

RELEVAMIENTO DE CALCIO, MAGNESIO, POTASIO Y MICRONUTRIENTES EN ZONAS CON DIFERENTE PRODUCTIVIDAD DE SOJA

Natalia Veronica Diovisalvi¹; Nahuel Ignacio Reussi
Calvo^{1,2,3*}; Miguel Boxler; Fernando García

Recibido: 16/5/2020

Recibido con revisiones: 26/1/2021

Aceptado: 26/1/2021

RESUMEN

La concentración de calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y micronutrientes podría limitar la producción de soja (*Glycine max L.*) de forma diferencial según zonas de la región pampeana (RP). El objetivo fue cuantificar la concentración Ca, Mg, K, boro (B), cobre (Cu), cinc (Zn), hierro (Fe) y manganeso (Mn) en suelo, hoja y grano de soja. Se relevaron un total de 79 lotes de soja en la RP, divididos en Zona Norte y Zona Sur según productividad. Se cuantificó la concentración de nutrientes en suelo a la siembra, en hoja en floración y en grano, y el rendimiento a madurez. Se determinaron diferencias ($P < 0,001$) en la concentración de nutrientes en suelo (salvo K y Mn) y hoja entre zonas. En ambas zonas, sólo la concentración de B y Zn en suelo se ubicó por debajo del nivel crítico (NC). En la Zona Norte, el 75% de las muestras para B y el 50% para Zn mostraron valores inferiores al NC, mientras en la Zona Sur se redujo a 25% para B y menos de 25% para Zn. Para Zn en ambas zonas y Mn en Zona Norte se obtuvo asociación significativa ($p < 0,05$) entre la concentración de nutrientes en suelo y hoja ($r = 0,64$ y $0,83$, respectivamente). La acumulación de nutrientes en grano fue explicada por el rendimiento ($p < 0,05$) y no por la concentración ($p > 0,05$). La acumulación fue en promedio de 2,2, 2,4, 19,4, 44, 33, 9,4, 65 y 24 g por tonelada de grano para Ca, Mg, K, Zn, B, Cu, Fe y Mn, respectivamente. La concentración de B y Zn en suelo limitan el rendimiento de soja de forma diferencial según zona de la RP. Los valores de acumulación de nutrientes en grano podrían ser utilizados como referencia nacional para la estimación de balances de nutrientes.

Palabras clave: análisis de suelo, diagnóstico foliar, análisis de grano, boro, cinc.

SURVEY OF CALCIUM, MAGNESIUM, POTASSIUM AND MICRONUTRIENTS IN ZONES WITH DIFFERENT SOYBEAN PRODUCTIVITY

ABSTRACT

The concentration of calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K) and micronutrients could limit soybean production (*Glycine max L.*) differentially according to areas of the Pampas region (RP). The objective of the present work was to survey the concentration of Ca, Mg, K, boron (B), copper (Cu), zinc (Zn), iron (Fe) and manganese (Mn) in soil, leaf and soybean grain. Seventy-nine commercial fields were surveyed in the RP, divided into Northern Zone and Southern Zone according to productivity. Nutrient concentration in soil at planting, foliar at flowering, and in grain (Southern Zone only), and yield at maturity were quantified. Significant differences ($P < 0.001$) in the concentration of nutrients in soil (except K and Mn) and leaf between zones were determined. Only the concentration of B and Zn in soil was below the critical level (NC) reported in the literature. In the Northern Zone, 75% of the samples for B and 50% for Zn showed values lower to the NC, while in the Southern Zone it was of 25% for B and less than 25%

¹ Laboratorio de Suelos Fertilab

² FCA-UNMDP

³ CONICET

* Autor de contacto: nreussicalvo@laboratoriofertilab.com.ar



for Zn. To Zn in both zones and Mn in Northern Zone, a significant association ($p < 0.05$) was obtained between the concentration of nutrients in soil and leaf ($r = 0.64$ and 0.83 , respectively). The accumulation of nutrients in grain was mainly explained by the yield ($p < 0.05$) and not by concentration ($p > 0.05$), with averages of 2.2, 2.4, 19.4, 44, 33, 9.4, 65 and 24 g per ton of grain for Ca, Mg, K, Zn, B, Cu, Fe and Mn, respectively. In summary, the concentration of B and Zn could limit soybean yield differentially depending on the area of the RP. Nutrient removal values in grain could be used as a national reference for estimating soybean nutrient balances.

Keywords: soil analysis, foliar diagnosis, grain analysis, boron, zinc.

INTRODUCCION

La intensificación de la agricultura, sumada a la elevada extracción y la baja reposición tanto de macronutrientes como de micronutrientes, ha provocado una marcada disminución de la fertilidad actual de la mayoría de los suelos de la región pampeana (RP) (García *et al.*, 2018; Sainz Rozas *et al.*, 2019). En un relevamiento de los suelos de dicha región, Sainz Rozas *et al.* (2019) observaron que en suelos bajo agricultura, la concentración de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) fue un 19-29, 30-40 y 12-30% menor respecto a situaciones prístinas, variando según zona (Sainz Rozas *et al.*, 2019). Además, estos autores informaron que si bien los niveles hierro (Fe), cobre (Cu) y manganeso (Mn) mostraron valores adecuados para la producción, la concentración de cinc (Zn) y boro (B) ha disminuido significativamente respecto a situaciones prístinas. En general, varios relevamientos de suelo muestran que los mayores porcentajes de disminución, tanto de macro como de micronutrientes, se dieron principalmente en la zona norte de la RP debido a la mayor frecuencia del cultivo de soja (*Glycine max L.*) en la rotación y su elevada tasa de extracción (Cordone *et al.*, 2011; Larrea, 2019; Sainz Rozas *et al.*, 2019).

No obstante, estos trabajos no relacionaron la concentración de nutrientes en suelo con el contenido en órganos vegetales ni con la productividad de los cultivos.

La metodología más difundida para el diagnóstico de cationes de intercambio (Haby *et al.*, 1990) y micronutrientes (Sims & Johnson, 1991) en suelo se basa en la determinación de su concentración previo a la siembra del cultivo (0-20 cm). Para su empleo, a nivel internacional se han propuesto distintos umbrales críticos que permitirían maximizar el rendimiento y definir la necesidad de fertilización (Haby *et al.*, 1990; Sims & Johnson, 1991). Para los cationes intercambiables se sugiere deficiencia nutricional con valores inferiores a: 2,5, 0,8 y 0,4 meq 100 g^{-1} para Ca, Mg y K, respectivamente (Haby *et al.*, 1990). Para el caso de los micronutrientes se sugiere deficiencia nutricional con valores en suelo inferiores a: 0,5 mg kg^{-1} para B (Sims y Johnson, 1991; Gerwing y Gelderman, 2005), 0,2 mg kg^{-1} para Cu (Buchholz, 1983; Sims & Johnson, 1991; Gerwing & Gelderman, 2005), 2,5-5,0 para Fe (Sims & Johnson, 1991), 1-2 mg kg^{-1} para Mn (Buchholz, 1983; Sims & Johnson, 1991) y 0,4-0,9 mg kg^{-1} para Zn (Sims & Johnson, 1991). Para la RP, Barbieri *et al.* (2015) en maíz (*Zea mays L.*)



informaron que la determinación de la concentración de Zn en suelo por el método DTPA permitió separar adecuadamente sitios con y sin deficiencia de dicho nutriente. Además, para B en soja, Bustos et al. (2020) informaron una adecuada asociación ($r^2=0,59$) entre la concentración de B extraído con acetato de amonio y el rendimiento relativo del cultivo.

