

DIFERENTES ESTRATEGIAS DE FERTILIZACION AFECTAN LOS RENDIMIENTOS, EL BALANCE DE NUTRIENTES, LA FERTILIDAD QUIMICA Y RENTABILIDAD EN EL LARGO PLAZO

Gustavo N. Ferraris^{1}, Mirta Toribio², Ricardo Falconi³, Rodrigo Falcone², Federico Moriones² y María Cecilia Paolilli¹*

Palabras clave: Filosofías de fertilización, intensificación productiva y económica.

Los experimentos de fertilización se suelen evaluar a partir de la eficiencia agronómica y económica en el término de una campaña agrícola. Este enfoque tiende a subvalorar los efectos de la práctica, puesto que el agregado de nutrientes en el suelo genera un efecto residual sobre la productividad de los cultivos subsiguientes. Por el contrario, el presente trabajo cuantifica los efectos de la fertilización a lo largo de doce ciclos agrícolas. Así, los criterios para maximizar el beneficio en el largo plazo podrían resultar diferentes de aquellos utilizados habitualmente a nivel productivo.

INTRODUCCION

Las deficiencias de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) no ocurren de manera aislada sino que se combinan de diversas maneras, por lo que es necesario evaluar integralmente la respuesta a la fertilización y conocer su efecto sobre la fertilidad química de los suelos. Con el propósito de estudiar la evolución en el tiempo de los rendimientos, el balance de nutrientes, las propiedades del suelo y la rentabilidad se diseñó un ensayo de estrategias de fertilización NPS en la secuencia maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja (Mz-Sj-Tr/Sj-Ce/Sj). El proyecto se inició en la campaña 2006/07, con maíz como el primer cultivo, llegando a doce períodos completos en la campaña 2017/18. En este escrito se reporta el efecto de las diferentes estrategias de fertilización NPS sobre: 1) los rendimientos anuales durante el período 2006/07 a 2017/18; 2) los rendimientos acumulados, el balance de nutrientes y su nivel final en el suelo luego de doce años (2006/07-2017/18); 3) la eficiencia de recuperación de P; y 4) la rentabilidad.

MATERIALES Y METODOS

El ensayo es conducido en la localidad de Arribeños, partido de General Arenales. Se plantea en un diseño en bloques al azar, con cuatro repeticiones, integrando una rotación de seis cultivos en cuatro años (M-Sj-T/Sj-C/Sj). Cabe aclarar

que en el segundo ciclo de la rotación se cambió Trigo/Soja por Cebada/Soja en el orden. El inicio de la secuencia se realizó con el cultivo de maíz, durante la campaña 2006/07, llegando al décimo segundo año 2017/18 nuevamente con maíz. Los tratamientos implican cinco manejos diferentes de fertilización, donde los fertilizantes son agregados en cobertura total al momento de la siembra (**Tabla 1**). Como fuentes se utilizaron superfosfato triple de calcio (0-20-0), superfosfato simple de calcio (0-9-0-12S) y urea granulada (46-0-0). El tamaño de las parcelas es de 54 m².

Anualmente se obtuvieron muestras de suelo de 0 a 20 cm. De cada parcela, en cada uno de los bloques, se extrajo una muestra compuesta, y sobre ella se determinó el pH y los contenidos de materia orgánica (MO), P extractable (Bray I), N total, N-nitrato y S-sulfato. A cosecha se evalúan el rendimiento de los cultivos 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 DISCUSION

La productividad acumulada de la secuencia -16 cultivos en doce campañas- mantuvo su tendencia consistente en ampliar la diferencia entre

1- INTA Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, 2- Profertil S.A. Investigación y Desarrollo, 3- El Ceibo Cereales S.A. *ferraris.gustavo@inta.gob.ar

Tabla 1. Tratamientos y dosis (kg ha⁻¹) de N, P y S aplicados en promedio en los cultivos de Trigo/ Soja – Maíz – Soja. En trigo y cebada se describen las demandas del doble cultivo, pero los fertilizantes fueron aplicados en su totalidad al primero. Estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2017/18, doce años de experimentación.

