

# Evaluación de largo plazo de efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre indicadores productivos, económicos y ambientales en el norte de la provincia de buenos aires

G.N. Ferraris<sup>1</sup>, M. C. Paolilli<sup>1</sup>,  
M. Toribio<sup>2</sup>, R. Falconi<sup>3</sup>, N. Ferrero<sup>3</sup>, R. Falcone<sup>2</sup>, F. Moriones<sup>2</sup>  
**Noviembre 2022**

## INTRODUCCIÓN

A nivel productivo, 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 los resultados económicos 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 dieciséis campañas completas en 2021/22. En este escrito se reporta el efecto de las diferentes estrategias de fertilización NPS sobre los rendimientos anuales, los rendimientos acumulados, el balance de nutrientes y su nivel final en el suelo luego de dieciséis años, la eficiencia de recuperación de P y los resultados económicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño experimental y tratamientos

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). El inicio de la secuencia se realizó con el cultivo de maíz, durante la campaña 2006/07, llegando al decimosexto año en 2021/22 con la secuencia trigo/soja. 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).

**Tabla 1.** Tratamientos y dosis de N, P y S aplicados en promedio en los cultivos de Trigo/Soja-Cebada/Soja- Maíz - Soja. Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.

Tratamiento	Criterio de fertilización	Nitrógeno (N) (kg ha <sup>-1</sup> )					
		maíz	soja	trigo	soja 2 <sup>da</sup>	cebada	soja 2 <sup>da</sup>
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

<sup>1</sup> EEA INTA Pergamino <sup>2</sup> Profertil S.A Investigación y Desarrollo, <sup>3</sup> El Ceibo Cereales S.A.

		Fósforo (P) (kg ha <sup>-1</sup> )					
Tratamiento	Criterio de fertilización	maíz	soja	trigo	soja 2 <sup>da</sup>	cebada	soja 2 <sup>da</sup>
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) (kg ha <sup>-1</sup> )					
Tratamiento	Criterio de fertilización	maíz	soja	trigo	soja 2 <sup>da</sup>	cebada	soja 2 <sup>da</sup>
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

**Nota:** En trigo y cebada se describen las demandas del doble cultivo, pero los fertilizantes fueron aplicados en su totalidad al primero.

### Determinaciones realizadas en el suelo y en los cultivos

Previo a la siembra de trigo 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.

### Análisis económico

Se determinaron los márgenes brutos (MB) por tratamiento y el retorno de la inversión (RI) para cada campaña y acumulados a lo largo del tratamiento.

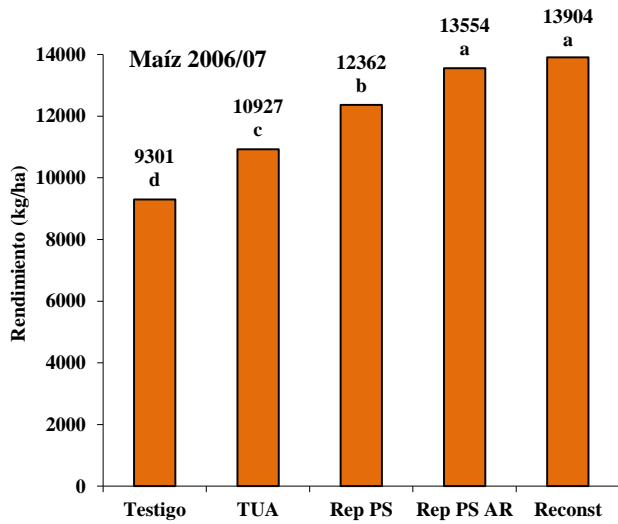
Se estimó el margen bruto marginal de la fertilización como la diferencia entre los ingresos adicionales y los costos de fertilización de cada tratamiento. Con el propósito de completar este dato, al cierre de la campaña 2021/22 se calculó tasa marginal de retorno sobre el capital invertido en fertilización de los cultivos como el cociente entre los ingresos adicionales acumulados de cada tratamiento con respecto al testigo, y los costos adicionales acumulados de cada tratamiento con respecto al testigo. Los valores se expresan en dólares por hectárea. Se utilizan precios actuales para la campaña 2022/2023. Las cotizaciones de maíz, trigo y soja se obtuvieron del Mercado a Término de Buenos Aires

(<http://www.matbarofex.com.ar>) considerando los precios futuros a cosecha. Para el producto cebada se tomó el precio futuro al momento de cosecha publicado por Agricultores Federados Argentinos SCL (<http://www.diario.afascl.coop>). Los precios de los fertilizantes (urea granulada, superfosfato triple de calcio y superfosfato simple de calcio) se tomaron de revistas especializadas (Márgenes Agropecuarios, 2022); Al precio de adquisición de los fertilizantes se le adicionó el precio del servicio de aplicación, mientras que al precio de los granos se le descontaron los gastos de comercialización (flete corto a acopio local, flete largo a Rosario, paritaria, zarandeo, impuestos y sellado). Todos los precios fueron considerados al 30 de Septiembre de 2022.

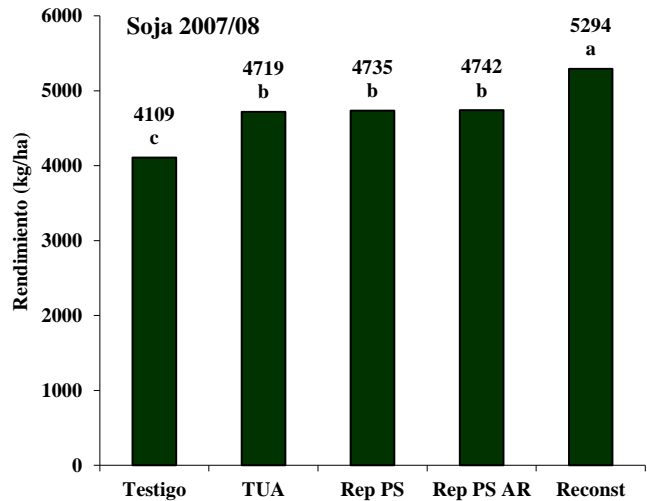
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efectos sobre los rendimientos anuales.