El análisis foliar de Ca, Mg, K y micronutrientes podría ser empleado como complemento del análisis de suelo para el monitoreo de la concentración de nutrientes durante el ciclo del cultivo (Jones & Case, 1990). Para muestreos de hoja de soja en plena floración, Malavolta et al. (1997) reportaron rangos de concentración crítica de Ca, Mg y K de 0,20-2,00, 0,25-1,00 y 1,50-2,50%, respectivamente. Mientras que, para micronutrientes, Melsted et al. (1969) informaron valores de concentración crítica en hoja igual a 25, 5, 30, 20 y 15 mg kg⁻¹ para B, Cu, Fe, Mn y Zn, respectivamente. Para la RP, Cordone et al. (2011) y Divito et al. (2015) determinaron que el análisis foliar se relacionó con el rendimiento y la respuesta del cultivo de soja. Sin embargo, Bustos et al. (2020) no observaron asociación entre la concentración de B en hoja y el rendimiento de soja.

La concentración de nutrientes en grano permitiría caracterizar la disponibilidad de nutrientes que tuvo el cultivo y ser base para la elaboración de balances de nutrientes. Salvagiotti et al. (2018) obtuvieron valores promedio de remoción de Ca, Mg, K, B, Zn y Mn en grano de soja de 3,4; 2,4; 17,2; 55,8;

36,5 y 41,7 g tonelada⁻¹, respectivamente. García & Correndo (2012) informaron valores de concentración de micronutrientes por tonelada de grano de soja de 7, 12, 65, 43 y 36 mg kg⁻¹ para B, Cu, Fe, Mn y Zn, respectivamente. No obstante, la información de ambos trabajos surge de experimentos en microparcels o de revisiones de la literatura internacional, los cuales deberían ser evaluados y validados a escala de lote en la RP.

En la actualidad, no hay registros de relevamientos de nutrientes donde se evalúe para el cultivo de soja a escala de lote y en paralelo la concentración de Ca, Mg, K y micronutrientes en suelo, hoja y grano, para zonas con diferente productividad de la RP. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la concentración de Ca, Mg, K y micronutrientes en muestras de suelo, hoja y grano en lotes de producción de soja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los sitios de muestreo

Durante la campaña 2017-2018 se relevó un total de 79 lotes de producción de soja de primera en zonas con diferentes características agroclimáticas de la RP (40 y 39 lotes en la Zona Norte y Sur, respectivamente). La Zona Norte comprendida por el sureste de Córdoba, sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, y la Zona Sur comprendida por el centro y sudeste bonaerense (**Figura 1**). Dentro de cada lote se seleccionó una zona/sitio de muestreo



(superficie 10000 m²), la cual fue georreferenciada para luego realizar las diferentes determinaciones de suelo, planta y rendimiento del cultivo de soja.

Las prácticas de manejo como variedades, densidad de plantas (entre 170 y 400 mil plantas por hectárea), espaciado entre hileras (entre 19 y 52 cm), control de malezas e insectos fueron las comúnmente utilizadas por los productores de cada región. La fecha de siembra varió desde fines de octubre a

principios de noviembre para la Zona Norte y desde principios de noviembre a principios de diciembre para la Zona Sur. En general, en ambas zonas los lotes tenían como antecesor dominante maíz y, en menor medida trigo o cebada en la Zona Sur. Al momento de la siembra, todos los lotes fueron fertilizados con 20 kg ha⁻¹ de P y 10 kg ha⁻¹ de S, para no limitar el rendimiento del cultivo.

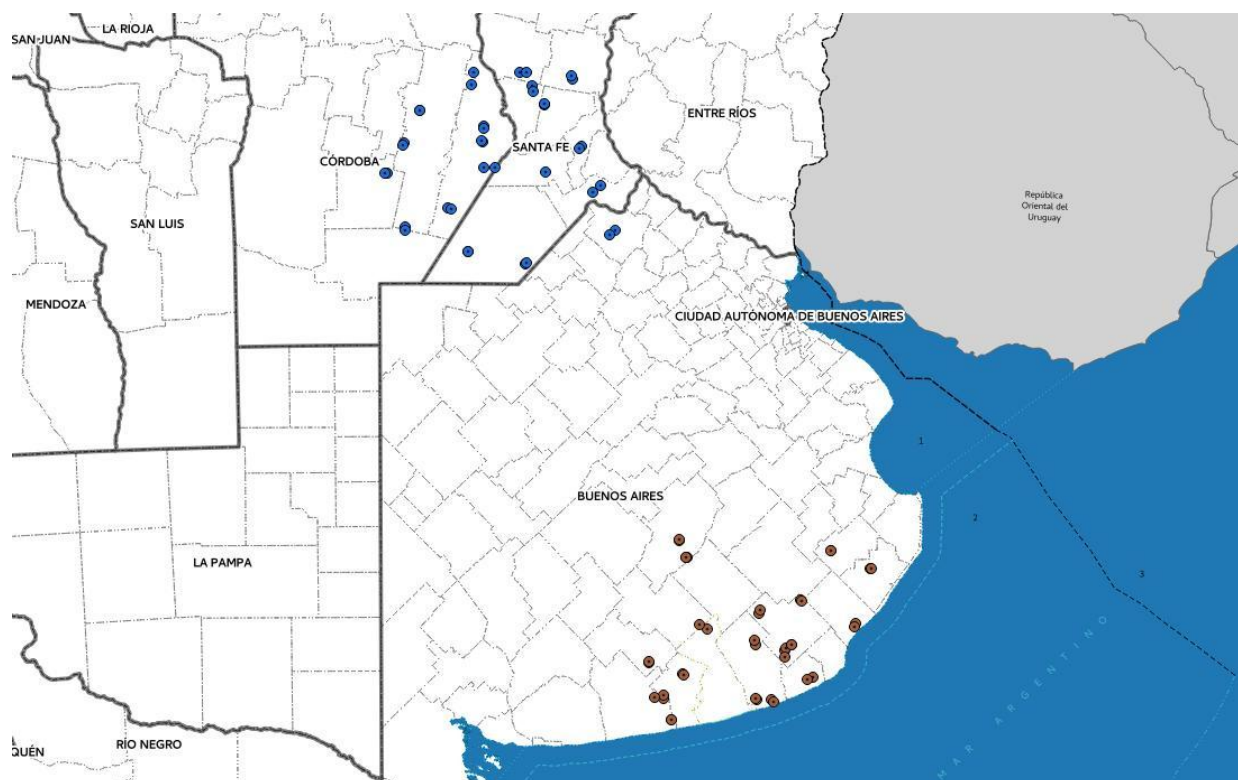


Figura 1. Ubicación de los diferentes puntos de muestreo. Círculos celestes y marrones representan la Zona Norte y Sur, respectivamente (n= 79).

Figure 1. Location of the different sampling points. Blue and brown circles represent the Northern and Southern Zone, respectively (n= 79).



Determinaciones de suelo y planta

A la siembra se realizó un muestreo (30 sub muestras por muestra) a la profundidad de 0-20 cm. Las muestras fueron secadas en estufa a 30°C y posteriormente se molieron y tamizaron por 0,5 mm. Se determinó el pH en una relación suelo:agua de 1:2,5 (v:v), materia orgánica (MO) (Walkey & Black, 1934) y P extractable (Bray & Kurtz, 1945). Además, el contenido Ca, Mg y K intercambiables se determinó mediante la extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 (Haby *et al.*, 1990), mientras que la concentración de Cu, Zn, Fe, y Mn mediante la extracción con DTPA en un medio ácido (Anon, 1994) con posterior lectura en ambos casos en espectrofotómetro de absorción atómica. Por otra parte, el contenido de B se determinó por el método colorimétrico de la curcumina (Naftel, 1939).

