-46-0).

En la campaña 2009/10, el híbrido de maíz utilizado fue Syngenta NK 900 sembrado el 14 de septiembre

Tabla 1. Características de los suelos de los sitios experimentales.

Serie de suelo	Lincoln	Junín	Junín
Clasificación taxonómica	Hapludol típico	Hapludol típico	Hapludol típico
Textura (0-20 cm)	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso
Arcilla (%)	12.0	15.2	15.2
Limo (%)	24.4	26.3	26.3
Arena (%)	63.6	58.5	58.5
pH (0-20 cm)	5.6	6.2	6
MO (0-20 cm) (%)	2.75	2.22	1.68
P Bray 1 (0-20 cm) (mg kg ⁻¹)	6.8	7.3	7.1

¹ AER INTA Junín

² Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (FAUBA)

³ EEA INTA Pergamino

* Autor de contacto. Correo electrónico: telleria.maria@inta.gob.ar

Tabla 2. Descripción de los tratamientos de fertilización fosfatada en maíz. Campañas 2009-10, 2010-11, y 2011-12.

Tratamiento	Dosis, kg P ha ⁻¹	Ubicación	Momento de aplicación
0	0		
1	10	Voleo	90 días antes de la siembra
2	20	Voleo	90 días antes de la siembra
3	30	Voleo	90 días antes de la siembra
4	40	Voleo	90 días antes de la siembra
5	10	Voleo	Siembra
6	20	Voleo	Siembra
7	30	Voleo	Siembra
8	40	Voleo	Siembra
9	20	Línea	Siembra

con una distancia entre hileras de 52.5 cm; en 2010/11 el híbrido fue Dekalb DK 670 MGRR2 sembrado el 7 de octubre a 70 cm entre hileras; y en la campaña 2011/12 se utilizó el híbrido Dekalb 747 MGRR2 sembrado el 27 de septiembre a 70 cm entre hileras. Los cultivos fueron sembrados en siembra directa y, al momento de los experimentos, los sitios se hallaban bajo manejo de siembra directa estabilizado (cinco años o más). Los cultivos fueron conducidos bajo un planteo de alta tecnología, sin limitantes nutricionales de nitrógeno (N) ni azufre (S). Al momento de la siembra, los cultivos de maíz se fertilizaron con 150 kg ha⁻¹ de N (360 kg ha⁻¹ de urea) y 15 kg ha⁻¹ de S (83 kg ha⁻¹ de yeso agrícola), ambos aplicados en forma de cobertura total.

Las campañas fueron ambientalmente diferentes. La campaña 2009/10 fue muy favorable climáticamente para el desarrollo de los cultivos y los balances hídricos no presentaron déficit en ningún momento del año. La campaña 2010/11 presentó un déficit hídrico durante el periodo crítico, sin embargo la reconstitución de las precipitaciones a partir del mes de enero determinaron una compensación del rendimiento a través del peso de los granos y se lograron rendimientos muy aceptables. La campaña 2011/12 inició con reservas inferiores a lo normal, lo cual, sumado a la ausencia total de precipitaciones durante el mes de diciembre, causaron un severo déficit hídrico que afectó al cultivo; no obstante, las lluvias ocurridas a partir de mediados de enero permitieron una recuperación parcial del cultivo.

Con el cultivo en madurez fisiológica, se determinó el rendimiento de una superficie de 2 m². La cosecha de las espigas o mazorcas se realizó en forma manual y la trilla de las mismas se realizó con una máquina trilladora estacionaria. Sobre las muestras húmedas se midió el contenido de humedad con un equipo Delver y se hicieron las correcciones de peso correspondientes a humedad comercial (14.5 %).

Los datos recolectados se analizaron mediante ANVA y contrastes para determinar efectos del momento de

aplicación, dosis, su interacción y efecto de la ubicación del fertilizante. Para comparar momentos de aplicación se compararon modelos (regresiones lineales y no lineales) ajustados a la relación respuesta vs. dosis. Para eso se ajustaron dos modelos: uno con una línea para cada momento y otro con una línea común a ambos momentos. La comparación se realizó testeando si el aumento del error por ajustar una línea en vez de dos fue significativo mediante un test de *F*. Si el valor *p* fue mayor que 0.05 indicó que el momento de aplicación no afectó significativamente la relación respuesta vs. dosis, por lo que ésta se pudo representar con una sola línea común a ambos momentos. Se utilizó el programa Statistix para realizar el ANVA, los contrastes y las regresiones.