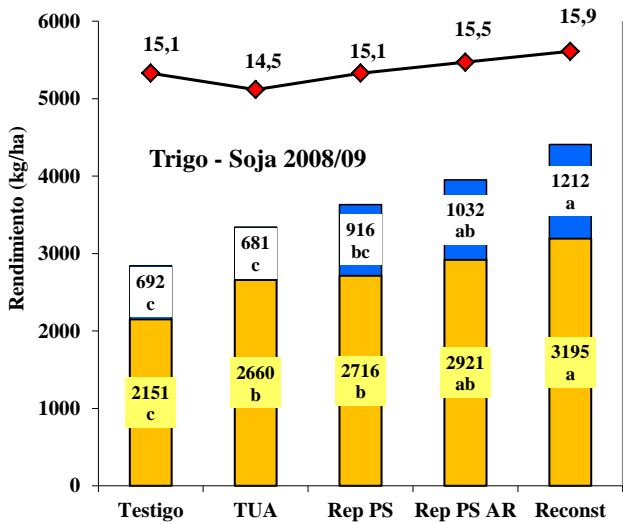
En todas las campañas hubo diferencias significativas entre tratamientos en los rendimientos de los cultivos. (Figura 1). En el Maíz de 2006/07 los rendimientos máximos se alcanzaron por T4 y T5, los que a su vez superaron a T3, este a T2, y a la vez este a T1, respectivamente (Figura 1.a). En 2007/08 los rendimientos máximos fueron en T5, superando a T2, T3 y T4, y estos a T1 (Figura 1.b). En el ciclo siguiente, los cultivos estuvieron afectados por una fuerte sequía. En trigo, todos los tratamientos superaron al testigo, con el rendimiento máximo en T5. Los tratamientos de mayor fertilización permitieron leves mejoras en la concentración de proteína en grano. En la soja de segunda subsiguiente, T4 y T5 superaron a los tratamientos T1 y T2 (Figura 1.c). En el ciclo 2009/10 no se determinaron diferencias significativas en los rendimientos de cebada ( $P>0,10$ ), pero sí en soja de segunda, con el tratamiento T4 por encima de T2 y T5. A su vez, T4 y T3 superaron a T1 (Figura 1.d). El comienzo de un nuevo ciclo de rotación en 2010/11 trajo rendimientos de maíz máximos en T3, T4 y T5, estos a su vez superaron a T2, y éstos a T1 (Figura 1.e). Un resultado similar se determinó en 2011/12, donde todos los tratamientos superaron a T1 (Figura 1.f). En la cebada de la campaña 2012/13, nuevamente todos los tratamientos superaron a T1, sin cambios significativos en el % de proteína. Las diferencias fueron más marcadas en soja de segunda, donde T3, T4 y T5 alcanzaron rendimientos significativamente superiores a T2, y éstos a los de T1 (Figura 1.g). El Trigo de 2013/14 mostró rendimientos superiores en T5 vs T3, en T4 y T5 vs T2, y en T3, T4 y T5 vs T1, con una significativa ganancia de proteína. En soja de segunda, T3, T4 y T5 superaron a T1 (Figura 1.h). La soja de primera del ciclo 2014/15 alcanzó rendimientos superiores en T5 respecto de T1 y T2, y de T3, T4 y T5 en comparación con T1 (Figura 1.i). Durante la campaña húmeda 2015/16, los tratamientos T3, T4 y T5 alcanzaron rendimientos muy elevados, superando a T2, y este a T1, respectivamente. Sin embargo, el T5 alcanzó los niveles máximos de concentración de proteína. La soja de segunda mantuvo la tendencia, con T3, T4 y T5 en el escalón máximo de rendimiento (Figura 1.i). En la campaña 2016/17 el maíz mostró un comportamiento destacadísimo agrupando cuatro niveles de significancia estadística: T5 superior al resto, seguido por T3 y T4 en un nivel de equidad. Luego continuaron T2 y más abajo T1 con un rendimiento muy bajo y considerable brecha con los anteriores (Figura 1.k). En la campaña 2017/18 la soja evidenció diferencias significativas entre tratamientos ( $P<0,10$ ). El rendimiento máximo se obtuvo en los tratamientos T4 y T5, los cuales superaron al control (T1), a la vez de una tendencia incremental sobre T2 y T3. Más adelante, el ciclo 2018/19 se caracterizó por una alta expresión de rendimiento y de los efectos de tratamiento. En trigo, se determinaron diferencias en (T2, T3, T4, T5) vs T1. Por su parte, en concentración de proteína se separaron un grupo de comportamiento superior (T3, T4, T5) vs otro inferior (T1, T2). Lo propio sucedió en los rendimientos de soja de segunda, donde se determinaron rendimientos crecientes en todo el rango de tratamientos. En el maíz de 2019/20 se determinó un incremento lineal en todo el rango de tratamientos evaluados, con el máximo estadístico en T4-T5 y el óptimo agronómico en T5 (Figura 1.k). Finalmente, en la soja del año 2020/21 la severa reducción de precipitaciones acontecida durante el verano no afectó los rendimientos máximos en los mejores tratamientos, ni limitó la expresión de respuesta a la fertilización. La estabilidad del cultivo se expresó al igualar estadísticamente los tratamientos T5, T4 y T3, este último con inferior productividad agronómica. Sin embargo, cuando la fertilización fue limitada o nula la caída en los rendimientos fue muy severa (Figura 1.j).



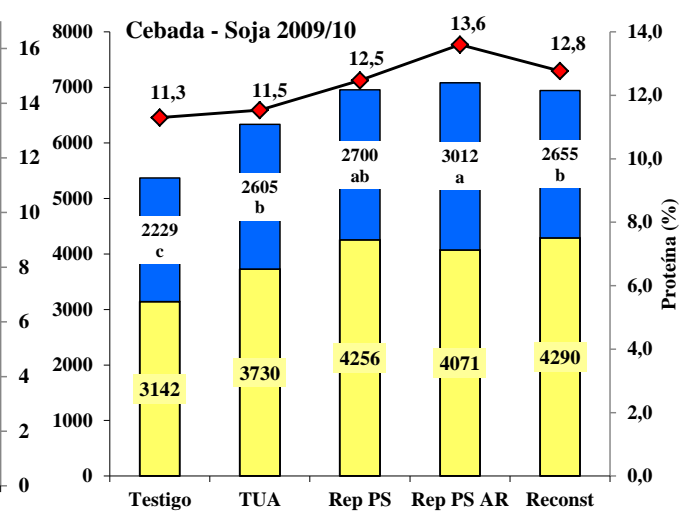
Estrategia de Fertilización  
Figura 1.a



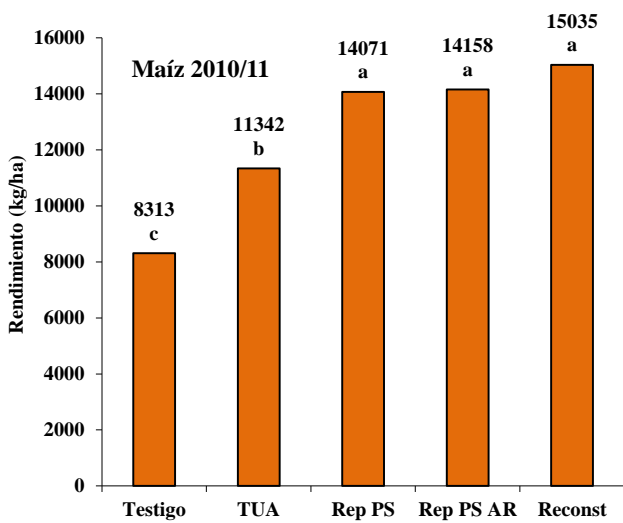
Estrategia de Fertilización  
Figura 1.b



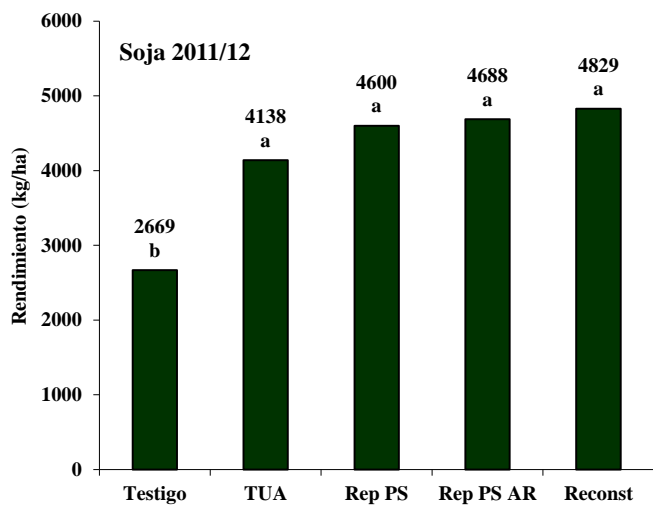
Estrategia de Fertilización  
Figura 1.c



