

Fertilización fosforo-azufrada en secuencias de soja continua. Estrategias basadas en dosis, localización y momentos de aplicación

Gustavo N. Ferraris¹, Pablo Traficante² y Alejandro Tortorielo²

Introducción

En la campaña 2010/11 se inició un ensayo, el cual continua en la actualidad, con el propósito de estudiar la evolución en el tiempo de los rendimientos, el balance de nutrientes y las propiedades químicas del suelo bajo distintas estrategias de fertilización con fósforo (P) y azufre (S) en una secuencia continua de soja.

El presente escrito expone los resultados generales de los primeros cinco años y enfatiza los resultados específicos de la campaña 2015/16. Las hipótesis del trabajo son las siguientes:

- La soja responde a la fertilización fósforo-azufrada.
- La eficiencia de uso de P y S no se modifica según la forma y/o momento de fertilización.
- El incremento en la dosis total de fertilizante aplicado se traduce en aumentos en el rendimiento de los cultivos.
- La inclusión de zinc (Zn) mejora la performance del cultivo.
- La dosis de P y la aplicación de S afectan la disponibilidad final del P extractable en el suelo, con residualidad para los próximos cultivos de la secuencia.

Materiales y métodos

El ensayo se condujo en la localidad de La Trinidad, Ferré, partido de General Arenales, (Buenos Aires, Argentina), sobre un suelo argiudol típico serie Rojas, Clase de uso I. Se evaluaron estrategias de fertilización con P y S que difirieron en cuanto a dosis, momento y forma de localización (**Tabla 1**). A partir de 2013/14, se modificó

uno de los tratamientos (T5), incorporando Zn, además de P y S.

El ensayo fue establecido bajo el sistema de siembra directa y se utilizaron variedades de soja comerciales de alto nivel de producción para la localidad. Los cultivos se implantaron como "soja de primera" con siembras de fin de octubre-principios de noviembre, sin cultivo de cobertura como antecesor. La semilla fue inoculada con *Bradyrhizobium japonicum* para asegurar adecuada provisión de nitrógeno (N). Se realizan tres aplicaciones de herbicida glifosato durante el ciclo de cultivo, así como tratamientos para el control de defoliadoras, chinches y enfermedades en forma manual.

El ensayo se condujo utilizando un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones y seis tratamientos, los cuales se presentan en la **Tabla 1**. Las parcelas fueron de 6 m de ancho por 9 m de longitud. Las fuentes de fertilizante utilizadas fueron Superfosfato Triple de Calcio (SPT, 0-46(20P)-0) y Sulfato de Calcio (SC, 0-0-0-S18).

Sobre cada una de las parcelas se evalúa el contenido de MO, pH, P y S residual en el suelo (0-20 cm). Sobre muestras de grano se evalúa la concentración de NPS, para poder realizar un balance de nutrientes. Durante las diferentes campañas, se realizó una estimación indirecta del contenido de N de la cobertura por medio del sensor Green Seeker, mediante procesamiento con software específico de imágenes digitales, y una evaluación de nodulación sobre 10 plantas por parcela. En madurez fisiológica, se midió la materia seca total. La cosecha se realizó en forma manual, con trilla estacionaria de las muestras.

Tabla 1. Tratamientos evaluados, fuentes y localización de fertilizantes en soja. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campañas 2010/11 a 2014/15.

Denominación	Criterio para P	Momento aplicación	Localización	Dosis S Siembra kg ha ⁻¹	Dosis Zn kg ha ⁻¹
T1	Testigo			SC 100	
T2	Reposición	Anticipado junio	Voleo	SC 100	
T3	Arrancador	Siembra noviembre	Localizado	SC 100	
T4	Reposición dividida	Anticipado junio Siembra noviembre	Voleo Localizado	SC 100	
T5	Reposición	Siembra noviembre	Localizado	SC 100	1.5 kg ha ⁻¹ suelo + 0.4 kg ha ⁻¹ Zn foliar
T6	Reposición sin S	Siembra noviembre	Localizado	SC 0	

¹ INTA EEA Pergamino. Av Frondizi km 4.5 (B2700WAA) Pergamino. Buenos Aires, Argentina

² Escuela Agrotécnica Salesiana. Concepción Gutiérrez de Unzué. La Trinidad, General Arenales. Buenos Aires, Argentina

* Autor de contacto. Correo electrónico: ferraris.gustavo@inta.gob.ar

Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza y comparaciones de medias.

