

EFFECTOS DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN SOBRE LOS RENDIMIENTOS, EL BALANCE DE NUTRIENTES Y SU DISPONIBILIDAD EN LOS SUELOS

Gustavo N. Ferraris¹, Lucrecia Couretot¹, Mirta Toribio² y Ricardo Falconi³
¹Area Desarrollo Rural EEA INTA Pergamino, ²Profertil S.A., ³El Ceibo Cereales S.A.
 nferraris@pergamino.inta.gov.ar

Introducción

El nitrógeno (N) es el principal elemento requerido para la producción de los cultivos de grano en la Región Pampeana Argentina. Deficiencias de este elemento reducen la expansión foliar, provocan su prematura senescencia y afectan la tasa fotosintética, dando como resultado una menor producción de materia seca y rendimiento. Por otra parte, la disponibilidad de N afecta su concentración en el grano, interviniendo en la determinación del contenido proteico, parámetro principal para definir la calidad comercial. La incidencia del N sobre los dos factores, rendimiento y contenido de proteína, hacen que su manejo sea estratégico para la producción de todos los cultivos.

Las estrategias de fertilización con fósforo (P) implementadas en Argentina han determinado un balance negativo por el retiro de cantidades importantes con los granos que no son repuestas al sistema. Por este motivo, desde principios de la década del 80, la disponibilidad de este nutriente en suelos de la región originalmente bien provistos, ha disminuido marcadamente y, como consecuencia, en los últimos años aumentó el uso de fertilizantes fosforados.

El diseño de estrategias que contemplen la reposición de las cantidades de nutrientes exportadas con los granos es prioritario, así como la restitución paulatina mediante fertilización cuando los niveles se encuentren por debajo de los umbrales críticos sugeridos. Las rotaciones de doble cultivo con inclusión de cereales de invierno brindan una buena oportunidad para la implementación de estrategias de reposición de nutrientes, ya que su elevado potencial productivo con frecuencia permite obtener un diferencial de respuesta que compensa la mayor inversión en fertilización.

Las respuestas al agregado de azufre (S) en cultivos de maíz en el sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires se han vuelto más frecuentes en las últimas campañas (Fontanetto, 2004; Salvaggiotti et al., 2004; Martínez y Cordone, 2005; Ferraris et al., 2005), por lo que la fertilización con este nutriente es habitual en lotes de alta producción.

Las situaciones de baja disponibilidad de N, P y S no ocurren de manera aislada, sino que se combinan de diversas maneras, por lo que es necesario evaluar la respuesta a la fertilización y conocer los cambios de los niveles de nutrientes en los suelos de manera conjunta.

Con el propósito de estudiar la evolución de los rendimientos en el tiempo, el balance de nutrientes y las propiedades químicas del suelo, se diseñó un ensayo de estrategias de fertilización en la secuencia maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja. El proyecto se inició en la campaña 2006/07, siendo maíz el primer cultivo implantado, seguido de soja en el ciclo 2007/08 y trigo/soja en 2008/09. Los objetivos planteados durante el tercer año fueron 1. Determinar la evolución de los niveles de N, P, S, MO y pH del suelo de acuerdo con las estrategias de fertilización y los rendimientos obtenidos en los cultivos previos, 2. Evaluar el efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento y la calidad de trigo, y sus efectos residuales en soja de se-

gunda, 3. Cuantificar y valorizar el balance de nutrientes luego de cuatro cultivos, y 4. Realizar una evaluación económica integrando toda la secuencia.

Materiales y métodos

El ensayo es conducido en la localidad de Arribeños, partido de General Arenales y se mantendrá por un plazo mínimo de cuatro años, abarcando una rotación maíz-soja-trigo/soja de 2da. – cebada/soja de 2da. Los tratamientos se plantearon en un diseño en bloques al azar, con cuatro repeticiones (Tabla 1).

En el ciclo 2008-09, las variedades sembradas de trigo fueron Baguette 11 Premium y de soja de segunda Nidera 4613 RG. Los fertilizantes fueron agregados a la siembra del primer cultivo (trigo), contemplando las necesidades de la rotación trigo-soja. Las dosis de fertilizante aplicado se presentan en la Tabla 1.

Los fertilizantes nitrogenados, fosforados y azufrados se aplicaron al voleo al momento de la siembra del cultivo de trigo. Como fuentes se utilizaron urea granulada (46-0-0), superfosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0) y sulfato de calcio (SC, 0-0-0-18S).

Determinaciones realizadas

En el suelo

Previo a la siembra, se extrajo una muestra compuesta (0-20 cm) de cada parcela en cada uno de los bloques, y sobre ella se determinó el pH y los contenidos de materia orgánica (MO), P disponible (Bray I), N total, N-nitratos y S-sulfatos.

