

Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica

IAH 20 - Diciembre 2015

Las mejores prácticas de manejo de la fertilización azufrada en cultivos extensivos..	2
El aporte de la fijación biológica de N en el cultivo de soja en Argentina	7
Estudio prospectivo de los principales metales pesados de suelos agrícolas cultivados con trigo candeal y maíz en diferentes zonas de Chile	12
Respuestas en rendimiento a la aplicación de P, S y Zn en maíz tardío en la región pampeana norte argentina	19
La tarea de detectar efectos de compuestos biológicos sobre el rendimiento de cultivos ...	24
Avances en las evaluaciones de B y Zn en el cultivo de caña de azúcar en suelos derivados de ceniza volcánica de Guatemala	29
Cursos y Simposios	34
Publicaciones Disponibles	35

En este número

- MPM de la fertilización azufrada
- Aporte de la fijación biológica de N en soja
- Principales metales pesados en suelos agrícolas de Chile
- Respuesta a P, S y Zn en maíz tardío
- Detección del efecto de compuestos biológicos
- B y Zn en caña de azúcar en suelos de Guatemala



Editores :
Dr. Fernando O. García
Dr. Raúl Jaramillo
Dr. Armando Tasistro

International Plant Nutrition Institute (IPNI)

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se citen la fuente y el autor.

<http://www.ipni.net>

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso • Buenos Aires - Argentina
Telf/Fax.: 54 11 4798 9939 • Correo electrónico: Lpisauri@ipni.net • <http://Lacs.ipni.net>

Oficina para el Norte de Latinoamérica • Casilla Postal 17 17 980 • Quito - Ecuador
Telf.: 593 2 2463 175 • Fax: 593 2 2464 104 • Correo electrónico: aormaza@ipni.net • <http://nla.ipni.net>

Oficina para México y Centroamérica • 3500 Parkway Lane, Suite 550 • Norcross, GA 30092 - EE.UU
Telf.: 1 770 825 8079 • Fax: 1 770 448 0439 • Correo electrónico: atasistro@ipni.net • <http://mca.ipni.net>

Las mejores prácticas de manejo de la fertilización azufrada en cultivos extensivos

W.D. Carciochi^{1,4,*}, G.A. Divito^{2,4}, N.I. Reussi Calvo^{2,3,4} y H.E. Echeverría⁴

Introducción

El azufre (S) es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas. En los últimos años su deficiencia se ha expandido por varias regiones del mundo, incluida la Argentina (Echeverría et al., 2015), donde es el tercer nutriente limitante de los rendimientos, luego del nitrógeno (N) y el fósforo (P).

Algunas investigaciones han avanzado en el desarrollo y evaluación de métodos de diagnóstico para determinar situaciones en las que se requiere la aplicación de S (Carciochi et al., 2015). En este sentido, trabajos realizados en la región pampeana argentina indican que suelos de textura gruesa, bajo contenido de materia orgánica, prolongada historia agrícola, barbechos cortos y ambientes de alta productividad son algunas de las características del suelo y del sistema de producción que determinan una alta probabilidad de deficiencia de S. Por otra parte, la determinación del contenido de S-sulfato en el suelo a la siembra aporta solo una aproximación de la disponibilidad de dicho nutriente. Esta información puede complementarse durante el ciclo de los cultivos con metodologías basadas en el análisis de material vegetal, como la relación entre las concentraciones de N y S en biomasa aérea o el uso del clorofilómetro.

La aplicación de las mejores prácticas de manejo (MPM) de la nutrición y fertilización permiten incrementar los rendimientos y mejorar las eficiencias de uso de recursos e insumos, maximizando el beneficio económico y minimizando el impacto ambiental. Para llevar a cabo las MPM, es necesario aplicar la dosis y la fuente adecuada de nutrientes, en la forma y el momento correctos (Bruulsema et al., 2008). Así, estos cuatro requisitos son necesarios para un manejo racional de la nutrición, que contribuya a la productividad de los cultivos y los sistemas, contemplando el equilibrio entre los aspectos ambientales, económicos y sociales.

Por lo tanto, se propone como objetivos del presente trabajo:

- i) Realizar una revisión de la información disponible sobre las MPM de la fertilización azufrada.
- ii) Generar un esquema que resuma las pautas a seguir para cumplir con las MPM de la fertilización azufrada en los principales cultivos extensivos de la región pampeana argentina.

Fuentes de azufre

Existen diversas fuentes azufradas que se diferencian por su solubilidad y presentación (**Tabla 1**). Las solubles presentan el S en forma de sulfato (SO_4^{2-}) y en las insolubles el S se encuentra en forma elemental (S^0). Dentro de las primeras se hallan el sulfato de amonio (SA) y el superfosfato simple (SPS). Este último ha adquirido gran difusión en Argentina debido a que contiene P y S, principales nutrientes deficitarios en el cultivo de soja. El sulfato de calcio o yeso agrícola (YE) es otro de los fertilizantes solubles que ha comenzado a utilizarse en los últimos años. Entre las fuentes líquidas se dispone de mezclas de urea-amonio-nitrato (UAN) y tiosulfato de amonio (TSA), las cuales aplicadas al suelo producen S elemental y sulfato en proporciones iguales. Por su parte, el S elemental (SE) es un fertilizante apto para la producción orgánica debido a su origen natural, y por su efecto acidificante también puede ser aplicado en suelos sódicos para reducir el pH de los mismos.

En la Argentina, es común que los fertilizantes azufrados se comercialicen en mezclas físicas con otros productos como la urea o el superfosfato triple. A su vez, en los últimos años se ha incrementado la oferta de mezclas químicas complejas (con N, P, S y otros nutrientes en proporciones variables). Las mismas han sido desarrolladas para cultivos intensivos, aunque actualmente han tratado de imponerse como “arrancadores” en cultivos extensivos. En la mayoría de estas mezclas, el S se encuentra como sulfato, mientras que unas pocas contienen el nutriente en su forma elemental o bajo ambas formas.

El sulfato es la forma bajo la cual las plantas absorben este nutriente, por lo tanto, el S elemental se debe oxidar en el suelo para poder ser absorbido por las plantas. El proceso de oxidación es complejo y está regulado principalmente por el tamaño de la partícula del fertilizante, la temperatura y humedad. Respecto al tamaño de partícula, las granulometrías más apropiadas son las inferiores a 150-200 μm . Es por esto que, algunas formulaciones, incorporan el S elemental en forma micronizada dentro de la matriz de los gránulos de fertilizantes convencionales como el fosfato monoamónico, donde los tamaños de partículas son pequeños (< 40 μm). De esta forma se logra una mayor tasa de oxidación y es posible incorporar una mayor concentración de S en el fertilizante, comparado con mezclas físicas de fertilizantes que utilizan sulfato. Cuando las condiciones son restrictivas para la oxidación

¹ Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

² CONICET

³ Laboratorio de suelos FERTILAB

⁴ Unidad Integrada Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP, EEA INTA Balcarce

* Autor de contacto. Correo electrónico: waltercarciochi@hotmail.com

Tabla 1. Fertilizantes azufrados comúnmente empleados en la región pampeana argentina. Fuente: Echeverría et al. (2015).

Fertilizante	Contenido de S (%)	Otros nutrientes	Solubilidad	Presentación	Características
Sulfato de amonio (SA)	24	21% N	alta	sólido	Riesgo de fitotoxicidad (efecto acidificante)
Superfosfato simple	12	9% P 20% Ca	alta	sólido	Usado en leguminosas por el aporte de P y S
Sulfato de calcio (yeso agrícola, YE)	16-18	22% Ca	media	sólido	Residualidad media, no produce acidez
Tiosulfato de amonio (TSA)	26	12% N	alta	líquido	Riesgo de fitotoxicidad, apto para fertirriego
Azufre elemental (SE)	80-98	-	baja	sólido	Baja disponibilidad inicial, alta residualidad
Mezcla química "NPS" ⁽¹⁾	9	10% N 20% P	alta	sólido	Utilizada como "arrancador" de cultivos

⁽¹⁾ Los contenidos de nutrientes son variables entre mezclas, se menciona una como ejemplo.

del S elemental (ejemplo baja temperatura, disponibilidad hídrica o contenido de materia orgánica) se recomienda aplicar una fuente de S soluble o seleccionar S elemental micronizado de alta reactividad en el suelo, para proveer S disponible dentro del ciclo del cultivo. Otra opción ante esta situación es aplicar el S elemental en forma anticipada a la siembra.

Experiencias realizadas en una red de 8 ensayos en trigo y 9 en soja en la Pampa Ondulada y Pampa Plana indicaron similar eficiencia de uso del S (kg grano kg⁻¹ S aplicado) entre el sulfato de amonio y el S elemental micronizado, cuando ambas fuentes se aplicaron a la siembra y con la misma dosis de S (Torres Duggan, 2011). La excepción se produjo en 2 sitios donde la eficiencia de uso del S fue mayor con sulfato de amonio, dado que la baja ocurrencia de lluvias posteriores a la fertilización generó condiciones desfavorables para la oxidación del S elemental.

La liberación progresiva y sostenida de S a partir del S elemental podría ser una ventaja en suelos de textura gruesa y/o en condiciones de altas precipitaciones, donde el sulfato de los fertilizantes solubles puede perderse por lixiviación. Así, ensayos de larga duración realizados en Estados Unidos por Girma et al. (2005) reportaron que la aplicación de yeso al trigo generó rendimientos más elevados que con S elemental; mientras que en aquellos sitios donde se registraron fuertes lluvias, el yeso registró las menores eficiencias debido a la lixiviación del sulfato.

Por otra parte, el empleo de S elemental es una buena estrategia cuando se piensa en la fertilización de cultivos plurianuales como pasturas y de doble cultivos, ya que presenta una mayor residualidad que las fuentes que contienen sulfato. En una red de numerosos ensayos en la región pampeana se compararon fuentes de S como sulfato y en forma elemental en los cultivos de trigo y soja. En estos se determinó mayor respuesta en rendimiento con las fuentes solubles para el cultivo al que se le aplicó

el fertilizante, pero no para el cultivo siguiente, donde el S elemental generó una mayor respuesta (Melgar et al., 2000).

Respecto a las fuentes solubles, Torres Duggan et al. (2006) compararon dos formas de presentación física de yeso (peleteado y granulado), sulfato de amonio y superfosfato simple. Dichos autores no observaron diferencias entre las fuentes evaluadas, al igual que en otras experiencias desarrolladas en la región pampeana (Vivas et al., 2002; Gutiérrez Boem et al., 2007). Si bien el yeso tiene menor solubilidad que el sulfato de amonio, en general, el contenido de agua en los suelos agrícolas no se presenta como limitante para la disolución de las cantidades que se emplean habitualmente. De esta forma, dicha diferencia sería agrónomicamente irrelevante (Gutiérrez Boem et al., 2007). Así, la ausencia de diferencias entre fertilizantes sulfatados, hace que sea conveniente aplicar aquel de menor costo por unidad de S. Debe considerarse, sin embargo, que el S tiene menor costo respecto del N y P, por lo que, cuando se aplica en mezclas, debe contemplarse el precio de los demás integrantes de la formulación.