		Nitrógeno (N)					
Tratamiento	Criterio de fertilización	maíz	soja	trigo	soja 2 ^{da}	cebada	soja 2 ^{da}
T1	Testigo sin fertilización	0	0	0	0	0	0
T2	Tecnología Uso Actual	46	0	46	0	46	0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	94	0	83	0	83	0
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	114	0	113	0	113	0
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	114	0	113	0	113	0
		Fósforo (P)					
Tratamiento	Criterio de fertilización	maíz	soja	trigo	soja 2 ^{da}	cebada	soja 2 ^{da}
T1	Testigo sin fertilización	0	0	0	0	0	0
T2	Tecnología Uso Actual	16	16	16	0	16	0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	30	22	16	15	16	15
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	30	26	20	22	20	22
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	46	42	36	22	36	22
		Azufre (S)					
Tratamiento	Criterio de fertilización	maíz	soja	trigo	soja 2 ^{da}	cebada	soja 2 ^{da}
T1	Testigo sin fertilización	0	0	0	0	0	0
T2	Tecnología Uso Actual	0	0	0	0	0	0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	18	12	7	8	7	8
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	18	15	9	11	9	11
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	18	15	9	11	9	11

tratamientos conforme el paso del tiempo. Así, mientras el testigo acumuló 59944 kg grano ha⁻¹, el tratamiento T5 de reconstrucción llegó a 102748

kg ha⁻¹, siendo la brecha de rendimiento de 71,4% (Figura 1). Esta brecha es superior a la observada por Correndo *et al.* (2015) en un ensayo de 14