En el cultivo

A cosecha se evaluó el rendimiento y sus componentes, número y peso de los granos. En una muestra de grano de cada parcela se cuantificó el contenido de N, P y S. Con los datos de rendimiento, concentración de nutrientes en grano y dosis aplicada de los mismos se realizó un balance de nutrientes.

Resultados y discusión

Breve descripción de los resultados de años anteriores

A. Primer año de ensayos. Rendimientos de maíz y su efecto sobre el balance de nutrientes y las propiedades químicas del suelo

Se determinaron diferencias significativas entre tratamientos para los rendimientos del cultivo de maíz implantado durante la campaña 2006-07 ($P < 0,001$; Figura 1). Los tratamientos de máxima dosis de N alcanzaron los mayores niveles de productividad, no difiriendo significativamente entre sí (Figura 1). Mayor información sobre los resultados de esta campaña 2006/07 están disponibles en Ferraris et al. (2008).

A partir de las dosis de NPS agregadas y la extracción de nutrientes cuantificada en base a los rendimientos y

la concentración de los distintos elementos en grano, se puede establecer el balance de nutrientes (Tabla 2).

Luego de la cosecha de maíz y previo a la siembra de soja, se realizó un análisis completo de suelo por parcela, cuyos datos en promedio se consignan en la Tabla 3.

El P es el nutriente que es más fácilmente cuantificable en cuanto a cambios en su concentración asociados a procesos de ganancia o empobrecimiento en el suelo. Luego de un año del ensayo, los tratamientos de reposición (T3, T4, T5) presentaron un mayor nivel de P en el suelo con relación a los tratamientos de suficiencia. Los rendimientos no se asociaron al nivel de N, S, pH y MO a la cosecha del ensayo (datos no presentados).

Se logró ajustar una relación entre el nivel de P disponible (Bray 1, 0-20 cm) y el balance de P generado en los diversos tratamientos (Figura 2). La inversa de la pendiente de este modelo representa la dosis de P necesaria para elevar la disponibilidad del nutriente en una unidad. Conforme a la función ajustada, sería necesario agregar 10.7 kg P ha⁻¹ para incrementar el nivel en el suelo en 1 mg P kg⁻¹.

B. Segundo año de experimentación. Soja de Primavera. Campaña 2007/08

En el cultivo de soja, las estrategias de fertilización determinaron diferencias significativas en los rendimientos (P<0.001; CV= 6.1 %). El tratamiento de máxima (T5, reconstrucción de P) superó significativamente al resto de los tratamientos fertilizados y, a la vez, éstos superaron al testigo (Figura 3).

El rendimiento de soja del tratamiento con máxima fertilización superó al testigo en un 29%; porcentaje menor al logrado por el rendimiento de maíz con máxima fertilización con respecto al testigo (49%). La respuesta medida en soja superó la magnitud de los incrementos medios directos (es decir, en ensayos de un año que no consideran efectos residuales) observados en la región. Las diferencias en soja serían atribuibles al efecto residual y directo del P y S aportados al antecesor maíz y a la soja del presente año, respectivamente. A la vez, es esperable una mejora en las propiedades físicas y biológicas en los tratamientos de mayores aportes de nutrientes, así como un incremento en la adquisición de otros nutrientes no monitoreados en esta experiencia, como consecuencia de los mayores niveles de crecimiento aéreo y radicular, y el superior aporte de residuos derivados de un tratamiento con mayores rendimientos.

Con los datos de concentración de nutriente en grano, rendimientos y dosis aplicada de cada nutriente es posible conocer el balance para cada tratamiento (Tabla 4). El balance de N fue negativo para todas las estrategias, si no se considera el aporte por fijación biológica (FBN). Aún ponderando los ingresos vía este mecanismo, difícilmente podría ser compensada la extracción de N. En S, los tratamientos testigo y de mínima reflejaron un balance negativo (T1, T2), mientras que aquellos que proveían la reposición sobreestimaron la extracción del nutriente dando como resultado un balance positivo (T3, T4, T5). En el caso de P, tal la tendencia esperada, el

Tabla 1. Tratamientos y dosis (kg ha⁻¹) de nitrógeno, fósforo y azufre aplicados en trigo para la secuencia trigo-soja. Estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos, Arribeños, General Arenales. Campaña 2008/09, tercer año de ensayos.