Estrategia de Fertilización  
Figura 1.d



Estrategia de Fertilización  
Figura 1.e



Estrategia de Fertilización  
Figura 1.f

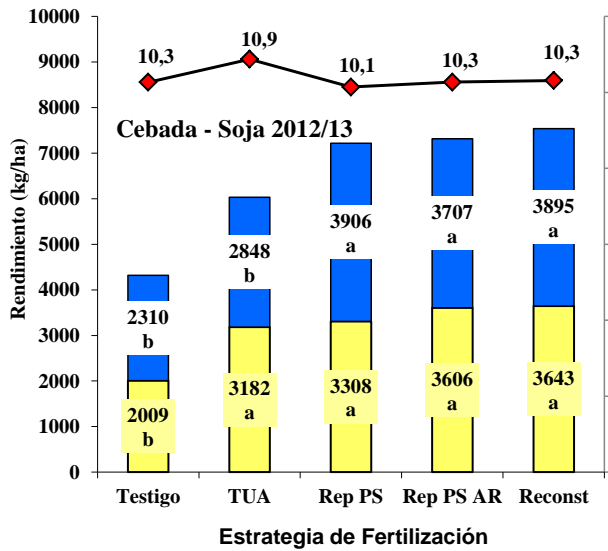


Figura 1.g

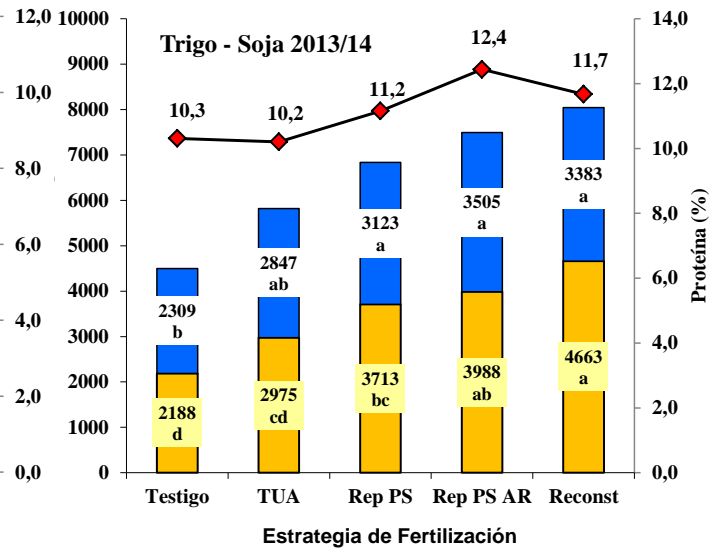


Figura 1.h

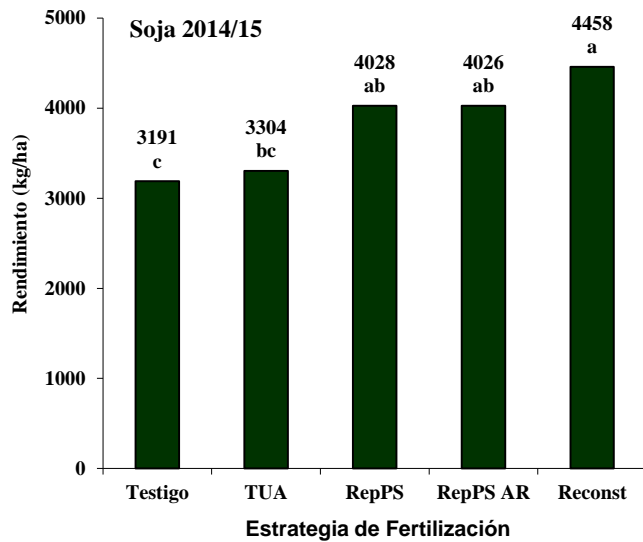


Figura 1.i

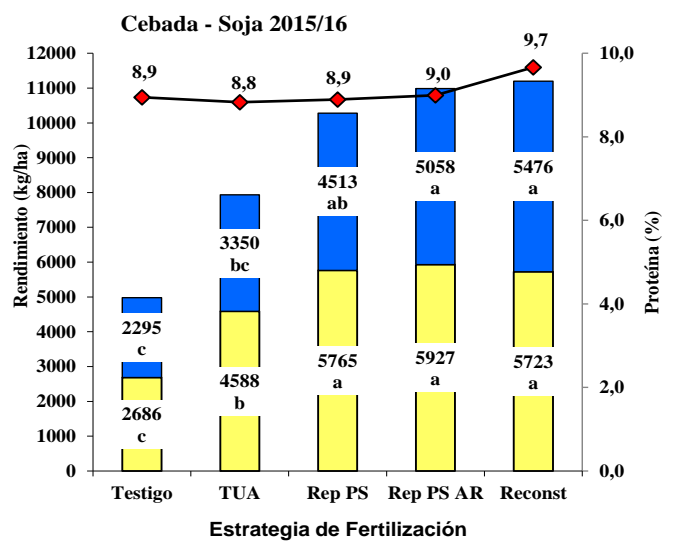


Figura 1.j

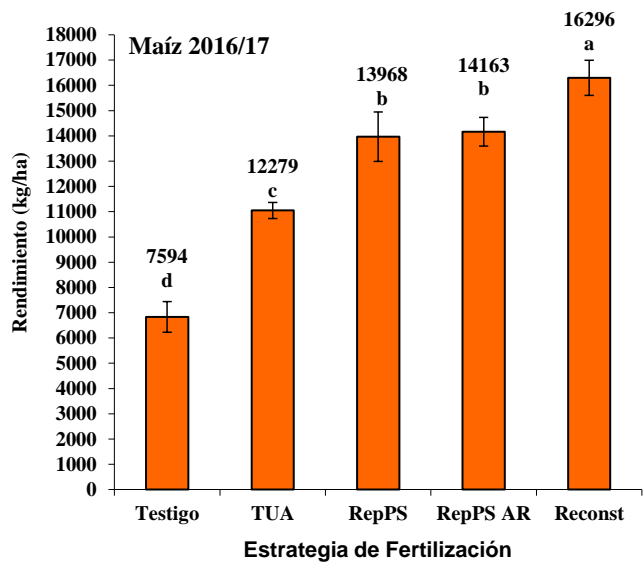


Figura 1.k

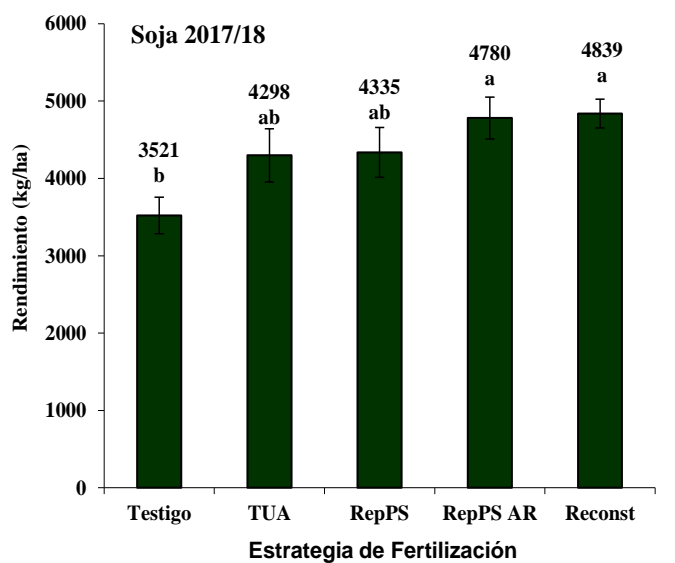


Figura 1.l

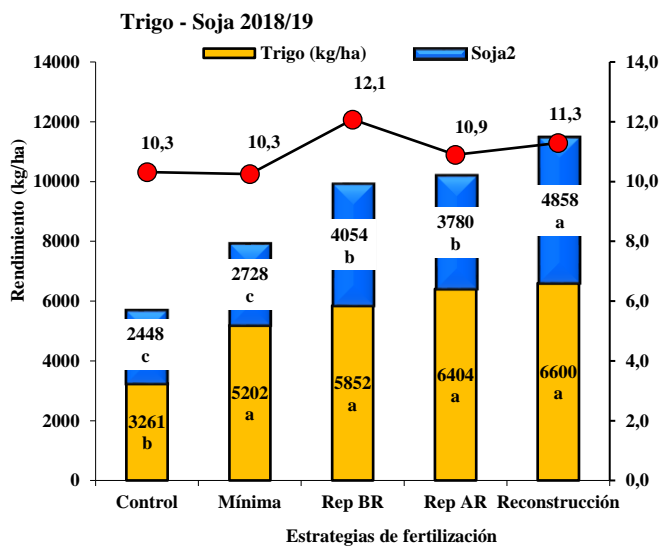


Figura 1.J

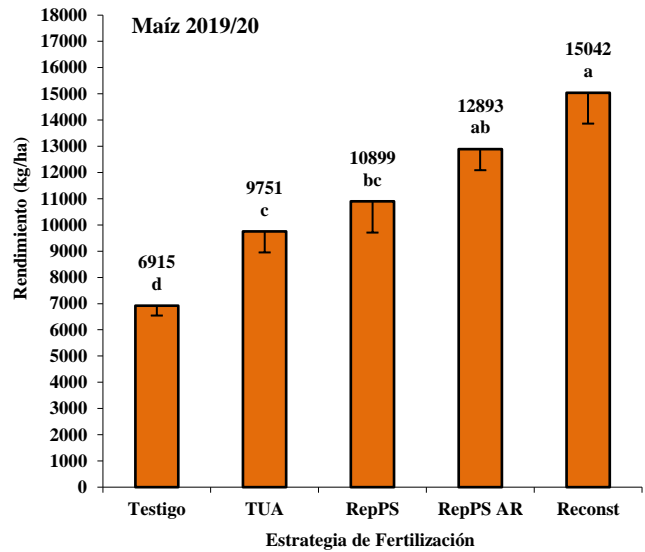


Figura 1.k

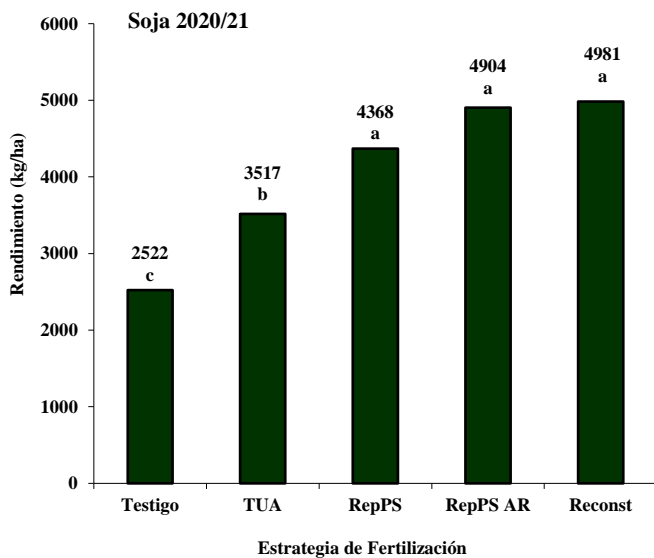


Figura 1.L

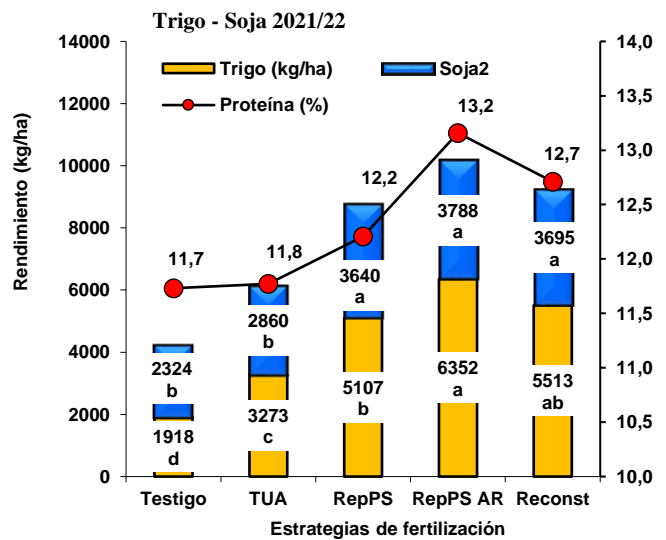
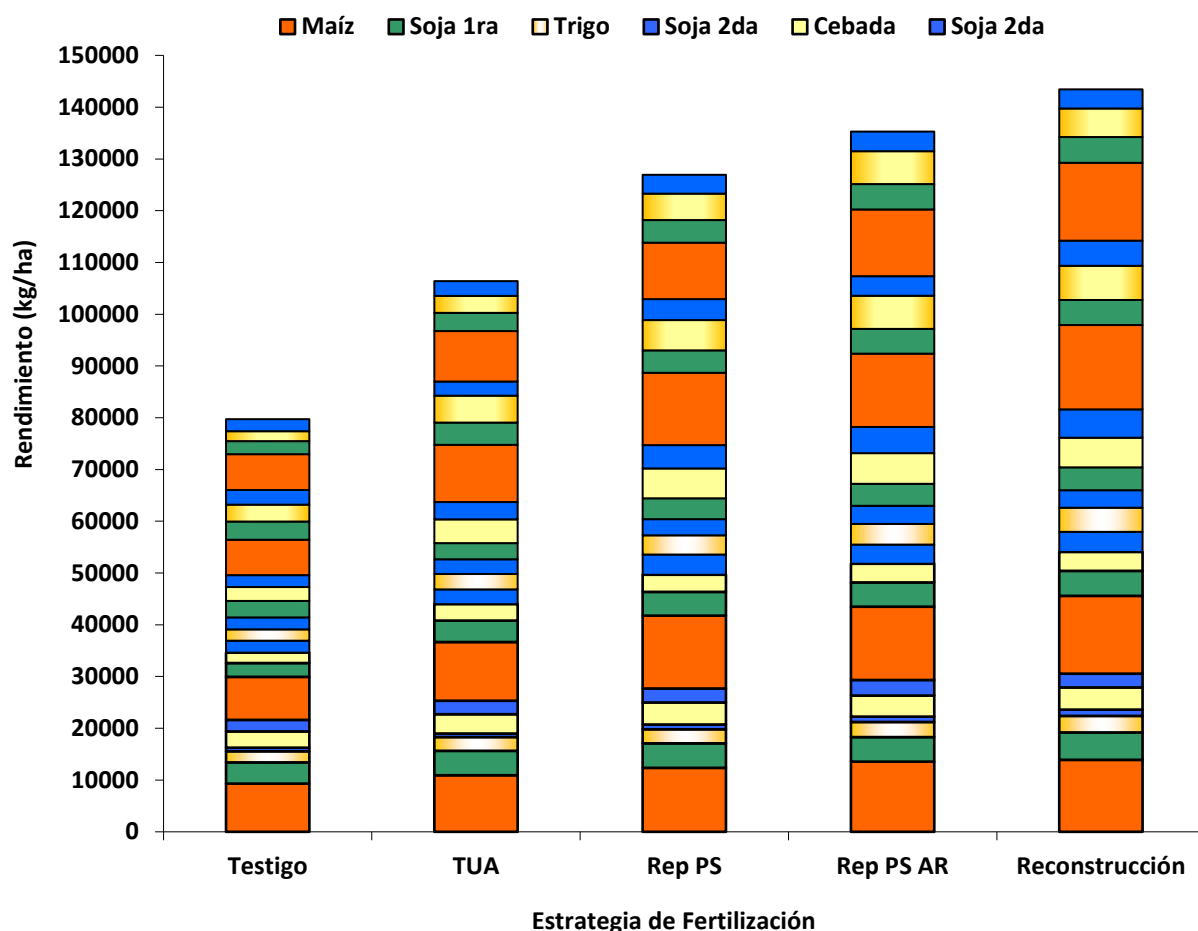


Figura 1.M

**Figura 1.** Rendimiento y proteína (en cereales de invierno) anualizado de diferentes estrategias de fertilización. Dentro de cada cultivo, letras distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos. Experimento de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Campañas 2006/07 a 2021/22. Arribeños, General Arenales.

### Efectos sobre los rendimientos acumulados, el balance de nutrientes y su nivel final en el suelo luego de dieciséis años: 2006/07-2021/22.