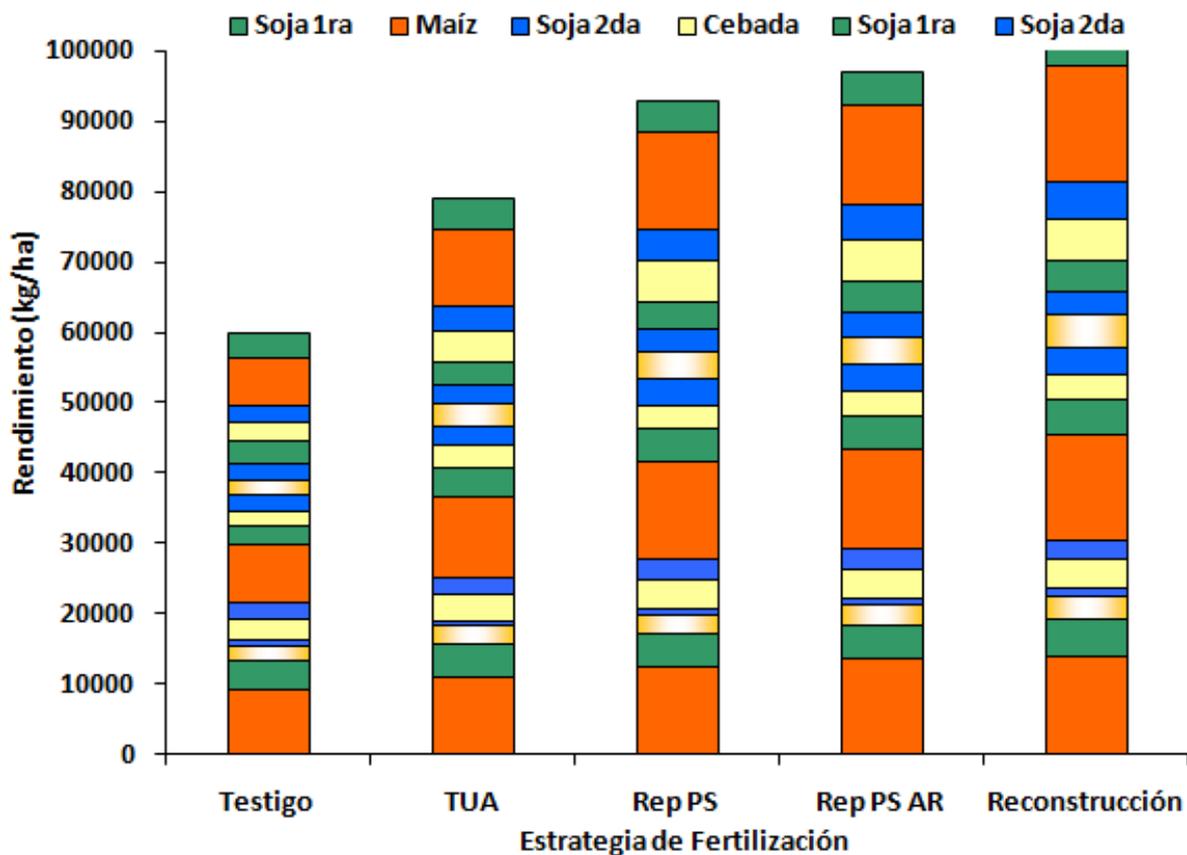


Figura 1. Producción por cultivo (kg ha^{-1}) de diferentes estrategias de fertilización acumulada en una secuencia maíz - soja - trigo/soja - cebada/soja - maíz - soja - cebada/soja - trigo/soja - soja - cebada/soja - maíz. Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2017/18.

campañas sobre un sitio de buena fertilidad en la secuencia maíz - soja - trigo/soja. Sin embargo, es inferior a la que estos mismos autores determinaron en un ambiente de menor fertilidad inicial, cultivado con la secuencia maíz - trigo/soja.

Con los datos de concentración de nutrientes en grano, los rendimientos y la dosis aplicada de cada uno de los nutrientes es posible estimar el balance para cada tratamiento. En el presente trabajo se presentan para P, ya que se trata del nutriente evaluado con mayores efectos residuales en el tiempo. La evolución de la concentración de P Bray-1 en suelo (**Figura 2**) reflejó las tendencias observadas en los balances. Incrementos muy notables en el P Bray-1 en suelo como resultado de un balance positivo de P fueron documentados por Mallarino *et al.*, (2017), quienes postulan que la tasa de incremento es superior en el rango medio de disponibilidad, y que una vez alcanzado un nivel alto es necesario agregar mayores dosis de P para mantener/aumentar su concentración en el suelo, por el permanente pasaje de P en solución o adsorbido a fracciones más estables. En el

largo plazo, estrategias de alta fertilización podrían incrementar los niveles de P más allá de los primeros 20 cm, por el reciclaje de raíces y una lenta movilidad por difusión y *bye pass* a través de macroporos, como postulan Bauke *et al.* (2018), aunque esto no fuera evaluado en el presente experimento.

El contenido de MO, N total y el pH no manifestaron cambios importantes. El testigo fue el tratamiento con niveles finales de pH más alto, de acuerdo con su menor aporte de residuos, menor exportación de bases y la ausencia de efecto acidificante de los fertilizantes (**Tabla 2**). Es probable que los plazos abarcados por esta experiencia sean todavía breves para reflejar efectos de mayor magnitud en parámetros como MO o N total. Apoyando estos resultados, el promedio de cinco sitios de una red conducida por los grupos CREA en el Sur de Santa Fe mostró luego de 13 años una caída de MO de 3,1 a 2,7 %, y un incremento en el pH de 5,7 a 6,1 en el tratamiento Testigo, en comparación con la fertilización permanente con NPS (Boxler *et al.*, 2013).