La reacción de la fuente sulfatada en el suelo puede resultar un aspecto importante en decisiones que tienen que ver con la tecnología de la fertilización. En términos generales, cuando la cantidad de nutriente aplicado al voleo es similar al requerido por el cultivo, el riesgo de acidificación por fertilizantes azufrados amoniacaes o formadores de amonio (sulfato de amonio y tiosulfato de amonio) es bajo. Sin embargo, no se recomienda la fertilización con dichas fuentes junto con la semilla, ya que puede dañarlas causando una disminución en la densidad de plantas logradas. En el caso del yeso, no se han detectado efectos fitotóxicos relevantes aun con dosis elevadas aplicadas junto a la semilla, debido a su reacción neutra en el suelo. Por su parte, para el caso particular

de la soja, no es aconsejable ubicar ninguna fuente junto con la semilla inoculada, ya que los efectos salinos de los fertilizantes afectan a las bacterias fijadoras de N.

Forma de aplicación

La movilidad del sulfato en el suelo y el uso de fuentes solubles, permiten manejar las formas de aplicación de los fertilizantes azufrados con gran flexibilidad. Si bien no se ha investigado ampliamente el tema en la región pampeana, las características de las fuentes indican que no son esperables diferencias en efectividad entre aplicaciones en bandas o al voleo (**Figura 1**). Esto se debería a la baja capacidad de adsorción de sulfato en los suelos de la región pampeana. Al igual que para los fertilizantes sólidos, las fuentes líquidas pueden aplicarse en bandas o cubriendo la totalidad de la superficie, ya sea en forma chorreada, pulverizada, e incluso mediante el equipo de riego.

Para el caso particular del S elemental se recomienda que se aplique en forma superficial, permitiendo que el mismo se disgregue y que la mayor cantidad de producto quede en contacto con el suelo, aunque las fuentes modernas disponen de agentes o aditivos que mejoran su disgregación. Las fuentes que combinan sulfato con S elemental permitirían el empleo de cualquier forma de aplicación, debido a que contienen una forma soluble rápidamente disponible con otra de liberación gradual.

Momento de aplicación

La elección del momento en el cuál se aplica el fertilizante debe contemplar la mayor sincronía posible entre la oferta del nutriente y la demanda del cultivo, a fin de disminuir las pérdidas del sistema suelo-cultivo. En este sentido, el principal mecanismo de pérdida de S es la lixiviación del sulfato, proceso sobre el cual se dispone de escasa información a nivel local. Sin embargo, haciendo una analogía con el N, la lixiviación podría producirse

ante determinadas condiciones predisponentes, siendo las más relevantes:

- i) Suelos de textura gruesa.
- ii) Precipitaciones intensas.
- iii) Excesos hídricos.
- iv) Alta disponibilidad de S en el suelo.

Es frecuente que el S se aplique en mezclas físicas o químicas y sólidas o líquidas con N y P a la siembra, o con N en estadios vegetativos tempranos. Generalmente el aporte de S a partir de mezclas, depende del momento en el que se requiera el nutriente acompañante. Por su parte, las fuentes que contienen S elemental deberían aplicarse con anterioridad a la siembra para promover la oxidación del mismo, en especial si las condiciones ambientales son desfavorables para dicho proceso. Si bien son deseables las aplicaciones tempranas para asegurar la disponibilidad del nutriente en los momentos de mayor demanda del cultivo, la ventana de aplicación de S se extiende aproximadamente hasta la floración. Considerando que el S se absorbe y acumula aún en estadios ontogénicos avanzados, la ventana de intervención agronómica para efectuar la aplicación de S es mayor a la de otros nutrientes como el N. Así, en caso de detectarse una deficiencia de S, la misma puede revertirse aplicando el nutriente en estadios avanzados, pese a que ello genere inconvenientes operativos. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que aplicaciones en estos momentos solo serán eficientes con fuentes solubles, dentro de las cuales las líquidas presentan ventajas por permitir su aplicación junto con otros agroquímicos e incluso con el sistema de riego.

Es escasa la información disponible acerca del efecto de distintos momentos de aplicación de S sobre los cultivos. En colza y trigo no se manifestaron diferencias en rendimiento para aplicaciones de yeso y sulfato de amonio a la siembra o dividida entre siembra y estadios vegetativos tempranos (Díaz-Zorita et al., 1998; Keller y Fontanetto, 2006). Esto podría deberse a la baja capacidad de adsorción del sulfato al suelo y a la escasa magnitud de las pérdidas de S por lixiviación en suelos con texturas medias ubicados en el área central de la región pampeana.

Debido a la alta frecuencia de siembra de soja de segunda en la región pampeana, es frecuente plantear la fertilización azufrada en el trigo con el objetivo de satisfacer las necesidades de los dos cultivos. En una red de 46 ensayos en dicha región, donde se aplicaron entre 10 y 30 kg S ha⁻¹, se pudo observar que parte del mismo permanecía en el suelo bajo la forma de sulfato a la siembra de la soja de segunda (Echeverría et al., 2011). Por su parte, otras investigaciones realizadas en el doble cultivo trigo/soja indicaron similar respuesta y eficiencia de uso de S cuando se aplicó una dosis equivalente al requerimiento total de este nutriente al trigo o a cada uno de los cultivos por separado (Salvagiotti et al., 2004).

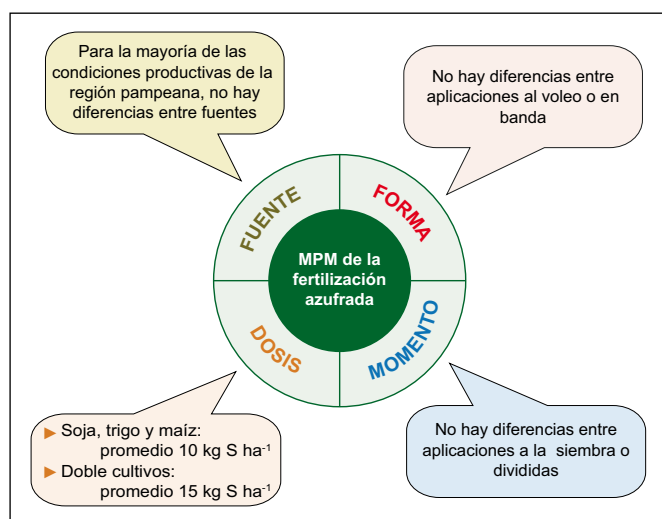


Figura 1. Pautas a seguir para cumplir con las mejores prácticas de manejo (MPM) de la fertilización azufrada en los principales cultivos extensivos de la región pampeana argentina.

Dosis a aplicar

Una de las falencias de los métodos de diagnóstico desarrollados hasta el momento es que no permiten definir la dosis de S. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en ensayos donde se evaluaron dosis crecientes de S, se pudo determinar que para los cultivos de soja, trigo y maíz el máximo rendimiento se logró con la aplicación de 10 kg S ha⁻¹ (Ferraris, et al., 2006; Reussi Calvo et al., 2011; Divito et al., 2015). Sin embargo, en cultivos que por su requerimiento específico (i.e. colza) o por los niveles de productividad alcanzados (i.e. cultivos bajo riego, alfalfa de corte, entre otros) podría ser necesario incrementar las dosis mencionadas. Otro ejemplo es la fertilización al trigo pensando en cubrir los requerimientos del doble cultivo trigo/soja de segunda, donde se debería aumentar la dosis a aproximadamente 15 kg S ha⁻¹.

Análisis económico

La relación de precios entre fertilizante y grano muestra los kg de grano que se necesitan para comprar 1 kg de S. El valor promedio entre los años 2000-2014, tomando como fuente de S el yeso, indica que se necesitan 6.2 kg de soja, 9.5 kg de trigo y 13.7 kg de maíz por cada kg de S agregado (**Figura 2**) (Correndo et al., 2015). A partir de una revisión realizada por Steinbach y Álvarez (2012) sobre fertilización azufrada, se determinó que la eficiencia de uso del S promedio en la región pampeana (1995-2009), fue de 19, 17 y 45 kg grano kg⁻¹ S para soja, trigo y maíz, respectivamente (**Figura 2**). Dado que la eficiencia de uso del S supera la relación de precios entre fertilizante y granos, se puede concluir que ante una deficiencia, la fertilización con S es económicamente rentable en los tres cultivos. Incluso a lo largo del periodo evaluado (2000-2014), no se registró ningún año en el que la relación de precios supere la eficiencia de uso del S para ninguno de los cultivos (**Figura 2**). Estos resultados evidencian la rentabilidad de la práctica de fertilización con S ante una deficiencia del nutriente, aún sin considerar su efecto residual. Es importante destacar que el precio de la unidad de S varía según la fuente. Cálculos realizados para el presente trabajo indicaron que en alguna de ellas el precio del S fue despreciable.

Consideraciones finales

En los últimos años se ha manifestado deficiencia de S en los principales cultivos extensivos de la región pampeana, aunque la misma no ha sido generalizada. Ante la necesidad de fertilizar con este nutriente, surge el interés por implementar las mejores prácticas de manejo de la nutrición y fertilización, en pos de contribuir a la productividad de los cultivos y los sistemas, contemplando el equilibrio entre los aspectos ambientales, económicos y sociales. La **Figura 1** resume las mejores prácticas de manejo de la fertilización azufrada para la región.

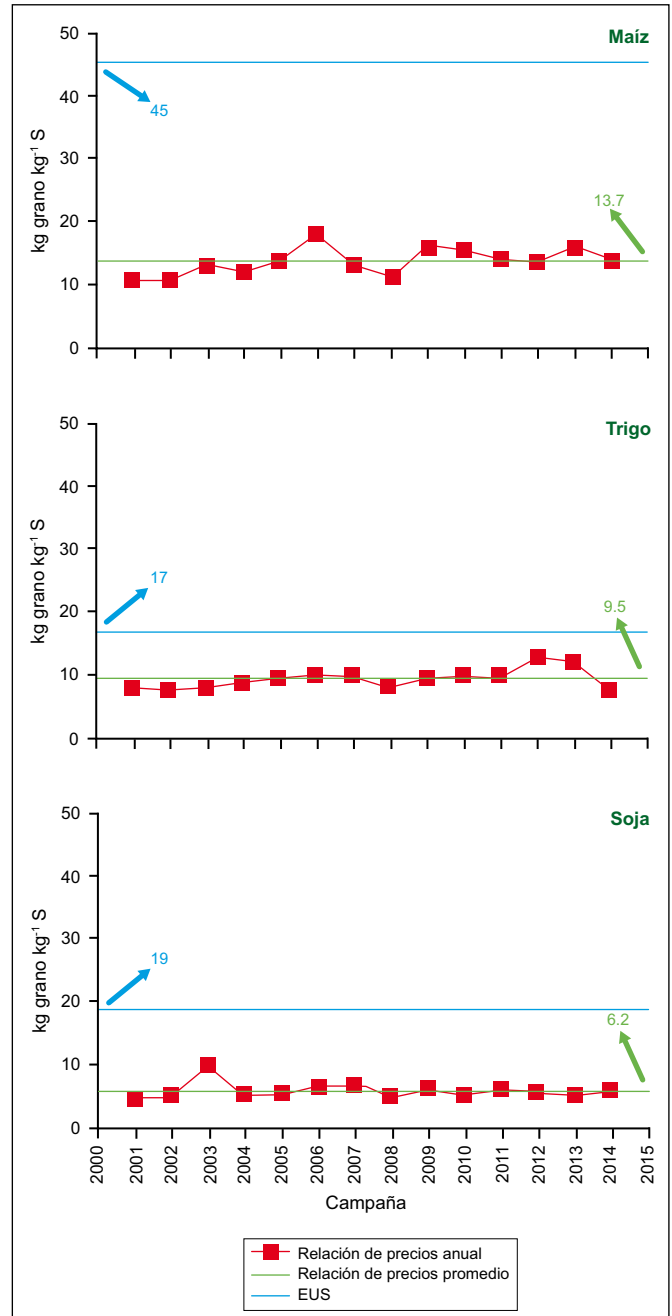


Figura 2. Eficiencia de uso del azufre (EUS) y relación de precio (kg grano kg⁻¹ S) entre el yeso y los cultivos de soja, trigo y maíz (Correndo et al., 2015). La EUS surge de una serie de ensayos realizados en la región pampeana argentina durante las campañas 1995-2009 (Steinbach y Álvarez, 2012).