Condiciones ambientales 2010/11 a 2015/16

En las **Figuras 1 a 6** se presentan las precipitaciones determinadas en el sitio experimental y la evapotranspiración del cultivo, así como el balance hídrico decádico para cada año. El ambiente climático fue contrastante entre las campañas evaluadas, tanto en cantidad como en distribución de las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos de soja.

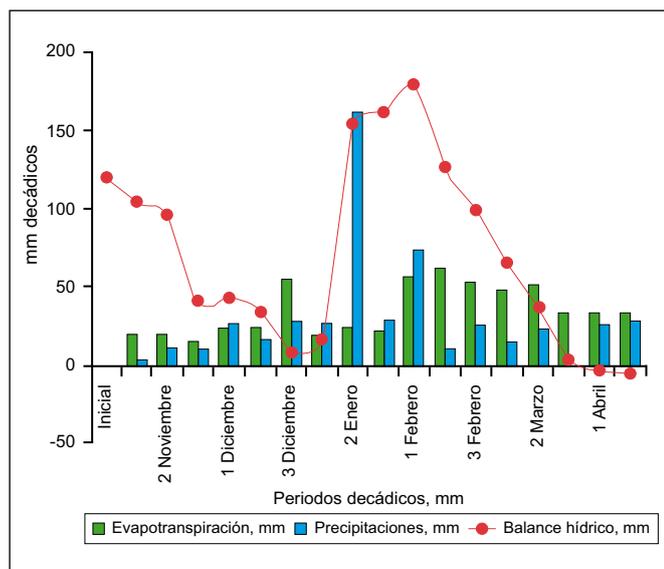


Figura 1. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádicos, considerando 2 m de profundidad. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2010/11. Precipitaciones totales 514 mm. Déficit acumulado 10 mm.

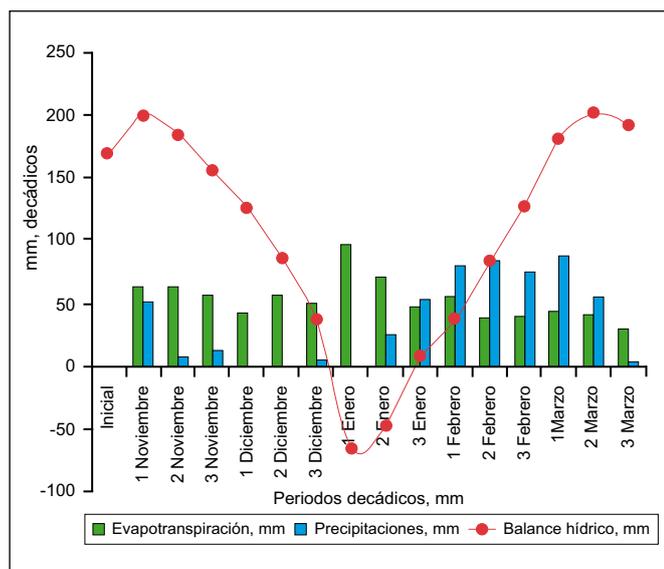


Figura 2. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádicos, considerando 2 m de profundidad. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2011/12. Precipitaciones totales 534.5 mm. Déficit acumulado 114 mm.

Resultados y discusión

Resultados de la campaña 2015/16 y acumulados 2010/11 a 2015/16

En la **Tabla 2** se presentan los resultados de morfología de las plantas en R3 en el ciclo 2015/16.

En el experimento de 2015/16, la aplicación de fertilizantes incrementó los rendimientos de grano en forma estadísticamente significativa ($P = 0.002$; $CV = 7.7\%$). Los rendimientos alcanzaron un rango entre 4203 y 5487 kg ha⁻¹, siendo la media de 5127 kg ha⁻¹ (**Tabla 3**).