En floración (R₁-R₂) (Fehr & Caviness, 1977) se realizó el muestreo de hoja de al menos 40 plantas al azar. Se tomó la primera hoja madura (totalmente expandida) desde del ápice, sin pecíolo. Se determinó la concentración de Ca, Mg, K y micronutrientes mediante digestión húmeda y posterior lectura en un

Análisis estadístico

Para cada nutriente tanto en suelo como en planta se realizó un análisis descriptivo de los datos. Además, para la comparación de medias entre zonas se utilizó el test t por medio del paquete estadístico R (R Core Team, 2014). Se estimó para cada zona el porcentaje de caso con deficiencia de un determinado nutriente como el cociente entre el número de muestras con una concentración del nutriente por debajo

espectrofotómetro de absorción atómica (Zasoski & Burau, 1977; Jones & Case, 1990). El método de digestión húmeda se basa en la descomposición de la MO de los tejidos vegetales por digestión ácida a alta temperatura. Por lo tanto, se realizó la digestión en bloque de aluminio usando HNO₃ con la adición de HClO₄ para incrementar la velocidad y completar la digestión (Zasoski & Burau, 1977; Jones & Case, 1990). Luego se tomó 1 ml del digesto y se procedió a leer en un equipo de adsorción atómica ajustando diferentes curvas de dilución según el nutriente. Por otra parte, la concentración de B se cuantificó bajo la misma técnica que en suelo (Naftel, 1939) previa combustión seca colocando la muestra en una mufla a aproximadamente 500 °C de temperatura.

A madurez fisiológica se cosecharon 2 m² y se trillaron empleando una trilladora estacionaria Zurn 150. Se determinó el rendimiento, el cual fue ajustado a 13,5% de humedad. Sólo en la Zona Sur se analizó la concentración de Ca, Mg, K y micronutrientes en grano bajo las mismas metodologías utilizadas para hoja.

del NC citado en la literatura internacional sobre el total de muestras analizadas en cada zona por cien. Se realizaron análisis de correlación para evaluar el grado de asociación entre la concentración de nutrientes en hoja y la concentración de nutrientes en suelo y, de regresión empleando el procedimiento lm (lineal model) para evaluar y ver cuánto de la variación de la acumulación y concentración de nutrientes en grano es explicada por el rendimiento del cultivo. Para la confección de las figuras y estimaciones de estadística descriptiva se utilizó



el software GraphPad Prism® en su versión 8.0c para Mac®.

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización general

La disponibilidad hídrica al momento de la siembra del cultivo de soja fue adecuada en ambas zonas (suelo a capacidad de campo), sin embargo, en los meses de febrero y marzo, las precipitaciones fueron inferiores en 50 y 100 mm a los registros históricos, respectivamente. Además, la temperatura media estuvo por encima del registro histórico en gran parte de la RP lo cual pudo haber limitado el rendimiento del cultivo de soja, particularmente en la Zona Sur. El rendimiento promedio fue de 4212 kg ha⁻¹ para la Zona Norte y 2679 kg ha⁻¹ para la Zona Sur, siendo significativo el efecto de zona (Figura 2). Además, el rango de rendimiento fue mayor en la Zona Norte (3150 kg ha⁻¹), mientras que el CV (17,6%) fue menor respecto a la Zona Sur (rango = 2535 kg ha⁻¹ y CV = 24%, respectivamente).

En la Zona Norte, el 25 y 75% de los lotes presentaron valores de rendimiento menores o iguales a 3860 y 4858 kg ha⁻¹, mientras que en la Zona Sur fueron de 2200 y 3208 kg ha⁻¹, respectivamente (**Figura 2**). El menor rendimiento en la Zona Sur respecto a la Zona Norte, se explicaría en parte por el deterioro característico de las condiciones ambientales (temperatura y radiación) hacia fines de ciclo (Andrade & Sadras, 2000). A su vez, Aramburu Merlos *et al.* (2015) reportó menor rendimiento potencial de soja en secano para la Zona Sur respecto a la Zona Norte.

Los valores medios de MO, P Bray y pH para

la Zona Norte fueron 28 ± 5 g kg⁻¹, 15 ± 6 mg kg⁻¹ y 5,8 ± 0,2 mientras que para la Zona Sur fueron 50 ± 8 g kg⁻¹, 17 ± 10 mg kg⁻¹ y 5,9 ± 0,3, respectivamente. Estos valores coinciden con los niveles típicos de la RP (Sainz Rozas *et al.*, 2019). La principal variación fue observada en los valores de MO, la cual se explicaría por la diferente historia agrícola, textura, clima y potencial de producción de cada zona (Diovisalvi *et al.*, 2014). Los menores valores de MO en la Zona Norte podrían estar asociados a la intensificación de la actividad agrícola, la mayor frecuencia del cultivo de soja en la rotación, su elevada tasa de extracción de nutrientes, la baja reposición de los mismos y el menor aporte de residuos respecto a otros cultivos como por ejemplo el maíz (Cordone *et al.*, 2011; Larrea, 2019; Sainz Rozas *et al.*, 2019). Estudios realizados en el sudeste bonaerense han demostrado que una elevada participación del cultivo de soja en la rotación produce disminuciones más pronunciadas de la MO del suelo debido al bajo volumen de rastrojos y raíces y, a la baja relación C:N de dichos residuos (Studdert & Echeverría, 2000; Martínez *et al.*, 2020). Sainz Rozas *et al.* (2019) reportaron para la RP que los contenidos de MO disminuyeron de este a oeste y de sur a norte del área relevada, con valores de MO que variaron de 10 hasta 65 g kg⁻¹, según zonas. Estos autores observaron que los valores más bajos se determinaron al oeste de Buenos Aires, este de La Pampa y sur-suroeste de Córdoba, y los más elevados al sudeste de Buenos Aires lo cual coincide con los resultados del presente trabajo. Por otra parte, en lo que respecta a P, los valores no difieren entre zonas, a pesar de la