Se concluye que se cuenta con adecuada información sobre las fuentes azufradas comúnmente empleadas en nuestra región. Por su parte es escasa la cantidad de investigaciones realizadas para evaluar los efectos de formas y momentos de aplicación del S. Respecto a la dosis, no se cuenta hasta el momento con métodos de diagnóstico que permitan recomendar una cantidad específica de nutriente a aplicar. Sin embargo, para cultivos de grano es factible la recomendación de dosis entre 10-15 kg S ha⁻¹, que normalmente cubren las deficiencias que se manifiestan en la zona y generan resultados económicos positivos.

Bibliografía

- Bruuselma T., C. Witt, F. García, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, y S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. *Better Crops* 92(2):13-15. IPNI. Norcross, EE.UU.
- Carciochi W.D., G.A. Divito, N.I. Reussi Calvo, y H.E. Echeverría. 2015. ¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina?. *Actas Simposio Fertilidad 2015*. Rosario, 19 y 20 de mayo. En CD.
- Correndo, A., M. Boxler, y F.O. García. 2015. Reposición de nutrientes en el largo plazo ¿Qué nos dicen los números? *Actas Simposio Fertilidad 2015*. En CD.
- Díaz-Zorita, M., G.A. Grosso y O. Peralta. 1998. Nitrógeno y azufre en cultivos de canola en el oeste bonaerense. *Actas de la III Reunión Nacional de Oleaginosas*. Bahía Blanca . pp. 203-204.
- Divito, G.A., H.E. Echeverría, F.H. Andrade, y V.O. Sadras. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. *Field Crops Research*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.06.006>
- Echeverría, H., N. Reussi Calvo, A. Pagani, y L. Fernández. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. *Actas Simposio Fertilidad 2011*. pp. 98-107.
- Echeverría, H.E., N.I. Reussi Calvo, y A. Pagani. 2015. Azufre. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 287-315.
- Ferraris, G., F. Gutiérrez Boem, P. Prystupa, F. Salvagiotti, L. Couretot, y D. Dignani. 2006. Fertilización azufrada en maíz, evaluación de la respuesta del cultivo y análisis de metodologías de diagnóstico de la fertilización azufrada: reporte final. *Proyecto Regional Agrícola. Desarrollo Rural INTA Pergamino*. [en línea] <www.profertilnutrientes.com.ar > [consulta: 2 junio 2015]
- Girma, K., J. Mosali, y K.W. Freeman. 2005. Forage and grain yield response to applied sulfur in winter wheat as influenced by source and rate. *Journal of Plant Nutrition* 28:1541-1553.
- Gutiérrez Boem, F.H., P. Prystupa, y G. Ferraris. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30:93-104, 2007.
- Keller, O., y H. Fontanetto. 2006. Fertilización nitrogenada y azufrada en trigo en una secuencia con soja. *Información técnica de trigo campaña 2006*. Publicación Miscelánea Nº 105.
- Melgar, R.J., M.E. Camozzi, y J. Lavandera. 2000. Al margen de las fuentes. *Fertilizar* Nº 20.
- Reussi Calvo, N.I., H.E. Echeverría, y H. Sainz Rozas. 2011. Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: plant analysis. *Journal of Plant Nutrition*. 34:573-589.
- Salvagiotti, F., G. Gerster, S. Bacigaluppo, J. Castellarín, C. Galarza, N. González, V. Gudelj, O. Novello, H. Pedrol, y P. Vallone. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* 22(2)92-101.
- Steinbach, H.S., y R. Álvarez. 2012. Revisión del efecto de la fertilización con azufre sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja en la región pampeana. *Actas XIX Congr. Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina 16 - 20 de abril.
- Torres Duggan, M. 2011. Fuentes azufradas en cultivos de grano de la región pampeana. Tesis de Maestría de la Universidad Nacional de Buenos Aires. 96 p.
- Torres Duggan, M., S. Gambaudo, y O. Quaino. 2006. Evaluación de fuentes azufradas en un Argiudol típico de la provincia de Santa Fe. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 18-22 de Septiembre de 2006. Salta-Jujuy.
- Vivas, H.S., H. Fontanetto, R. Alberch, y J.L. Hotián. 2002. fertilización con nitrógeno y azufre y fuentes azufradas en la producción de trigo. campaña 2001. *Información Técnica de Trigo. Campaña 2002*. Nº 4. [en línea] <<http://rafaela.inta.gov.ar>> [consulta: 2 junio 2015]



El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina

F. Salvagiotti^{1*}, D.J. Collino², A. Perticari³, C. Piccinetti³, G. Ovando⁴, S. Urquiaga⁵, y R.W. Racca¹

El nitrógeno (N) es central para la producción de los cultivos dado que está directamente implicado en el proceso de fotosíntesis (Kumar et al., 2004). El N atmosférico no-reactivo (N₂) es el pool más grande de N en la biósfera (ca. 79% del aire), sin embargo la producción de los cultivos se realiza con el N reactivo (NO₃, NH₄). Esta fracción presenta una gran variabilidad en cada sistema de producción dependiendo del balance entre las entradas de N al sistema (fertilizante, mineralización de la materia orgánica, la introducción de leguminosas en el sistema que realizan aporte a través de la fijación biológica de N (FBN), la fijación a través de microorganismos libres, la fijación por tormentas eléctricas) y las salidas (grano cosechado, erosión del suelo, perdidas gaseosas (denitrificación o volatilización de amonio) pérdidas por lavado) (Robertson y Vitousek, 2009). La evaluación de los balances de N es útil para estimar la magnitud de ganancias/perdidas cuando se utilizan leguminosas en un sistema de producción, analizar la eficiencia en el uso de los fertilizantes o evaluar la sustentabilidad en el manejo del N en distintos agro-ecosistemas. La elaboración de balances requiere una correcta estimación de los ingresos al mismo, especialmente de la FBN (Boyer et al., 2004). A nivel global, Smil (1999) estimó que la FBN representa ca. 17% del total de las entradas de N al sistema. En la misma escala de análisis, Galloway et al. (2004) estimaron que ca. 65% del N reactivo proviene de la FBN, y las plantas cultivadas representan ca. 20% del total de las entradas antrópicas de N. El aporte de N derivado de FBN dependerá de la presencia relativa de cultivos de grano, cultivos de cobertura y/o pasturas leguminosas en los distintos sistemas de producción.

El cultivo de soja requiere en promedio 80 kg en biomasa aérea para producir 1 tonelada de grano (Salvagiotti et al., 2008). Si se le suma la contribución de las raíces, los nódulos y las rizodeposiciones, este requerimiento podría alcanzar ca. 107 kg N (Rochester et al., 1998; Salvagiotti et al., 1998). Este requerimiento es satisfecho a través del N proveniente del suelo y la contribución del N de la FBN. En la campaña 2012-13, el cultivo de soja ocupó ca. 20 millones de has (SIIA-MAGyP, 2014), en un área comprendida entre 22-39° Lat. S y 56-66° Long O (**Figura 1**), con temperaturas anuales entre 23-14°C desde el norte al sur, y con una precipitación promedio entre 600 - 1100 mm desde O a E (Álvarez y Lavado, 1998; Hall et al., 1992). Estas variaciones climáticas determinaran distintos rendimientos, necesidades de N, y por lo tanto de FBN.

El cultivo de soja se cultiva principalmente sobre suelos molisoles con contenidos de materia orgánica entre 0.9 y 6.5% y valores de pH en el suelo entre 5.5 y 7.5 en los 20 cm superficiales (Sainz Rozas et al., 2011).

Dada la importancia de conocer el aporte de la FBN en los sistemas de producción de Argentina para poder elaborar balances y determinar la variabilidad de este aporte, entre las campañas 2004/2005 y 2010/2011 se realizó un relevamiento en 86 lotes de producción y/o parcelas experimentales ubicadas entre 22-39° Lat. S y 56-66° Long O (**Figura 1**) en lotes con larga historia de cultivo con soja, representando el rango de suelos y condiciones climáticas de la región sojera argentina. Este artículo es un resumen y adaptación del trabajo de Collino et al. (2015), en la cual se pueden consultar mayores detalles de metodología y resultados. Los objetivos de este

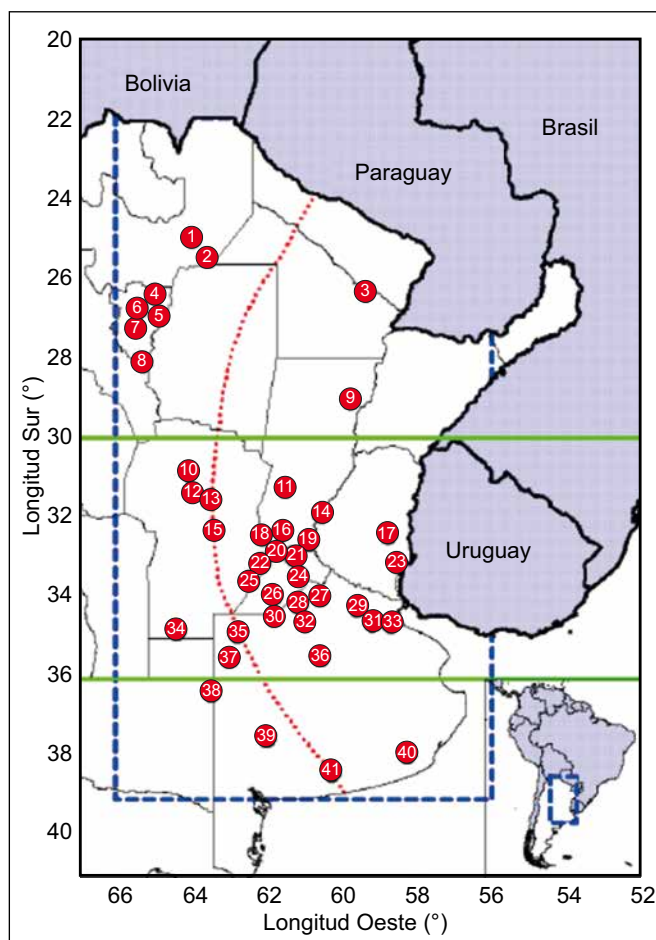


Figura 1. Distribución de los lotes en donde se determinó la FBN en soja en Argentina. Las líneas horizontales verdes corresponden a los paralelos 30 y 36° S. La línea punteada es la isoyeta de 800 mm.

¹ EEA Oliveros INTA

² Instituto de Fisiología y Recursos Genéticos Vegetales, INTA

³ Instituto de Microbiología y Zoología Agrícola, INTA Castelar

⁴ Climatología Agrícola, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba

⁵ Embrapa Agrobiologia, Brasil

* Autor de contacto. Correo electrónico: salvagiotti.fernando@inta.gov.ar

trabajo fueron: i) Evaluar la contribución de la FBN en el área de producción de soja en Argentina, ii) Construir un modelo para predecir la FBN a través de variables de cultivo, suelo y meteorológicas y iii) Estimar el aporte de la FBN de soja a nivel nacional usando los valores de este trabajo.