La productividad acumulada de la secuencia –veintitrés cultivos en dieciséis campañas- mantuvo su tendencia consistente en ampliar la diferencia entre tratamientos conforme el paso del tiempo. Así, mientras el testigo acumuló 79722 kg grano ha<sup>-1</sup>, el tratamiento T5 de reconstrucción llegó a 143436 kg ha<sup>-1</sup>, siendo la brecha de rendimiento de 79,9 % (Figura 2), la cual se amplía año tras año. Esta brecha es superior a la observada por Correndo *et al.*, (2015) en un ensayo de 14 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.



**Figura 2.** Producción por cultivo (kg ha<sup>-1</sup>) 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 2021/22.

Con los datos de concentración de nutrientes en grano, los rendimientos y la dosis aplicada en cada uno de ellos es posible estimar el balance para cada tratamiento (Tabla 2). El balance de N fue negativo para todas las estrategias, incluso considerando el aporte por fijación biológica (FBN). Aun ponderando los ingresos vía este mecanismo, los balances oscilaron entre -721 a -929 kg N ha<sup>-1</sup>. Aunque el balance de N en los cultivos de gramíneas tiende a ser neutro o positivo, el cultivo de soja al no agregar N externo- genera los mayores balances negativos, dado que la FBN cubre aproximadamente la mitad de la demanda del cultivo (Collino *et al.*, 2007). Los tratamientos con menor fertilización expresaron balances más negativos, ya que es de esperar que el menor crecimiento deprima las tasas de fijación biológica (Tabla 2).