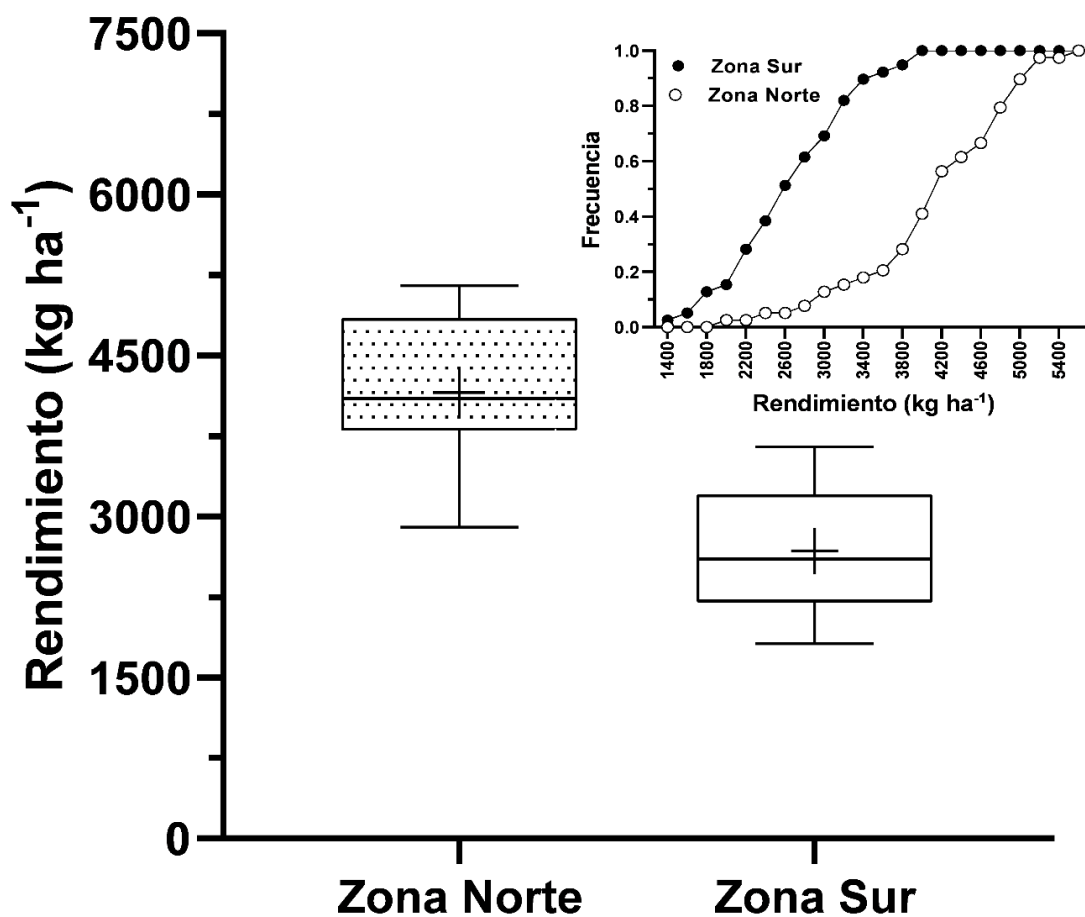


Figura 2. Rendimiento en grano y frecuencia (caja inserta) para la Zona Norte y Sur. Las barras verticales indican los percentiles 5% y 95%, las cajas los percentiles 25% y 75%, la línea horizontal la mediana, y el signo “+” indica la media. La caja inserta representa la distribución de frecuencia del rendimiento para la Zona Norte y Sur.

Figure 2. Yield grain and frequency (inserted box) for the Northern and Southern Zones. The vertical bars indicate the 5% and 95% percentiles, the boxes the 25% and 75% percentiles, the horizontal line the median, and the “+” sign indicates the mean. The box figure represents the frequency distribution of the yield for the North and South Zone.

mayor frecuencia y extracción por parte del cultivo de soja en la Zona Norte. Este comportamiento podría explicarse si se tiene en cuenta que en los últimos 25 años, según lo informado por Sainz Rozas *et al.* (2019), la disminución de la concentración de P disponible fue más importante hacia el oeste y norte de la RP, donde los valores de P nativo eran más elevados. Sin embargo, en el sur de la RP, si bien los valores nativos de P eran menores, la amplia adopción de la fertilización, el uso de dosis de P más elevadas y la menor frecuencia de soja han permitido mantener o incrementar

dichos valores. Por último, en lo que respecta al pH, en ambas zonas los valores fueron similares y no limitarían el rendimiento del cultivo de soja. Sainz Rozas *et al.* (2019) observaron en suelos prístinos valores más elevados de pH en el sudeste (promedio de 7.0) que en el norte (promedio de 6.7) de la RP. No obstante, estos autores han informado una disminución del pH en lotes agrícolas respecto a zonas prístinas producto de la baja reposición de Ca, Mg, K y continuo uso de fertilizantes fosfatados y nitrogenados, principalmente en el norte de la RP.



Relevamiento de suelo

La concentración de Ca y Mg intercambiables en suelo varió por efecto de la zona ($P < 0,001$), siendo no significativo para K (**Tabla 1**). La Zona Sur presentó la mayor disponibilidad de Ca y Mg respecto a la Zona Norte (9,90 vs 7,20 y 2,09 vs 1,69 meq 100 gr⁻¹ para Ca y Mg, respectivamente). Este comportamiento podría deberse a la mayor frecuencia y rendimiento de soja y, por ende, la mayor extracción de dichos nutrientes en la Zona Norte. Similares resultados informaron Cordone *et al.* (2011), Larrea (2019) y Sainz Rozas *et al.* (2019). No obstante, opuesto a lo observado en el presente estudio, estos autores también informaron diferencias significativas entre zonas para K. Larrea (2018) en un estudio sobre la disponibilidad y variabilidad espacial de cationes de intercambio en la RP, informó que el K fue el catión que presentó la mayor variación espacial y la mayor reducción en su concentración en suelos agrícolas respecto a suelos prístinos. Por otra parte, el 25% de las muestras analizadas tuvieron valores inferiores o iguales a 5,96 y 8,40 meq 100 gr⁻¹ de Ca y 1,40 y 1,82 meq 100 gr⁻¹ de Mg en la Zona Norte y Sur, respectivamente. Mientras que, para K, en ambas zonas el 25% de las muestras analizadas mostró valores inferiores o iguales a 1,34 meq 100 gr⁻¹. Si bien en la Zona Norte los valores de los cationes intercambiables fueron en general más bajos, en todos los casos se ubicaron por encima del NC recomendado por Haby *et al.* 1990 (**Tabla 1**), lo cual indicaría que no serían limitantes para la producción de soja. Por otra parte, las relaciones entre cationes de intercambio también mostraron diferencias significativas entre zonas ($P < 0,001$), siendo la

relación (Ca+Mg)/K, Ca/K, Ca/Mg y K/Mg en promedio de 8, 7, 5 y 0,8 para la Zona Sur y de 6, 5, 4, 1 para la Zona Norte, respectivamente. Estos valores se ubicaron por debajo de los valores de referencia reportados por Havlin *et al.* (1999), lo cual indicaría que si bien los valores absolutos de cada uno de los cationes fue adecuado, la interacción entre los mismos podría llegar a afectar la absorción y el desarrollo del cultivo. No obstante, Sainz Rozas *et al.* (2019) informaron que las relaciones entre cationes intercambiables no serían un adecuado indicador directo de la magnitud de cambios en la disponibilidad de Ca, Mg y K por efectos de los años de agricultura. Además, Larrea (2018) determinó que el contenido de cationes intercambiables y la relación entre ellas puede presentar una elevada variabilidad sitio-específica generada por el tipo de suelo y por la actividad antrópica.

La concentración promedio de micronutrientes en suelo varió por el efecto de la zona ($P < 0,001$), salvo para el caso de Mn (**Tabla 1**). Mientras que los valores medios por zona de Fe, Cu y Mn se ubicaron por encima del NC recomendado, B y Zn en ambas zonas presentaron valores medios por debajo de dicho umbral (Buchholz, 1983; Sims y Johnson, 1991; Gerwing & Gelderman, 2005) (**Tabla 1**). En el caso del Zn, en la Zona Norte, el 50% de las muestras mostraron valores inferiores al NC recomendado en la bibliografía (**Tabla 1**). En dicha zona, el 25 y 50% de las muestras presentaron valores menores a 0,67 y 0,92 mg kg⁻¹, respectivamente. En la Zona Sur, sólo el



25% de las muestras mostraron valores inferiores a dicho NC. Por otra parte, en lo que respecta a B, el 25 y el 75% de los lotes mostraron valores inferiores al NC para la Zona Sur y Norte (**Tabla 1**), respectivamente. Estos resultados indicarían que la deficiencia de Zn y B es más marcada en la Zona Norte. Miretti *et al.* (2012) y Sainz Rozas *et al.* (2019) informaron que dicha zona es donde mayor disminución de los niveles de Zn y B se ha producido en los últimos años por efecto de la actividad agrícola. Al igual que para los cationes de intercambio, estas diferencias entre zonas podrían explicarse por los mayores rendimientos de los cultivos e historia agrícola de los lotes de la Zona Norte que se traducen en una mayor remoción de nutrientes en grano. Sumado a esto, la baja reposición de los mismos vía fertilización hace que las deficiencias sean cada vez más frecuentes (Barbagelata & Melchiori, 2008). Por último, las relaciones entre el rendimiento en grano y la concentración de nutrientes en suelo fueron no significativas ($P > 0,001$, datos no mostrados).

