

Red de Ensayos en Nutrición de Cultivos Región CREA Sur de Santa Fe

Resultados de la Campaña 2018/19: Maíz

Preparado por:

Paula Gelso (CREA Sur de Santa Fe), Franco Permingeat (CREA Teodelina), Santiago Gallo (CREA Sur de Santa Fe), Ricardo Pozzi (CREA San Jorge-Las Rosas), Matías Salinas (Nutrien Ag Solutions), Nahuel Reussi Calvo y Angel Berardo (Laboratorio Fertilab) y Fernando O. García (IPNI Cono Sur)

En la campaña 2018/19, la región Sur de Santa Fe del movimiento CREA, con la colaboración de IPNI Cono Sur y el auspicio de Nutrien Ag Solutions, continuó la Red de Ensayos de Nutrición de Cultivos iniciada en la campaña 2000/01. Los objetivos generales de la Red son:

1. Determinar respuestas (directas y residuales) de los cultivos dentro de la rotación a la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P), y azufre (S) en diferentes ambientes de la región
2. Evaluar algunas metodologías de diagnóstico de la fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada
3. Evaluar deficiencias y respuestas potenciales a otros nutrientes: potasio (K), magnesio (Mg), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu) y zinc (Zn)
4. Conocer la evolución de los suelos bajo distintos esquemas de fertilización determinando índices relacionados con su calidad

En este informe se reportan los resultados observados en cinco ensayos de maíz durante la campaña 2018/19, dos bajo rotación maíz - trigo/soja de segunda (M-T/S) y tres bajo rotación maíz - soja de primera - trigo/soja de segunda (M-S-T/S). Los objetivos específicos para esta campaña fueron:

1. Evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada (directa y residual) y el método de diagnóstico de disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra.
2. Evaluar la respuesta a la fertilización fosfatada (residual) y el análisis de suelos en capa superficial en pre-siembra como método de diagnóstico.
3. Evaluar la respuesta a la fertilización azufrada (directa y residual) y el análisis de S-sulfato en pre-siembra como método de diagnóstico.
4. Evaluar los rendimientos sin limitaciones nutricionales en cada uno de los sitios de experimentación.

5. Evaluar parámetros de suelo: el nivel de $P_{\text{Bray-1}}$, N-nitrato y S-sulfato en tratamientos selectos.
6. Determinar propiedades químicas selectas en los tratamientos Testigo y Completo.

Información de años anteriores de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe se puede encontrar en García et al. (2010) y en los sitios de Internet <http://www.aacrea.org.ar> y <http://Lacs.ipni.net>.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los cinco ensayos que se reportan en este informe se establecieron en lotes bajo siembra directa de varios años ubicados en establecimientos de grupos CREA de la región Sur de Santa Fe, en la provincia de Santa Fe (**Tabla 1**). Desde 2000/01, la rotación establecida es Mz-Tr/Sj en los sitios Balducchi y San Alfredo y Mz-Sj-Tr/Sj en La Blanca, La Hansa y Lambaré. Los seis tratamientos establecidos son similares en los cinco sitios y se disponen en un diseño en bloques completos con tres repeticiones. Los mismos se repiten anualmente siempre sobre las mismas parcelas. La cantidad de nutrientes y los fertilizantes aplicados a la siembra del maíz en la campaña 2018/19 se indican en la **Tabla 2**. Cabe destacar, que debido a los altos niveles de $P_{\text{Bray-1}}$ alcanzados en los tratamientos con P, desde la campaña 2016/17 se decidió suspender la aplicación de P en los tratamientos correspondientes, se volverá a aplicar P en dichos tratamientos cuando el nivel de $P_{\text{Bray-1}}$ alcance valores inferiores a 30 mg kg^{-1} . El manejo general del cultivo (control de malezas, fecha de siembra, etc.) fue similar al manejo del lote de producción, utilizándose maquinaria del productor en todos los sitios.

En pre-siembra, se muestrearon tratamientos selectos en los tres bloques para determinar: $P_{\text{Bray-1}}$, N-nitrato y S-sulfato a 0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm de profundidad, y N mineralizable como N-nitrato producido por incubación anaeróbica en 7 días (Nan) a 0-20 y 20-40 cm. Se tomaron veinte "piques" por muestra superficial y 10 "piques" por muestra sub-superficial. Se determinó el contenido de agua útil del suelo, de ser posible a 0-100 cm de profundidad, a la siembra, en los tratamientos PS, NS, NP y NPS.

En el muestreo de pre-siembra de esta campaña 2018/19 se realizó un muestreo de propiedades químicas, el cual se repite cada 4-6 años para conocer la evolución de estos parámetros en tratamientos contrastantes. Se muestrearon los tratamientos Testigo y Completo en las tres repeticiones de cada ensayo para evaluar materia orgánica (MO), pH, P Bray, capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio), y micronutrientes (boro, cobre,

hierro, manganeso y zinc). Con los datos de bases intercambiables y CIC se estimó el porcentaje de saturación de bases como:

$$\text{Saturación de bases} = (\text{Suma de bases/CIC}) * 100$$

A partir de la información de rendimientos se analizaron respuestas a la fertilización y se realizaron estimaciones de eficiencia de uso de recursos para los diferentes tratamientos. Considerando las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo (Octubre-Febrero) se estimó la productividad del agua (PA) como el cociente entre el rendimiento de los tratamientos y las precipitaciones registradas durante el ciclo de los cultivos. Como indicadores de eficiencia de uso de nutrientes se realizaron estimaciones de la productividad parcial del factor (PPF, kg de grano producido por kg de nutriente aplicado) y el balance parcial de nutrientes (BPN kg de nutriente exportado por kg de nutriente aplicado). Estas estimaciones solo se realizaron para N y S, dado que en la presente campaña no se aplicó P.

El análisis de los datos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y/o regresión, según corresponda. Los niveles críticos de nutrientes se estimaron mediante el método lineal-plateau y el del arcoseno-logaritmo modificado (Correndo et al., 2016) utilizando Microsoft Excel 2016®. Las figuras fueron realizadas con Microsoft Excel 2016®.

RESULTADOS

Análisis de suelos

Los resultados de los análisis de suelo previos a la siembra se muestran en la **Tablas 3 y 4** y las **Fig. 1 y 2**. En el caso de N, se observaron efectos residuales positivos de la fertilización nitrogenada sobre los niveles de N-nitrato en Balducchi, y, en menor medida, en San Alfredo y La Blanca. Los niveles de disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra (0-60 cm) fueron bajos en general, pero el sitio Balducchi mostro valores mas altos que los restantes. Por otra parte, los niveles de Nan (como indicador del N mineralizable) fueron particularmente bajos en Balducchi. Los valores mas altos de Nan se registraron en San Alfredo y La Hansa. No se observó efecto residual de la fertilización nitrogenada sobre este indicador en ninguno de los sitios.

El P Bray muestra residualidad de P de aplicaciones de años previos en los cinco sitios, y dicha residualidad se observa aun hasta 60 cm como es el caso de San Alfredo, La Blanca y La Hansa (**Fig. 1 y 2**). Este efecto probablemente se deba a la movilización de P por las raíces de las plantas a través de los años de ensayo. Los niveles de P Bray de los tratamientos NS han ido disminuyendo a lo largo de los años y alcanzan valores de 6-28 mg kg⁻¹. Los tratamientos NPS siguen mostrando valores altos, pero con los dos años de fertilización fosfatada interrumpida han caído a

niveles debajo de 30 mg kg⁻¹ en Balducchi y San Alfredo (29 y 26 mg kg⁻¹, respectivamente), por lo que se deberá volver a fertilizar con P a partir de 2019/20.

Los niveles de S-sulfato solo muestran efecto residual en San Alfredo. Los niveles fueron muy bajos en los cinco sitios. En todos los casos, los niveles de S-sulfato (0-20 cm) se ubicaron por debajo de 8-10 mg kg⁻¹, umbral crítico mencionado en la literatura internacional.

Evolución de algunas propiedades químicas

El análisis de suelo de propiedades químicas que se efectúa periódicamente se muestra en la **Tabla 4**. Las **Fig. 3, 4 y 5** muestran la evolución de P Bray, MO, pH, saturación de bases y zinc (Zn) para los muestreos de 2000 (inicial), 2004, 2008, 2012 y 2018.

Como se indico mas arriba, los niveles de P Bray del Testigo (sin aplicación de P) fueron disminuyendo a lo largo de los años en todos los sitios, excepto La Blanca donde se mantienen entre 12 y 14 mg kg⁻¹ (**Fig. 3**). En el tratamiento Completo, los niveles de P Bray subieron hasta 2012 como resultados de balances positivos de P (aplicación > remoción), mientras que la caída de 2012 a 2018 se debe a balances negativos de P (aplicación < remoción) por la no aplicación de P a partir de 2016. Esta situación de caída en los tratamientos Completo no se observó en La Blanca y Lambaré.

En general, la MO tendió a disminuir en ambos tratamientos Testigo y Completo a lo largo de los años, pero esta reducción fue mas acentuada en el Testigo, probablemente debido a la menor producción de biomasa aérea y de raíces por las limitaciones nutricionales (**Fig. 3**). En La Blanca, la MO varió en menor medida, siendo casi constante.