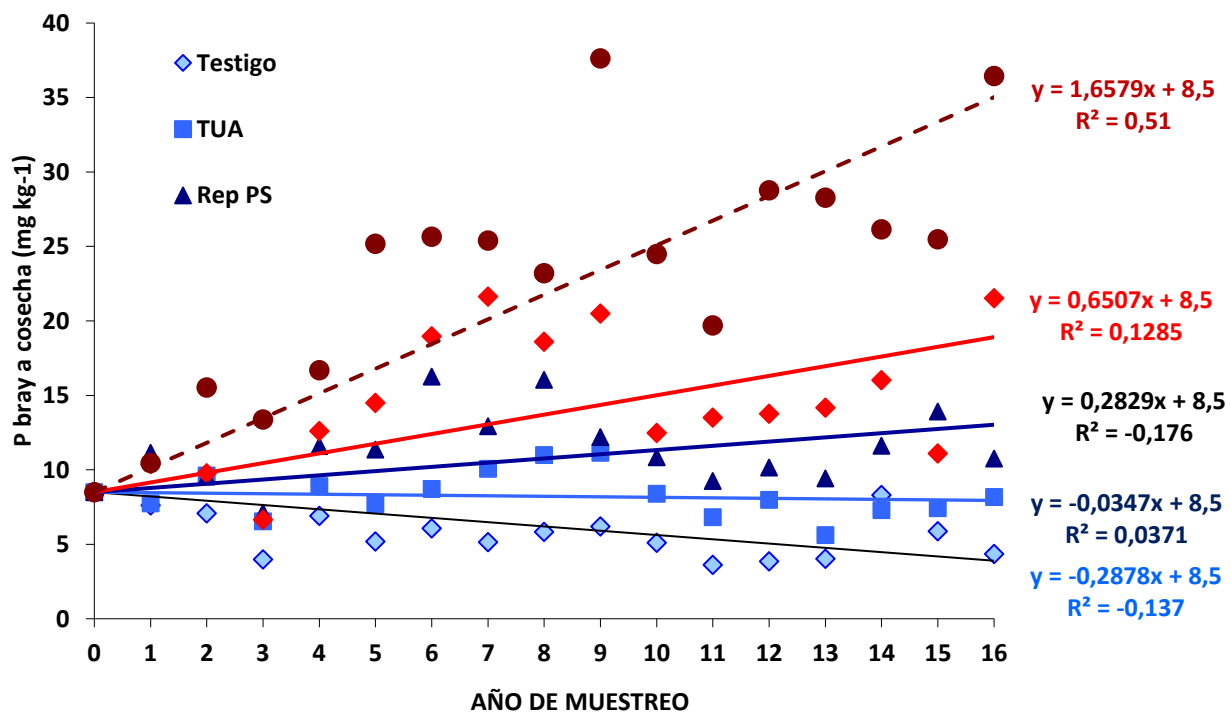
En P y S, los tratamientos testigo y de tecnología de uso actual (T1, T2) reflejaron un balance negativo, mientras que en aquellos de reposición se sobreestimó la extracción del nutriente dando como resultado un balance positivo (T3, T4, T5) (Tabla 2). Esto estaría asociado a concentraciones en grano inferiores a las inicialmente estimadas. A modo de ejemplo, la concentración de tendencia de P en grano de soja en nuestro experimento fue de 0,42 %, frente al valor medio sugerido de 0,5 % (IPNI, 2013). Un balance positivo de P a causa de concentraciones de P en grano inferiores a los valores tabulados a partir de los cuales se diseñaron tratamientos de reposición fue observado por Ventimiglia *et al.*, (2012), quien bajo una secuencia de soja continua determinó una concentración de 0,29 a 0,35% de P en grano. Por su parte, Berardo, (2003) propone concentraciones de P en grano de soja de 0,5 % (0,4-0,6), similares a los máximos observados en nuestro experimento.

**Tabla 2.** Balance de nitrógeno, fósforo y azufre ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para los diferentes tratamientos durante la secuencia 2006/07 - 2021/22. Los datos de rendimiento y extracción de nutrientes en grano fueron ajustados a 13% de humedad. Cuando se pondera el N aportado por fijación biológica de N (FBN), se considera que el 50% en leguminosas proviene de esa fuente.

Tratamiento	Agregado ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				Extracción ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			Balance ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			
	N (Fertilizante)	N (FBN)	P	S	N	P	S	N (Fertilizante)	N (FBN)	P	S
T1	0	964	0	0	1983	200	78	-1983	-1019	-200	-78
T2	506	1221	256	0	2600	303	97	-2094	-874	-47	-97
T3	898	1428	449	237	3137	356	134	-2239	-811	93	103
T4	1193	1501	555	295	3352	384	143	-2159	-658	170	152
T5	1193	1547	811	295	3524	426	150	-2331	-784	385	145

La evolución en el tiempo de la concentración de P Bray-1 en suelo (Figura 3) reflejó las tendencias observadas en los balances de Tabla 2. Incrementos muy notables en el P Bray-1 en suelo como resultado de un balance positivo de P fueron documentados por Mallarino y Prater (2007), 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. Respecto de azufre (S), se determinó un contraste entre aquellos que lo recibieron (T3, T4 y T5) y los no fertilizados (T1, T2).

El contenido de MO, N total no manifestaron cambios importantes. El testigo (T1) y TUA (T2) fueron los tratamientos con mayor nivel final de pH, de acuerdo con su menor aporte de residuos, menor exportación de bases y la ausencia de efecto acidificante de elevadas dosis de fertilizantes (Tabla 3). 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).



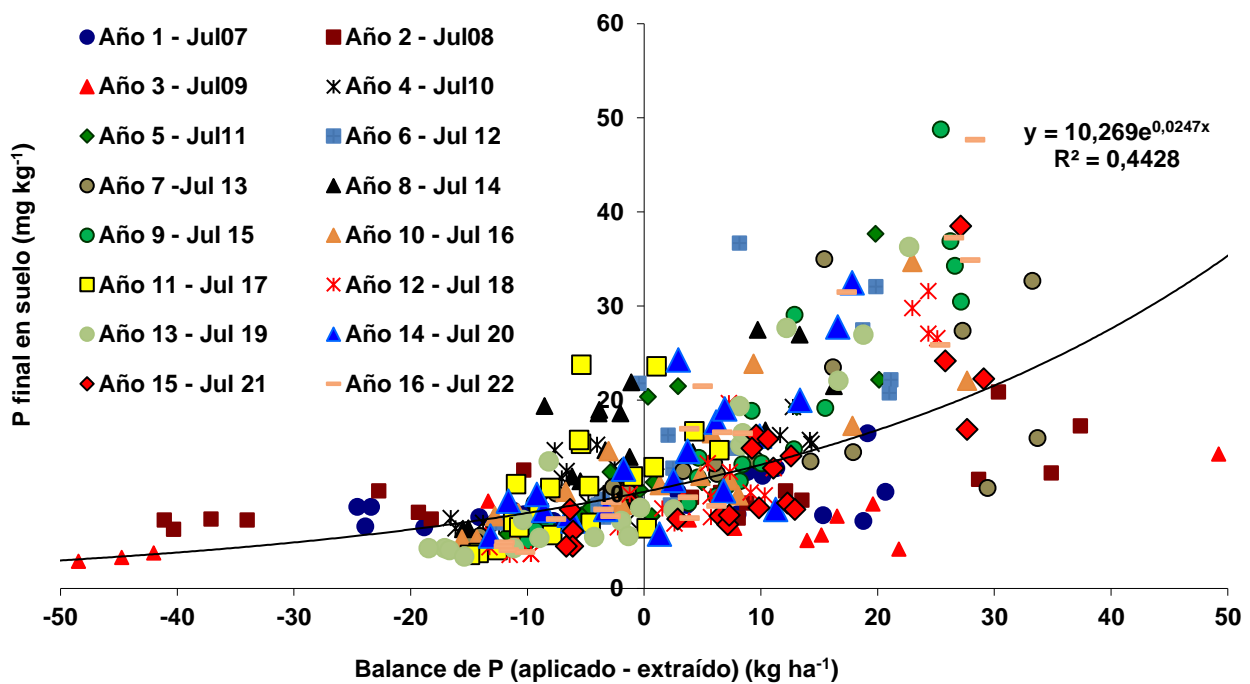
**Figura 3.** Evolución del P extractable en suelo (Bray-1, 0-20 cm) según estrategia de fertilización, luego de dieciséis campañas y veintitrés cultivos, hasta la campaña 2021/22.



**Tabla 3.** Análisis de suelo (0-20 cm) luego de trece 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 <sub>3</sub> <sup>-</sup> 0-40 cm (kg ha <sup>-1</sup> )	P Bray-1 (mg kg <sup>-1</sup> )	S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
Inicial	2,38	5,6	0,119	17,8	8,5	13,8
T1	2,07	6,1	0,104	30,7	4,4	6,4
T2	2,07	6,2	0,104	26,5	8,2	6,7
T3	2,22	6,0	0,111	34,1	10,8	7,6
T4	2,12	6,0	0,106	37,8	21,5	6,6
T5	2,11	5,9	0,106	35,5	36,5	8,8

La relación entre el balance de P (Tabla 2) y el P Bray<sup>-1</sup> determinado en el suelo al final de la cosecha (Figura 3, Tabla 3) permite estimar la tasa de cambio en función de la extracción o reposición del nutriente. La Figura 4 muestra una función exponencial, que fuera la de mayor ajuste a los datos observados. Dicha función representa un crecimiento de P en suelo más pronunciado en el rango positivo respecto del negativo, donde se transforma en una asintótica, que caracteriza al efecto buffer del suelo (Figura 4). Si esta función se transforma en lineal, estadísticamente se pueden separar dos funciones, un el rango positivo y negativo, respectivamente. La inversa de la pendiente que relaciona estos parámetros indica la dosis de P o balance negativo necesario para variar en 1 mg kg<sup>-1</sup> el nivel del análisis de P Bray-1 en el suelo. De acuerdo con este análisis, por cada 3,0 kg P ha<sup>-1</sup> 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 5,7 kg P ha<sup>-1</sup> de balance negativo su nivel en el suelo disminuiría en 1 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4). 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<sup>-1</sup> 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. En otros experimentos fue observado un rango de variación relativamente estable a lo largo del tiempo (Messiga *et al.*, 2010). 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.