Sitios experimentales

Los suelos incluyeron Vertisoles, Entisoles y Mollisoles. La textura en los 20 cm superficiales variaron desde francos arenosos (hasta 85% de arena) en la zona más al Oeste hasta arcillosos (hasta 51% de arcilla) en las zonas más hacia el Este. En esta profundidad, el contenido de carbono osciló entre 0.64 y 4.54 %, el pH entre 4.7 y 7 y el contenido de P Bray entre 6 y 198 mg kg⁻¹. Cada lote fue manejado de acuerdo al manejo recomendado en términos de elección de cultivar, fecha de siembra y manejo de malezas, enfermedades e insectos.

Determinación de la FBN

La FBN fue determinada a través de la metodología de abundancia natural de ¹⁵N (Shearer y Kohl, 1986). Esta metodología se basa en la abundancia relativa de las dos formas isotópicas estables de N: ¹⁴N y ¹⁵N. Esta última fracción se encuentra a baja concentración en la atmósfera (0.3663%), mientras que en el suelo, está en una proporción superior a la de la atmósfera. En consecuencia, plantas que tomen N de la atmósfera, como es el caso de las legumbres que fijan N atmosférico, tendrán una concentración de ¹⁵N menor a la de una planta que no tome N del aire. Este principio se utiliza para determinar la proporción de N que deriva de la fijación biológica de N (**Figura 2**).

En cada lote en donde se evaluó la FBN, se utilizó sorgo o maíz resistente a glifosato como planta de referencia. Este cultivo de referencia se implantó en el lote en el área en donde posteriormente se realizaron los muestreos. Entre R6 y R7 del cultivo de soja, se cosechó 1 m² de la planta de referencia y del cultivo de soja, se secaron en estufa y molieron. Se determinó el contenido de N en

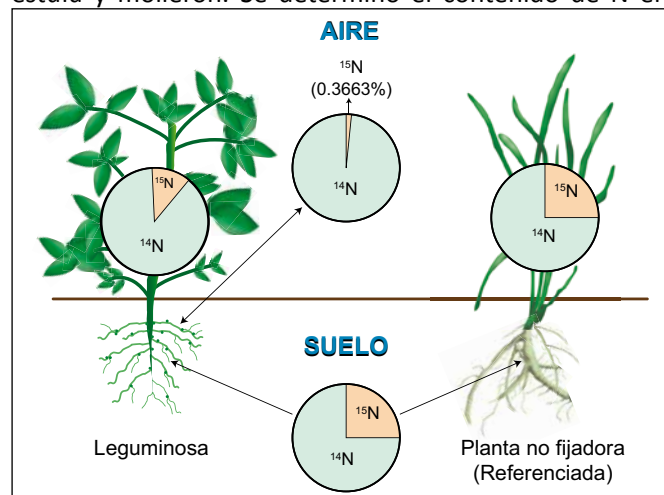


Figura 2. Esquema representativo de los principios de la metodología de abundancia de ¹⁵N (Adaptado de Peoples et al., 1989).

tejido a través de un análisis semi-micro Kjeldahl (Nelson y Sommers, 1973) y se determinó la abundancia de ¹⁵N a través de un espectrómetro de masa. La proporción de N derivado de la FBN (%Ndfa) se calculó según la Ec. 1:

$$\%Ndfa = 100 \frac{\delta^{15} N_{ref} - \delta^{15} N_{soja}}{\delta^{15} N_{ref} - B} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde $\delta^{15} N_{ref}$ y $\delta^{15} N_{soja}$ son la abundancia natural de ¹⁵N en el cultivo de referencia y la soja, respectivamente, y 'B' es la abundancia natural de ¹⁵N de una planta de soja que solamente utiliza el N del aire. Este valor B fue estimado en experimentos en condiciones controladas utilizando la cepa E-109 (utilizada en la mayor parte de los inoculantes de Argentina). A estas plantas se les analizó el $\delta^{15} N$. El valor B obtenido fue de -1.032 ‰.

La cantidad de N fijado en kg ha⁻¹ fue calculada utilizando la biomasa aérea del cultivo de soja, la concentración de N en los tejidos y el %Ndfa. Es importante destacar que los valores obtenidos no tienen en cuenta el aporte de raíces, nódulos y rizodeposiciones.

Fenología y variables meteorológicas estimadas

Se utilizó la información de radiación solar diaria y temperaturas de estaciones climáticas distantes a 50 km y las lluvias de cada lote. Utilizando los datos de localidad, cultivar y fecha de siembra, se simuló la ocurrencia de R2, R5 y R7 utilizando el programa SIFESOJA V 2010 (Peltzer y Peltzer, 2010). Con esta información se calculó: i) La radiación acumulada (Rad), ii) Temperatura media (TM), iii) La evaporatranspiración de referencia acumulada a través del método de Priestley–Taylor modificado por Ritchie (1972) (ETP, mm), iv) La lluvia efectiva acumulada (mm) según Dardanelli et al (1992) (PE) y v) Las lluvias acumuladas en el periodo de barbecho (desde el 1 de Abril) (PEB), y para tres subperiodos dentro del ciclo del cultivo: a) Vegetativo: siembra-R2, b) Reproductivo: R2-R5 y c) Llenado de granos: R5-R7.

La precipitación efectiva acumulada durante el periodo de barbecho y durante el periodo de crecimiento promedió 347 y 440 mm, respectivamente. En promedio, el 39, 27 y 34% de la precipitación efectiva total ocurrió durante Siembra-R2, R2-R5 y R5-R7, respectivamente (**Tabla 1**). La radiación acumulada fue en promedio de 2495 MJ m⁻² durante el ciclo del cultivo, repartiéndose un 46, 24 y 30% en los subperiodos Siembra-R2, R2-R5 y R5-R7, respectivamente (**Tabla 1**). La temperatura media tuvo menor variación, mostrando valores de 23, 23.4 y 21.3 °C para los mismos tres periodos, respectivamente (**Tabla 1**).

Análisis de la información

Se realizó un análisis global de los datos y también teniendo en cuenta las regiones definidas por la Red de Evaluación de Cultivares de Soja (RECSO) (Baigorri, 1997): i) Norte: al norte del paralelo 30° Lat. S, ii) Central: entre los paralelos 30 y 36° Lat. S y iii) Sur: al sur del paralelo 36° Lat. S (**Figura 1**).

Tabla 1. Promedios y rangos de las variables meteorológicas en los distintos subperiodos durante el ciclo de crecimiento del cultivo de soja.

	----- Subperiodos -----			
	Barbecho	Siembra-R2	R2-R5	R2-R5
Radiación solar acumulada (MJ m ⁻²)	-	1161 (608-1647)	585 (339-938)	749 (486-1069)
Temperatura media del aire (°C)	-	23 (19.5-28)	23.4 (20.5-27.3)	21.3 (15.8-24.9)
Evapotranspiración de referencia acumulada (mm)*	-	281 (181-407)	143 (78-241)	174 (99-267)
Precipitaciones acumuladas (mm)	347 (166-643)	173 (35-426)	120 (21-324)	147 (42-330)

* Método de Priestley–Taylor modificado por Ritchie (1972)

Tabla 2. Estadísticos de resumen sobre rendimiento, absorción de N (en R6/R7) y N derivado de la FBN en biomasa aérea en cultivos de soja en el área sojera de Argentina.

	n	Máximo	Percentil 75	Mediana	Percentil 25	Mínimo	Promedio
Set de datos completo							
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	81	5.9	4.3	3.6	2.9	1.5	3.6
N absorbido en R6/R7 (kg ha ⁻¹)	80	447	305	254	195	82	256
FBN, %	86	90	71	59	46	12	58
FBN, kg ha ⁻¹	80	337	197	148	98	15	153
Región Norte							
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	13	5.1	3.7	2.8	2.2	1.6	2.9
N absorbido en R6/R7 (kg ha ⁻¹)	12	447	268	210	170	129	229
FBN, %	13	84	58	53	45	32	52
FBN, kg ha ⁻¹	12	255	159	95	85	48	122
Región Pampeana Central							
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	64	5.9	4.4	3.7	3.3	1.5	3.8
N absorbido en R6/R7 (kg ha ⁻¹)	64	446	310	266	207	82	266
FBN, %	69	90	71	61	48	12	60
FBN, kg ha ⁻¹	64	337	208	154	127	15	165
Región Sur							
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	4	2.9	2.7	2.3	1.8	1.5	2.2
N absorbido en R6/R7 (kg ha ⁻¹)	4	241	221	182	128	94	175
FBN, %	4	73	61	38	26	25	43
FBN, kg ha ⁻¹	4	79	74	67	58	50	65

Se utilizó estadística descriptiva para resumir la información de FBN, absorción de N y rendimiento: promedio, mediana y el intervalo inter-cuartil (percentiles 25-75% percentiles, IQR) que representa el 50% de las observaciones centrados alrededor de la media.

Para encontrar variables de respuesta asociadas a FBN se realizaron análisis de árboles de regresión y clasificación (CART) para separar grupos que presenten homogeneidad (De'ath y Fabricius, 2000). Se realizó, además, un análisis de regresión múltiple stepwise para modelar la FBN en función de las variables meteorológicas, de cultivo y suelo calculados dentro de cada grupo definido por los CART.

Rendimiento, absorción de N y FBN

Los rendimientos de los lotes oscilaron entre 1493 y 5888 kg ha⁻¹, con un rango de intercuartiles 25-75% (IQR) de 2913-4323 kg ha⁻¹ (**Tabla 2**). Los rendimientos más altos se observaron en la región pampeana central (3735 kg ha⁻¹; IQR=3255-4418 kg ha⁻¹). En la región norte, el rendimiento promedio fue de 2942 kg ha⁻¹ (IQR= 2215-3670 kg ha⁻¹), mientras que en la región pampeana Sur, el rendimiento promedió 2215 kg ha⁻¹, con un IQR entre 1778 y 2653 kg ha⁻¹. La absorción de N en R6/R7 promedió 256 kg N ha⁻¹, con un IQR de 195-305 kg N ha⁻¹ (**Tabla 2**). La relación entre rendimiento y absorción de N

en estructuras aéreas tuvo una pendiente de 13.6 kg de grano por kg de N absorbido.

En promedio, la proporción de N derivado de la FBN en biomasa aérea fue del 58% del N absorbido (IQR entre 46 y 71%) dentro de un rango entre 12 y 90% (Tabla 2). La región pampeana Central mostró los valores más altos (ca. 60%) mientras que la región pampeana Sur mostro los valores más bajos (43%) y el Norte valores intermedios (52%). El análisis conjunto mostro que en términos absolutos, en biomasa aérea, la FBN estuvo entre 15 y 337 kg N ha⁻¹, con un promedio de 153 kg N ha⁻¹ (un IQR 98-197 kg N ha⁻¹) (Tabla 2). En este sentido, la FBN se relacionó positivamente con el rendimiento ($r^2 = 0.55$), con una pendiente de 52 kg de N fijado por tonelada de rendimiento.

A nivel global, el aporte de la FBN en biomasa aérea, había sido estimado en ca. 52-58% (Salvagiotti et al., 2008; 2009) con una gran variación de acuerdo a las

condiciones ambientales y la disponibilidad de N en el suelo. En este trabajo se ha determinado un aporte promedio en Argentina de ca. 60%. En Brasil, Hungría et al. (2006) mostró valores de %Ndfa superiores al 75%, pero en suelos menos fértiles. En América del Norte, algunas estimaciones daban cuenta de una contribución del orden del 50-60% de la FBN (Pueppke, 2005).