La evolución del pH en ambos tratamientos mostro evidencias de acidificación, variable según el ensayo, pero siempre mas acentuada en el tratamiento Completo (**Fig. 4**). Estas caídas en pH son reflejo de las caídas en saturación de bases. La mayor desaturación, y consecuente acidificación, en el tratamiento Completo se debería a la mayor remoción de bases en granos por los mayores rendimientos y, probablemente en menor medida, al efecto acidificante de fertilizantes amoniacales (urea, MAP). Los tratamientos Completo de Balducchi y San Alfredo ya se encuentran con una saturación de bases por debajo del 60%, que podría considerarse como umbral crítico. Los tratamientos Completo de los otros sitios estarían llegando a ese valor de 60% de saturación de bases. Las determinaciones de pH y saturación de bases de esta campaña 2018 están fuertemente relacionadas e indicarían que una saturación del 70% resulta en un pH de aproximadamente 6.

Los niveles de los micronutrientes hierro (Fe) y manganeso (Mn) se ubican en niveles por arriba de los mencionados como críticos en la literatura internacional. Los valores tendieron a ser mayores en el tratamiento Completo que en el Testigo, probablemente por la mayor acidez observada en el tratamiento Completo.

Los micronutrientes boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn) se aplican regularmente en el tratamiento Completo, por lo que los mayores niveles observados respecto del Testigo probablemente se deban a la acumulación de los mismos. En el caso de Zn (Fig. 5), se observa una tendencia de disminución en el Testigo y de aumento en el Completo a través de los años, de alguna manera similar a lo ocurrido con P Bray.

Considerando niveles de críticos de 0.5-1 mg kg⁻¹ para B, los valores son bajos a medios en Balducchi y San Alfredo. Los valores de Cu se ubican por arriba del límite crítico internacional de 1 mg kg⁻¹. Para Zn, a nivel nacional se ha determinado un rango crítico de 0.9-1.3 mg kg⁻¹, por lo que los tratamientos Testigo de Balducchi y La Hansa estarían en valores límites.

Rendimientos y respuestas a la fertilización

En términos climáticos, la campaña se destacó por comenzar con buena reserva de agua en el suelo a la siembra en todos los sitios (Tabla 1). Durante el ciclo del maíz, el nivel de precipitaciones fue alto, por lo tanto, la oferta hídrica no fue limitante.

Los rendimientos fueron elevados en general, excepto en La Hansa (Tabla 5). Los mayores rendimientos se registraron con los tratamientos NPS y Completo, que solamente difirieron entre sí en La Hansa y Lambaré. En contraste, los menores rendimientos se registraron con el tratamiento Testigo, especialmente en el sitio Balducchi (4615 kg ha⁻¹) y en La Hansa (4914 kg ha⁻¹). Estos son los dos sitios de menor fertilidad al inicio de los ensayos y de mayor número de años bajo agricultura continua.

En cuanto a la respuesta a nutrientes, en Balducchi se observaron respuestas significativas a N y a S, pero la interacción NPS resulta ser la de mayor respuesta (+8528 kg ha⁻¹).

En San Alfredo, se observaron respuestas significativas a N, P y S; sin embargo, la respuesta de mayor significancia fue a NPS (+5504 kg ha⁻¹, Tabla 5). Estas respuestas se atribuyen a los bajos niveles de N-nitratos, P Bray y S-sulfatos (Tabla 3).

En La Blanca, se observaron respuestas significativas a N y a S, y a la interacción NS (+5377 kg ha⁻¹). Estas respuestas también se atribuyen a bajos niveles de N y S disponible en el suelo. Se observó una tendencia de respuesta a P (no significativa), relacionada al nivel medio de P Bray (11 mg kg⁻¹).

En La Hansa, se observaron respuestas significativas a N y a otros nutrientes (+2059 y +1547 kg ha⁻¹, respectivamente). Las respuestas se relacionan al bajo nivel de N disponible. La tendencia de respuesta a S respondería al bajo nivel de S-sulfatos y la falta de respuesta a P al nivel de P Bray de 13 mg kg⁻¹.

En Lambaré, se observaron respuestas significativas a N, a S, y a otros nutrientes (+2056, +1024 y +604 kg ha⁻¹, respectivamente). La interacción NS fue significativa (+3563 kg ha⁻¹). EL alto nivel de P Bray (28 mg kg⁻¹) explicaría la falta de respuesta a P.

Los valores de índice de verdor (SPAD) mostraron respuestas significativas a NS y NP en Balducchi, a PS, NS y NP en La Blanca, y a N, NS y NP en La Hansa (Tabla 6). Los índices de suficiencia de nutrición (ISN), estimados como la relación entre el índice de verdor de cada tratamiento en relación al índice de verdor del tratamiento Completo, se muestran en la Tabla 8. El ISN se relacionó estrechamente con los rendimientos de los tratamientos (Fig. 6). Los menores ISN se registraron en Balducchi donde las respuestas fueron mayores.

A partir de las precipitaciones entre Octubre y Febrero inclusive, se estimó la productividad del agua de lluvia (PA, kg mm lluvia⁻¹) para todos los tratamientos en los cinco sitios (Fig. 7). La PA varió entre 6 y 26 kg maíz mm⁻¹. Un uso eficiente del agua en maíz se estima en 27 kg mm⁻¹, por lo que las PA de los tratamientos NPS en San Alfredo y La Blanca estarían en niveles óptimos.

En cuanto a la eficiencia de uso de los nutrientes (Tabla 8), las mejores productividades parciales, tanto de N (PPN) como de S (PPS), se registraron para los tratamientos NPS y Completo, lo que destaca a la nutrición balanceada. Los valores de PPN de dichos tratamientos se ubican entre 77 y 86 kg kg⁻¹ N en Balducchi, San Alfredo y La Blanca, y son algo mas bajos en Lambaré y especialmente en La Hansa. Valores de PPN de entre 60 y 80 kg kg⁻¹ N son considerados adecuados a nivel mundial.

Los balances parciales de nutrientes (BP), expresados como kg nutriente extraído kg⁻¹ nutriente aplicado, se detallan en la Tabla 8. Para N, los BP muestran valores de extracción generalmente inferiores a 1, indicando que la aplicación excedió la remoción en grano. Los tratamientos NPS y Completo mostraron los valores mas cercanos a 1. Considerando que para las estimaciones de BP de N se utilizó una concentración de N promedio en grano de 1.27%, el valor de BP de N de 1 se alcanzaría con una PPN de 78, esta podría ser considerada una situación "ideal".

Relación entre variables de suelo y rendimientos

A continuación, se discuten algunas relaciones entre las variables de suelo y planta, y las respuestas a los nutrientes. En todos los casos se evalúan las relaciones para las 13 campañas con información de maíz de la Red de Nutrición, incluyendo ocho sitios en 2000/01, cinco sitios en 2002/03, seis sitios en 2003/04, cuatro sitios en 2004/05, nueve sitios en 2006/07, dos sitios en 2008/09, cuatro sitios en 2009/10, dos sitios en 2010/11, cinco sitios en 2012/13, dos en 2014/15, tres en 2015/16, dos en 2016/17, y cinco en 2018/19 (n=57).

Se estimó una relación significativa entre la disponibilidad de N a la siembra (N-nitrato en el suelo a la siembra, 0-60 cm de profundidad, + N fertilizante) y los rendimientos de maíz (**Fig. 8**). Las funciones cuadrática-plateau o linear-plateau ajustadas, permitirían estimar necesidades aproximadas de 165 kg ha⁻¹ de N (suelo + fertilizante) para alcanzar rendimientos de 10 000 kg maíz ha⁻¹, mientras que se necesitarían alrededor de 231-265 kg N ha⁻¹ para lograr un rendimiento máximo medio estimado en 11618-11877 kg ha⁻¹. Por otra parte, se ajustó un modelo de rendimiento relativo ($r = 0.89$, $p < 0.001$) que arrojó un nivel crítico de 225 kg N ha⁻¹ (IC_{95%} = 215 a 236 kg N ha⁻¹) para lograr el 99% del rendimiento máximo (**Fig. 9**).

Considerando los 57 casos (sitios-años) de las 13 campañas de maíz, la relación entre el rendimiento relativo (rendimiento tratamiento NS/rendimiento tratamiento NPS) y la concentración de P_{Bray-1} en la capa superficial (**Fig. 10**) indica un nivel crítico de 11 mg kg⁻¹ para obtener el 90% del rendimiento relativo, con un intervalo de confianza entre 9 y 13 mg kg⁻¹. Para obtener el 95% del rendimiento relativo, el umbral asciende a 15 mg kg⁻¹, con un intervalo de confianza entre 13 y 17 mg kg⁻¹.

Por otra parte, la respuesta de maíz a S se correlacionó con la concentración de S-sulfato a 0-20 cm (**Fig. 11**), no así con la disponibilidad a 0-60 cm (datos no mostrados). En función de dicha relación se estimó un nivel crítico de 7 mg kg⁻¹ (entre 6 y 8 mg S kg⁻¹) para obtener el 95% del rendimiento relativo. Cabe destacar que, en general, los niveles de S-sulfato en superficie (0-20 cm) a la siembra son bajos, menores de 10 mg kg⁻¹. Por lo tanto, surge la necesidad de evaluar metodologías complementarias basadas en el análisis de planta o grano con el fin de poder diagnosticar mejor la deficiencia de S en el cultivo de maíz.