Criterio de fertilización		Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Azufre (S)	Urea (46-0-0)	SPT (0-20-0)	SC (0-0-0-18S)
		kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
T1	Testigo sin fertilización	0 + 0 [#]	0 + 0	0 + 0	0 + 0	0 + 0	0 + 0
T2	Tecnología Uso Actual	46 + 0	16 + 0	0 + 0	100 + 0	80 + 0	0 + 0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	78 + 0	16 + 15	7 + 8	169 + 0	80 + 77	38 + 45
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	103 + 0	20 + 22	9 + 11	223 + 0	100 + 108	47 + 63
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	103 + 0	36 + 22	9 + 11	223 + 0	180 + 108	47 + 63

[#] El primer número indica la dosis para trigo y el segundo indica la dosis para soja.

Tabla 2. Balance de nitrógeno, fósforo y azufre (kg ha⁻¹) para los diferentes tratamientos en el primer año de ensayo. Los datos de rendimiento y concentración de nutrientes en grano de maíz fueron ajustados a 13 % de humedad.

Tratamiento	Agregado (kg ha ⁻¹)			Extracción (kg ha ⁻¹)			Balance (kg ha ⁻¹)		
	N	P	S	N	P	S	N	P	S
T1	0	0	0	82	23	6.5	-81.9	-22.7	-6.5
T2	46	16	46	102	27	6.4	-56.2	-10.9	-6.4
T3	69	30	69	115	26	8.3	-46.3	3.6	9.7
T4	89	36	89	138	28	9.1	-49	8.3	12.9
T5	89	52	89	154	34	9.7	-65.2	18.4	12.3

Tabla 3. Análisis de suelo (0-20 cm) luego de la cosecha de maíz y previo a la siembra de soja (julio 2007). Los datos son el promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	MO (%)	pH	N total (%)	N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)
T1	2.66	5.8	0.133	5.6	7.6	9.6
T2	2.64	5.6	0.133	6.7	7.8	9.1
T3	2.83	5.7	0.142	7	11.2	8.2
T4	2.72	5.6	0.136	6.2	10.4	9.4
T5	2.53	5.6	0.127	9.2	10.5	10

balance fue muy negativo para T1 (testigo), ligeramente negativo en T2, próximo a la neutralidad en T3 y T4 y marcadamente positivo en el tratamiento de reconstrucción, T5 (Tabla 4). Si el balance de P se relaciona con la disponibilidad de este elemento determinada en el suelo a cosecha (Tabla 5), se puede medir la tasa de cambio en función de la extracción o reposición del nutriente luego de dos años. La inversa de la pendiente que relaciona estos parámetros indica la dosis de P que es necesario agregar para variar en 1 mg kg^{-1} la disponibilidad del nutriente en el suelo. De acuerdo con este análisis, por cada 9.9 kg P ha^{-1} de diferencia entre el agregado y extraído, el nivel de P en suelo cambiaría en una unidad (Figura 4). Esta tasa de cambio, observada luego de dos años, no difiere demasiado del valor registrado para el primer año (Figura 2).

Campaña de trigo/soja 2008/09

Caracterización agroclimática de la campaña

El ciclo 2008-09 se caracterizó por presentar escasas precipitaciones, temperaturas y evapotranspiración potencial (ETP) elevadas, así como baja humedad relativa. Las precipitaciones sumaron 240 mm en el periodo julio-noviembre 2008 y 283 mm en el periodo diciembre 2008-marzo 2009. Sumado a una reducida reserva hídrica inicial, este panorama climático determinó condiciones de sequía permanente en ambos cultivos. Las altas temperaturas provocaron además arrebato y un corto periodo de llenado en trigo, lo que deprimió los rendimientos y provocó altas concentraciones de proteína en grano. En soja, la madurez fue desuniforme, el peso de los granos bajo, y la calidad comercial fue muy afectada.

Rendimientos, balance de nutrientes y cambios en la disponibilidad de P en suelo

A pesar de las condiciones ambientales desfavorables, se cuantificaron diferencias significativas en los rendimientos de trigo ($P < 0.001$; $CV = 7\%$) (Figura 5). Dado que la eficiencia de uso de N (EUN) para rendimiento fue baja, de lo cual da cuenta el alto contenido de proteína, los efectos residuales de los nutrientes agregados en los dos años previos habrían sido un factor relevante en la diferencia de rendimiento entre tratamientos. Otra causa del contraste en los rendimientos sería el