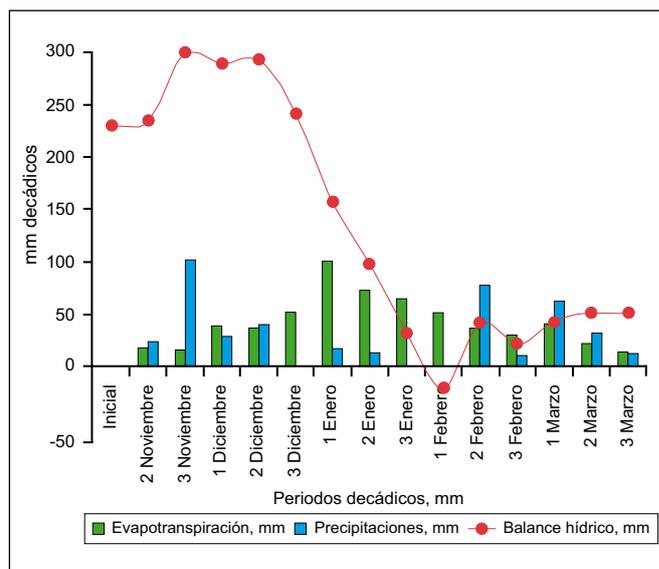


Figura 3. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádico considerando 2 m de profundidad. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2012/13. Precipitaciones totales 419 mm. AU inicial (2 m) 230 mm. Déficit acumulado 20 mm.

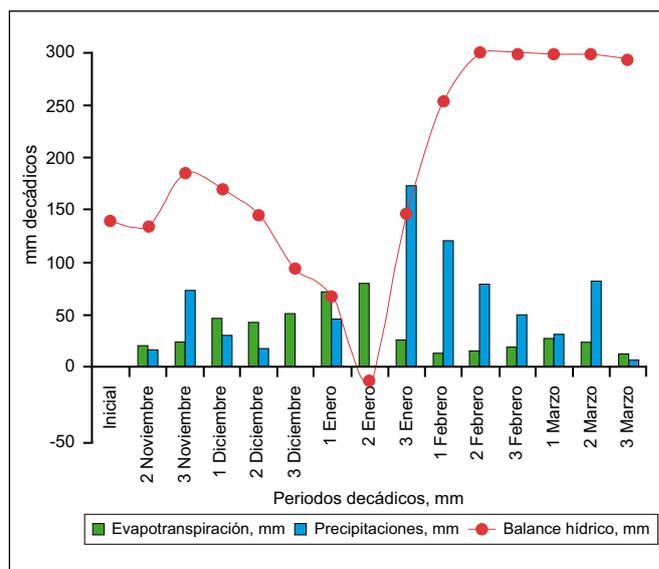


Figura 4. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádico considerando 160 cm de profundidad. La Trinidad, Buenos Aires. Campaña 2013/14. Precipitaciones totales 728 mm. AU inicial (160 cm) 140 mm. Déficit acumulado 12 mm.

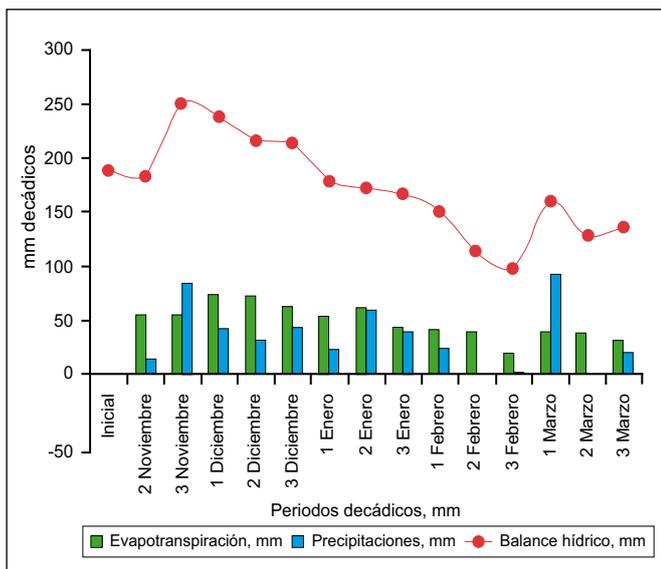


Figura 5. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádico considerando 1.6 m de profundidad. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2014/15. Precipitaciones totales en el ciclo 481 mm. AU inicial (160 cm) 180 mm. Déficit acumulado 0 mm.