CONCLUSIONES

1. Los análisis de suelos realizados en pre-siembra mostraron efectos residuales significativos de fertilizaciones de campañas anteriores para P_{Bray-1}, principalmente en el estrato 0-20 cm, pero inclusive a mayor profundidad. En esta campaña no se

- observo residualidad como N-nitrato o S-sulfato de la fertilización nitrogenada y azufrada de años anteriores, respectivamente.
2. El análisis de suelo de propiedades químicas que se efectúa periódicamente, indica que:
 - 2.1. En general, la MO tendió a disminuir en ambos tratamientos, Testigo y Completo, a lo largo de los años, pero esta reducción fue mas acentuada en el Testigo.
 - 2.2. La evolución del pH en ambos tratamientos, Testigo y Completo, mostró evidencias de acidificación, variable según el ensayo, pero siempre mas acentuada en el tratamiento Completo.
 - 2.3. Estas caídas en pH son reflejo de las caídas en saturación de bases. Los tratamientos Completo de Balducchi y San Alfredo ya se encuentran con una saturación de bases por debajo del 60%, que podría considerarse como umbral crítico. Los tratamientos Completo de los otros sitios estarían llegando a ese valor de 60% de saturación de bases.
 - 2.4. Los niveles de los micronutrientes cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn) se ubican en valores por arriba de los mencionados como críticos en la literatura internacional.
 - 2.5. Los micronutrientes boro (B) y zinc (Zn) presentan valores bajos o cercanos a los críticos en Balducchi, San Alfredo y La Hansa.
 - 2.6. Las aplicaciones de B, Cu y Zn en los tratamientos Completo muestran efectos residuales en los análisis de suelo.
 3. Luego de diecinueve campañas, los niveles de rendimiento de maíz de los tratamientos Testigo muestran el agotamiento de las reservas de N, P y S de estos suelos, con disminuciones del 51% y 37% en los rendimientos promedio del tratamiento Testigo respecto del tratamiento NPS para los ensayos bajo rotación M-T/S y rotación M-S-T/S, respectivamente.
 4. En ambos sitios, la disponibilidad de agua a la siembra y la distribución de precipitaciones no fueron limitantes para el cultivo, lo que permitió alcanzar altos rendimientos de maíz, especialmente en las parcelas con NPS.
 5. El agotamiento por falta de reposición generó grandes respuestas a la aplicación de N, P y S, con respuestas promedio de 4284 y 2320 kg ha⁻¹ a N, 2528 y 170 kg ha⁻¹ a P y 2869 y 1239 kg ha⁻¹ a S, para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Sin embargo, como en años anteriores, las mayores respuestas se observan con las aplicaciones conjuntas NPS (los dos sitios de rotación M-T/S) o NS/NP (La Blanca y Lambaré).
 6. Los ensayos de La Hansa y Lambaré mostraron respuesta significativa a otros nutrientes complementarios (K, Mg, B, Cl, Cu, Zn).

7. La productividad del agua (PA) por mm de lluvia, con 561-959 mm entre Octubre y Febrero, se incrementó cuando se cubrieron las deficiencias de N, P y/o S, registrando un promedio de 9 kg maíz mm⁻¹ para el Testigo y de 15 kg maíz mm⁻¹ para el tratamiento NPS.
8. Se obtuvieron relaciones significativas entre el rendimiento y la disponibilidad de N en suelo a la siembra (N suelo + N fertilizante). Según la función ajustada para rendimiento absoluto, disponibilidades de N a la siembra (suelo + fertilizante) de entre 165 y 231-265 kg ha⁻¹ permitieron alcanzar rendimientos medios de entre 10000 a 11877 kg ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte, según el modelo ajustado para rendimiento relativo, se estimó un umbral de 225 kg N ha⁻¹ para alcanzar el 99% del rendimiento máximo.
9. Se determinaron rangos críticos de P_{Bray-1} de 9-13 mg kg⁻¹ y de 13-17 mg kg⁻¹, en 0-20 cm a la siembra, para el 90% y 95% del rendimiento máximo, respectivamente. Por debajo de estos rangos, la probabilidad de respuesta es alta y por arriba de los mismos la probabilidad de respuesta es baja. Por lo tanto, sería suficiente mantener niveles de P_{Bray-1} superiores a 17 mg kg⁻¹ para maíces sin restricciones de nutrición fosfatada.
10. Similar al caso de P, suelos con niveles de S-SO₄⁻² menores de 6 mg kg⁻¹ en 0-20 cm a la siembra presentaron respuestas altamente probables a la aplicación de S, mientras que por arriba de 8 mg kg⁻¹, la probabilidad y magnitud de respuesta disminuyó considerablemente.

Agradecimientos

- A todos los asesores, productores y personal de los establecimientos que implantaron los ensayos y participan en este proyecto.
- A Nutrien Ag Solutions por su continuo apoyo para la realización de esta Red.

Referencias

- Correndo, A.A., F.H. Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti, y F.O. García. 2016. Método alternativo para estimar niveles críticos de nutrientes. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Ordenamiento territorial: un desafío para la ciencia del suelo. 27 de Junio al 1^{ro} de Julio de 2016. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. AACCS. Disponible en: <https://www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/repositorio/978-987-688-173-9.pdf>
- García F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. AACREA. 64 pp. ISBN 978-987-1513-07-9.

Tabla 1. Información de manejo y de sitio, lámina de agua en el suelo a la siembra y precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

Establecimiento	Balducchi	San Alfredo	La Blanca	La Hansa	Lambaré
CREA	Teodelina	Santa Isabel	Gral. Baldissera	Armstrong-M. de Oca	Las Rosas
Serie Suelo	Santa Isabel	Hughes	La Bélgica	Bustanza	El Trébol
Años agricultura	+60	24	24	39	22
Antecesor	Trigo/Soja	Trigo/Soja	Trigo/Soja	Trigo/Soja	Trigo/Soja
Híbrido	DK72-10 VT3Pro	AX7761	NEXT22.6	NEXT22.6	DM2771
Fecha de siembra	26/9/18	26/9/18	1/10/18	10/10/18	5/10/18
Densidad lograda (pl/ha)	73000				
Distancia entre surcos (cm)	0.52	0.52	0.52	0.52	0.70
Fecha de Cosecha		14/3/19	30/4/19	19/5/19	13/3/19
Lámina de agua útil (mm, 0-100 cm)					
Siembra	143	168	165	165	144
Precipitaciones					
Septiembre	24	28	28	0	32
Octubre	92	87	77	112	81
Noviembre	169	95	100	310	403
Diciembre	85	167	91	214	142
Enero	283	210	255	83	251
Febrero	36	15	38	135	82
Marzo	171	126	75	105	130
Ciclo (Oct-Febrero)	665	574	561	854	959

Tabla 2. Tratamientos de fertilización establecidos en los cinco sitios. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

Tratamiento	1	2	3	4	5	6
Nombre	Testigo	PS	NS	NP	NPS	NPSMgK Micros
	Fertilizante (kg/ha)					
FMA		0		0	0	0
Urea			370	370	370	370
Azufertil (19%)		79	79		79	79
Oxido de magnesio (36%)						40
Cloruro de potasio						50
B10						10
Zn 40						5
Cu25						8
Fertilizante total (kg/ha)	0	79	449	370	449	562
	Nutrientes (kg/ha)					
N			170	170	170	170
P		0		0	0	0
K						25
Mg						14
S		15	15		15	15
B						1
Zn						2
Cu						2
Cl						23

Tabla 3. Análisis de suelo previo a la siembra del maíz en los cinco sitios. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

Ensayo	Tratamiento	P	N-NO ₃	N-NO ₃	S-SO ₄	S-SO ₄	Nan
		ppm	ppm	kg ha ⁻¹	ppm	kg ha ⁻¹	ppm
		0-20 cm	0-20 cm	0-60 cm	0-20 cm	0-60 cm	0-20/ 20-40 cm
Balducchi	PS	-	32	124	-	-	27/12
	NS	6	-	-	-	-	-
	NP	-	-	-	5	40	-
	NPS	29	46	156	5	33	26/12
San Alfredo	PS	-	18	85	-	-	50/24
	NS	7	-	-	-	-	-
	NP	-	-	-	4	35	-
	NPS	26	19	91	11	61	55/38
La Blanca	PS	-	18	99	-	-	47/26
	NS	11	-	-	-	-	-
	NP	-	-	-	5	36	-
	NPS	49	20	110	7	47	43/27
La Hansa	PS	-	18	89	-	-	52/31
	NS	13	-	-	-	-	-
	NP	-	-	-	4	30	-
	NPS	59	21	84	5	37	58/32
Lambaré	PS	-	18	102	-	-	52/40
	NS	28	-	-	-	-	-
	NP	-	-	-	5	36	-
	NPS	75	14	69	6	40	44/29

Tabla 4. Análisis de suelo previo a la siembra del maíz en los tratamientos Testigo y Completo en los cinco sitios (0-20 cm). Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