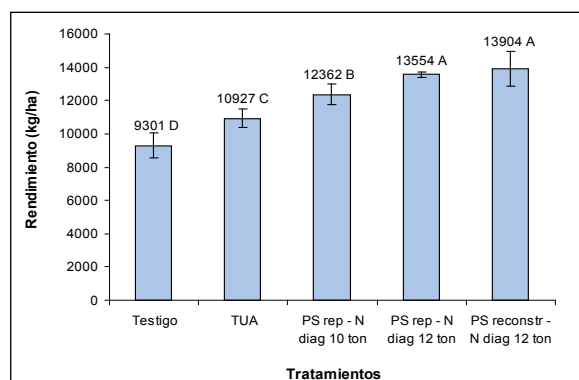


Figura 1. Rendimiento de grano de diferentes estrategias de fertilización aplicadas en maíz. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$). Las barras verticales representan el desvío estándar de la media. Ensayo de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Primer año. Arribeños, General Arenales. Campaña 2006/07 (Ferraris et al., 2008).

mayor aporte de residuos en los mejores tratamientos durante los años anteriores, lo que ayudó a conservar la humedad y disminuir la temperatura en el suelo durante las etapas más críticas del cultivo. Es decir, más que una respuesta directa a la fertilización, es probable que factores químicos, físicos y biológicos hayan interactuado para crear un ambiente de mejor crecimiento en los tratamientos con mejor historia de fertilización y rendimiento, contribuyendo a mitigar el estrés hídrico al que se vio sometido el cultivo. Similar reflexión cabría para el comportamiento de la soja de segunda (Figura 6), cultivo en el cual a pesar de los bajos rendimientos, se observaron igualmente diferencias significativas entre tratamientos ($P=0.005$; $CV=19.6\%$).

La productividad acumulada de la secuencia de cultivos acompañó la tendencia de dosis e inversión en fertilizantes (Figura 7), incrementando los rendimientos en forma sistemática. Aún la estrategia de recomposición de P, proyectada para mejorar los niveles del nutriente y los rendimientos del cultivo en el mediano y largo plazo, mostró en este breve ciclo analizado una diferenciación con relación a la estrategia anterior.

Los diferentes tratamientos generaron balances de nu-

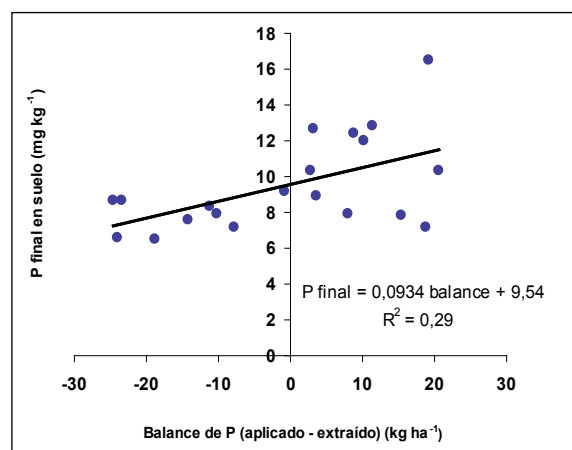


Figura 2. Relación entre el nivel de P en suelo a cosecha (mg kg^{-1}) y el balance de P (aplicado-extraído en kg ha^{-1}) determinado en cada tratamiento. Campaña 2006-07, primer ciclo de cultivo.

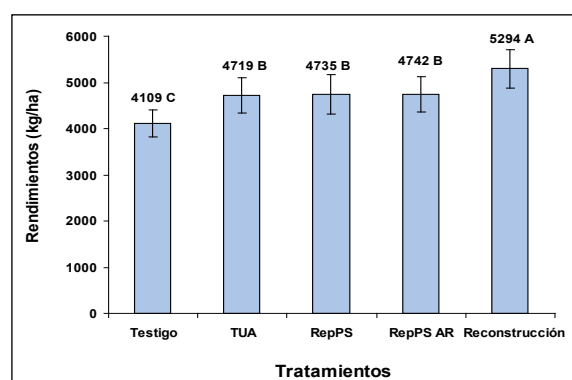


Figura 3. Rendimiento de soja como resultado de diferentes estrategias de fertilización. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$). Las barras verticales representan el desvío estándar de la media. Ensayo de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Segundo año de experimentación. Arribeños, General Arenales. Campaña 2007/08.

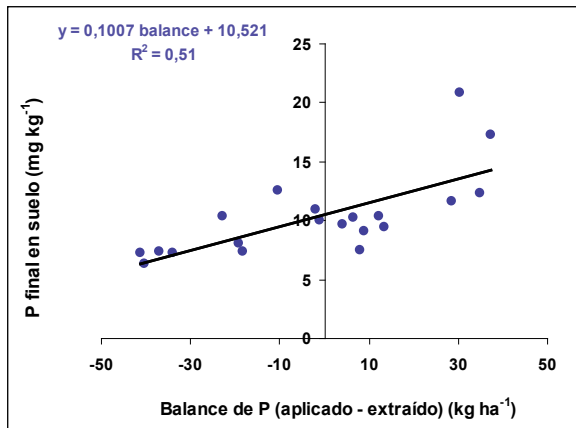


Figura 4. Relación entre el nivel de P en suelo a cosecha (mg kg^{-1}) luego de dos años –secuencia maíz-soja- y el balance de P (aplicado-extraído en kg ha^{-1}) determinado en cada tratamiento. Campaña 2007-08, segundo ciclo de cultivo.