Relevamiento foliar

Los análisis de planta mostraron diferencias significativas entre zonas para todos los nutrientes (**Tabla 2**). Si bien, la concentración promedio de nutrientes en planta fue superior en la Zona Norte respecto a la Zona Sur, en ninguno de los casos se observaron valores por debajo del NC recomendado (**Tabla 2**). Sólo en el caso del Mg y K en ambas zonas y, del Cu en la Zona Sur, los valores mínimos fueron cercanos al NC. El 25% de las muestras para Mg y K mostraron valores inferiores a 0,35 y 1,97% para la Zona Norte y 0,33 y 1,78% para la Zona Sur, respectivamente. Mientras

que, para Cu, en la Zona Sur el 25% de las muestras tuvieron valores menores o iguales a $6,7 \text{ mg kg}^{-1}$. Por último, considerando la ausencia de casos con deficiencia de Zn y B mediante el análisis foliar, los NC deberían ser revisados debido a la falta de coincidencia con el diagnóstico basado en el análisis de suelo.

La relación entre el rendimiento en grano y la concentración de nutrientes en hoja fue no significativa ($P > 0,001$, datos no mostrados). Similar comportamiento se observó en general entre la concentración de nutrientes en suelo y hoja ($P > 0,001$). No obstante, para Mn, la concentración en suelo se asoció con el contenido en hoja ($r = 0,83$) solo para la Zona Norte (**Figura 3A**). Para el caso de Zn, en ambas zonas, se determinó una estrecha asociación entre la concentración en suelo y el contenido en hoja, siendo el coeficiente de correlación de 0,64 (**Figura 3B**). Enderson *et al.* (2015) determinaron asociación no significativa entre la concentración de B, Cu, Mn y Zn en suelo y en planta ($r^2 < 0,31$). Sutradhar *et al.* (2017) informaron falta de asociación para B y Mn, pero asociación significativa para Zn. No obstante, reportaron que el valor r^2 fue muy bajo (0,13). La falta de asociación entre ambos tipos de determinaciones puede explicarse porque el análisis de suelo está sujeto a la disponibilidad actual del nutriente en el momento del muestreo, en cambio, el análisis de hoja refleja la historia de crecimiento del cultivo e integra diversos factores tales como suelo, clima y de manejo (Jones & Case, 1990).

Nutrientes en grano

La concentración media de Ca, Mg y K en grano fue de $0,23 \pm 0,07$; $0,25 \pm 0,04$ y



Tabla 1. Estadísticos descriptivos para las determinaciones de cationes intercambiables y micronutrientes en suelo (0-20cm) para la Zona Norte (-N) y Zona Sur (-S). Nivel crítico en suelo de cationes según Haby et al. (1990) y de micronutrientes según Sims & Johnson (1991).

Table 1. Descriptive statistics for determinations of interchangeable cations and micronutrients in soil (0-20cm) for the Northern Zone (-N) and the Southern Zone (-S). Critical levels of cations according to Haby et al. (1990) and micronutrients according to Sims & Johnson (1991).

Estadístico	Ca-N	Ca-s	Mg-N	Mg-s	K-N	K-s	Zn-N	Zn-s	Fe-N	Fe-s	Cu-N	Cu-s	Mn-N	Mn-s	B-N	B-s
	----- (cmol _c kg ⁻¹) -----						----- (mg kg ⁻¹) -----									
Promedio	7,20	9,90	1,69	2,09	1,57	1,57	0,89	1,70	62,7	146,0	1,07	1,39	49,7	48,7	0,47	0,71
DE	1,66	2,19	0,36	0,31	0,36	0,36	0,30	0,68	18,9	33,6	0,37	0,31	21,9	12,8	0,20	0,30
Mínimo	3,54	6,00	1,15	1,55	0,74	0,89	0,27	0,70	20,9	76,0	0,48	0,90	6,3	28,8	0,27	0,31
Máximo	10,27	18,20	2,58	2,68	2,32	2,46	1,61	3,30	127,0	214,4	1,67	2,10	82,6	87,7	1,41	1,79
Percen. (0,25)	5,96	8,40	1,40	1,82	1,34	1,34	0,67	1,10	48,6	116,0	0,75	1,20	27,2	40,2	0,35	0,48
Percen. (0,50)	7,61	9,50	1,63	2,12	1,54	1,51	0,92	1,50	60,7	147,2	1,06	1,40	51,2	45,9	0,44	0,67
Percen. (0,75)	8,56	11,40	1,99	2,33	1,86	1,76	1,10	2,30	74,5	166,6	1,45	1,60	70,2	54,8	0,52	0,84
Percen. (1,00)	10,27	18,20	2,58	2,68	2,32	2,46	1,61	3,30	127,0	214,4	1,67	2,10	82,6	87,7	1,41	1,79
Skewness	-0,40	1,42	0,64	-0,01	-0,09	0,77	0,10	0,60	0,7	0,05	0,16	0,29	-0,2	1,2	3,06	1,44
Kurtosis	-0,65	4,12	-0,17	-1,01	-0,29	0,61	-0,11	-0,65	2,4	-0,48	-1,22	-0,51	-1,2	2,2	12,57	3,55
CV (%)	23,06	22,14	21,42	14,92	23,03	22,76	33,57	40,24	30,1	23,0	34,18	21,95	44,2	26,3	42,05	42,09
P _{valor}	<0,001		<0,001		0,96		<0,001		<0,001		<0,001		0,82		<0,001	
Norte vs Sur	<0,001		<0,001		0,96		<0,001		<0,001		<0,001		0,82		<0,001	
Nivel crítico	2,50*		0,80*		0,40*		0,40-0,90#		2,50-5,00#		0,20#		1,00-2,00#		0,50#	

*Extracciones de Ca, Mg y K con acetato de amonio 1N a pH 7.

#Extracciones de B con agua caliente y de Cu, Fe, Mn y Zn con DTPA.

* Ca, Mg and K extractions with 1N ammonium acetate at pH 7.

Extractions of B with hot water and of Cu, Fe, Mn and Zn with DTPA.

1,96±0,10%, respectivamente. Además, la remoción promedio por tonelada de grano fue 2,2 kg para Ca, de 2,4 para Mg y de 19,4 kg para K. Similares valores promedios en grano de soja fueron informados por Ciampitti & García (2007). El rendimiento del cultivo explicó el 18, 47 y 90% de la remoción de Ca, Mg y K en grano, respectivamente (**Figura 4**). Además, la concentración de nutrientes en grano no fue afectada por el rendimiento del cultivo (**Figura 4**).

Para el caso de los micronutrientes, la concentración media de Cu, Mn, B, Zn y Fe fue de 9,6±2,6; 22,7±5,0; 32,7±4,5; 44,4±8 y 62,3±14,8 %, respectivamente. Al igual que para Ca, Mg y K, la extracción remoción de micronutrientes en grano fue explicada principalmente por el rendimiento, mientras que la concentración no se asoció con el rendimiento (**Figura 5**). El rendimiento del cultivo explicó el 36, 60, 78, 62 y 59% de la remoción de Cu, Mn, B, Zn y Fe en grano, respectivamente (**Figura 5**).