Relaciones entre la FBN y las variables meteorológicas, de suelo y de cultivo

El análisis a través de CART mostro que el rendimiento del cultivo fue la variable que mejor separó la población de datos en dos grupos, con un umbral de 3700 kg ha⁻¹. Por encima de 3700 kg ha⁻¹, se observó una contribución significativa del P-Bray y $R_{(P-R2)}$ y una asociación negativa con el pH, explicando el 70% de la variación en la proporción de N derivado de FBN (Tabla 3). Por debajo de 3700 kg ha⁻¹, la $TM_{(R5-R7)}$ y la precipitación efectiva durante el periodo de barbecho explicaron el 44% de la variación en el aporte de FBN.

La FBN en soja en Argentina a nivel país y los balances parciales de N

Se realizó un balance parcial de N en Argentina (N ingresado a través de la FBN menos el N exportado con los granos), utilizando los valores de %Ndfa obtenidos en este estudio, los datos estadísticos de producción de la campaña 2012-13, y asumiendo que 40% del N esta en estructuras sub superficiales (i.e. raíces, nódulos, rizodeposiciones).

Utilizando el valor de la mediana de %Ndfa observada en nuestro set de datos (i.e. 59%), a nivel país, la cantidad de N fijado asciende a 3.27 Tg. Tomando en cuenta los valores de los percentiles 25 y 75 de la distribución, el aporte de la FBN a nivel país estaría entre 2.55 y 3.94 Tg (Tabla 4).

Estos cambios modificarían los balances parciales de N que indican cuanto N es exportado del sistema a través del grano en relación al aporte de la FBN.

Tabla 3. Variables explicativas del aporte de la FBN (% del total absorbido en biomasa aérea) determinadas por el modelo de regresión lineal múltiple.

Variable explicativa	Coficiente de regresión	Error estándar	Valor P	Cp Mallows
Rendimiento < 3700 kg ha ⁻¹				
Intercepto	88.3	28.0	< 0.01	
R (P-R2)	0.24	0.04	< 0.01	31.4
PBray I	0.64	0.14	< 0.01	22.7
pH	-16	5.08	< 0.01	12.5
Rendimiento > 3700 kg ha ⁻¹				
Intercepto	-166.3	64.9	0.02	
TM (R5-R7)	9.96	2.9	< 0.01	13.4
PEB	0.05	0.02	0.02	8.4

R (P-R2): Precipitación acumulada entre siembra y R2
TM (R5-R7): Temperatura media entre R5 y R7
PEB: Precipitación efectiva durante el barbecho

Tabla 4. Estimación del aporte de N fijado por la soja usando datos estadísticos de la campaña 2012-13 y los datos de FBN del presente trabajo.

Valor de % FBN	Área (Mha)	Producción (Tg)	Biomasa aérea (Tg) ^a	N en biomasa aérea (Tg) ^b	N absorbido por el cultivo total (Tg) ^c	FBN (%)	N fijado por el cultivo total (Tg) ^d	N en semilla (Tg) ^e	Balance parcial de N (Tg) ^f
Percentil 75						71	3.94		0.81
Mediana	19.4	49.3	123.3	3.7	5.55	59	3.27	3.13	0.15
Percentil 25						46	2.55		-0.57

a Usando un índice de cosecha del 40% (Herridge et al., 2008)

b Usando 3% N in biomasa aérea

c Multiplicando N en biomasa aérea por 1.5. Se asume que en madurez fisiológica el 40% del total del N absorbido está localizado en raíces y rizodeposiciones (Herridge et al., 2008; Rochester et al., 1998)

d (%FBN/100) N absorbido por cultivo total*

e Usando un contenido de N en semilla de 6.34% (Salvagiotti et al., 2008)

f Balance parcial de N = N fijado - N removido exportado con los granos

Usando el valor de la mediana, este balance es de 0.15 Tg, sin embargo si los valores de %Ndfa son similares a los valores del percentil 25 de la distribución, el balance parcial de N sería negativo, aun incluyendo el aporte de las estructuras subterráneas (**Tabla 4**). Asimismo, debe tenerse en cuenta que la concentración y cantidad total de N, así como el %Ndfa, en las estructuras subterráneas puede ser muy variable según distintos autores (Rochester et al., 1998; Schweiger et al., 2014), constituyendo una fuente de variación significativa para la estimación de balances.

La información generada en la presente investigación es relevante para poder contar con información nacional que es de importancia para entender la dinámica del N a nivel local y su impacto a escala global. La ausencia de esta información provoca que muchas veces las inferencias que se hagan sean inexactas o tengan mayor incertidumbre.

Colaboraron en la generación de esta información, seleccionando los sitios e instalando las parcelas de evaluación: Norma Arias (INTA Concepción del Uruguay); Gustavo Artaux (INTA Junín) Mirian Barraco (INTA Gral. Villegas); Cristian Brambilla (CREA); Juan José Calvo (INTA Junín) Julia Capurro (INTA Cañada de Gomez); Natalia Carrasco (INTA Barrow); Adolfo Carrizo (INTA Salta); César Di Ciocco (Univ. Lujan); Juan Martín Enrico (INTA Oliveros); Hugo Fontanetto (INTA Rafaela); Francisco Fuentes (INTA Marcos Juárez); Pablo Glagovsky (INTA Gualaguaychú); Norma González (INTA Balcarce); Carlos López (INTA Río I); Hernán Giacomelli (Estancia Runciman); Fernando Martínez (INTA Casilda); Fernando Mousegne (INTA San Antonio de Areco); León Murúa (INTA Jesús María); Eduardo Ocampo (INTA EL Colorado); Damian Pafundi (Rizobacter SA); Ricardo Pozzi (CREA); Guillermo Resch (INTA Huinca Renancó); Hector Sánchez (INTA Famailla); Eduardo Sa Pereira (INTA Cnel. Suárez); Diego Santos (INTA Paraná); Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio); José Luis Zorzín (AAPRESID) y Sebastián Zuil (INTA Reconquista).

Este estudio fue subsidiado por INTA (Proyectos AEEV 1512 y PNCER 22472).

Bibliografía

- Álvarez, R., y R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83:127-141.
- Baigorri, H.E. 1997. Elección de cultivares. In: H.E. Baigorri, and L. Giorda (eds.), *El cultivo de soja en la Argentina*. INTA - Centro Regional Córdoba, Córdoba, Argentina, pp. 106-122.
- Boyer, E.W., R.W. Howarth, J.N. Galloway, F.J. Dentener, C. Cleveland, G.P. Asner, P. Green, y C. Voorsmarty. 2004. Current nitrogen inputs to world regions. In: AR Mosier, KJ Syers and JR Freney (Eds), *Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Island Press, Washington – USA, pp. 221-230.
- Collino, D., F. Salvaggiotti, A. Peticari, C. Piccinetti, G. Ovando, S. Urquiaga, y R.W. Racca. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationship with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil*, April 2015. DOI: 10.1007/s11104-015-2459-8
- Dardanelli, J.L., A. de la Casa, M.R. Ateca, R. Zanvetto, F. Nuñez Vazquez, e Y.H.P Salas. 1992. Validación del balance hidrológico versátil para la rotación sorgo soja bajo dos sistemas de labranza. *Revista Agropecuaria de INTA Manfredi e INTA Marcos Juárez*: 20-29.
- De'ath, G., y K.E. Fabricius. 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 81:3178-3192.
- Galloway, J.N., F.J. Dentener, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asner, C.C. Cleveland, P.A. Green, E.A. Holland, D.M. Karl, A.F. Michaels, J.H. Porter, A.R. Townsend, y C.J. Voorsmarty. 2004. Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry* 70:153-226.
- Hall, A.J., C.M. Rebella, C.M. Ghersa, y J.P. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: Pearson CJ (Ed), *Ecosystems of the world*. Elsevier, Amsterdam.
- Herridge, D.F., M.B. Peoples, y R.M. Boddey. 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1-2), 1–18. <http://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>
- Hungría, M., J.C. Franchini, R.J. Campo, C.C. Crispino, J.Z. Moraes, R.N.R. Sibalidelli, I.C. Mendes, y J. Arihara. 2006. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science* 86:927-939.
- Kumar, P., M. Parry, R. Mitchell, A. Ahmad, e Y. Abrol. 2004. Photosynthesis and Nitrogen-Use Efficiency. In: Foyer CH and Noctor G (eds). *Photosynthetic Nitrogen Assimilation and Associated Carbon and Respiratory Metabolism*, pp. 23-34.
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers. 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agron J* 65:109-112.
- Peltzer, H., y N. Peltzer. 2010. Modelo de simulación de fenología en soja. *SI.FE.SOJA 2010*. Ediciones INTA.
- Peoples, M.B., A.W. Faizah, B. Rerkasem, y D.F. Herridge. 1989. Methods for Evaluating Nitrogen Fixation by Nodulated Legumes in the Field. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. 76 p.
- Pueppke, S. 2005. Nitrogen Fixation by Soybean in North América. In: Werner D and Newton W (Eds) *Nitrogen Fixation in Agriculture, Forestry, Ecology, and the Environment*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 15-23.
- Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8:1204-1213.
- Robertson, G.P., y P.M. Vitousek. 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the cost of an essential resource. *Annu. Rev. Environ. Resourc.* 34:97-125.
- Rochester, I.J., M.B. Peoples, G.A. Constable, y R. Gault. 1998. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Aust. J. Exp. Agric.* 38:253-260.
- Sainz Rozas, H., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo* 29:29-37.
- Salvaggiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss, y A. Dobermann. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108:1-13.
- Salvaggiotti, F., J.E. Specht, K.G. Cassman, D.T. Walters, A. Weiss, y A. Dobermann. 2009. Growth and Nitrogen Fixation in High-Yielding Soybean: Impact of Nitrogen Fertilization. *Agron J* 101:958-970.
- Schweiger, P., M. Hofer, J. Vollmann, y W. Wanek. 2014. The relationship between N isotopic fractionation within soybean and N₂ fixation during soybean development. *Physiol. Plant.* 152:546-557.
- Shearer, G. y D.H. Kohl. 1986. N₂ fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. *Australian Journal of Plant Physiology* 13: 699-756.
- SIIA-MAGyP. 2014. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación www.minagri.gob.ar
- Smil V. 1999. Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global Biogeochem. Cycles* 13:647-662.

Estudio prospectivo de los principales metales pesados de suelos agrícolas cultivados con trigo candeal y maíz en diferentes zonas de Chile

J. Hirzel^{1,*}, I. Walter² e I. Matus¹

Introducción

Las propiedades químicas de suelos agrícolas de importancia para las plantas cultivadas contemplan una amplitud de elementos o parámetros, dentro de los cuales se encuentran aquellos considerados como esenciales, otros considerados como benéficos, y finalmente elementos que al superar una determinada concentración se consideran como dañinos o tóxicos (Benton, 1998; Epstein, 1994; Glass, 1989; Mengel y Kirkby, 1987). Dentro de estos parámetros se encuentran los micronutrientes, que se pueden agrupar en cationes y aniones en función de su carga química (Benton, 1998; Mengel y Kirkby, 1987), y que a su vez, incluyen un grupo denominado metales pesados, caracterizados porque su peso atómico es a lo menos cinco veces mayor al de la molécula del agua, además de una alta densidad relativa (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), y un efecto tóxico cuando se encuentran en alta concentración, tanto para plantas como para humanos (McDowell et al., 2013; Nicholson et al., 2003; Wong et al., 2002). La presencia de metales pesados en suelos agrícolas está asociada con ciclos geoquímicos y biológicos complejos que además son influenciados por factores antropogénicos como prácticas agrícolas, actividad industrial, tratamientos con enmiendas orgánicas, y tránsito vehicular (Buccolieri et al., 2010; Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Kabata-Pendias, 2004). A su vez, la contaminación con metales pesados en los cultivos depende principalmente de los siguientes factores: concentración de los metales pesados de línea base, características físico-químicas del suelo, toxicidad específica de cada metal, y diferencias entre especies, variedades y estado de crecimiento de la planta (Cajuste et al., 2006; Graham et al., 2007; Grant et al., 2008; Lehoczky et al., 2006).