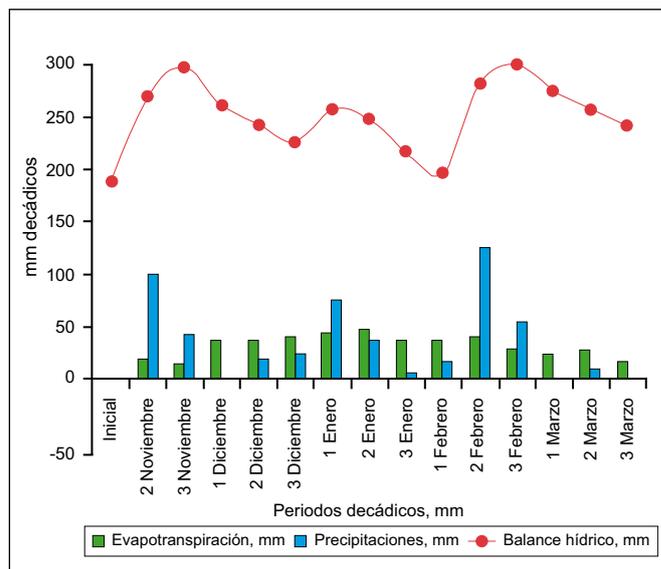


Figura 6. Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádico considerando 1.5 m de profundidad. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2015/16. Precipitaciones totales en el ciclo 517 mm. AU inicial (150 cm) 170 mm. Déficit acumulado 0 mm.

Tabla 2. Altura final de planta (AFP, cm), cobertura del canopeo (o dosel), índice verde (IV) medido por Green Seeker, número de nudos por planta y número de vainas por planta en R3. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2015/16.

Tratamiento	AFP (cm)	Ciclo 2015/16			
		Cobertura R3 (%)	IV	Nudos planta ⁻¹	Vainas planta ⁻¹
T1	88	83.5	0.81	17.2	55.3
T2	94	88.2	0.83	20.4	63.8
T3	92	85.7	0.81	16.2	58.8
T4	94	92.8	0.84	20.9	67.3
T5	97	91.3	0.84	18.8	63.8
T6	92	90.8	0.83	18.3	62.8

Tabla 3. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹), componentes y diferencia absoluta o relativa respecto del testigo. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires. Campaña 2015/16.

Tratamiento	Rendimiento kg ha ⁻¹	Número granos m ⁻²	Peso mil granos	Diferencia rendimiento con testigo	
				kg ha ⁻¹	%
T1	4203 c	3061	137.3		
T2	5158 ab	3454	149.3	+955	+22.7
T3	4588 bc	3340	137.3	+384	+9.1
T4	5488 a	3864	142.0	+1284	+30.6
T5	5333 a	3791	140.7	+1130	+26.9
T6	5092 ab	3379	150.7	+888	+21.1
P =	0.002				
CV =	7.72%				
DMS (α = 0.05)	578.9 kg ha ⁻¹				

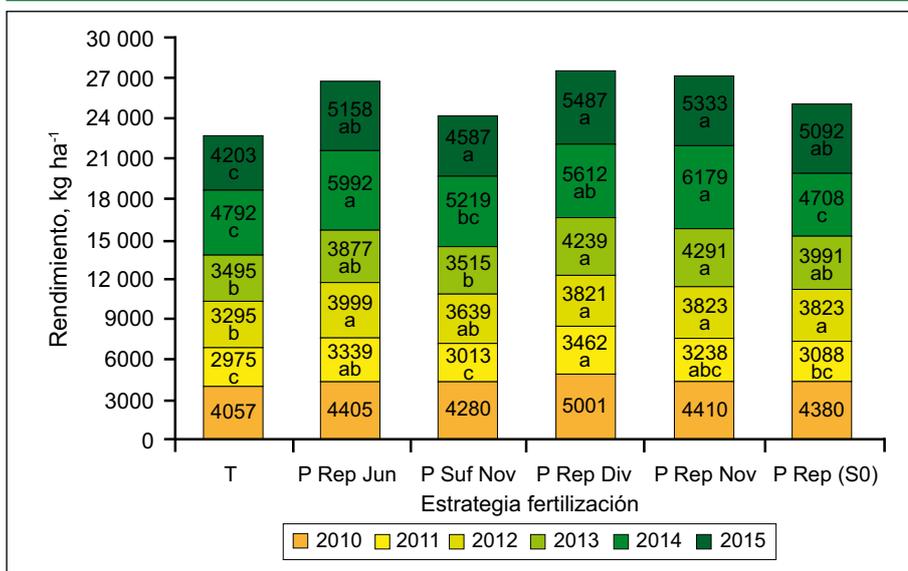


Figura 7. Rendimiento (kg ha⁻¹) como resultado de estrategias consistentes en diferentes dosis, momentos y formas de localización en soja. Para un mismo año, letras distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (p = 0.10).