La remoción promedio de Cu, Mn, B, Zn y Fe fue 9,4; 24; 33; 44 y 65 g por tonelada de grano, respectivamente. No obstante, a partir de la recopilación de datos bibliográficos, Ciampitti y García (2007) informaron diferentes valores promedio de extracción de micronutrientes en grano de soja (35, 376, 72, 33 y 21 g por tonelada para Cu, Mn, B, Zn y Fe, respectivamente), lo cual se explicaría en parte por la amplia base de datos utilizada. Además, Salvagiotti *et al.* (2018) determinaron que para el caso de los micronutrientes existe un ajuste en la eficiencia interna de la planta (ambientes de máxima acumulación o de máxima dilución), lo cual genera variaciones en

los requerimientos de dichos nutrientes. En la actualidad, los niveles de remoción de nutrientes en soja no son compensados por la fertilización (Forján,2004), por tanto, la baja tasa de reposición de nutrientes y la pérdida de materia orgánica generan una disminución progresiva de la fertilidad de los suelos y de la sustentabilidad de los sistemas de producción (Cruzate & Casas, 2009).

CONCLUSIONES

La concentración de B y Zn en suelo limitan el rendimiento del cultivo de soja de forma diferencial según zona de la región pampeana (Zona Norte > Zona Sur). Además, solo la concentración de Zn y Mn en suelo se asoció con su contenido en hoja. La acumulación de nutrientes en grano fue explicada por el rendimiento y no por la concentración de los mismos, siendo en promedio de 2,2, 2,4, 19,4, 44, 33, 9,4, 65 y 24 g por tonelada de grano para Ca, Mg, K, Zn, B, Cu, Fe y Mn, respectivamente. Estos valores de remoción de nutrientes en grano podrían ser utilizados como referencia nacional para la estimación de balances de nutrientes en soja.

Las futuras investigaciones deberían focalizarse en estudios sobre la determinación y/o validación de niveles críticos de cationes de intercambio y micronutrientes en suelo y planta y su interacción con: a) la disponibilidad de macronutrientes, b) materiales genéticos, c) prácticas de manejo y condiciones edafoclimáticas.



Tabla 2. Estadísticos descriptivos para las determinaciones de calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y micronutrientes en hoja de cultivos de soja para la Zona Norte (-N) y Zona Sur (-S). Nivel crítico en hoja de Ca, Mg y K según Malavolta et al. (1997) y de micronutrientes según Melsted et al. (1969).
Table 2. Descriptive statistics for the determinations of interchangeable calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K) and micronutrients in soybean crops for the Northern Zone (-N) and the Southern Zone (-S). Critical levels of Ca, Mg, K according to Malavolta et al. (1997) and of micronutrients according to Melsted et al. (1969).

Estadístico	Ca-N	Ca-S	Mg-N	Mg-S	K-N	K-S	Zn-N	Zn-S	Fe-N	Fe-S	Cu-N	Cu-S	Mn-N	Mn-S	B-N	B-S
	------(%)-----						------(mg kg ⁻¹)-----									
Promedio	0,92	0,84	0,48	0,37	2,13	1,95	36,64	53,46	219,7	134,1	15,32	7,59	85,5	57,9	71,43	60,55
DE	0,11	0,19	0,14	0,06	0,22	0,23	3,96	9,46	47,0	30,0	4,91	1,34	24,7	10,3	13,09	6,39
Mínimo	0,66	0,53	0,31	0,26	1,55	1,57	29,60	29,40	137,0	77,7	7,00	5,10	52,0	41,4	48,90	50,40
Máximo	1,16	1,43	0,79	0,56	2,47	2,44	49,60	72,30	328,0	198,6	29,00	10,10	143,0	84,0	101,80	73,90
Percen. (0,25)	0,81	0,72	0,35	0,33	1,97	1,78	34,20	46,50	184,3	114,0	11,93	6,70	65,5	51,0	62,90	54,80
Percen. (0,50)	0,91	0,82	0,43	0,37	2,19	1,92	36,25	55,50	211,0	124,2	14,25	7,60	81,0	56,4	71,10	59,50
Percen. (0,75)	1,02	0,92	0,57	0,40	2,27	2,08	39,48	60,00	248,8	161,7	18,30	8,50	109,8	64,8	79,80	66,40
Percen. (1,00)	1,16	1,43	0,79	0,56	2,47	2,44	49,60	72,30	328,0	198,6	29,00	10,10	143,0	84,0	101,80	73,90
Skewness	-0,07	1,06	0,63	1,01	-0,82	0,51	0,82	-0,39	0,48	0,55	0,59	0,21	0,49	0,59	0,23	0,31
Kurtosis	-0,73	1,47	-0,76	2,35	0,68	-0,30	1,63	0,21	-0,26	-0,51	0,39	-0,50	-0,81	0,24	-0,08	-0,89
CV (%)	12,28	23,07	28,89	15,75	10,24	11,62	10,80	17,70	21,40	22,42	32,05	17,65	28,98	17,88	18,33	10,55
P _{valor}																
Norte vs Sur	0,029		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001	
Nivel crítico	0,20*		0,25*		1,50*		15,0#		30,0#		5,0#		20,0#		25,0#	

*Ca, Mg y K, digestión húmeda.

#Zn, Fe, Cu y Mn, digestión húmeda y B, combustión seca.

* Ca, Mg and K, wet digestion.

#Zn, Fe, Cu and Mn, wet digestion and B, dry combustion.