Resultados y discusión

La **Tabla 3** muestra el rendimiento en grano de maíz, corregido al 14.5% de humedad en los ensayos de 2009/10, 2010/11 y 2011/12. El agregado de dosis crecientes de P produjo aumentos significativos en el rendimiento en las tres campañas y no se detectó efecto del momento de aplicación ni interacción entre las dosis y el momento de aplicación (**Tabla 4**). Las dosis empleadas presentaron una tendencia de efecto lineal ($p < 0.10$) en la primer campaña y un efecto lineal significativo ($p < 0.05$) en las dos últimas.

La **Figura 1** muestra el incremento de rendimiento, en términos absolutos, en función de la dosis de P agregada. El aumento máximo de rendimiento fue de 2500 kg ha⁻¹ (20%) en la campaña 2009/10, de 1490 kg ha⁻¹ (13%) en 2010/11, y de 2650 kg ha⁻¹ (36%) en 2011/12.

No se observó efecto de la dosis de P sobre la eficiencia de uso del nutriente aplicado (EUP), probablemente debido a una elevada variabilidad de este indicador (**Tabla 5**). Por tanto, la relación entre la respuesta de rendimiento en grano y dosis, y cuya pendiente es la EUP, fue representada mediante regresiones lineales. En la **Tabla 6** se presenta la comparación de dos modelos, uno con una función ajustada para cada momento de aplicación y campaña,

Tabla 3. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹, 14.5% Humedad). Campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12.

Campaña	Dosis (kg P ha ⁻¹)	Momento y ubicación del fertilizante		
		Voleo		Línea
		Anticipado	Siembra	Siembra
2009-10	0		12 490	
	10	13 938	13 672	-
	20	13 268	13 456	13 370
	30	14 111	13 985	-
	40	14 279	15 723	-
2010-11	0		11 272	
	10	11 429	11 392	-
	20	11 779	12 432	13 435
	30	12 873	12 649	-
	40	12 083	13 190	-
2011-12	0		7363	
	10	7722	7014	-
	20	8339	8769	9891
	30	10 011	10 013	-
	40	9291	10 298	-

Tabla 4. Análisis de la varianza (ANVA) de rendimiento en grano de maíz (kg ha⁻¹). Campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12.

Fuente de variación	2009/10	2010/11	2011/12
	Valor p		
Momento	0.53	0.18	0.71
Dosis			
Lineal	0.06	< 0.01	< 0.01
Cuadrático	0.16	0.14	0.17
<i>Lack of fit</i>	0.69	0.55	0.39
Dosis x Momento	0.47	0.50	0.57
Ubicación	0.93	0.08	0.27

Tabla 5. Valores de EUP para las dosis de 10, 20, 30 y 40 kg P ha⁻¹ aplicados a la siembra en los experimentos de las campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12.

Dosis	2009/10	2010/11	2011/12
	EUP, kg maíz kg P aplicado ⁻¹		
10	131	14	5
20	44	42	60
30	52	50	89
40	63	34	61
Valor p	0.22	0.15	0.2
CV	83%	59%	94%

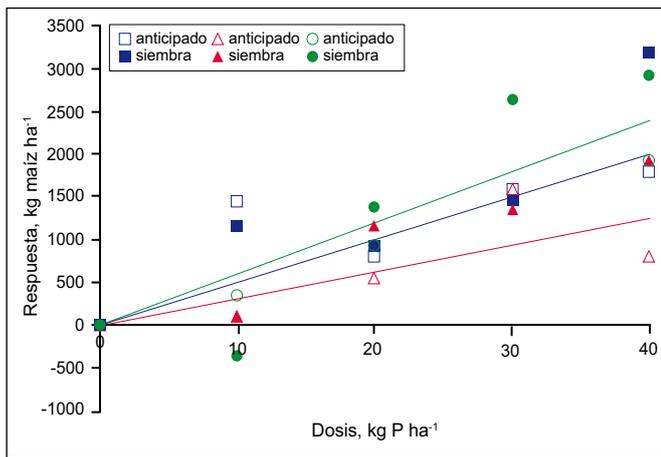


Figura 1. Respuesta de rendimiento en grano en función de la dosis de P al voleo. Campañas 2009/10 (cuadrados), 2010/11 (triángulos) y 2011/12 (círculos). Los símbolos vacíos representan las aplicaciones anticipadas y los símbolos llenos las aplicaciones a la siembra. La representación se realiza con una sola regresión por campaña ya que no difiere de la representación con dos regresiones (momento de aplicación).