Ensayo	Tratamiento	P	MO	pH	CIC	Ca	Mg	K	Saturación bases	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		ppm	%			cmol _c kg ⁻¹			%	ppm				
Balducchi	Testigo	4	1.5	6.3	11.4	6.6	1.2	0.9	77%	0.4	0.9	83	57	0.8
	Completo	30	2.0	5.4	14.8	6.1	0.8	1.0	55%	0.4	1.3	142	68	2.1
San Alfredo	Testigo	6	3.3	5.7	19.7	9.2	2.0	1.4	64%	0.9	1.3	82	82	2.4
	Completo	32	3.4	5.4	20.3	8.2	1.6	1.4	56%	1.1	2.3	105	100	3.3
La Blanca	Testigo	14	2.8	5.9	18.0	8.4	2.0	1.6	68%	0.9	1.5	77	57	2.0
	Completo	45	3.0	5.6	19.7	8.3	1.9	1.8	62%	1.2	2.2	141	91	3.8
La Hansa	Testigo	11	2.9	5.8	20.3	9.8	2.5	1.1	67%	1.0	1.5	88	158	1.0
	Completo	50	3.2	5.5	19.5	8.5	1.8	1.3	60%	1.3	1.7	91	155	2.8
Lambaré	Testigo	44	2.7	5.7	21.5	9.5	2.4	1.8	64%	1.4	2.2	118	173	1.5
	Completo	76	3.0	5.6	23.8	9.9	2.6	1.9	61%	1.3	2.4	112	134	2.4

Tabla 5. Rendimientos de maíz para los seis tratamientos evaluados y respuestas a diferentes combinaciones de N, P, S y otros nutrientes en los cinco ensayos. Promedios de tres repeticiones. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19. #Rendimientos seguidos por las mismas letras en cada sitio no difieren significativamente al nivel de probabilidad de 5%. ##Otros incluye K, Mg y Zn.

Tratamiento	Rotación M-T/S			Rotación M-ST/S			
	Balducchi	San Alfredo	Promedio	La Blanca	La Hansa	Lambaré	Promedio
	<i>Rendimiento (kg ha⁻¹)</i>						
Testigo	4615	8875	6745	8126	4914	7435	6825
PS	7102	11851	9476	11756	5052	8844	8551
NS	11549	10917	11233	13503	7602	10998	10701
NP	10496	11288	10892	12470	6552	9876	9633
NPS	13143	14379	13761	14602	7112	10900	10871
Completo	13628	13580	13604	14638	8658	11504	11600
DMS (5%)	2045	1466	-	1456	948	530	-
CV (%)	11	5	-	6	8	3	-
	<i>Respuesta (kg ha⁻¹)</i>						
N	6041	2528	2528	2846	2059	2056	2320
P	1594	3462	3462	1098	-490	-98	170
S	2646	3091	3091	2132	560	1024	1239
PS	2487	2976	2976	3630	138	1409	1726
NS	6934	2042	2042	5377	2688	3563	3876
NP	5881	2413	2413	4344	1638	2441	2808
NPS	8528	5504	5504	6475	2198	3465	4046
Otros	485	-799	-799	37	1547	604	729

Tabla 6. Valores de SPAD (índice de verdor Minolta SPAD 502) en maíz para los seis tratamientos evaluados y respuestas a diferentes combinaciones de N, P, S y otros nutrientes en los cinco ensayos. Promedios de tres repeticiones. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19. #Valores seguidos por las mismas letras en cada sitio no difieren significativamente al nivel de probabilidad de 5%. ##Otros incluye K, Mg y Zn.

Tratamiento	Rotación M-T/S			Rotación M-S-T/S			
	Balducchi	San Alfredo	Promedio	La Blanca	La Hansa	Lambaré	Promedio
<i>Índice de verdor SPAD</i>							
Testigo	29	34	32	38	29	52	40
PS	41	42	41	51	36	55	47
NS	59	47	53	59	45	57	54
NP	52	48	50	53	43	57	51
NPS	49	55	52	60	40	51	50
Completo	60	45	52	56	46	58	54
DMS (5%)	19	NS	-	10	3	NS	-
CV (%)	22	13	-	10	4	8	-
<i>Diferencias SPAD</i>							
N	8	13	13	9	4	-4	3
P	-10	8	8	1	-6	-6	-3
S	-3	7	7	6	-3	-6	-1
PS	12	7	7	13	6	3	7
NS	30	12	12	20	16	5	14
NP	23	14	14	15	14	5	11
NPS	20	21	21	22	10	-1	10
Otros	11	-10	-10	-4	7	7	3

Tabla 7. Índices de suficiencia de nutrición, determinados por el índice de verdor (Minolta SPAD 502) de cada tratamiento respecto al tratamiento Completo, en los cinco ensayos. Promedios de tres repeticiones. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

Tratamiento	Rotación M-T/S			Rotación M-S-T/S			
	Balducchi	San Alfredo	Promedio	La Blanca	La Hansa	Lambaré	Promedio
Testigo	0.48	0.77	0.60	0.68	0.63	0.90	0.75
PS	0.68	0.93	0.79	0.91	0.77	0.95	0.88
NS	0.98	1.04	1.01	1.05	0.98	0.98	1.00
NP	0.86	1.08	0.96	0.95	0.93	0.98	0.95
NPS	0.81	1.23	0.99	1.07	0.86	0.88	0.94
Completo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 8. Estimaciones de indicadores de eficiencia de uso de nutrientes (N y S) para los tratamientos de fertilización en los cinco sitios. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19. # Para la estimación del balance de nutrientes se consideraron concentraciones de N y S en grano de 1.27% y 0.11%, respectivamente.

Ensayo	Tratamiento	Productividad parcial del factor (PPF)		Balance parcial de nutrientes (BP) #	
		N	S	N	S
		kg maíz	kg nutriente aplicado ⁻¹	kg extraído	kg aplicado ⁻¹
Balducchi	PS	-	473	-	0.57
	NS	68	770	0.87	0.92
	NP	62	-	0.79	-
	NPS	77	876	0.99	1.05
	Completo	80	909	1.03	1.09
San Alfredo	PS	-	790	-	0.95
	NS	64	728	0.82	0.87
	NP	66	-	0.85	-
	NPS	85	959	1.08	1.15
	Completo	80	905	1.02	1.08
La Blanca	PS	-	784	-	0.94
	NS	79	900	1.02	1.08
	NP	73	-	0.94	-
	NPS	86	973	1.10	1.17
	Completo	86	976	1.10	1.17
La Hansa	PS	-	337	-	0.40
	NS	45	507	0.57	0.61
	NP	39	-	0.49	-
	NPS	42	474	0.54	0.57
	Completo	51	577	0.65	0.69
Lambaré	PS	-	590	-	0.71
	NS	65	733	0.83	0.88
	NP	58	-	0.74	-
	NPS	64	727	0.82	0.87
	Completo	68	767	0.87	0.92