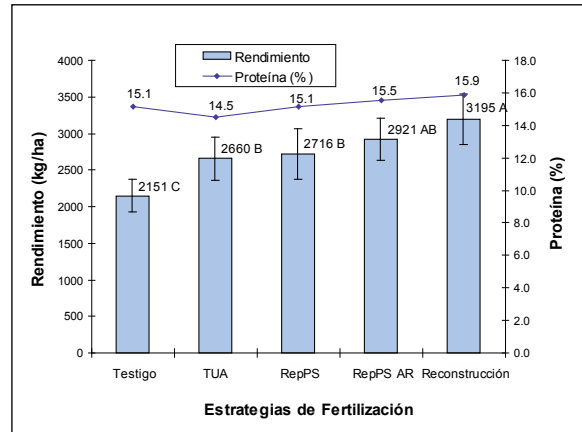


Figura 5. Rendimiento (kg ha^{-1}) y concentración de proteína (%) en grano de trigo como resultado de diferentes estrategias de fertilización. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$). Las barras verticales representan el desvío estándar de la media. Ensayo de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Tercer año de experimentación. Arribeños, General Arenales. Campaña 2008/09.

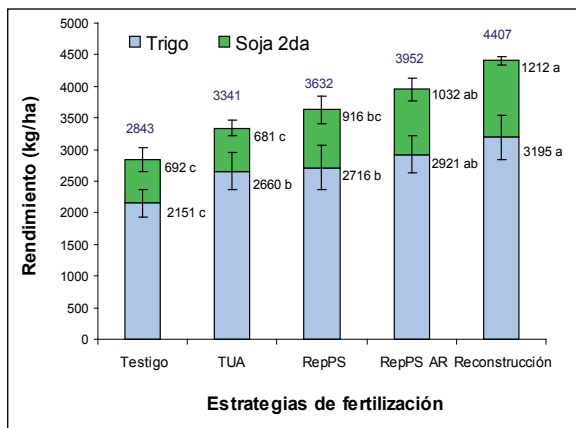


Figura 6. Rendimiento (kg ha^{-1}) de grano de trigo y soja de segunda por la implementación de diferentes estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Dentro de cada cultivo, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$). Las barras verticales representan el desvío estándar de la media. Ensayo de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Tercer año de experimentación. Arribeños, General Arenales. Campaña 2008/09.

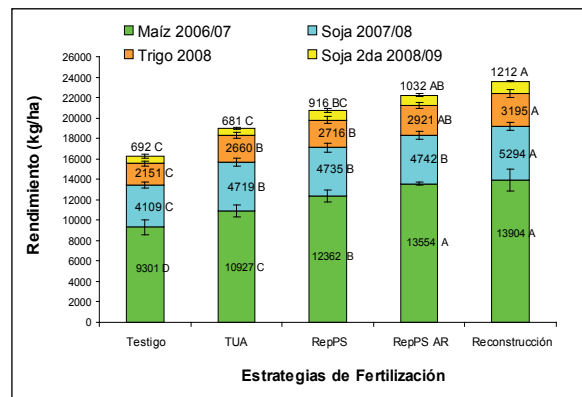


Figura 7. Producción media (kg ha^{-1}) por cultivo acumulada en una secuencia maíz-soja-trigo/soja de diferentes estrategias de fertilización. Dentro de cada cultivo, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$). Las barras verticales representan el desvío estándar de la media. Arribeños, General Arenales. Campaña 2008/09.

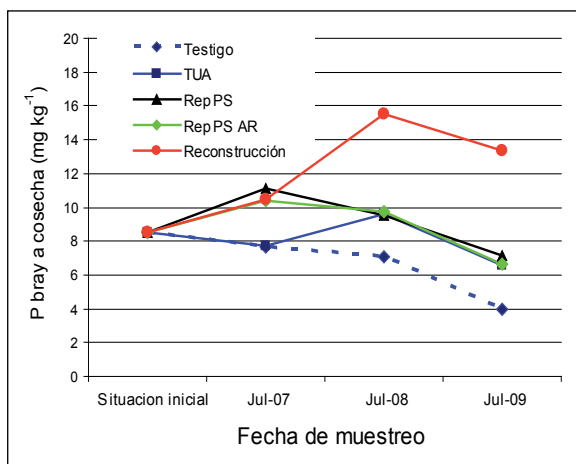


Figura 8. Evolución del P disponible en suelo (Bray-1, 0-20 cm) luego de tres campañas y cuatro cultivos. Los valores presentados son el promedio de cuatro repeticiones.