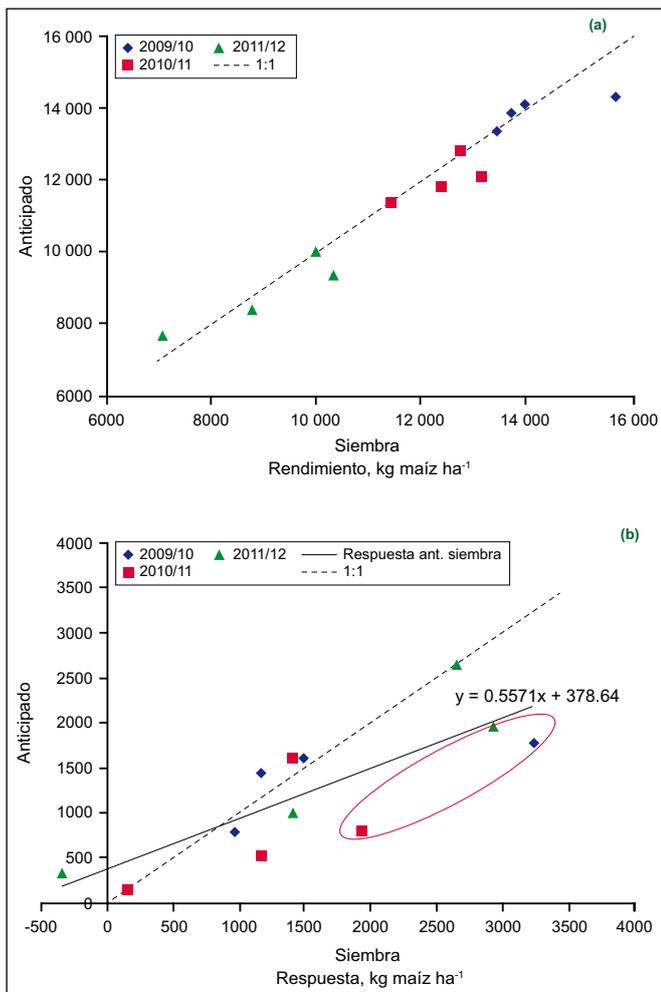


Figura 2. Relación entre el rendimiento (a) y la respuesta (b) de los tratamientos con aplicaciones al voleo anticipado vs a la siembra. Los puntos alineados en torno a la relación 1:1 indican ausencia de diferencia entre ambos momentos de aplicación. Campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12. Los puntos dentro de la elipse corresponden a la dosis de 40 kg P ha⁻¹.

y otro con una función por campaña (común a ambos momentos de aplicación). Los resultados arrojaron que no hubo diferencias entre ambos modelos ($p = 0.16$), con lo cual la representación entre respuesta de rendimiento en grano y dosis se realizó con una sola función por campaña (**Figura 1**).

Se realizaron comparaciones de los momentos de aplicación graficando los rendimientos de la aplicación anticipada vs aplicación a la siembra. En la **Figura 2a** se observa que los puntos estuvieron alineados sobre la recta 1:1, indicando que ambos momentos de aplicación presentaron un comportamiento similar, y a través de un test t se determinó que la pendiente de la recta de los momentos de aplicación no difirió de 1 ($p = 0.18$). Sin embargo, cuando se graficaron las respuestas (**Figura 2b**), la pendiente fue significativamente menor que 1 ($p < 0.01$), sugiriendo que las respuestas fueron mayores con las aplicaciones a la siembra, para los valores más altos de respuesta.

Los puntos que más se separan de la línea 1:1 son los correspondiente a la dosis más alta de P (40 kg P ha⁻¹), lo que sugiere que sólo con estas altas dosis se esperaría observar una diferencia en respuesta a favor de la aplicación a la siembra. Por otro lado, en el rango de dosis más comúnmente usado en este cultivo, no se observaron diferencias entre momentos de aplicación. Las diferencias promedio de rendimiento entre las aplicaciones anticipadas y a la siembra para las tres campañas fueron de tan sólo 289 kg ha⁻¹ a favor de las aplicaciones a la siembra. Por lo tanto, es de esperar que, en suelos Hapludoles de textura franco arenosa, la aplicación anticipada, en los lapsos mencionados, no generen retención del P de gran magnitud así como tampoco generen una mayor disponibilidad del P en solución. Similares resultados hallaron Mallarino et al. (2009) trabajando en una red de 20 ensayos con maíz y soja en Iowa (EE.UU.); donde tampoco detectaron diferencias en rendimiento ni en materia seca acumulada en estadios iniciales de los cultivos por efecto del momento de aplicación del fertilizante utilizando dosis muy similares a las de este estudio (0,10, 20,30, 40 y 50 kg P ha⁻¹).