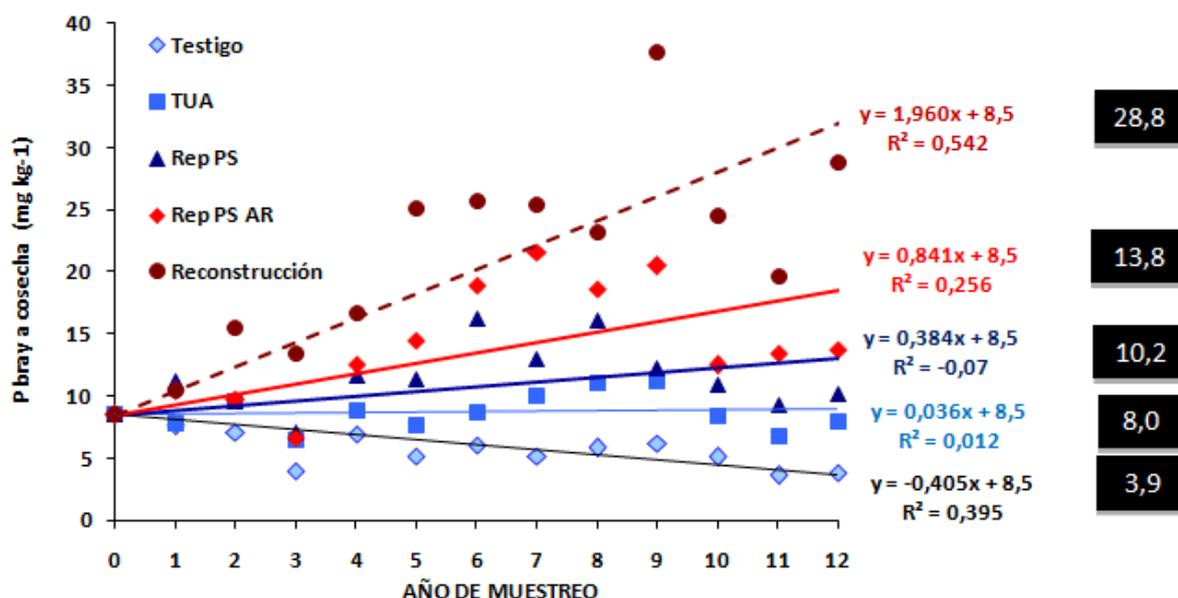


Figura 2. Evolución del P extractable en suelo (Bray-1, 0-20 cm) según estrategia de fertilización, luego de doce campañas y diecisiete cultivos, hasta la campaña 2017/18. A la derecha se indica el último valor determinado, en julio 2018.

Tabla 2. Análisis de suelo (0-20 cm) luego de doce campañas, y su comparación con el nivel al inicio del experimento. Los datos son promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	MO (%)	pH	N total (%)	N-NO ₃ ⁻ 0-40 cm (kg ha ⁻¹)	P Bray-1 (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ⁻² (mg kg ⁻¹)
Inicial	2,38	5,6	0,119	17,8	8,5	13,8
T1	2,36	6,0	0,118	38,4	3,9	6,8
T2	2,43	5,9	0,122	44,5	8,0	7,5
T3	2,49	5,8	0,124	37,8	10,2	8,5
T4	2,42	5,8	0,121	39,5	13,8	7,9
T5	2,41	5,7	0,120	41,2	28,8	8,2

La relación entre el balance de P y el nivel de P Bray⁻¹ determinado en el suelo al final de la cosecha (**Figura 3, Tabla 2**) permite estimar la tasa de cambio en función de la extracción o reposición del nutriente. La **Figura 3** muestra una función de diferente pendiente según el balance resulte positivo o negativo. La inversa de la pendiente que relaciona estos parámetros indica la dosis de P o balance negativo necesario para variar en 1 mg kg⁻¹ el nivel del análisis de P Bray-1 en el suelo. De acuerdo con este análisis, por cada **4,3 kg P ha⁻¹** por sobre lo extraído por cosecha, el nivel de P en suelo aumentaría en una unidad. Por el contrario, cuando el balance es negativo actúa el poder buffer del suelo liberando fracciones estables de P hacia formas más lábiles, y por lo tanto amortiguando la tasa de caída. Así, por

cada **5,5 kg P ha⁻¹** de balance negativo su nivel en el suelo disminuiría en 1 mg kg⁻¹ (**Figura 3**). Esta tasa de cambio ha variado sustancialmente con el tiempo, disminuyendo especialmente en los últimos años, luego de alcanzar un máximo de 11,9 kg P ha⁻¹ en 2009, después del tercer año de ensayo. Es probable que la acumulación de fracciones lábiles de P sature cargas positivas y disminuya así la retención/fijación del P aportado mediante fertilización, permitiendo ganancias de P marcadas en las estrategias ubicadas en el lado positivo del balance. Carver *et al.* (2017) destacan el valor de las rotaciones intensivas, incluyendo hasta cultivos de cobertura, con el objetivo de ciclar los nutrientes en formas orgánicas y disminuir sus pérdidas o fijación. En otros experimentos fue observado un rango de