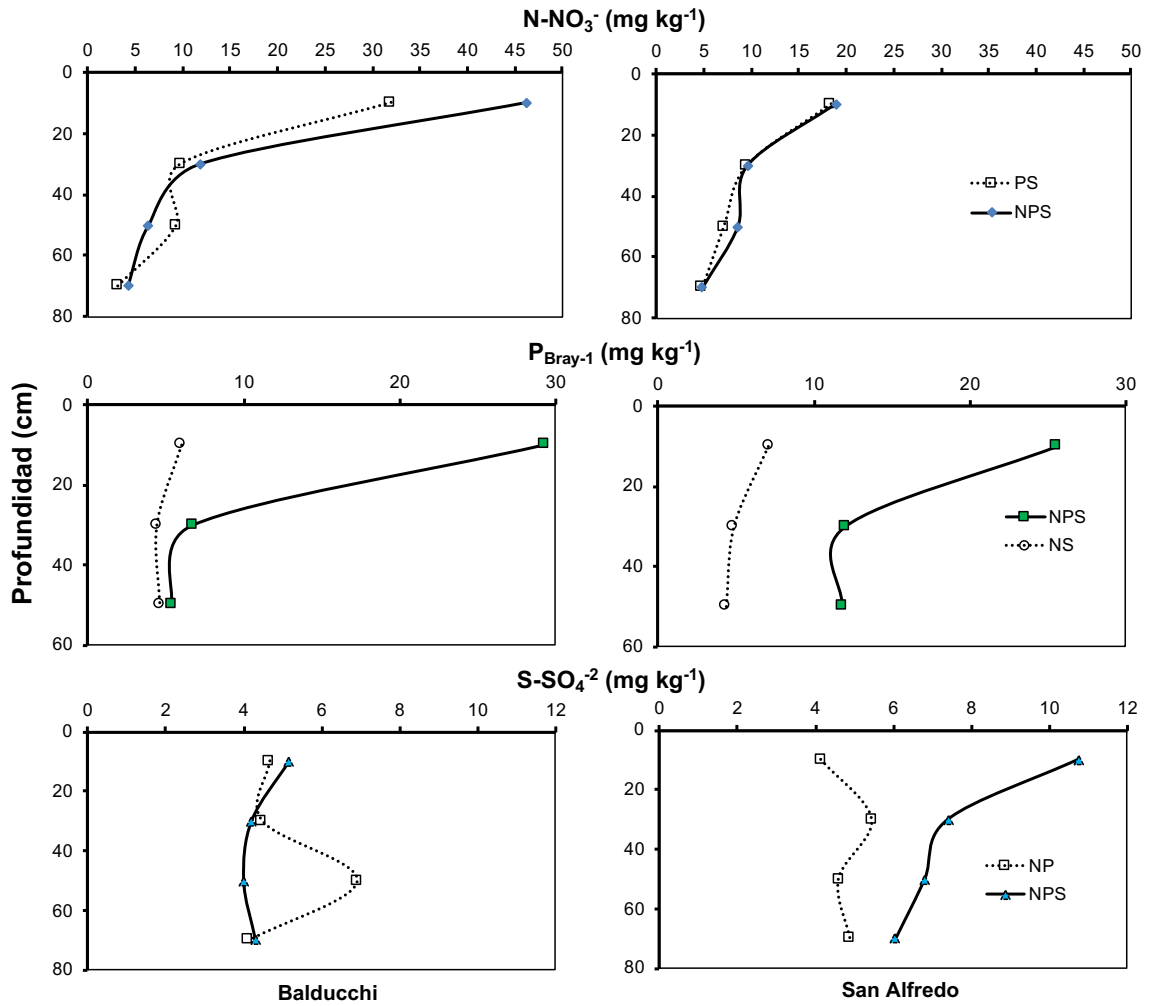


Fig. 1. Distribución de la concentración de $N-NO_3^-$, P_{Bray-1} , y $S-SO_4^{-2}$ hasta 60 u 80 cm de profundidad en pre-siembra para tratamientos selectos en los sitios bajo rotación Mz-Tr/Sj. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

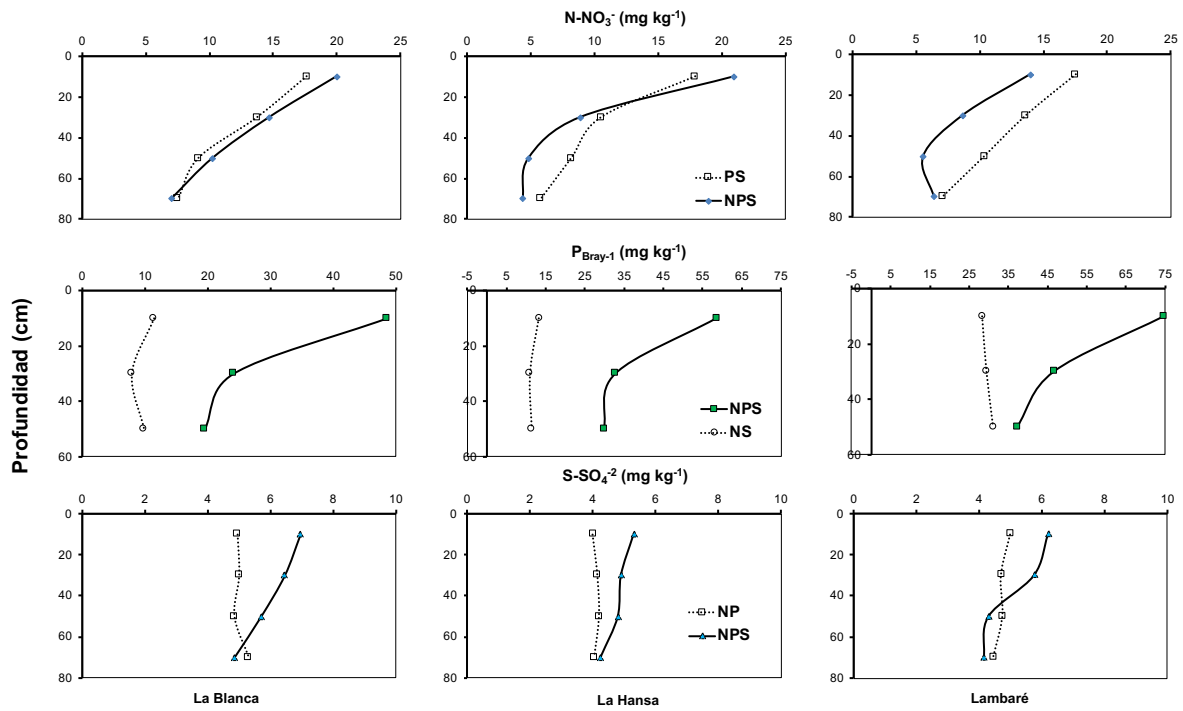


Fig. 2. Distribución de la concentración de $N-NO_3^-$ (arriba), P_{Bray-1} (medio), y $S-SO_4^{2-}$ (abajo) hasta 80 cm de profundidad en pre-siembra para tratamientos selectos en los sitios bajo rotación Mz-Sj-Tr/Sj. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

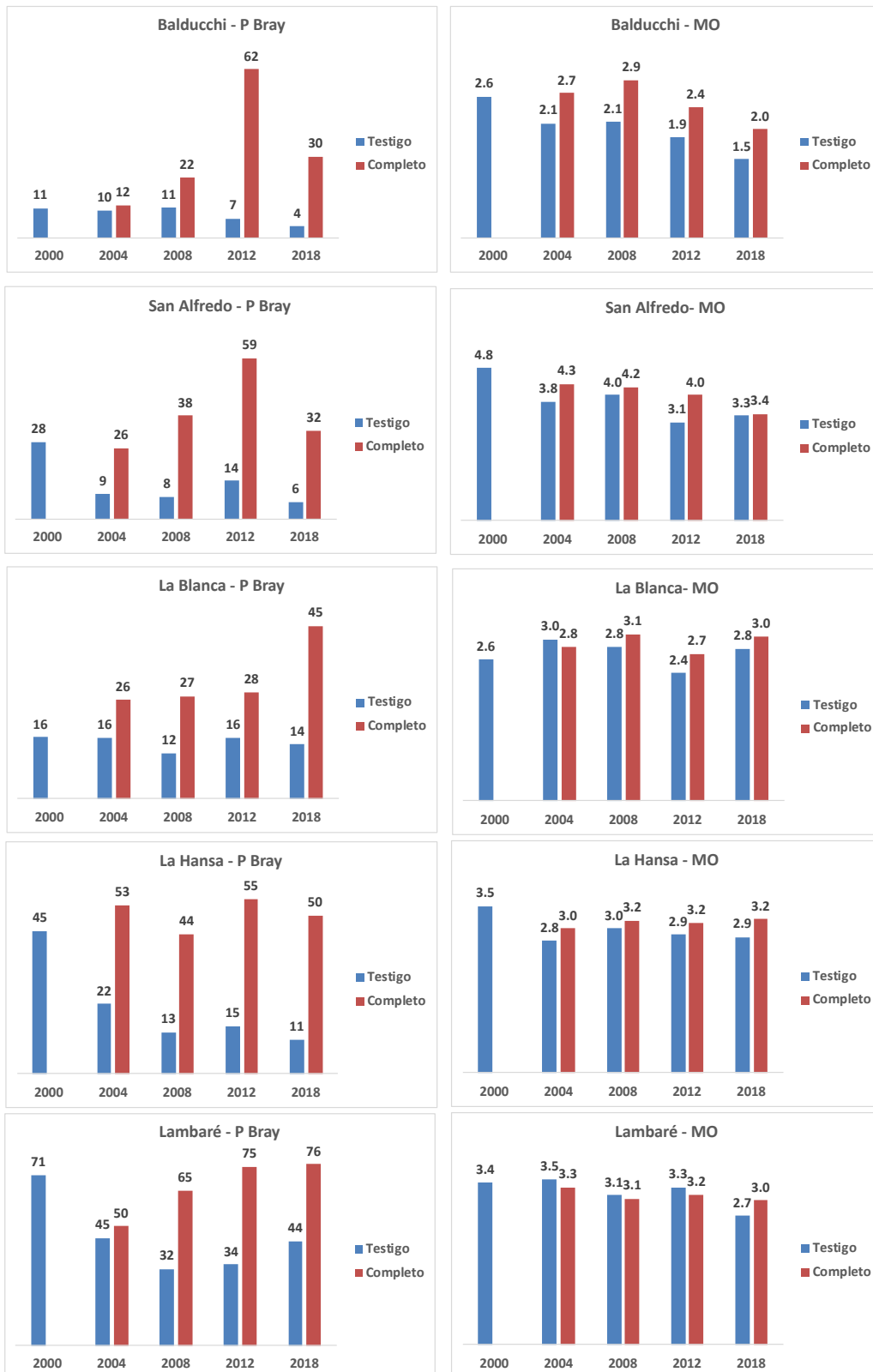


Fig. 3. Evolución de P Bray y materia orgánica (MO) (0-20 cm) para tratamientos Testigo y Completo en los sitios bajo rotación Mz- Tr/Sj y Mz-Sj-Tr/Sj. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Unidades = P Bray en mg kg⁻¹; MO en %.