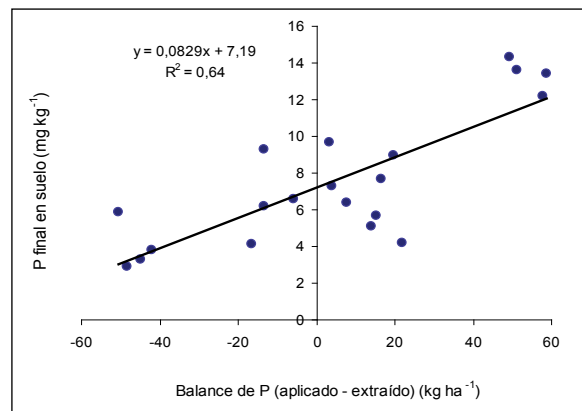


Figura 9. Relación entre el nivel de P en suelo a cosecha (mg kg^{-1} , 0-20 cm) y el balance de P (aplicado-extraído en kg ha^{-1}) utilizando los valores provenientes de cada parcela, luego de tres campañas –cuatro cultivos-. Arribeños, General Arenales, julio de 2009.

trientes más favorables con relación a los años anteriores, producto de un rendimiento observado menor al estimado al diseñar las estrategias (Tabla 7). El balance fue negativo para N si no se contemplan los aportes por FBN. En el caso de S, las estrategias confirmaron la tendencia observada en años previos de balance negativo en T1 y T2, y positivo en T3, T4 y T5. Para el caso de P, solo el testigo reflejó un balance negativo, dada la escasa extracción realizada por los cultivos durante esta campaña.

Luego de la cosecha de soja y previo a la siembra de trigo, se realizó un análisis completo de suelo por parcela, cuyos datos promediados se consignan en la Tabla 8. Es curioso observar como, después de un año de escasos aportes de residuos y modesta extracción de P, los valores de materia orgánica aumentan (Tablas 5 y 8) y los de este nutriente disminuyen (Tablas 5 y 7, Figura 8) con relación a la campaña precedente. Como hipótesis podría sugerirse una menor mineralización de la fracción orgánica, motivada por un otoño e invierno con bajas temperaturas y muy escasas precipitaciones. La reducción en la disponibilidad de S-sulfatos para esta campaña apoyaría este razonamiento. Es posible que un menor aporte por mineralización fuera la causa de la reducción en el nivel de P en todos los tratamientos, si bien el P orgánico no es una fuente de abastecimiento importante en suelos con larga historia agrícola en la región noroeste de Buenos Aires.

Después de tres secuencias y cuatro cultivos, la relación entre la disponibilidad final de P y el balance acumulado en cada parcela permite presentar una medida de la tasa de cambio del nutriente en el mediano plazo, sugerir qué dosis es necesario agregar para recomponer la

disponibilidad del nutriente a un nivel que se fije como objetivo, y servir de base como criterio de recomendación. La inversa de la pendiente de esta relación sugiere la tasa de cambio. La dosis que surge como necesaria para incrementar la disponibilidad de P en 1 mg kg⁻¹ después del ciclo 2008/09 alcanza a 12 kg P y es mayor a la propuesta en años anteriores (10.7 y 9.9 kg P para los registros de 2007 y 2008 luego de uno y dos años de ensayo, respectivamente) producto de un bajo nivel final de P en un año de balance positivo para la mayoría de las estrategias (Figura 9).

Análisis económico

En la Tabla 8 se presentan los aportes de nutrientes realizados en cada estrategia. A su vez, se analiza la diferencia de rendimiento, su valoración económica y el costo adicional de pasar a una estrategia mejorada con relación a la anterior (i.e. T2 vs T1, T3 vs T2 y así sucesivamente), lo mismo que el beneficio o perjuicio económico que origina este incremento en la fertilización. En maíz, incrementar la fertilización mejoró el resultado económico para todas las estrategias. En soja de primera y el trigo posterior, los tratamientos T2 y T5 aumentaron la rentabilidad con relación a la estrategia precedente. Por su parte, en soja de segunda T3, T4 y T5 incrementaron la rentabilidad con relación al tratamiento anterior. Como resumen de toda la secuencia, mejorar la estrategia de fertilización otorgó un beneficio marginal, siendo los tratamientos más destacados T2 y sorprendentemente, la estrategia de reconstrucción de P (T5), favorecidos en ambos casos por el excelente resultado obtenido en el cultivo de soja

Tabla 4. Balance de nitrógeno, fósforo y azufre (kg ha⁻¹) para los diferentes tratamientos en el segundo año de ensayo. Los datos de rendimiento y concentración de nutrientes en grano fueron ajustados a 13 % de humedad.