Estudios de metales pesados en suelos agrícolas han sido realizados por varios autores en diferentes lugares del mundo (Buccolieri et al., 2010; Horckmans et al. 2005; McDowell et al., 2013; Sierra et al., 2007; Qiao et al., 2011), por citar algunos, sin embargo, para las condiciones de suelos agrícolas de Chile existen aún pocos estudios (González et al., 1997; Villanueva, 2003). Por su parte, el desarrollo de los cultivos de trigo candeal y maíz en Chile, de alta importancia en la dieta humana y/o animal de este país, ocupa una extensa área de cultivo que en conjunto comprende del orden de 1400 km de longitud entre los paralelos 28.5 y 41.2 de latitud sur. Esta extensa área geográfica presenta mucha variabilidad de tipos

de suelo y propiedades químicas (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), cuya caracterización en las diferentes zonas geográficas no contempla las concentraciones de metales pesados en la capa arable del suelo, y a su vez no permite conocer o estimar si estos elementos constituyen limitaciones nutricionales de forma previa a la realización de un cultivo, como ha sido detectado para zinc (Zn) y manganeso (Mn) en el cultivo de trigo candeal en la zona centro sur de Chile (Hirzel y Matus, 2011). Por consiguiente, para contribuir a un mayor conocimiento de la fertilidad del suelo y de su variabilidad a lo largo de la zona productora de trigo candeal y maíz de Chile, el objetivo del presente estudio fue determinar los contenidos de los metales pesados hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y cadmio (Cd) extraíbles por DTPA en cuatro grandes áreas geográficas, evaluando su variabilidad entre áreas y dentro del perfil arable del suelo.

Materiales y métodos

El estudio contempló un muestreo al azar de suelos cultivados de forma intensiva con trigo candeal y/o maíz, de rotación corta con cereales o monocultivo para el maíz, en un transecto de 1400 km a lo largo del valle central de riego de Chile. La extensión territorial monitoreada se dividió en 4 zonas de acuerdo a su posición geográfica desde norte a sur, separadas en zona centro-norte, zona central, zona centro-sur y zona sur (**Figura 1**), utilizando parte de la metodología señalada por Qiao et al. (2011), que permite agrupar las zonas seleccionadas de acuerdo a sus características climáticas y de génesis de suelo. En el periodo libre de cultivo del año 2012 se monitorearon 10 unidades productivas o sitios de cada zona geográfica, colectando muestras compuestas por 30 sub-muestras desde cada sitio, con lo cual se constituyeron 40 muestras compuestas a lo largo del transecto de suelos estudiado. En cada sitio las muestras de suelo se colectaron a 2 profundidades: 0-20 y 20-40 cm usando barreno de 3 cm de diámetro. Las 4 zonas monitoreadas presentaron principalmente las siguientes características;

- i. **Zona centro-norte**, con régimen árido y formación sedimentaria con origen aluvial. Los órdenes de suelo correspondieron a Entisol, Inceptisol y Alfisol.
- ii. **Zona central**, con régimen semi-árido y formación sedimentaria con origen aluvial o lacustre. Los órdenes de suelo correspondieron a Inceptisol, Mollisol, Alfisol y Vertisol.

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Avenida Vicente Méndez 515, Chillán, Chile

² Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Apdo. Correos 8111, 28080 Madrid, España

* Autor de contacto. Correo electrónico: jhirzel@inia.cl

iii. Zona centro-sur, régimen templado y formación sedimentaria con origen aluvial, volcánico y de transición. Los órdenes de suelo correspondieron a Inceptisol, Alfisol y Andisol.

iv. Zona sur, régimen templado lluvioso y formación sedimentaria con origen volcánico. Los órdenes de suelo correspondieron a Andisol y Ultisol.

Las rotaciones de cultivos en cada localidad muestreada fueron las siguientes: i) Zona centro-norte; trigo candeal-maíz ó monocultivo de maíz, ii) Zona central; trigo candeal-maíz ó monocultivo de maíz, iii) Zona centro-sur; trigo candeal-maíz, trigo candeal-avena (*Avena sativa* L.), monocultivo de maíz, iv) Zona sur; trigo candeal-maíz, trigo candeal-avena, monocultivo de maíz. Antecedentes adicionales de manejo como encalado u otras prácticas de acondicionamiento de suelos no fueron consideradas como parámetro de selección de sitios a muestrear, y todos los suelos de las zonas centro sur y sur reciben encalado cada 2 a 4 años para corregir limitaciones de Al. A su vez, en todos los suelos de las zonas estudiadas no se incorporan residuos de cosecha.

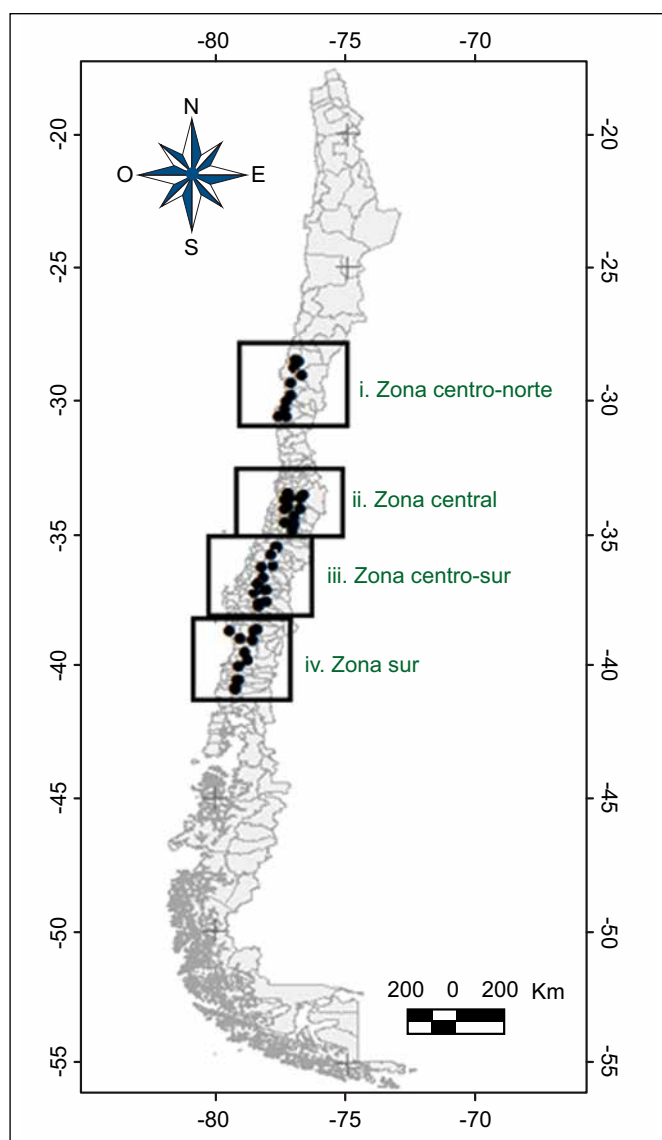


Figura 1. Distribución de muestras de suelo colectadas desde norte a sur en el área de estudio.

Tabla 1. Análisis de significancia de los parámetros evaluados en el suelo.

Fuente de variación	Área geográfica (G)	Profundidad de suelo (P)	Interacción (G*P)
Hierro	**	*	NS
Manganeso	**	**	NS
Zinc	**	**	NS
Cobre	**	**	NS
Cadmio	**	**	NS

*, ** Significativo a 0.05 y 0.01 de probabilidad. NS, no significativo

Las muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas por 2 mm y analizadas para Fe, Mn, Zn, Cu y Cd en DTPA (Lindsay y Norvell, 1978) por espectrometría de absorción atómica. Además, el Cd-DTPA fue determinado por la metodología señalada por Degryse et al. (2009). Los resultados analíticos fueron evaluados estadísticamente, para cada elemento por separado, a través de un diseño de bloques al azar con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a la zona geográfica y la sub-parcela a la profundidad de muestreo. Se realizó análisis de varianza y test de medias Tukey ($p = 0.05$) usando el procedimiento GLM del programa estadístico SAS (SAS Institute, 2008).

Resultados y discusión

Todos los parámetros evaluados en el suelo fueron afectados por el área geográfica y la profundidad de suelo, sin presentarse interacción entre estos factores (Tabla 1). El análisis de resultados por profundidad del suelo se presenta a continuación.

Primera profundidad (0-20 cm)

La disponibilidad de Fe en las 4 zonas estudiadas fluctuó entre 22 y 52 mg kg⁻¹, y fue mayor en la zona sur, que sólo superó a la concentración obtenida en la zona centro-norte ($p < 0.05$) (Figura 2a). Estos valores se encuentran dentro del rango de > 4.5 mg kg⁻¹ señalado como alto para suelos agrícolas en extracciones con DTPA (Havlin et al., 1999). La mayor concentración de Fe disponible en el suelo de la zona sur puede estar asociada al menor pH en esta zona (Tabla 2), dado que la mayor concentración de protones en suelos de menor pH genera un ambiente de reducción y los óxidos de Fe (FenOn) presentes en el suelo se hacen disponibles a la forma de Fe²⁺ o Fe³⁺ (Havlin et al., 1999). Conociendo estas reacciones de óxido-reducción en el suelo se habrían esperado también diferencias de concentración entre el suelo de la zona sur y los suelos de la zona central, de mayor pH que los suelos de la zona sur (Tabla 2), sin embargo el método de extracción utilizado (DTPA) no sólo accede al Fe²⁺ y Fe³⁺ presente en el suelo, sino también a una fracción intercambiable, carbonatada y de óxidos e hidróxidos (López y Mandado, 2002; Madrid et al., 2007).

Tabla 2. Rango de valores medios de propiedades físico-químicas seleccionadas para las 4 áreas geográficas estudiadas (0-20 cm).