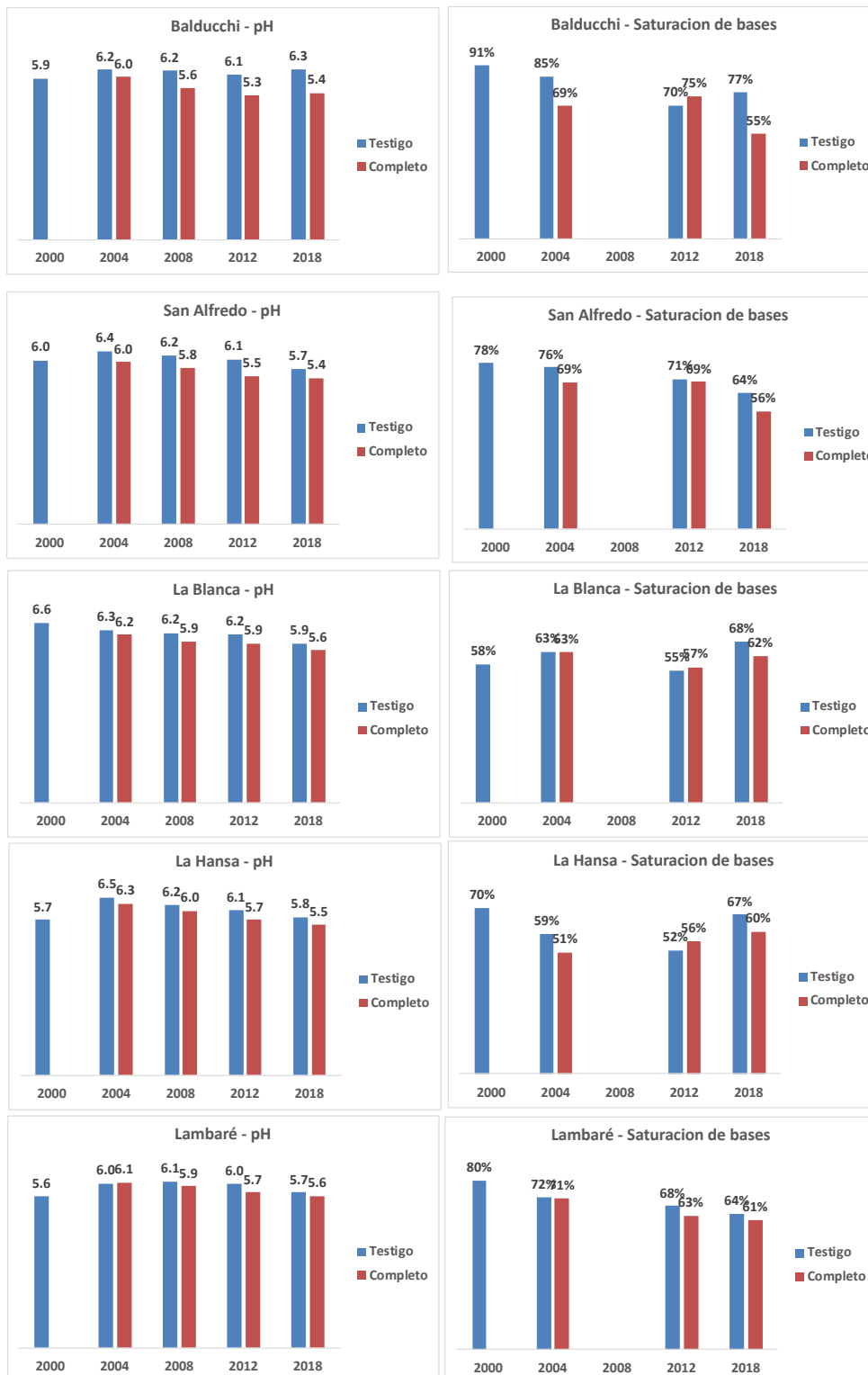


Fig. 4. Evolución de pH y saturación de bases (0-20 cm) para tratamientos Testigo y Completo en los sitios bajo rotación Mz- Tr/Sj y Mz-Sj-Tr/Sj. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Unidades = pH sin unidades y Saturación de bases en %.

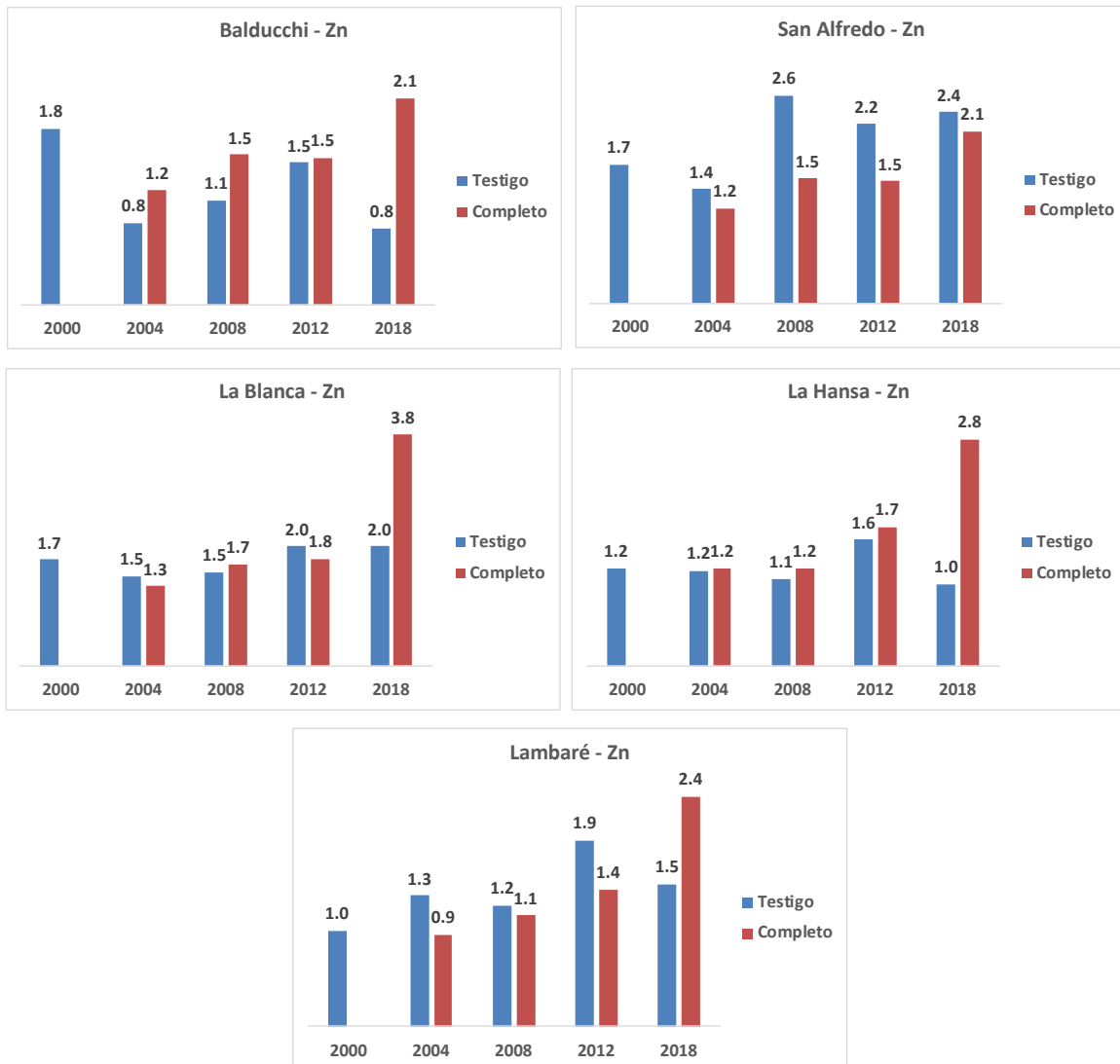


Fig. 5. Evolución de zinc (0-20 cm) para tratamientos Testigo y Completo en los sitios bajo rotación Mz- Tr/Sj y Mz-Sj-Tr/Sj. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Unidades = Zinc en mg kg⁻¹;

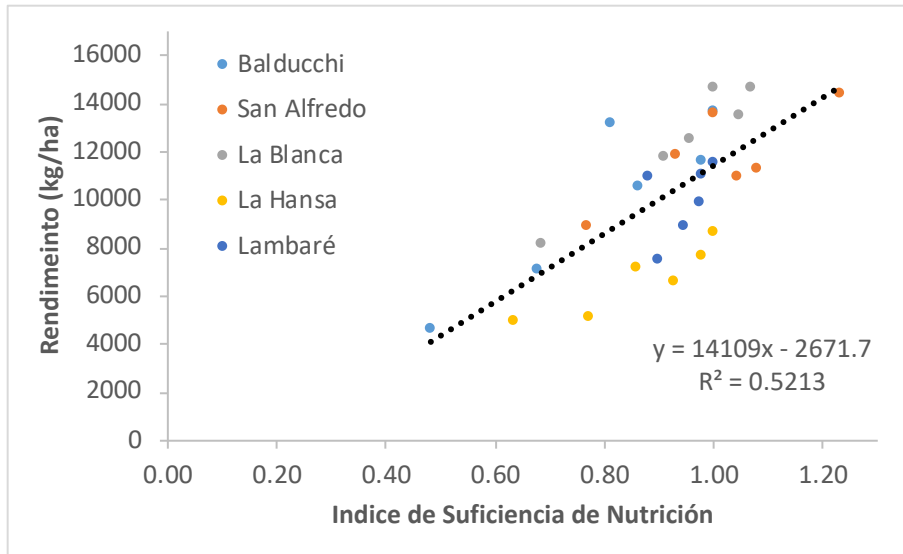


Fig. 6. Relación entre el índice de suficiencia de nutrición (ISN), estimado como la relación del índice de verdor de cada tratamiento respecto del tratamiento Completo, y los rendimientos en grano. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