**Figura 4.** Relación entre el nivel de P extractable en suelo a cosecha (0-20 cm,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) luego de quince años, y el balance de P (aplicado-extraído en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) determinado en cada tratamiento. Campañas 2006/07 a 2021/22. 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  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ .

### **Eficiencia de recuperación de P según cultivo y estrategia de fertilización**

En función de la dosis de P aplicada, los rendimientos y la concentración de P en grano se calculó la eficiencia de recuperación del fertilizante aplicado. Para ello se transformaron los valores de P en grano a P en planta entera según los índices de cosecha de P propuestos por IPNI (2013).

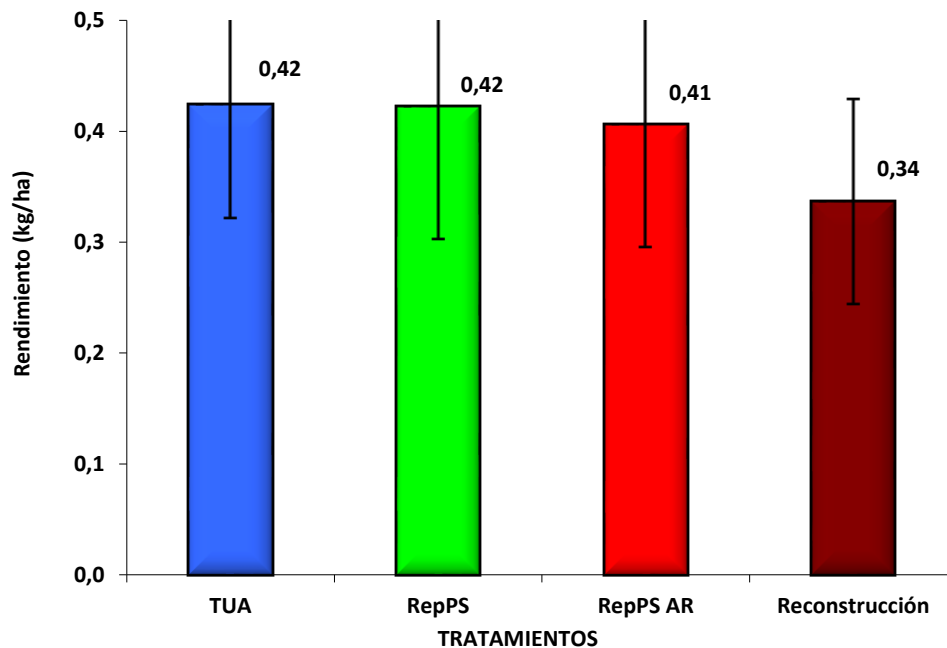
La eficiencia de recuperación de P en planta entera osciló entre 0,30 y 0,39, siendo menor en la medida en que aumentó la dosis aplicada (**Figura 5**). Estos valores se encuentran dentro del rango de 0,10 a 0,35 propuesto por diferentes autores (Ciampitti, 2009; Johnston and Syers, 2009; Rubio *et al.*, 2008). Los cultivos mostraron una capacidad variable de recuperación del fertilizante aplicado (Figura 6). El comportamiento general muestra una mayor eficiencia en cultivos de verano con relación a los de invierno, entre los de primera siembra. El maíz siempre presentó eficiencias de recuperación de P muy altas, con un contraste muy marcado respecto de soja. Soja de primera fue muy estable, absorbiendo en promedio de todos los tratamientos entre 34 y 36 % del P aplicado. En cambio, soja de segunda presentó un comportamiento variable, asociado a las precipitaciones y el rendimiento del antecesor (Figura 6).

En campañas climáticamente similares, el maíz del undécimo año asimiló mayor proporción de fertilizante que el del quinto, y este a su vez fue más eficiente en recuperación respecto del primero, probablemente a causa de la acumulación de fracciones lábiles de P con las sucesivas fertilizaciones. En cambio, la soja absorbió en planta una proporción similar en las campañas 2007/08, 2011/12 y 2014/15, aunque fueron disímiles climáticamente y en los rendimientos, evidenciando que la eficiencia de recuperación es muy conservativa en este cultivo. En el período 2015/16 a la actualidad, asociado a un ciclo húmedo se verificó una gran facilidad para la asimilación de P proveniente del fertilizante, determinando valores de eficiencia que elevaron el promedio general.

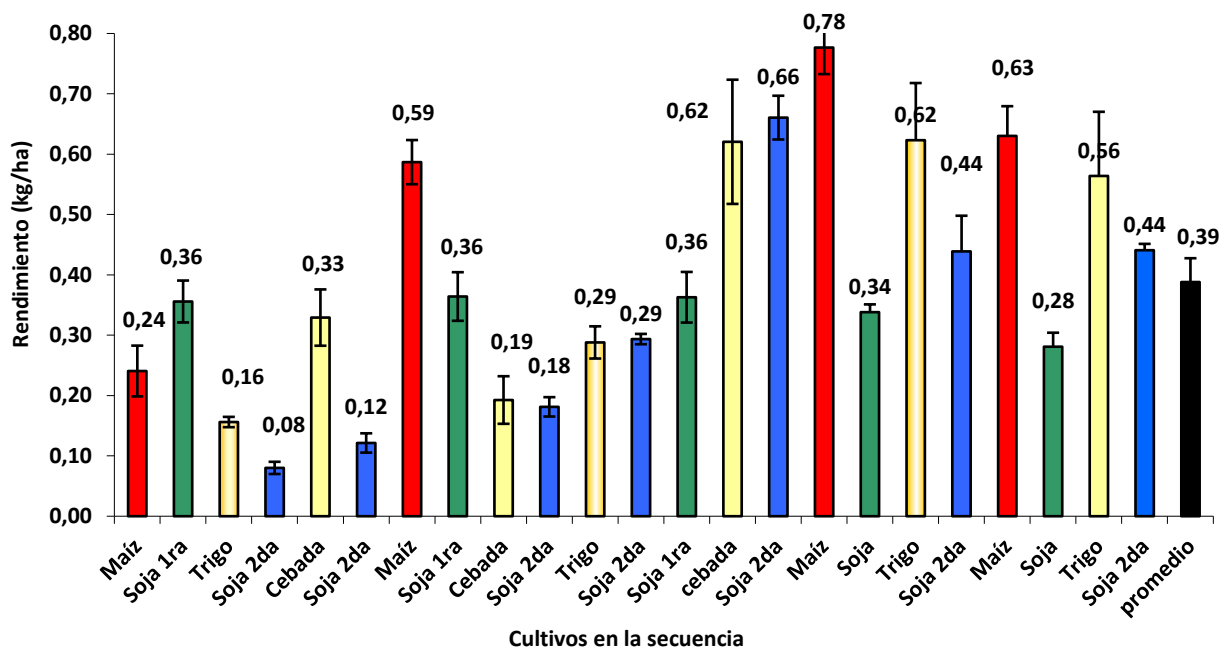
Por la carencia de P, el T1 presenta una concentración en grano notablemente inferior, favoreciendo la diferencia de acumulación total entre testigo y fertilizados. Esto repercute incrementando la eficiencia de absorción del nutriente. Por último, el trigo y la soja de la campaña seca 2008/09 recuperaron muy poco fertilizante en comparación con la cebada/soja de los ciclos húmedos 2009/10 y 2012/13, o la secuencia de dobles cultivos en las campañas 2013/14, 2015/16 y 2018/19. Tomado individualmente por cultivo, el valor promedio para todas las secuencias y tratamientos fue de 39,7 % de P recuperado

en el primer año de su aplicación (Figura 6). Dentro de este rango, las gramíneas fueron más eficientes (46%) en comparación con la soja (33%).

Entre cultivos, la máxima recuperación correspondió a los dobles cultivos (72 %: 40 % en cultivos de invierno y 32 % en soja de segunda), seguido por maíz (56 %). El menor valor correspondió a soja 1ra (34 %). Los valores de eficiencia de recuperación de nutrientes mostrados por la bibliografía son muy amplios, y están influenciados por factores de suelo y cultivo tales como textura, nivel de P inicial, pH, presencia de Calcio (Ca) y carbonatos, precipitaciones, dosis aplicada y rendimiento del cultivo, entre otros.