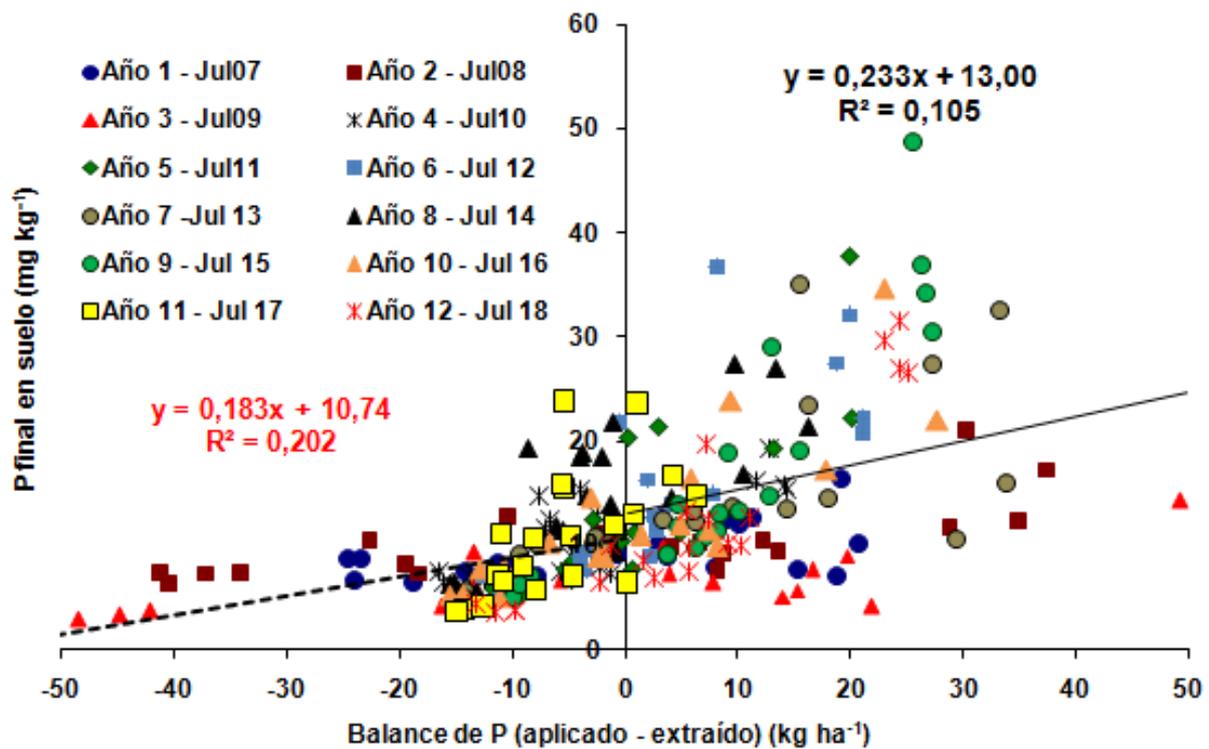


Figura 3. Relación entre el nivel de P extractable en suelo a cosecha (0-20 cm, mg kg⁻¹) luego de diez años y el balance de P (aplicado-extraído en kg ha⁻¹) determinado en cada tratamiento. Campañas 2006/07 a 2017/18. La inversa de la pendiente indica la cantidad de P que es necesario agregar (o retirar) para variar la concentración de P en suelo en 1 mg kg⁻¹.

variación relativamente estable a lo largo del tiempo (Messiga *et al.*, 2010). La pendiente de la relación entre nivel final de P y balance es más consistente y presenta mayor ajuste en el rango de balance negativo en comparación con el lado positivo, donde se observa una mayor variabilidad de datos (**Figura 3**). En algunos casos, particularmente provenientes de los años 2012, 2013, 2015 y en menor medida 2014, pareciera dividirse la pendiente, siendo de menor magnitud

y mayor dispersión en los procesos de ganancia de P que en los de pérdida. Este comportamiento dual fue observado por Ciampitti (2009), a partir de ensayos conducidos en el sur de Santa Fe, sobre suelos similares a los de este sitio experimental. Con esta mirada sobre suelo y cultivo, Buczko *et al.*, (2018) plantean una reevaluación de los experimentos de larga duración ponderando la respuesta en rendimiento acumulado y la ganancia o pérdida de P en suelo.

Tabla 3. Análisis económico de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Campañas 2006/07 a 2017/18. Arribeños, General Arenales.

Tratamiento	Criterio de Fertilización	M. Bruto U\$S/Ha. 2006/2007 a 2017/2018	Incremento M. Bruto respecto/ T1 US\$/Ha	Incremento M. Bruto respecto / T1 %	Costo Fertilización U\$S/Ha	Tasa de Retorno a la Fertilización (%)
T1	Testigo sin fertilización	4.612				
T2	Tecnología Uso Actual	6.613	2.001	43,4%	906	220,8%
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	7.676	3.064	66,4%	1.778	172,4%
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	7.877	3.265	70,8%	2.217	147,3%
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	8.007	3.396	73,6%	2.780	122,1%

Rentabilidad de los planteos evaluados

Una evaluación económica de los diferentes planteos evaluados se presenta en la Tabla 3.