Tratamiento		Agregado (kg ha ⁻¹)			Extracción (kg ha ⁻¹)			Balance (kg ha ⁻¹)		
		N	P	S	N	P	S	N	P	S
T1	Testigo	0	0	0	238	15.4	5.8	-238	-15.4	-5.8
T2	TUA	0	16	0	271	22.8	6	-271	-6.8	-6
T3	PS rep - N diag 10 t	0	22	12	279	23.3	7.5	-279	-1.3	4.5
T4	PS rep - N diag 12 t	0	26	15	272	24.2	7.8	-272	1.8	7.2
T5	PS reconstr - N diag 12 t	0	42	15	306	27.8	8.3	-306	14.2	6.7

Tabla 5. Análisis de suelo (0-20 cm) luego de la cosecha de soja y previo a la siembra de trigo (julio 2008). Los datos son promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	MO (%)	pH	N total (%)	N-NO ₃ 0-40 cm (kg ha ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)
T1	2.39	5.7	0.12	42.9	7.1	9.8
T2	2.27	5.6	0.114	39.5	9.6	9.1
T3	2.39	5.5	0.12	40.4	9.6	10.1
T4	2.25	5.6	0.113	43.8	9.8	10.7
T5	2.17	5.6	0.109	36.5	15.5	10.6

Tabla 6. Balance de nitrógeno, fósforo y azufre (kg ha⁻¹) para los diferentes tratamientos en el tercer año de ensayo. Los nutrientes fueron aplicados a la siembra de trigo, pero contemplan las necesidades del doble cultivo. La extracción surge de contabilizar las cantidades removidas por el doble cultivo trigo-soja. Los datos de rendimiento y concentración de nutrientes en grano fueron ajustados a 13 % de humedad.

Tratamiento		Agregado (kg ha ⁻¹)			Extracción (kg ha ⁻¹)			Balance (kg ha ⁻¹)		
		N	P	S	N	P	S	N	P	S
T1	Testigo	0	0	0	84.9	8.3	4.1	-82.6	-8.1	-4.2
T2	TUA	46	16	0	93.1	10.6	4.6	-29.1	6.4	-4.2
T3	PS rep - N diag 10 ton	78	31	15	109.5	11.1	5.6	-9.3	20.6	10
T4	PS rep - N diag 12 ton	103	42	20	122.6	11.9	6	-18.9	29.3	13.8
T5	PS reconstr - N diag 12 ton	103	58	20	141.5	14.6	7.2	-20	45.5	13.9

(Figura 3). T3 y T4 mostraron su mejor performance en maíz lo cual se trasladó a toda la secuencia. Estos resultados evidencian cómo el maíz es un cultivo apropiado para incrementar las dosis de fertilizante con el objetivo de mejorar la fertilidad, ya que es probable obtener una consecuente mejora en los rendimientos que permita pagar los mayores costos de fertilización. Como atenuante cabe acotar que la siembra de maíz se correspondió con una excelente campaña climática, en contraste con la sequía que afectó a la secuencia trigo/soja, siendo ésta la rotación alternativa al maíz con alta demanda de nutrientes y fuerte expectativa de respuesta a la fertilización.

Consideraciones finales

- * Las estrategias de fertilización impactaron en los rendimientos, modificaron el balance de nutrientes y se correlacionaron con los niveles finales de P en suelo.
- * Estrategias de suficiencia, reposición o reconstrucción de P generaron cambios previsible en su disponibilidad en el suelo. Luego de tres años de experimentación, la tasa de cambio fue de 1 mg kg^{-1} de P Bray (0-20 cm) por cada 12 kg P ha^{-1} de diferencia entre agregado y extracción. Este valor es superior con relación al observado a la cosecha de los cultivos precedentes, después de uno ($10.7 \text{ kg P ha}^{-1}$) o dos (9.9 kg P ha^{-1}) años de experimentación.
- * El incremento en las dosis de fertilización como resultado de pasar a una estrategia superior en todos los casos mejoró la rentabilidad de la secuencia analizada globalmente. El cultivo de maíz lideró esta tendencia, apareciendo como el cultivo más apropiado para mejorar la estrategia de fertilización con el objetivo de mejorar la fertilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, es factible obtener un incremento en los rendimientos de maíz que permita amortizar los mayores costos de fertilización.