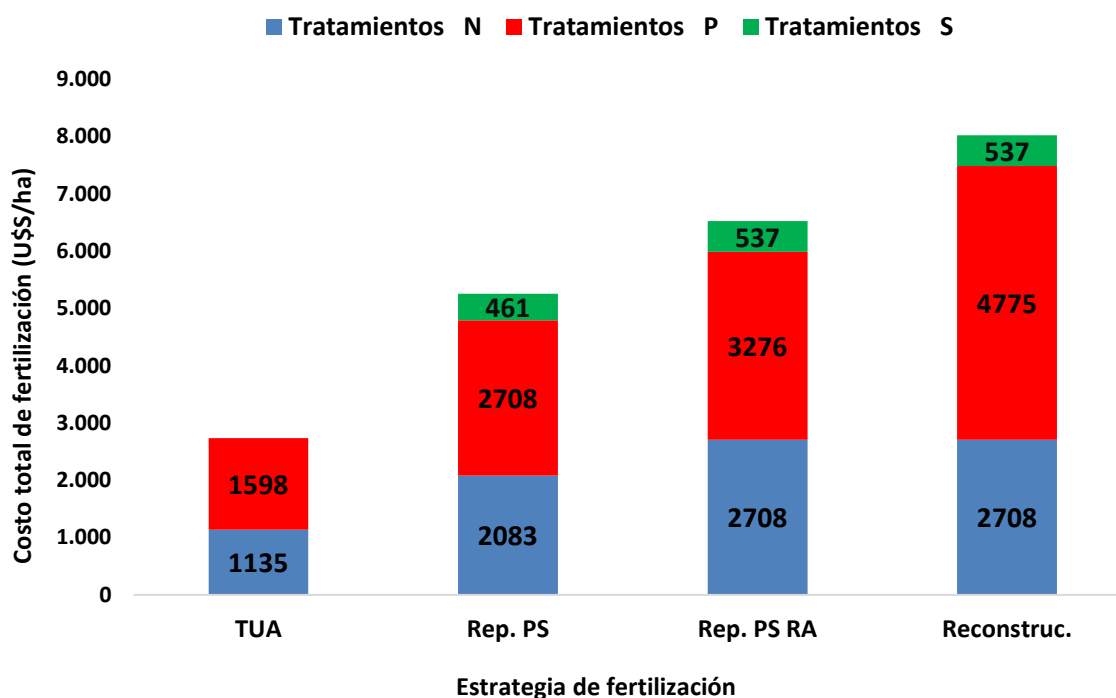
**Figura 5.** Fracción de fósforo recuperada en planta entera según estrategia de fertilización. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.



**Figura 6.** Fracción de fósforo recuperada en planta entera según cultivo. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.

## Análisis económico

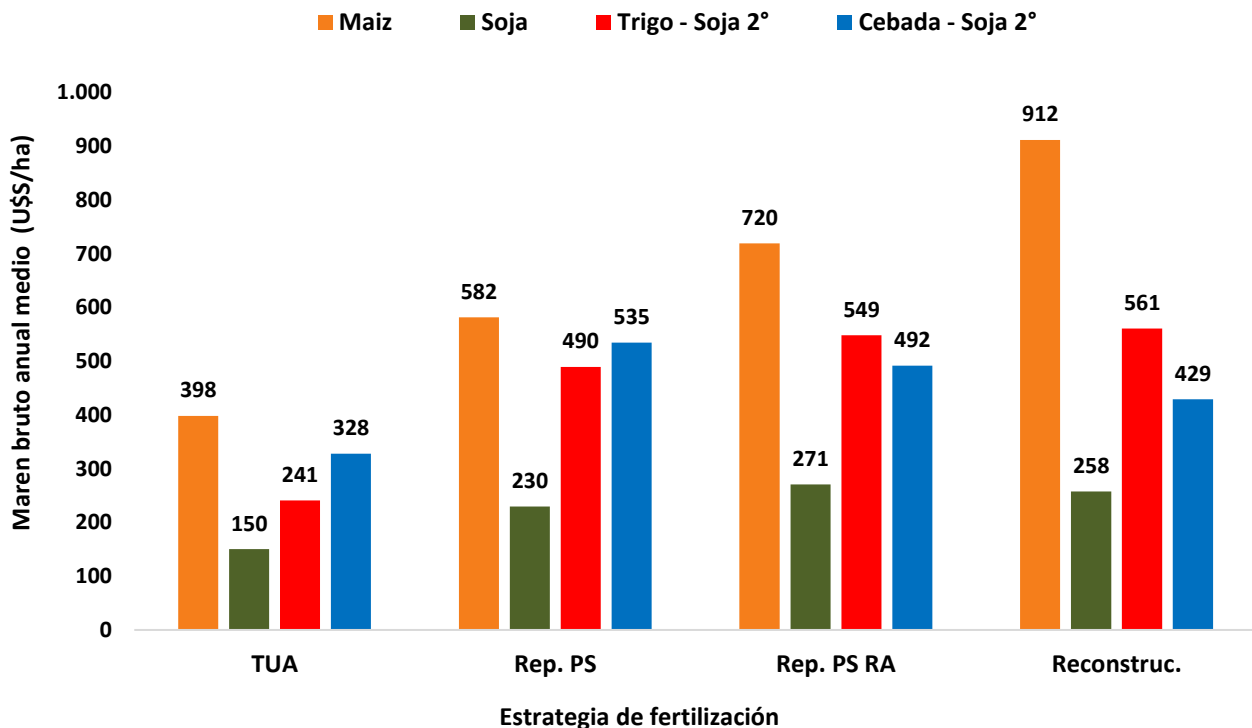
Durante el periodo analizado, la inversión total realizada en fertilizantes nitrogenados, fosforados y azufrados según las diferentes estrategias de fertilización ascendió a 2.733, 5.252, 6.521 y 8.020 U\$S ha<sup>-1</sup> para los tratamientos TUA, Rep. PS, Rep. PS RA y Reconstruc., respectivamente (Figura 7). Como contrapartida, se registraron ingresos adicionales acumulados de 7.026, 12.485, 14.641 y 16.584 U\$S ha<sup>-1</sup>, para cada uno de los tratamientos aplicados.



**Figura 7. Costo** acumulado en fertilizantes nitrogenados, fosforados y azufrados. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.

Los resultados de la inversión, evaluado como margen bruto anual, variaron entre -205 y 1.258 U\$S ha<sup>-1</sup> año, según cultivo, tratamiento, condiciones climáticas e incidencia de enfermedades de cada campaña. De un total de 64 parcelas fertilizadas, en el 89,06% de los casos se obtuvieron resultados positivos. La frecuencia de márgenes brutos positivos fue del 87,50% para los tratamientos TUA, Rep. PS RA y Reconstruc. y del 93,75% para el tratamiento Rep. PS, respectivamente.

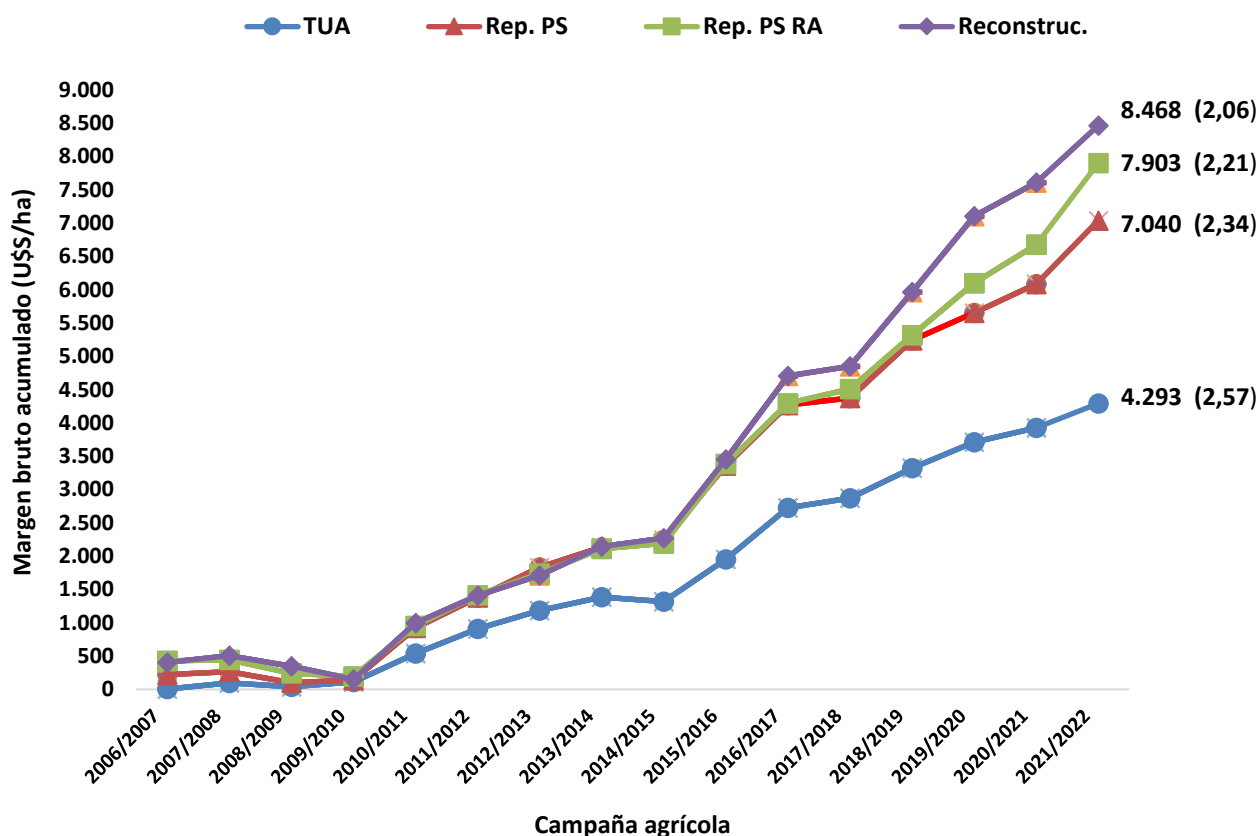
En el global de los años, el tratamiento de Reconstruc. fue el de mejor comportamiento en términos de margen bruto anual medio, seguido en orden de importancia por Rep. PS RA, Rep. PS y TUA, respectivamente. En general, el cultivo de maíz mostro los mayores márgenes anuales promedios, mientras que la soja de primera mostró los márgenes medios anuales más bajos en todos los tratamientos de fertilización analizados (Figura 8).