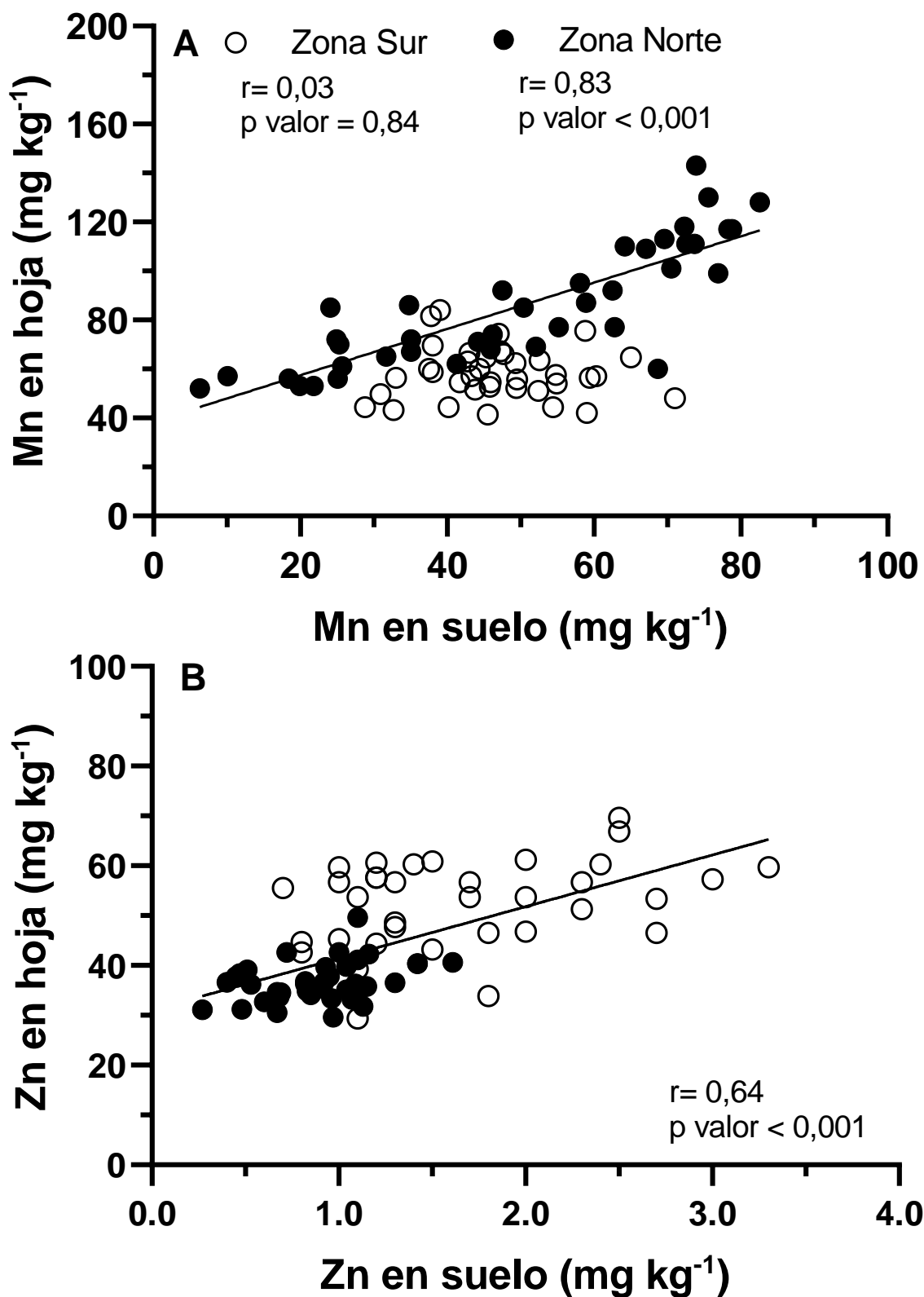


Figura 3. Asociación entre la concentración de nutrientes en suelo y hoja: A) Manganese (Mn) y B) Zinc (Zn).
 Figure 3. Association between the concentration of nutrients in soil and leaf: A) Manganese (Mn) and B) Zinc (Zn).



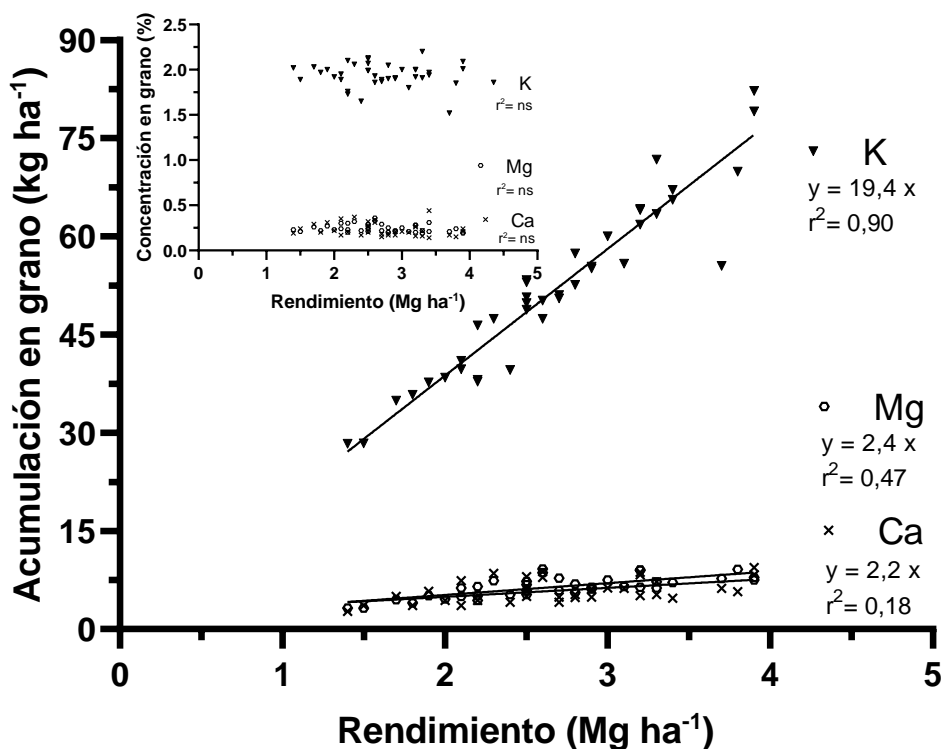


Figura 4. Acumulación y concentración (caja inserta) de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) en grano de soja en función del rendimiento del cultivo para la Zona Sur. ns= no significativo.

Figure 4. Accumulation and concentration (inserted box) of calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K) in soybean grain as a function of crop yield for the Southern Zone. ns= not significant.

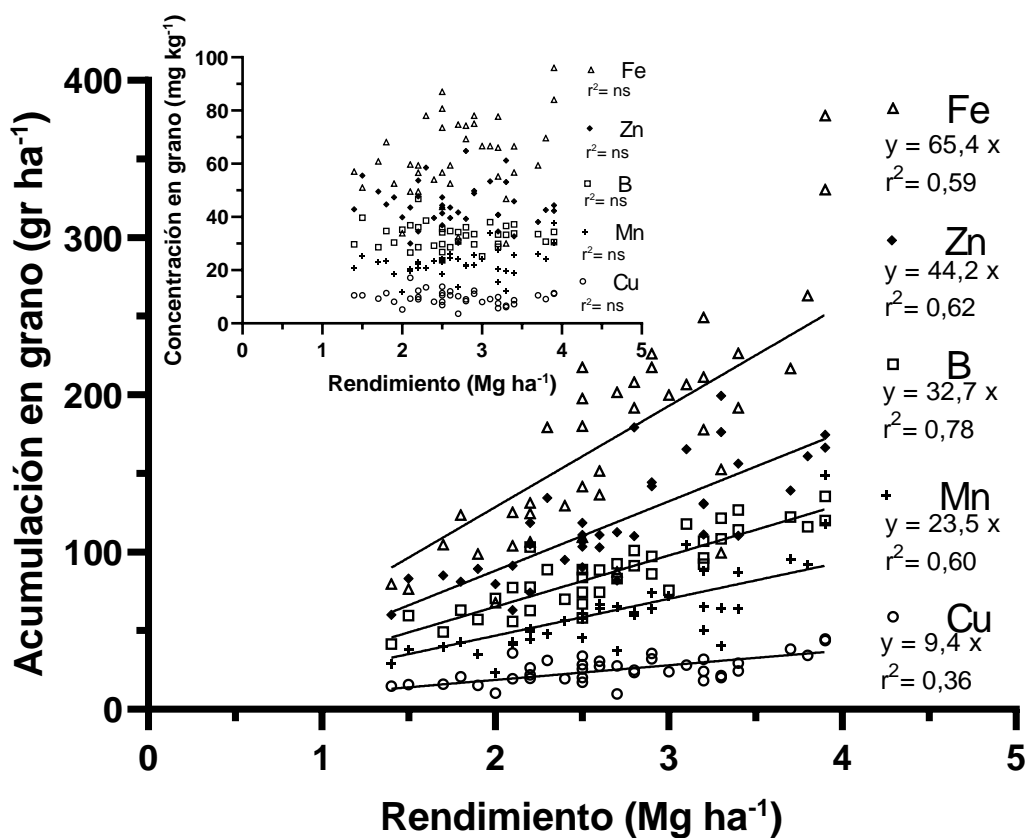


Figura 5. Acumulación y concentración (caja inserta) de micronutrientes en grano de soja en función del rendimiento del cultivo para la Zona Sur. ns= no significativo.