Respecto de la localización, como en años anteriores, la aplicación dividida alcanzó el máximo (T4), pero sin diferencias significativas con la misma dosis anticipada (T2) y el tratamiento a la siembra acompañado por microelementos (Tabla 3 y Figura 7). El aporte de Zn, agregado por segundo año consecutivo en el tratamiento de siembra, habría contribuido a su buen resultado. En los rendimientos acumulados, la estrategia que combina una aplicación anticipada y a la siembra (T4), continúa siendo la de mejor comportamiento.

La respuesta al tratamiento “arrancador” o de “suficiencia” en la presente campaña fue escasa y el rendimiento no difirió del testigo (Tabla 3 y Figura 7). Asimismo, la respuesta a S (T5-T6) fue relevante, aunque

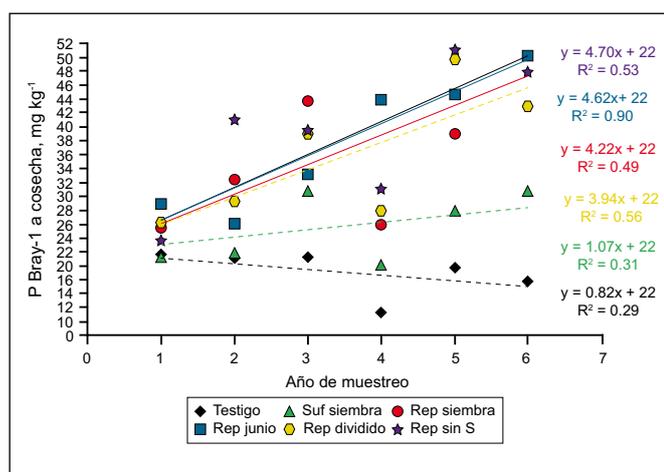


Figura 8. Cambios en el contenido de P en el suelo a lo largo del experimento. Los muestreos fueron realizados en el mes de junio, entre las campañas 2010/11 a 2015/16. Las pendientes de las relaciones ajustadas indican el incremento o caída anual en los niveles de P Bray-1, de acuerdo con el balance de nutrientes alcanzado. Estrategias de fertilización bajo soja continua. La Trinidad.

no significativa, y de una magnitud esperable y de acuerdo con los antecedentes previos. A diferencia del ciclo anterior, se determinó una considerable respuesta a P sin agregado de S (T6-T1).

Residualidad de los nutrientes a cosecha

En la **Tabla 4** se presentan los aportes por fertilización, y la estimación de extracción y balance de nutrientes en grano para las cinco campañas evaluadas. A través de los años, el balance real de nutrientes fue positivo con relación al estimado, ya que los tratamientos destinados a reposición de P sobreestimaron la extracción pese a los buenos rendimientos del ensayo, dejando un crédito de P en suelo. La concentración de P y S en grano no fue afectada por el

tratamiento de fertilización ni guardó relación con el nivel de productividad (Tabla 4), siendo el balance dependiente del nivel de fertilización y la productividad del cultivo.

En la **Figura 8** se presenta la evolución del nivel de P Bray-1 en los diferentes tratamientos. Como tendencia general, se observa una caída en los niveles del tratamiento testigo, contrastando con el mantenimiento o ligero incremento en el resto de los tratamientos. El año 4 (2014) representa un caso de niveles por debajo de la tendencia, ocurriendo lo contrario los últimos años, 2015 y 2016. Dicho comportamiento podría atribuirse a cambios en la temperatura, humedad, o de algún otro factor del ambiente, probablemente climático. La **Figura 9** por su parte muestra la relación entre el nivel final de P y el balance (aplicado-extraído). La inversa de la pendiente de esta función indica la dosis de P que es necesario agregar para incrementar