Agradecimientos

A Profertil S.A. por la financiación de esta investigación y a El Ceibo Cereales (Arribeños, Buenos Aires) por prestar un campo de su propiedad para la realización de este ensayo de larga duración.

Referencias

- Martínez F. y G. Cordone.** 2005. Avances en el manejo de la fertilización de cultivos y fertilidad de suelos en el sur de Santa Fe. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Ferraris G., L. Couretot, M. Toribio y R. Falconi.** 2008. Efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento de maíz y el balance de nutrientes en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires Campaña 2006/07. Informaciones Agronomicas 37:20-22.
- Ferraris G., F. Gutierrez Boem, P. Prystupa, F. Salvagioti, L. Couretot y D. Dignani.** 2005. Fertilización azufrada en maíz. Actas VIII Congreso Argentino de Maíz. Rosario, Sante Fe, Argentina.

Fontanetto H. 2004. Nutrición de los cultivos y manejo de la fertilidad del suelo en la región central de Santa Fe. En: Actas Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. INPOFOS Cono Sur. Pag. 19-25.

Salvaggiotti F., G. Gerster, S. Bacigaluppo, J. Castellarin, C. Galarza, N. González, V. Gudelj, O. Novello, H. Pedrol y P. Vallote. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. Ciencia del Suelo 22:92-101. ■

Tabla 8. Dosis de nitrógeno, fósforo y azufre aplicados en diferentes estrategias de fertilización en una secuencia maíz – soja – trigo/soja. Para cada cultivo se analiza, con relación a la estrategia inmediata precedente, el incremento marginal de rendimiento, costo e ingreso marginal de la fertilización y el resultado económico de esta comparación. La descripción de las estrategias fue presentada en la Tabla 1.

	Estrategias de Fertilización				
	T1	T2	T3	T4	T5
Maíz					
Dosis N (kg ha^{-1})	0	46	69	89	89
Dosis P (kg ha^{-1})	0	16	30	36	52
Dosis S (kg ha^{-1})	0	0	18	22	22
Δ Rendimiento		1626	1435	1192	350
Costo Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		279	243	127	121
Ingreso Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		707	624	519	152
Resultado ($\text{\$ ha}^{-1}$)		428	382	392	31
Soja Primera					
Dosis N (kg ha^{-1})	0	0	0	0	0
Dosis P (kg ha^{-1})	0	16	22	26	42
Dosis S (kg ha^{-1})	0	0	12	15	15
Δ Rendimiento		609	16	7	553
Costo Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		121	86	38	121
Ingreso Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		579	15	6	525
Resultado ($\text{\$ ha}^{-1}$)		458	-70	-32	404
Trigo					
Dosis N (kg ha^{-1})	0	46	78	103	103
Dosis P (kg ha^{-1})	0	16	16	20	36
Dosis S (kg ha^{-1})	0	0	7	9	9
Δ Rendimiento		509	57	205	275
Costo Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		279	130	122	121
Ingreso Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		300	33	121	162
Resultado ($\text{\$ ha}^{-1}$)		21	-97	-1	41
Soja Segunda					
Dosis N (kg ha^{-1})	0	0	0	0	0
Dosis P (kg ha^{-1})	0	0	15	22	22
Dosis S (kg ha^{-1})	0	0	8	11	11
Δ Rendimiento		-11	235	115	181
Costo Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		0	143	57	0
Ingreso Marginal ($\text{\$ ha}^{-1}$)		-10	223	109	171
Resultado ($\text{\$ ha}^{-1}$)		-10	80	52	171
Δ Rentabilidad acumulada (cuatro cultivos, tres campañas)		897	295	411	648

Nota: Precios utilizados para este análisis: Superfosfato triple 393 U\\$/ton; Urea 410 U\\$/ton; Sulfato de Calcio 150 U\\$/ton; Maíz \\$45/q; Soja \\$ 95/q; Trigo \\$60/q; Gastos comercialización granos 15%.

Tabla 7. Análisis de suelo (0-20 cm) luego de la cosecha de soja de segunda (julio 2009). Los datos son promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	MO (%)	pH	N total (%)	N-NO ₃ (kg ha^{-1})	P (mg kg^{-1})	S-SO ₄ (mg kg^{-1})
T1	2.61	6.1	0.132	34.8	4	7.7
T2	2.66	5.9	0.134	37.3	6.6	8.8
T3	2.75	5.9	0.138	42.3	7.1	11.3
T4	2.7	5.9	0.135	42.3	6.7	8.9
T5	2.76	5.9	0.138	44.3	13.4	10.3