Figure 5. Accumulation and concentration (inserted box) of micronutrients in soybean as a function of crop yield for the Southern Zone. ns= not significant.



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por IPNI (Proyecto IPNI-2014-GBL-62), Canpotex, y Fertilab.

BIBLIOGRAFIA

- Andrade FE & VO Sadras. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade FE & VO Sadras (editores). Bases para el manejo del cultivo del maíz, el girasol y la soja. 7, Pp 173-206.
- Anon. 1994. Extractable zinc, copper, iron and manganese: DTPA method, In: Plant, Soil and Water Reference Methods.
- Aramburu Merlos F; JP Monzon; JL Mercou; M Taboada; FH Andrade; A Hall; E Jobbagy; KG Cassman & P Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184:145-54.
- Barbagelata PA & RJM Melchiori. 2008. Evaluación de la fertilización foliar con macro y micronutrientes en soja. En Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Barbieri P; H Sainz Rozas; H Echeverría; F Salvaggiotti; P Barbagelata; M Barraco; J Colazo; G Ferraris; H Sánchez; R Cáceres Díaz; N Reussi Calvo; G Esposito; M Eyherabide & B Larsen. 2015. El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de zinc en el cultivo de maíz? IAH 19.
- Bray RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Benton Jones J. 1991. Plant Tissue Analysis in Micronutrients. En: Luxmoore, R. J. (Eds) Micronutrients in agriculture SSSA, pp 477-522
- Buchholz D. 1983. Soil test interpretations and recommendations handbook. Dep. Agron. Univ. of Missouri, Columbia. <http://aes.missouri.edu/pfcs/soiltest.pdf> (accessed 2 July 2014).
- Bustos N; C Alvarez; PA Barbieri; M Eyherabide & HR Sainz Rozas. 2020. Diagnóstico de la disponibilidad de boro para soja mediante el análisis de suelo y tejido foliar. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo 13 al 16 de Octubre, Corrientes, Argentina. Actas 6 pág.
- Ciampitti I. & F García. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios en cereales, oleaginosos e industriales [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/755CD604735F8F148525799500785A15/\\$FILE/IA33.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/755CD604735F8F148525799500785A15/$FILE/IA33.pdf)
- Cordone G; C Vidal; R Albrecht; F Martínez; H Pescetti; L Martins; G Almada; L Angeloni; E Casasola; G Cavallero; M De Emilio; M Gatti; G Gerster; S Guerra; J Méndez; R Pagani; J Pabón; G Prieto; L Quevedo; N Trentino; A Rausch; J Scarel; C Espíndola; M Parodi; A Malmantile & J Rossi. 2011. Estado nutricional del cultivo de soja en la provincia de Santa Fe. En: Para mejorar la producción 46. INTA EEA Oliveros.
- Cruzate GA & Casas R. 2009. Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur (IPNI)*. 44: 21-26.
- Diovisalvi N; G Studdert; N Reussi Calvo; G Domínguez & A Berardo. 2014. Estimating soil particulate organic carbon through total soil organic carbon. *Ci. Suelo*. 32: 85-94.
- Divito GA; HE Echeverría; FH Andrade & VO Sadras. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: performance of S and N: S determinations in leaf, shoot and seed. *F. Crop. Res.* 180: 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.06.006>.
- Anderson JT; AP Mallarino & MU Haq. 2015. Soybean Yield Response to Foliar-Applied Micronutrients and Relationships among Soil and Tissue Tests. *Agron. J.* 107:2143–2161. doi:10.2134/agronj14.0536.
- Fehr WR & CE Caviness. 1977. Stages of soybean development. Iowa Agricultural 13 Experimental Station, Special Report 80.
- Forján HJ. 2004. Balance de nutrientes en secuencias agrícolas de la región sur bonaerense. *INPOFOS. Informaciones Agronómicas*. 21: 8-11.
- García FO & A Correndo. 2012. Cálculo de requerimientos nutricionales. IPNI, Programa Latinoamérica Cono Sur.
- García F.O.; A. Grasso; M. F. González Sanjuan; A. Correndo & F. Salvaggiotti. 2018. Connecting Crop Nutrient Use Efficiency to Future Soil Productivity. *Better Crops* 102(4): 8-10.
- Gerwing J & R Gelderman. 2005. Fertilizer recommendations guide. South Dakota State University Extension.EC750.



- Haby VA; MP Russelle & EO Skogley. 1990. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. En: Soil testing and plant analysis. Ed. RL Westerman. SSSA Madison, Winsconsin, USA. 3, Pp 181-227.
- Havlin JL; JD Beaton; SL Tisdale & WL Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers, 6th Edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice-Hall, Inc. 499 p.
- Jones JB & VW Case. Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. En: Soil testing and plant analysis. Ed. RL Westerman. SSSA Madison, Winsconsin, USA. 3, Pp 389-428.
- Larrea G. 2018. Disponibilidad y variabilidad espacial de calcio, magnesio y potasio en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana. Tesis de Maestría, Fac. Cs. Agrarias, Univ. Nac. Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires. 62 p.
- Martínez JP; C Crespo; H Sainz-Rozas; H Echeverría; G Studdert; F Martínez; G Cordone & P Barbieri. 2020. Soil organic carbon in cropping sequences with predominance of soybean in the Argentinean humid pampa. *Soil Use Manag.* 36, 173–183. doi: 10.1111/sum.12547.
- Malavolta E; GC Vitti & SA Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós. 319 p.
- Melsted SW; HL Motto & TR Peck. 1969. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agron. J.* 61:17-20.
- Miretti MC; M Pilatti; RS Lavado & S Del Carmen Imhoff. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del suelo.* 30(1): 67-73.
- Naftel J. 1939. Colorimetric microdetermination of boron. *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*, 11(7):407-409.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Versión 3.1.2. <http://www.R-project.org> (accessed 10.05.14).
- Sims JT & GV Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. En: *Micronutrients in agricultura*. Eds. JJ Mortvedt, FR Cox, LM Shuman & MR Welch. Ed. SSSA Madison, Winsconsin, USA. Pp 427-476.
- Sainz Rozas H; M Eyherabide; G Larrea; N Martínez Cuesta; H Angelini; N Reussi Calvo & N Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. En: *Simposio Fertilidad 2019*. Fertilizar, Rosario, Mayo 2019.
- Salvagiotti F; P Barbagelata; M Barraco; A Condori; G Di Mauro; J Enrico; H Echeverría; M Ferrari; F García; V Gudelj; O Ortez; J Rotundo & I Ciampitti. 2018. Requerimientos de nutrientes en soja: curvas de dilución y acumulación e índice de cosecha. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán 15 al 18 de mayo de 2018.
- Studdert GA & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1496-1503.
- Sutradhar AK; DE Kaiser & LM Behnken. 2017. Soybean Response to Broadcast Application of Boron, Chlorine, Manganese, and Zinc. *Agron. J.* 109:1048–1059. doi:10.2134/agronj2016.07.0389
- Vázquez M; A Terminiello; A Casciani; G Millán; P Gelati; F Guilino; J García Díaz; J Kostiría & M García. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en ámbitos templados argentinos. *Ci. Suelo*, 28(2).
- Walkley A & CA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37. doi:10.1097/00010694-193401000-00003.
- Zasoski RJ & RG Burau. 1977. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multielement tissue analysis. *Common Soil. Sci. Plant Analyzis*. Vol 3:425-436