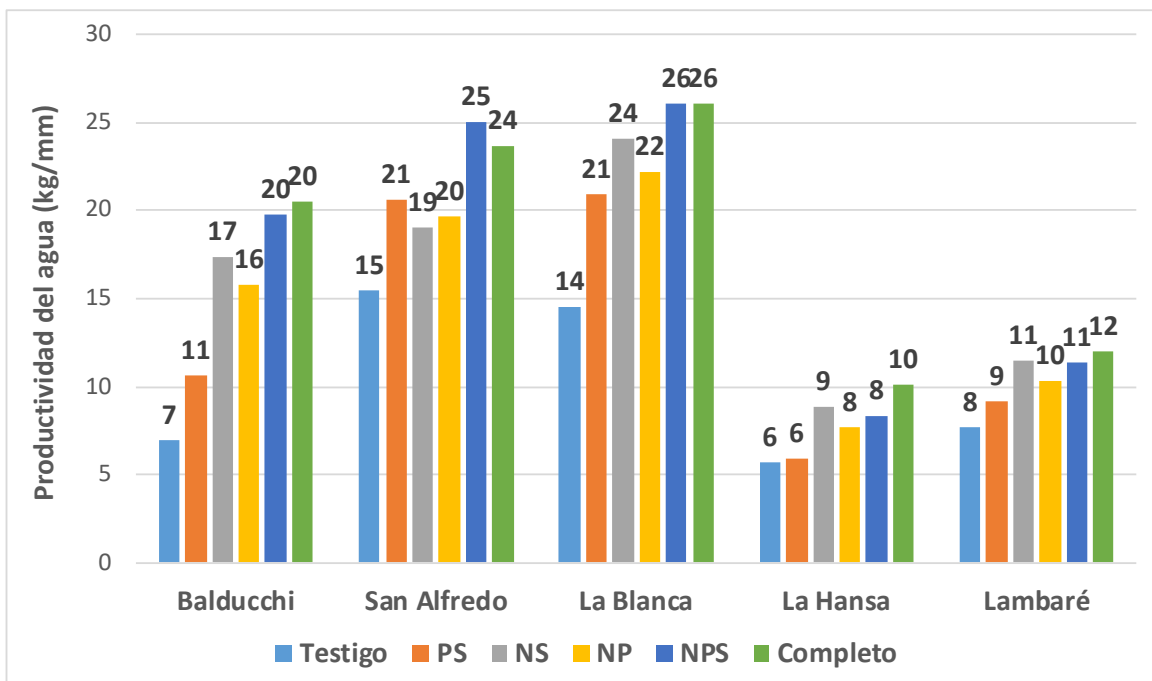


Fig. 7. Productividad del agua (PA) en maíz, calculada como cociente entre el rendimiento y la suma de las precipitaciones durante el ciclo (octubre a febrero inclusive), para los cinco sitios. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Maíz. Campaña 2018/19.

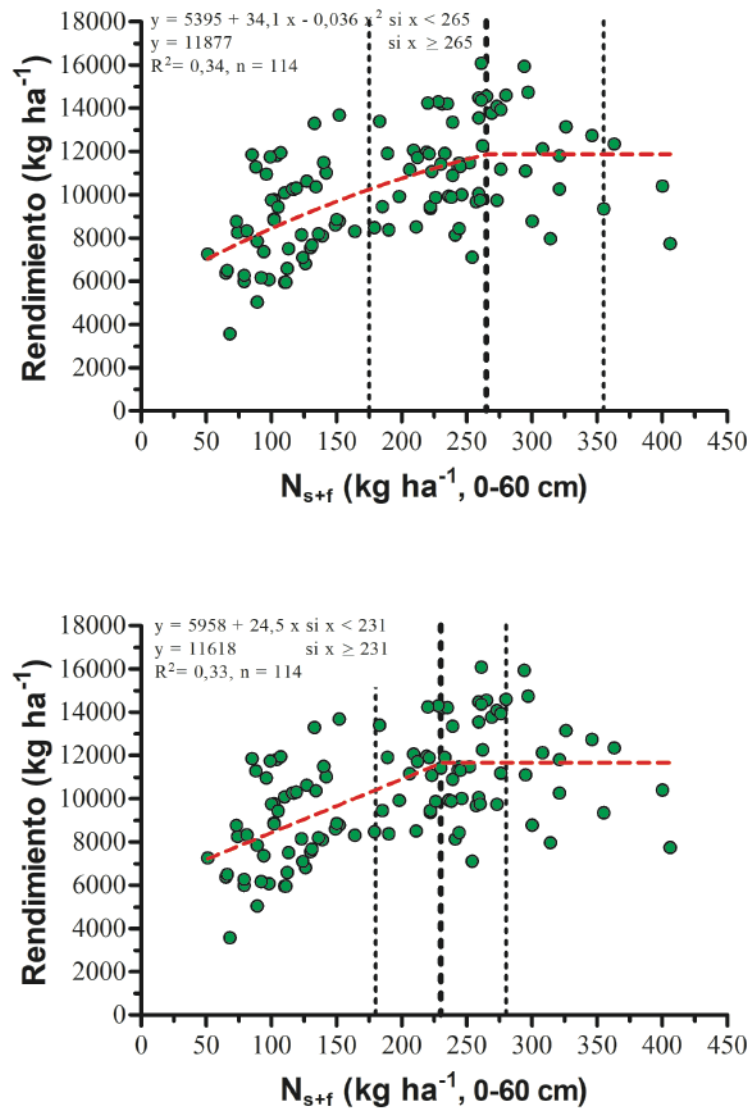


Fig. 8. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra (0-60 cm) + N aplicado como fertilizante (n=114). La figura superior muestra el ajuste cuadrático-plateau y la inferior el ajuste lineal-plateau. Las líneas punteadas verticales indican un valor umbral de 265 y 231 kg N ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento máximo medio de 11877 y 11618 kg ha⁻¹, según la función de ajuste, respectivamente ($r^2=0.34$ y 0.33 , $p<0.001$). La franja vertical punteadas indican el intervalo de confianza para el umbral ($IC_{95\%} = 175$ a 355 y 180 a 280 kg N ha⁻¹, respectivamente). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2006/07, 2008/09, 2009/10, 2010/11, 2012/13, 2014/15, 2015/16, 2016/17 y 2018/19.

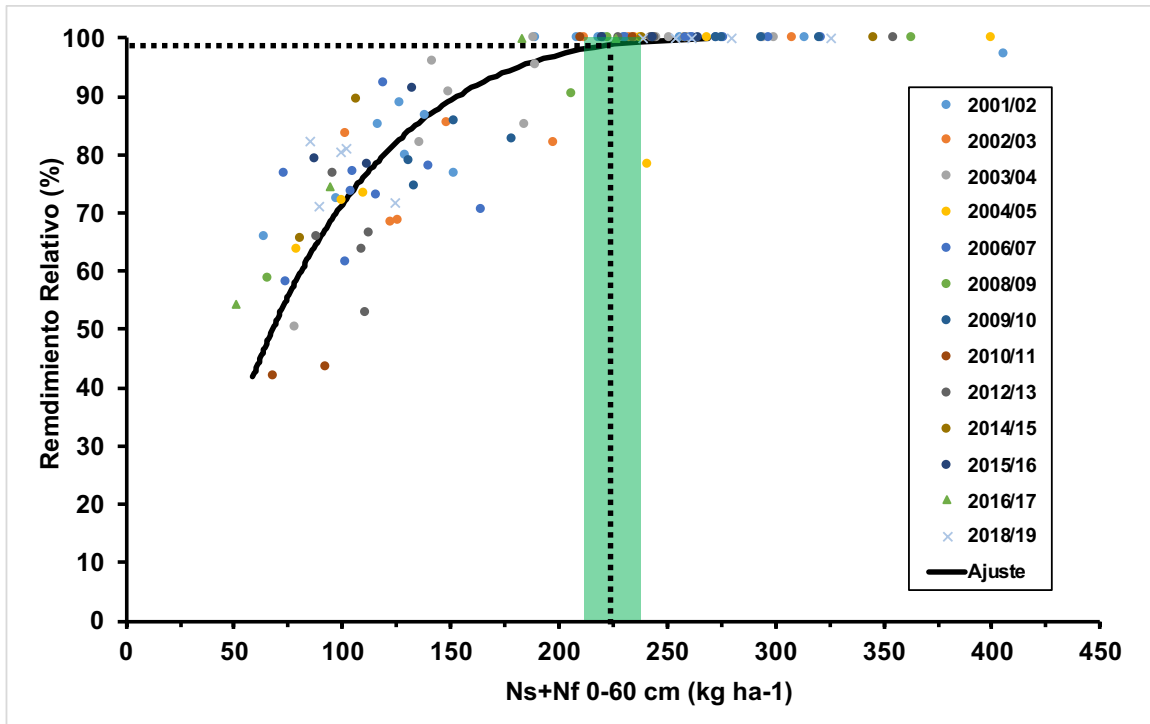


Fig. 9. Rendimiento relativo (%) de maíz en función de la disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra (0-60 cm) + N aplicado como fertilizante (n=114). La línea punteada vertical indica un valor umbral de 225 kg N ha⁻¹ para alcanzar el 99% del rendimiento relativo al máximo. La franja vertical verde indica el intervalo de confianza para el umbral (IC_{95%} = 215 a 236 kg N ha⁻¹). La curva de ajuste (r=0.89, p<0.0001) y las estimaciones se obtuvieron mediante el método arcoseno-logaritmo modificado (Correndo et al., 2016). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2006/07, 2008/09, 2009/10, 2010/11, 2012/13, 2014/15, 2015/16, 2016/17 y 2018/19.