Respecto a la ubicación del fertilizante, en ninguna de las tres campañas se observó un efecto significativo sobre el rendimiento (**Tablas 3 y 4**). Sin embargo, los rendimientos de los tratamientos con la ubicación del P en la línea de siembra tendieron a ser ligeramente superiores respecto a las aplicaciones al voleo, 7.5% ($p = 0.08$) y 11.3% para las campañas 2010/11 y 2011/12, respectivamente. Durante la campaña 2010/11 se registraron restricciones hídricas durante octubre, noviembre y diciembre, periodo en el cual las precipitaciones fueron casi del 60% inferiores respecto a las precipitaciones históricas de ese mismo trimestre. Por otro lado, en la campaña 2011/12, los meses de octubre y noviembre fueron normales pero diciembre se caracterizó por la ausencia total de precipitaciones. Estos resultados sugieren que en los dos años más secos hubo una tendencia a un

Tabla 6. Eficiencia de uso de P (EUP, b) expresada como la relación entre la respuesta de rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y la dosis de P en los experimentos de las campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12. Comparación entre momentos de aplicación.

MODELO: $y = b x$	b (EUP)	p	R ²
MODELO 1: 6 funciones		< 0.01	0.81
Función anticipado 2009/10	50.07		
Función siembra 2009/10	68.43		
Función anticipado 2010/11	30.72		
Función siembra 2010/11	47.47		
Función anticipado 2011/12	59.89		
Función siembra 2011/12	73.84		
MODELO 2: 3 funciones		< 0.01	0.76
Función anticipado y siembra 2009/10	59.25		
Función anticipado y siembra 2010/11	39.10		
Función anticipado y siembra 2011/12	66.86		
Diferencia*			0.16

* Una diferencia no significativa ($p > 0.05$) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta (y) y dosis de P (x).

mejor desempeño de la aplicación incorporada en la línea probablemente debido a una menor actividad radical cercana a la superficie del suelo. En tal sentido, se necesita investigar más al respecto para determinar si hay una relación causal entre el efecto de la ubicación del fertilizante fosforado y la humedad del suelo.

Conclusiones

Las aplicaciones anticipadas de P presentaron similares rendimientos que las aplicaciones a la siembra. Esto sugiere que en suelos con baja capacidad de fijación de P podrían esperarse similar eficiencia en estrategias que anticipen la aplicación de P en cobertura como en aquellas en que el fertilizante es colocado al momento de la siembra. Por otra parte, las respuestas tendieron a ser levemente superiores con las aplicaciones a la siembra, y con la dosis más alta de P, lo que indica que hubo cierto grado de retención del P aplicado anticipadamente, respecto al aplicado a la siembra. En función de la ausencia de diferencias en los rendimientos, las eficiencias en el uso del P (EUP) no variaron según el momento de aplicación.

Bibliografía

Barbagelata, P.A., y R.J.M. Melchiori. 2008. Efecto de la forma de aplicación del fósforo sobre el rendimiento de trigo en Entre Ríos. VII Congreso Nacional de Trigo, Santa Rosa, La Pampa.

Barbieri, P.A., H.E. Echeverría, y H.R. Saíenz-Rozas. 2006. Métodos de colocación de fósforo en el cultivo de maíz bajo siembra directa. Actas del XX congreso de la AACs. Salta, Argentina.

Bordoli, J.M., y A.P. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron.J.* 90: 27-33.

Darwich, N. 1998. Fósforo: Un nutriente esencial para las plantas. En: Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. p. 65-94. ISBN 950-43-9178-8. Mar del Plata, Argentina.

Fariña Núñez, J.R. 1997. Soja, la importancia de la ubicación del fertilizante. *Revista Fertilizar* N° 8. p 4-7.

Mallarino, A.P. 1997. Manejo de fósforo, potasio y starters para maíz y soja en siembra directa. 5° Congreso Nacional de AAPRESID. Mar del Plata. p. 11-19.

Mallarino, A.P., S.R. Barcos, J.R. Prater, y D.J. Wittry. 2009. Timing of broadcast phosphorus fertilization for no-till corn and soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:2143-2150.



Cultivo de Maíz próximo a cosecha