Se determinó el margen bruto acumulado para cada uno de los tratamientos aplicados entre las campañas 2006/07 y 2017/18. Analizando los márgenes brutos obtenidos, se observa que los tratamientos T3, T4 y T5 alcanzaron márgenes brutos que superan a T2, y este a T1. Para completar este dato, se realizó el análisis marginal que tiene por objetivo revelar la relación entre los incrementos en los beneficios netos y los aumentos en el costo de fertilización. Al comparar las tasas de retorno, se observa que el mayor valor se obtiene en T2, y disminuyen al incrementar los niveles de fertilización. En todos los tratamientos se observa una tasa de retorno que supera el 100%.

CONSIDERACIONES FINALES

Las estrategias de fertilización impactaron en los rendimientos, modificaron el balance de nutrientes y este a su vez correlacionó fuertemente con los niveles finales de P en suelo.

Las diferencias en producción de granos entre estrategias se amplían campaña tras campaña. Así, la diferencia entre los tratamientos T5 y T1 alcanza luego de 12 años y 17 cultivos a un 71,4 %.

Para P y S, estrategias pensadas como de reposición finalmente resultaron ser de reconstrucción. Esto podría explicarse por el reciclaje de P hacia capas superiores. Mientras las plantas asimilan los nutrientes desde diferentes estratos de suelo, la devolución por fertilización y los residuos se localiza cerca de la superficie.

Diferentes dosis de aplicación de nutrientes generaron cambios previsible de su disponibilidad en el suelo. Luego de doce años de experimentación, la tasa de cambio fue de 1 mg kg⁻¹ de P Bray (0-20 cm) por cada 4,3 kg P ha⁻¹ de balance positivo y 5,7 kg P ha⁻¹ de balance negativo. La relación cambia ligeramente año tras año, con una tendencia a disminuir evidenciando una acumulación de fracciones lábiles en el suelo.

Planteos intensivos con alta fertilización resultaron ser los de mayor margen bruto a largo plazo, gracias a los efectos residuales sobre los

rendimientos. Un desafío para la implementación práctica de estrategias superadoras sería dotar al productor de herramientas para financiar los mayores costos y menor tasa de retorno en el corto plazo, en la búsqueda de maximizar los beneficios a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

Bauke, S. L., von Sperber, C., Tamburini, F., Gocke, M. I., Honermeier, B., Schweitzer, K., ... & Amelung, W. 2018. Subsoil phosphorus is affected by fertilization regime in long-term agricultural experimental trials. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 103-112.

Boxler, M., F. O. García, A. Correndo, S. Gallo, R. Pozzi, M. Uranga, F. Bauschen, H. Rivero, N. Reussi Calvo y A.

Buczko, U., van Laak, M., Eichler-Löbermann, B., Gans, W., Merbach, I., Panten, K., ... & von Tucher, S. 2018. Re-evaluation of the yield response to phosphorus fertilization based on meta-analyses of long-term field experiments. *Ambio*, 47(1), 50-61.

Carver, R. E., Nelson, N. O., Abel, D. S., Roozeboom, K., Kluitenberg, G. J., Tomlinson, P. J., & Williams, J. R. 2017. Impact of Cover Crops and Phosphorus Fertilizer Management on Nutrient Cycling in No-Tillage Corn-Soybean Rotation. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 3(3), 5.

Ciampitti, I.A. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. M.Sc. thesis. FA-UBA. Buenos Aires, Argentina. XX pag.

Correndo, A., M. Boxler y F. García. 2015. Reposición de nutrientes en el largo plazo ¿Qué nos dicen los números? Pp 84-94. Actas del Simposio Fertilidad 2015. Cd-ROM.

Mallarino, A., Oltmans, R. R., & Piekema, N. 2017. Long-Term Potassium Fertilization Effects on Yield of Corn and Soybean in South Central Iowa. *Farm Progress Reports*, 2016(1), 186.

Messiga, A.J., N. Ziadi, D. Plenet, L.E. Parent, y C. Morel. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management*, 26, 354-364. <<



DECARGAR ARTÍCULO