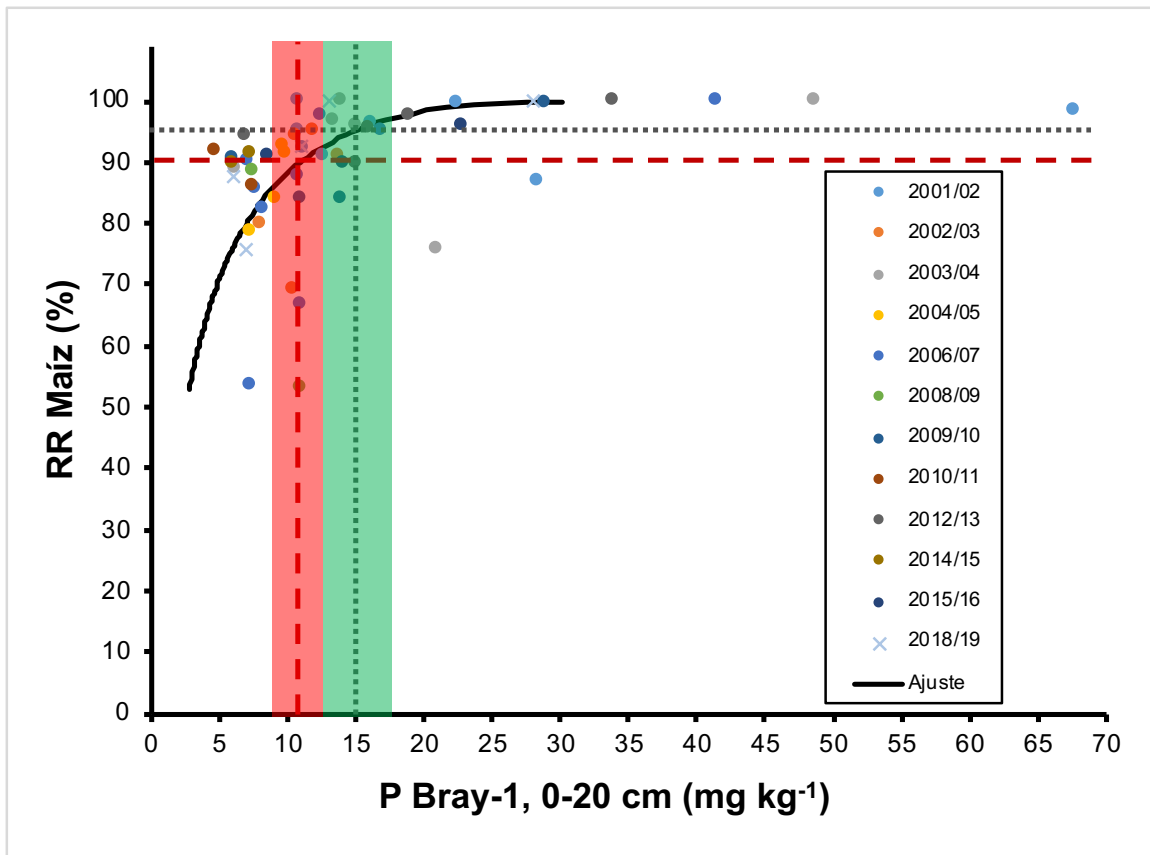


Fig. 10. Rendimiento relativo (RR) de maíz (NS/NPS) en función del nivel de $P_{\text{Bray-1}}$ (0-20 cm) a la siembra. $n=57$. Las líneas punteadas rojas y verdes indican niveles críticos de 11 mg kg^{-1} ($IC_{95\%}=9.4$ a 12.7 mg kg^{-1}) y 15 mg kg^{-1} ($IC_{95\%}=12.6$ a 17.4 mg kg^{-1}) de $P_{\text{Bray-1}}$ para obtener el 90% y el 95% del rendimiento relativo, respectivamente. La curva de ajuste ($r=0.51$, $p=0.0001$) y las estimaciones se obtuvieron mediante el método arcoseno-logaritmo modificado (Correndo et al., 2016). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe, 2000/01, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2006/07, 2008/09, 2009/10, 2010/11, 2012/13, 2014/15, 2015/16, 2016/17 y 2018/19.

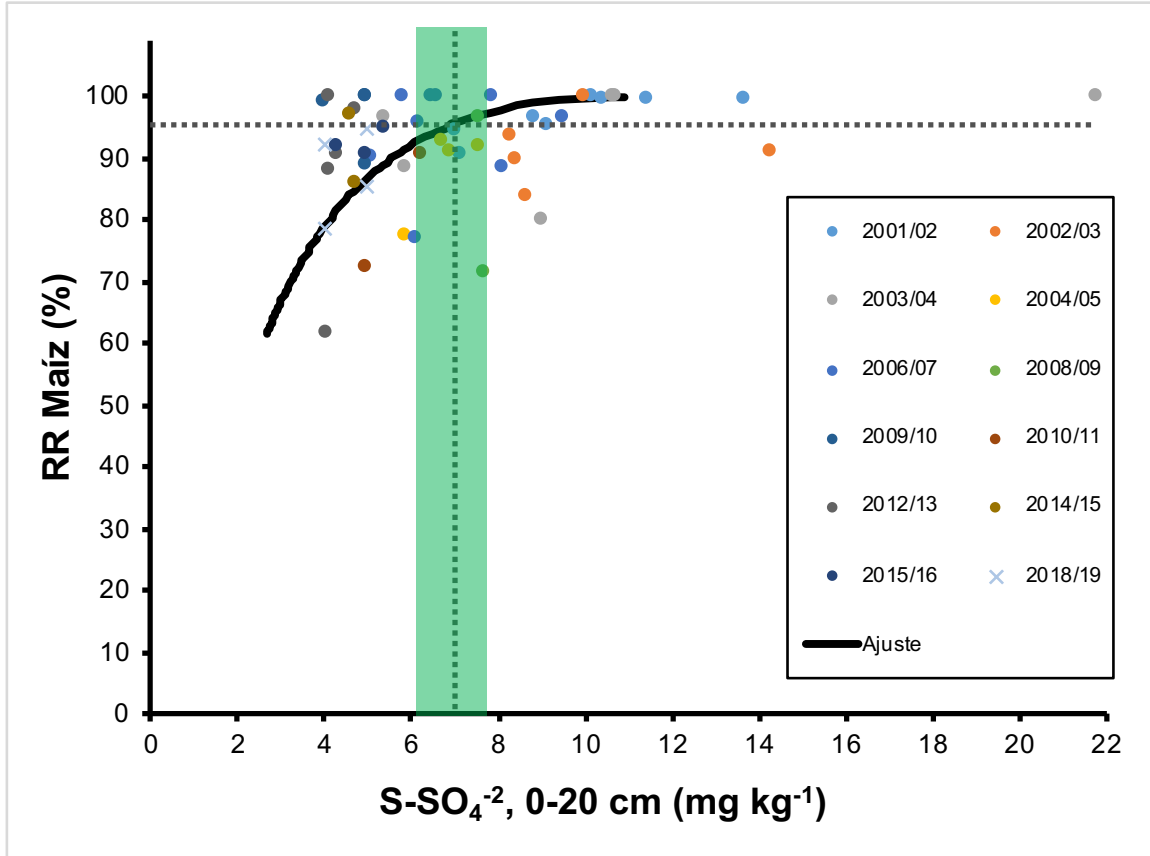


Fig. 11. Rendimiento relativo (RR) de maíz (NP/NPS) en función del nivel de $S-SO_4^{2-}$ (0-20 cm) a la siembra. $n=57$. Las líneas punteadas indican un nivel crítico de 6.8 mg kg^{-1} de $S-SO_4^{2-}$ para obtener 95% del rendimiento relativo ($IC_{95\%}=6.0 \text{ a } 7.6 \text{ mg kg}^{-1}$). La curva de ajuste ($r=0.33$, $p=0.013$) y las estimaciones se obtuvieron mediante el método arcoseno-logaritmo modificado (Correndo et al., 2016). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe, 2000/01, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2006/07, 2008/09, 2009/10, 2010/11, 2012/13, 2014/15, 2015/16, 2016/17 y 2018/19.