**Figura 8:** Margen bruto anual medio respecto del testigo no fertilizado para los diferentes tratamientos de fertilización. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.

Luego de dieciséis campañas agrícolas los márgenes brutos acumulados fueron de 4.293, 7.040, 7.903 y 8.468 U\$\$ ha<sup>-1</sup> para TUA, Rep. PS, Rep. PS RA y Reconstruc., respectivamente. Durante las primeras cuatro campañas los distintos tratamientos realizados acumularon un beneficio similar. Los mayores márgenes totales fueron alcanzados por los tratamientos Reconstrucc. y Rep. PS RA, los que a su vez superaron a Rep. PS, y este a TUA. Entre la quinta y la décima campaña, se produjo una marcada diferencia entre el margen bruto del tratamiento TUA y el correspondiente a los tratamientos Rep. PS, Rep. PS RA y Reconstruc. los que superaron al primero, en un 63, 62 y 64%, respectivamente. En las últimas seis campañas el margen por fertilización comenzó a diferenciarse entre tratamientos y el beneficio acumulado del manejo TUA comenzó a ser significativamente inferior al resto.

Por otra parte, los manejos con mayor índice de retorno a la inversión fueron TUA y Rep. PS con U\$\$ 2,57 y U\$\$ 2,34 por cada dólar invertido seguidos de Rep. PS RA y Reconstruc. con un retorno de 2,21 y 2,06 U\$\$/U\$\$, respectivamente. Si bien se observó que a medida que la estrategia de fertilización se hace más exigente, la tasa de retorno se reciente, es importante señalar que, en estos indicadores, no se ha valorizado económicamente ni la pérdida de nutrientes por aplicación de dosis menores a las de reposición; ni el mantenimiento y reconstrucción de los niveles de fertilidad (Figura 9).



**Figura 9.** Incremento acumulado en el margen bruto con respecto del testigo no fertilizado y retorno marginal al aumento de costo de fertilización para los diferentes tratamientos de fertilización. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2021/22.

## 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 16 años y 23 cultivos a un 79,9 %.

\* 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 el nutriente desde diferentes estratos de suelo, la devolución por fertilización y los residuos se localiza cerca de la superficie. En cambio, los tratamientos T1 (testigo) y T2 (TUA) resultaron secuencias extractivas, que llevaron a un final por debajo del observado al comenzar el experimento.

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

\* La recuperación media de P en planta entera – estimando un índice de cosecha de referencia- alcanza alrededor de un 39,7 % del P aplicado, valor que se encuentra dentro del rango mencionado en la bibliografía. La intensificación agrícola, mediante doble cultivo y siembra de gramíneas fue una buena herramienta para acentuar este proceso y tornar más eficiente el uso del nutriente.

\* Los resultados económicos señalan que, si bien las estrategias de fertilización más ambiciosas incrementan la inversión en fertilizantes respecto de la tecnología media del productor actual, también aumentan los ingresos y la rentabilidad en el mediano y largo plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Berardo, A. 2003.** Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. In Simposio "El fósforo en la agricultura Argentina". INPOFOS. Rosario, 8 y 9 de mayo del 2003.
- Boxler, M., F. O. García, A. Correndo, S. Gallo, R. Pozzi, M. Uranga, F. Bauschen, H. Rivero, N. Reussi Calvo y A. Berardo 2013.** Red de Ensayos en Nutrición de Cultivos. Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2012/13: Maíz, 25 pp. Disponible on-line [www.ipni.net/lacs](http://www.ipni.net/lacs)
- 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.
- Dodd, J. R., & Mallarino, A. P. (2005).** Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1118-1128.
- Drury, C. F., & Tan, C. S. (1995).** Long-term (35 years) effects of fertilization, rotation and weather on corn yields. *Canadian Journal of Plant Science*, 75(2), 355-362.
- Edwards, C. L. (2017).** *Evaluation of long-term phosphorus fertilizer placement, rate, and source, and research in the US Midwest* (Doctoral dissertation, Kansas State University).
- Ferraris, G., M. Toribio, R. Falconi y L. Couretot. 2015.** Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. Actas CD Simposio Fertilidad 2015. pp 137-142. "Nutriendo los suelos para las generaciones del futuro". Rosario, 19-20 Mayo 2015. IPNI Cono Sur – Fertilizar AC.
- IPNI. 2013.** Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes en cereales, oleaginosas, industriales y forrajeras. IPNI Programa Latinoamérica Cono Sur. Disponible on line <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>.
- Jarosch, K., Oberson, A., Emmanuel, F., Gunst, L., Dubois, D., Mäder, P., & Mayer, J. (2017, April).** Phosphorus (P) balances and P availability in a field trial comparing organic and conventional farming systems since 35 years. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 19, p. 15377).
- Johnston A. and J. Keith Syers. 2009.** A New Approach to Assessing Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. *Better Crops/Vol. 93* (2009, No. 3).
- Lang, M., Christie, P., Zhang, J., & Li, X. (2018).** Long-term phosphorus application to a maize monoculture influences the soil microbial community and its feedback effects on maize seedling biomass. *Applied Soil Ecology*, 128, 12-22.
- Mallarino, A., Havlovic, B., & Schaben, D. (2016).** Effects of Broadcast and Phosphorus and Potassium Placement on Yield of Corn and Soybean Managed with Tillage or No-Tillage. *Farm Progress Reports*, 2015(1), 24.
- 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.
- Mallarino, A.P., y J. Prater. 2007.** Corn and soybean grain yield, P removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. Proceeding 19th Annual Integrated Crop Management Conference, Ames, Iowa State University.
- 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.
- Miguez, F. e I. Daverede. 2015.** Análisis económico de rotaciones y fertilización en soja. pp 155-158. Actas del Simposio Fertilidad 2015. Sesión de Posters. Cd-ROM.
- Singh, J., Brar, B. S., Sekhon, B. S., Mavi, M. S., Singh, G., & Kaur, G. (2016).** Impact of long-term phosphorous fertilization on Olsen-P and grain yields in maize–wheat cropping sequence. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 106(2), 157-168.
- Zrlica, A., Walia, M. K., Krausz, R., Secchi, S., & Cook, R. L. (2017).** Continuous Corn and Corn–Soybean Profits over a 45-Year Tillage and Fertilizer Experiment. *Agronomy Journal*, 109(1), 218-226.
- Ventimiglia, L., L. Torrens Baudrix y M. Saks. 2012.** Fósforo en la monocultura sojera: efecto de la dosis, forma y momento de aplicación sobre el balance nutricional. *Informaciones Agronómicas Hispanoamérica* 6: 23-26.
- Wu, Q., Zhang, S., Zhu, P., Huang, S., Wang, B., Zhao, L., & Xu, M. (2017).** Characterizing differences in the phosphorus activation coefficient of three typical cropland soils and the influencing factors under long-term fertilization. *PloS one*, 12(5), e0176437.
- Zhang, J., Balkovič, J., Azevedo, L. B., Skalský, R., Bouwman, A. F., Xu, G., ... & Yu, C. (2018).** Analyzing and modelling the effect of long-term fertilizer management on crop yield and soil organic carbon in China. *Science of the Total Environment*, 627, 361-372.