Propiedad físico-química	Área geográfica							
	Centro-norte		Centro		Centro-sur		Sur	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
Arena, %	31.7 - 56.8	50.7a	24.5 - 47.8	34.4b	12.6 - 54.1	31.6b	26.1 - 56.5	36.0b
Limo, %	17.7 - 40.4	29.7b	36.1 - 54.0	44.5a	26.1 - 56.7	40.6a	30.8 - 48.5	42.3a
Arcilla, %	12.1 - 40.2	19.6a	14.1 - 28.1	21.2a	10.1 - 54.9	27.8a	4.6 - 43.1	21.8a
pH (1:2.5 suelo:agua)	7.47 - 8.52	7.86a	5.54 - 8.24	7.03b	5.11 - 6.41	5.94c	5.02 - 6.04	5.54c
MO, g kg ⁻¹	15.3 - 79.3	38.2c	13.8 - 35.0	25.1c	35.6 - 115.0	70.3b	108.4 - 232.2	151.6a
P disponible, mg kg ⁻¹	4.7 - 100.4	40.9a	7.1 - 50.1	20.3b	8.2 - 33.2	19.8b	6.3 - 33.7	20.2b
Ca intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	12.1 - 30.0	22.9a	9.5 - 27.2	17.6a	4.2 - 19.1	8.65b	1.1 - 14.5	4.76b
Mg intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	1.68 - 6.92	3.25a	1.06 - 3.98	1.84ab	0.35 - 2.44	1.23b	0.20 - 2.68	0.79b
Fe, mg kg ⁻¹	2.9 - 69.7	22.0b	10.8 - 103.3	44.6ab	16.6 - 94.9	39.9ab	24.0 - 101.5	52.0a
Mn, mg kg ⁻¹	7.2 - 27.8	15.0ab	5.8 - 19.3	11.7b	2.0 - 103.1	28.8a	1.4 - 25.6	12.8b
Zn, mg kg ⁻¹	0.3 - 5.6	1.9a	0.4 - 2.7	1.3ab	0.1 - 1.4	0.8b	0.1 - 3.7	0.9b
Cu, mg kg ⁻¹	0.9 - 11.6	5.0ab	4.3 - 171.1	25.5a	0.3 - 3.2	1.9b	0.3 - 3.3	1.7b
Cd, mg kg ⁻¹	0.018 - 0.071	0.041ab	0.034 - 0.152	0.068a	0.011 - 0.049	0.028b	0.010 - 0.102	0.035b

Letras distintas entre medias de una misma fila indican diferencia significativa según test de Tukey (p < 0.05)

El Mn disponible presentó una concentración que fluctuó entre 12 y 29 mg kg⁻¹ dentro de las 4 zonas estudiadas, con una mayor concentración en la zona centro-sur (Figura 2b), que sólo superó a las concentraciones obtenidas en las zonas central y sur (p < 0.05). Estos valores se encuentran dentro del rango de > 1 mg kg⁻¹ señalado como alto para suelos agrícolas en extracciones con DTPA (Havlin et al., 1999). Si bien la disponibilidad de Mn también es afectada por el potencial de reducción presente en suelos de menor pH (Havlin et al., 1999) como los suelos de la zona sur (Tabla 2), la presencia de este elemento está también asociada a la proporción de arcillas cristalinas en el suelo, y una parte importante de los suelos muestreados en la zona centro-sur dentro de este estudio son de origen sedimentario de textura fina, formados por terrazas aluviales (CIREN, 1997; 1999), en tanto que los suelos de la zona sur deben su origen al depósito de cenizas volcánicas, caracterizadas por la presencia de arcillas amorfas (Havlin et al., 1999; Neall, 2006) con menor presencia de Mn respecto de suelos con arcillas cristalinas.

La concentración de Zn disponible fluctuó entre 0.77 y 1.92 mg kg⁻¹ dentro de las 4 zonas estudiadas, con una mayor concentración en la zona centro-norte (Figura 2c), que sólo superó a las concentraciones obtenidas en las zonas centro-sur y sur (p < 0.05). En general, estos valores se encuentran dentro del rango de > 1 mg kg⁻¹ señalado como adecuado a alto para los principales cultivos agrícolas (Havlin et al., 1999), y fueron inferiores a los

valores medios de DTPA-Zn de 40 suelos agrícolas de Italia (Buccolieri et al., 2010), aunque estuvieron dentro del rango de valores señalado por los autores de este estudio. La concentración de Zn presentó una disminución en la medida que se avanzó desde norte a sur dentro de la zona de estudio, lo cual está asociado a la adsorción de Zn a la materia orgánica (MO) del suelo (Havlin et al., 1999), que es mayor en los suelos de la zona centro-sur y sur (Tabla 2) (Luzio, 2010). Cabe destacar que se esperaba una mayor reducción del Zn disponible en los suelos de la zona norte respecto de los suelos localizados en las zonas centro-sur y sur, debido a que el aumento de pH y la presencia de cationes combinados con carbonatos en situaciones de pH mayores a 8.0 (Tabla 2) genera una oxidación del Zn reducido (disponible) (Havlin et al., 1999). Sin embargo, el extractante DTPA logra capturar solo una fracción de Zn mayor a la obtenida con otros reactivos más suaves y que representan a este catión en su fracción inmediatamente disponible (López y Mandado, 2002). Por otra parte, en suelos con mayor concentración de calcio (Ca), como son los de la zona centro y centro-norte, y pH neutro como en la zona centro de Chile (Tabla 2), la concentración de Zn biodisponible incrementa en relación directamente proporcional al incremento de la concentración de Ca, dado que se produce una competencia entre estos dos elementos por los sitios de adsorción en los complejos minerales (Degryse et al., 2009).

El Cu disponible presentó una concentración que fluctuó entre 1.7 y 25.5 mg kg⁻¹ dentro de las 4 zonas estudiadas,

Tabla 3. Rango de valores medios de propiedades físico-químicas seleccionadas para las 4 áreas geográficas estudiadas (20-40 cm).

Propiedad físico-química	Area geográfica							
	Centro-norte		Centro-norte		Centro-norte		Centro-norte	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
Arena, %	35.4 - 64.5	51.4a	24.1 - 48.8	35.8b	10.4 - 56.1	34.6b	26.6 - 59.5	36.5ab
Limo, %	21.3 - 39.3	29.3b	36.0 - 49.7	43.5a	27.2 - 53.2	40.3a	29.2 - 50.6	41.8a
Arcilla, %	12.0 - 37.2	19.4a	12.0 - 27.9	20.7a	5.7 - 52.1	25.1a	4.6 - 43.7	21.7a
pH (1:2.5 suelo:agua)	7.26 - 8.91	8.06a	5.59 - 8.22	7.03b	4.98 - 6.54	6.04c	5.26 - 6.32	5.61c
MO, g kg ⁻¹	9.1 - 34.5	22.4c	16.4 - 29.4	23.1bc	19.1 - 116.0	54.7b	77.3 - 205.7	125.1a
P disponible, mg kg ⁻¹	1.3 - 60.3	22.6a	4.1 - 37.8	16.2a	2.8 - 27.4	9.2a	3.9 - 27.2	12.7a
Ca intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	10.6 - 29.5	21.9a	6.3 - 27.3	17.8a	2.6 - 11.4	7.8b	1.6 - 15.0	4.3b
Mg intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	1.43 - 7.81	3.31a	1.10 - 3.63	1.81ab	0.49 - 2.89	1.35b	0.19 - 1.22	0.62b
Fe, mg kg ⁻¹	2.9 - 53.4	14.4b	10.5 - 103.0	45.3a	12.7 - 53.1	28.6ab	19.3 - 93.5	45.0a
Mn, mg kg ⁻¹	4.0 - 18.1	10.0a	6.7 - 23.9	11.8a	0.4 - 39.7	14.2a	1.9 - 27.4	9.4a
Zn, mg kg ⁻¹	0.1 - 5.3	1.2a	0.5 - 2.5	1.2a	0.1 - 1.0	0.5b	0.1 - 1.2	0.5b
Cu, mg kg ⁻¹	1.1 - 10.9	4.0ab	4.3 - 168.5	25.2a	0.1 - 2.8	1.4b	0.2 - 3.3	1.5b
Cd, mg kg ⁻¹	0.010 - 0.065	0.031b	0.034 - 0.152	0.069a	0.002 - 0.041	0.017b	0.005 - 0.038	0.016b

Letras distintas entre medias de una misma fila indican diferencia significativa según test de Tukey (p < 0.05)

cuyo mayor valor fue obtenido en la zona centro (**Figura 2d**), y que sólo superó a las concentraciones obtenidas en las zonas centro-sur y sur ($p < 0.05$). El alto coeficiente de variación (CV) obtenido para este elemento (298%, dato no mostrado) no permitió detectar diferencias entre la zona centro y centro-norte, que cuantitativamente fueron muy diferentes. En general, los valores de los contenidos de Cu disponible se encontraron dentro del rango de $> 0.6 \text{ mg kg}^{-1}$ señalado como alto para suelos agrícolas en extracciones con DTPA (Havlin et al., 1999), y su rango de variación fue similar al señalado por Buccolieri et al. (2010) para su estudio de DTPA-Cu en 40 suelos agrícolas de Italia, donde además señalaron que obtuvieron un alto CV (105%). La alta variabilidad en las concentraciones de Cu total en el suelo ha sido también reportada por Qiao et al. (2011) para suelos de la región noreste de China. La mayor concentración de Cu disponible obtenida en la zona centro del país está asociada a que muchos de los suelos muestreados son de origen sedimentario y formados por fenómenos fluvio-glaciales, cuyos materiales parentales son muy altos en Cu (CIREN, 1996). También hay que señalar que en la precordillera y cordillera de esta zona se desarrolla actividad minera ligada a la extracción de Cu.

La concentración de Cd disponible fluctuó entre 0.03 y 0.07 mg kg^{-1} dentro de las 4 zonas de estudio (**Figura 2e**), y la mayor concentración se obtuvo en la zona centro, que sólo superó a los valores obtenidos en las zonas centro-sur y sur ($p < 0.05$). Los valores medios de Cd disponible en

todas las zonas geográficas fueron en general inferiores a los valores promedios indicados por FangSun et al. (2013) en diferentes regiones de China, pero se encontraron dentro del rango señalado para los suelos analizados por estos autores. La mayor concentración de Cd disponible en la zona centro y centro-norte es explicada por la interrelación de los complejos orgánicos e inorgánicos del suelo que aumentan la disponibilidad de Zn, Cu y Cd, y la competencia por los sitios de adsorción con otros cationes como Ca y magnesio (Mg) (Degryse et al., 2009; Tudoreanu y Phillips, 2004). A su vez es coincidente con la mayor disponibilidad de Cu y Zn (**Figuras 2c y 2d**), y con las mayores concentraciones de Ca y Mg reportadas para estas zonas (**Tabla 2**).

Segunda profundidad (20-40 cm)

Para la segunda profundidad de suelo, la concentración de Fe disponible fluctuó entre 14.2 y 45.0 mg kg^{-1} , y su comportamiento fue similar al obtenido para la primera profundidad de suelo (**Figura 2a**). Las mayores concentraciones se encontraron en las zona centro, centro-sur y sur, aunque solamente las concentraciones de Fe disponible en las zonas centro y sur superaron a la concentración obtenida en la zona centro norte ($p < 0.05$) (**Figura 2a**). Las diferencias de concentración obtenidas para el Fe disponible entre zonas en esta profundidad del suelo obedecen a factores que fueron ya discutidos anteriormente para la primera profundidad de suelo, y que se asocian a las propiedades químicas de los suelos

estudiados (Tabla 2 y 3). En general, la concentración de Fe disponible en la segunda profundidad de suelo fue inferior a la obtenida en la primera profundidad ($p < 0.01$) (Tabla 1, Figura 2a). Esta diferencia de concentración podría obedecer a una mayor acidificación en la capa superior de suelo asociada a la fertilización nitrogenada y acidez fisiológica de las plantas cultivadas, las cuales aumentan la disponibilidad de Fe (Havlin et al., 1999), sin embargo el pH de estos suelos en ambas profundidades, no presentó diferencias al considerar el análisis en toda la zona de este estudio (Tablas 2 y 3). Por tanto, esta diferencia puede obedecer al menor contenido de MO reportada para la segunda profundidad de suelo (Tabla 3), dado que una fuente de reserva importante para el Fe total y disponible del suelo es el contenido de MO (Havlin et al., 1999).