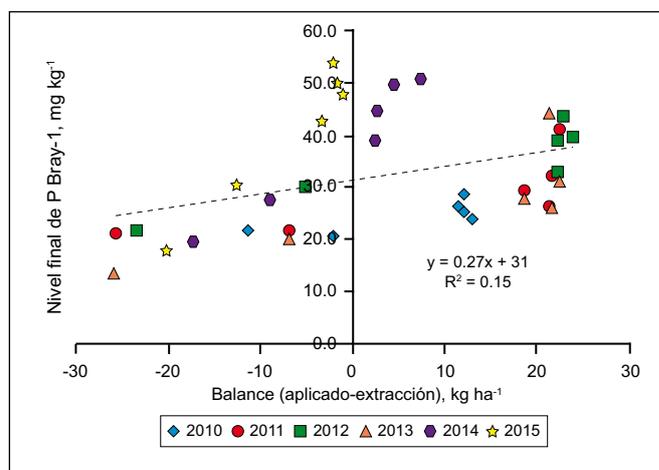


Figura 9. Relación entre el nivel final de P y el balance de P entre extracción y aplicación luego de 5 años en una secuencia continua de soja. La Trinidad, campaña 2014/15. Los valores de concentración de P y rendimiento fueron uniformados a 13% de humedad.

Tabla 4. Aporte de P y S (kg ha⁻¹), rendimiento de grano (kg ha⁻¹), concentración, extracción y balance de P y S en grano. Los valores de rendimiento, extracción y balance fueron ajustados a 13% de humedad. Dosis, momentos y localización de fertilizantes fosforados en soja. La Trinidad, General Arenales, Buenos Aires.

Trat.	Rend.	Fertilización		Conc. Grano		Extracción		Balance	
		P	S	P	S	P	S	P	S
		kg ha ⁻¹		%		kg ha ⁻¹			
2010/11									
T1	4057	0	18	0.40	0.20	16.4	8.1	-16.4	9.9
T2	4405	25	18	0.41	0.21	18.0	9.0	7.0	9.0
T3	4280	10	18	0.41	0.20	17.4	8.6	-7.4	9.4
T4	5001	25	18	0.41	0.21	20.6	10.4	4.4	7.6
T5	4410	25	18	0.40	0.20	17.8	9.0	7.2	9.0
T6	4380	25	0	0.41	0.20	17.8	8.9	7.2	-8.9
2011/12									
T1	2975	0	18	0.44	0.25	11.4	6.5	-11.4	11.5
T2	3339	25	18	0.45	0.25	13.1	7.3	11.9	10.7
T3	3013	10	18	0.45	0.24	11.8	6.3	-1.8	11.7
T4	3462	25	18	0.45	0.26	13.6	7.8	11.4	10.2
T5	3238	25	18	0.46	0.26	13.0	7.3	12.0	10.7
T6	3088	25	0	0.45	0.23	12.1	6.2	12.9	-6.2
2012/13									
T1	3294	0	18	0.42	0.22	12.0	6.4	-12.0	11.6
T2	3999	25	18	0.43	0.23	15.0	8.0	10.0	10.0
T3	3639	10	18	0.43	0.22	13.5	7.0	-3.5	11.0
T4	3821	25	18	0.43	0.23	14.3	7.7	10.7	10.3
T5	3823	25	18	0.43	0.23	14.4	7.6	10.6	10.4
T6	3823	25	0	0.43	0.22	14.3	7.2	10.7	-7.2
2013/14									
T1	3495	0	18	0.42	0.20	12.8	5.9	-12.8	12.1
T2	3877	25	18	0.43	0.18	14.5	6.1	10.5	11.9
T3	3515	10	18	0.43	0.21	13.1	6.3	-3.1	11.7
T4	4239	25	18	0.44	0.21	16.4	7.6	8.6	10.4
T5	4291	25	18	0.43	0.20	16.2	7.5	8.8	10.5
T6	3991	25	0	0.43	0.20	15.1	6.8	9.9	-6.8
2014/15									
T1	4792	0	18	0.41	0.14	17.1	5.8	-17.1	12.2
T2	5992	25	18	0.43	0.15	22.4	7.8	2.6	10.2
T3	5219	10	18	0.42	0.13	19.1	5.9	-9.1	12.1
T4	5612	25	18	0.42	0.17	20.5	8.3	4.5	9.7
T5	6179	25	18	0.42	0.12	22.6	6.5	2.4	11.5
T6	4708	25	0	0.43	0.11	17.6	4.5	7.4	-4.5
2015/16									
T1	4203	0	18	0.42	0.18	20.3	8.7	-20.3	9.3
T2	5158	25	18	0.45	0.20	26.7	11.9	-1.7	6.1
T3	4587	10	18	0.43	0.20	22.7	10.5	-12.7	7.5
T4	5487	25	18	0.45	0.20	28.4	12.6	-3.4	5.4
T5	5333	25	18	0.44	0.19	27.0	11.6	-2.0	6.4
T6	5092	25	0	0.44	0.17	25.8	9.9	-0.8	-9.9

la disponibilidad de P en suelo en 1 mg kg^{-1} . Esta resulta en 3.7 kg ha^{-1} , la cual es cercana a los mínimos registrados en experimentos similares, y es inferior al valor de $6.75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ observado en un experimento de larga duración conducido desde hace 10 años por nuestro grupo de trabajo, en una secuencia intensiva maíz –soja cebada/soja – trigo/soja. Es probable que la degradación física y biológica asociada al monocultivo de soja, la pérdida de cobertura y el habitual desecamiento superficial del suelo del sitio experimental sean los responsables de una baja absorción de P por el cultivo, dejando mayor cantidad remanente en el suelo. Es decir, mientras en una secuencia intensiva el cultivo es eficiente en absorber P, bajo monocultivo la absorción sería menor.

Conclusiones

- El sitio durante la campaña 2015/16 mostró un comportamiento climático muy favorable, permitiendo alcanzar rendimientos record, en promedio los segundos máximos desde el comienzo de este experimento.
- La respuesta en rendimiento durante la última campaña fue estadísticamente significativa, y abarcó un rango de 384 a 1284 kg ha^{-1} (9.1 a 30.6%). Los rendimientos muestran una diferencia de productividad creciente a lo largo del tiempo, medida en términos anuales o en forma acumulativa. Por lo expuesto, esto sostiene la hipótesis de que la soja responde a la fertilización con P y S. Este concepto, válido para P a través de los años, en el cuarto, quinto y sexto ciclo puede señalarse también para S.
- Luego de seis años, las alternativas tecnológicas para la aplicación de nutrientes –anticipado al voleo, localizado a la siembra y una combinación de ambas– no muestran diferencias significativas en los rendimientos ni una tendencia consistente en la evolución de PS en suelo. De tal manera, la forma y el momento de aplicación no afectaron la eficiencia de uso de P o S.
- Se observaron respuestas crecientes en función de la dosis de P, acentuando la diferencia entre tratamientos de reposición y suficiencia con relación a ciclos anteriores, tanto en términos de rendimientos absolutos como porcentuales.
- El agregado de Zn (adicional a P y S), a partir del año 4, mejoró la performance del cultivo, igualando o superando a los tratamientos T2 y T4.
- La estrategia de fertilización afectó el nivel residual del P extractable en el suelo. A partir del tercer año se acentuaron los contrastes entre tratamientos, con caída en el testigo, ligero incremento o mantenimiento en la estrategia de suficiencia, y un crecimiento en los niveles de P extractable cuando se aplicará el concepto de reposición.

Bibliografía

- Bray, R., y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci* 59:39-45.
- Ciampitti, I.A., y F.O. García. 2007. Archivo Agronómico N°11: Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Echeverría, H.E., y F.O. García (eds.). 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Ferraris, G. 2008. Fertilización de la Soja. pp. 261-278. En: R. Melgar y M. Díaz Zorita (eds). Fertilización de cultivos y pasturas. 2da edición ampliada y actualizada. 569 p.
- Ferraris, G., M. Toribio, R. Falconi, y L. Couretot. 2013. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos. Séptimo año de experimentación. Informe Interno. EEA INTA Pergamino.
- García, F.O., y M.F. González Sanjuan. 2012. La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos?. Fertilizar Asociación Civil. Diciembre 2012, Revista N°24. pp. 1-4. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *RIA / Vol. 38* N°1. pp. 33-39.
- Salvagiotti, F., M. Barraco, D. Dignani, H. Sánchez, A. Bono, P. Vallone, G. Gerster, C. Galarza, J. Montoya, y V. Gudelj. 2013. Plant stand, nodulation and seed yield in soybean as affected by phosphate fertilizer placement, source and application method. *European Journal of Agronomy* 51:25-33.
- SIIA, Sistema Integrado de Información Agropecuaria. 2013. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. <http://www.siia.gov.ar>, consultado el 01/03/13. Soja Campaña 2012/13. 9 p.
- Ventimiglia, L.A., y H.G. Carta. 2005. Soja: Efecto de los fertilizantes aplicados en la línea de siembra sobre el número de plantas y el rendimiento. *Informaciones agronómicas* N°28, Diciembre 2005, 23-28.*