La concentración de Mn disponible fluctuó entre 9.4 y 14.2 mg kg⁻¹ (Figura 2b) y no se encontraron diferencias entre zonas ($p > 0.05$), aunque cuantitativamente la

mayor concentración de Mn disponible se observó en la zona centro-sur al igual que lo obtenido para la primera profundidad (Figura 2b). En general, la concentración de Mn disponible en la segunda profundidad (Figura 2b) fue inferior a la observada en los primeros 20 cm (Figura 2b) ($p < 0.05$). Los factores que afectan esta menor disponibilidad en la segunda profundidad son similares a los que se señalaron para los contenidos de Fe disponible entre profundidades.

La concentración de Zn disponible fluctuó entre 0.45 y 1.21 mg kg⁻¹ (Figura 2c), y su comportamiento fue similar al obtenido para la primera profundidad del suelo, con mayor concentración en las zonas centro-norte y centro, respecto de las otras dos zonas estudiadas ($p < 0.05$). Las diferencias de concentración en el Zn disponible entre las 4 zonas estudiadas para la segunda profundidad obedecen a factores que fueron ya discutidos para la primera profundidad. En general, la concentración de

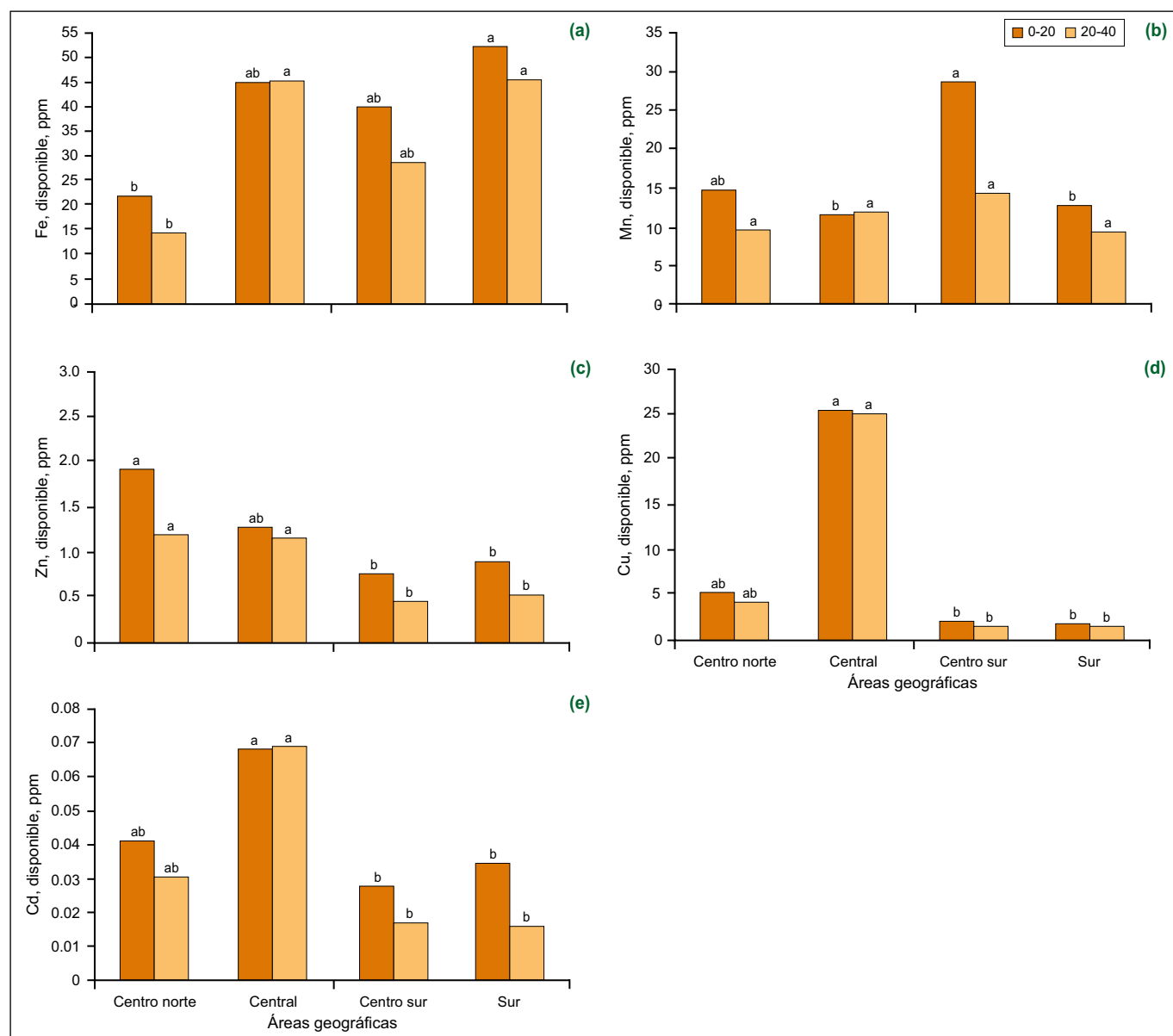


Figura 2. Concentración de metales pesados extraíbles con DTPA en el suelo (0-20 y 20-40 cm) de cuatro áreas geográficas de Chile cultivadas con trigo candeal y maíz; a) hierro, b) manganeso, c) zinc, d) cobre, y e) cadmio. Letras distintas sobre las barras de un mismo estrato de suelo para cada metal indican diferencia estadística entre áreas geográficas según Test de Tukey ($p < 0.05$).

Zn disponible en la segunda capa del suelo fue inferior a la obtenida en la primera ($p < 0.05$) (**Figura 2c**), y los factores que afectan esta menor disponibilidad son los mismos que fueron descritos anteriormente para Fe y Mn. Horckmans et al. (2005) en un estudio realizado con diferentes suelos en Luxemburgo encontraron diferencias en la concentración de Zn total entre profundidades, también con una mayor concentración en la capa superficial del suelo.

Para el Cu disponible, la concentración fluctuó entre 1.4 y 25.2 mg kg⁻¹ (**Figura 2d**), y su comportamiento fue similar al obtenido en la primera profundidad de suelo, con mayor concentración en las zonas centro y centro-norte, respecto de las otras dos zonas estudiadas ($p < 0.05$). Destaca cuantitativamente la concentración de Cu obtenida en la zona centro, cuyas causas fueron ya anteriormente discutidas para la primera profundidad. Se obtuvo también, en esta profundidad un alto CV (313%, datos no mostrados), que enmascaró la diferencia cuantitativa obtenida entre las zonas centro y centro-norte (**Figura 2d**). A diferencia de los elementos Fe, Mn y Zn (**Figuras 2a, 2b y 2c**), hubo una baja diferencia cuantitativa de concentración entre ambas profundidades, aunque con efecto altamente significativo ($p < 0.01$) (**Tabla 1**). Datos similares fueron obtenidos por Horckmans et al. (2005).

La concentración de Cd disponible presentó un comportamiento similar a lo observado en la primera profundidad, con una mayor concentración en la zona central de Chile, que superó a las demás zonas estudiadas ($p < 0.05$) (**Figura 2e**). La concentración de Cd disponible fluctuó entre 0.01 y 0.07 mg kg⁻¹, y el valor medio de concentración de este elemento en esta profundidad fue inferior al observado en la primera profundidad de suelo ($p < 0.01$) (**Tabla 1, Figura 2e**), asociado al bajo movimiento de este elemento en el suelo, como ha sido reportado por Rothbaum et al. (1986) y Horckmans et al. (2005), como también al menor contenido de MO de la segunda estrata de suelo (Tudoreanu y Phillips, 2004) (**Tabla 3**). La mayor concentración de Cd disponible en la capa superior está asociada también a las altas concentraciones de Ca intercambiable y Zn en ambas profundidades (**Tablas 2 y 3, Figura 2c**), situación reportada también por Degryse et al. (2009), y discutida anteriormente.

Conclusión

Las concentraciones extraídas con DTPA de los metales hierro, manganeso, cobre y zinc, considerados como nutrientes esenciales para las plantas, se encontraron dentro del rango adecuado a alto para los principales cultivos agrícolas. Por su parte, la concentración de cadmio, elemento no esencial, se encuentra por debajo del límite considerado crítico para la producción agrícola. Finalmente, todos los metales pesados analizados presentaron un mayor contenido en la primera profundidad del suelo.

Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado con el financiamiento del proyecto FONDECYT 1120992 de Chile.

Bibliografía

- Benton, J. 1998. Plant nutrition manual. 149 p. CRC Press LLC, Washington, USA.
- Buccolieri, A., G. Buccolieri, A. Dell'Atti, G. Strisciullo, y R. Gagliano-Candela. 2010. Monitoring of total and bioavailable metals pesados concentration in agricultural soils. *Environ Monit Asses* 168:547-560.
- Cajuste, L., L. Cajuste, C. García, y J. Cruz. 2006. Distribution and availability of metales pesados in raw and acidulated phosphate rock-amended soils. *Com. Soil Sci. Plant Analysis*. 37:2541-2552.
- CIREN. 1996. Estudio Agrológico de la VI Región. Imprenta CIREN CORFO. Santiago, Chile. Tomos I y II. 476 p. Santiago, Chile.
- CIREN. 1997. Estudio Agrológico, VII Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago. Publicación N° 117. 660 p. Santiago, Chile.
- CIREN. 1999. Descripciones de suelos materiales y símbolos: Estudio Agrológico VIII Región. Publicación Ciren N°121. 583 p. Santiago, Chile.
- Degryse, F., E. Smolders, y D.R. Parker. 2009. Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications – a review. *European Journal of Soil Science* 60:590-612.
- Epstein, E. 1994. Review: The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 91:11-17. Retrieved Nov. 11, 2012 from <http://www.pnas.org/content/91/1/11.full.pdf>
- FangSun, F., F. Hua Wang, X. Wang, W. He, D. Wen, Q. Feng Wang, y X. XiangLiu. 2013. Soil threshold values of total and available cadmium for vegetable growing based on field data in Guangdong province, South China. *J Sci Food Agric* 93:1967-1973.
- Glass, A.D.M. 1989. Plant nutrition: An introduction to current concepts. Jones and Bartlett Publishers, Boston, MA. 234 p.
- González, S., R. Ite, y X. Gálvez. 1997. Heavy metals profiles in chilean agricultural soils: a transect from the III region of Atacama to the XI region of Aysén. In: I.K. Iskandar, S.E. Hardy, A.C. Chang, and G.M. Pierzynski (eds). Fourth International Conference on the Biogeomestry of Trace Elements. Extended Abstracts, Berkeley, California. USA. pp. 43-44.
- Graham, R.D., R.M. Welch, D.A. Saunders, I. Ortiz-Monasterio, H.E. Bouis, y M. Bonierbale. 2007. Nutritious subsistence systems. *Adv. Agron.* 92:1-74.
- Grant, C.A., J.M. Clarke, S. Duguid, y R.L. Chaney. 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of the Total Environment*. 390:301-310.

- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S. Tisdale, and W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 6^a ed. 499 p. Prentice-Hall, New Jersey, North Carolina, USA.
- Hirzel, J., e I. Matus. 2011. Fertilización del cultivo de trigo candeal. Fertilización de Cultivos en Chile. Hirzel, J. (Editor). Colección Libros INIA N°28, Chillán, Chile. 2011. 434 p.
- Horckmans, L., R. Swennen, J. Deckers, y R. Maquil. 2005. Local cack ground concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxembourg. *Catena* 59:279-304.
- Kabata-Pendias, A., y H. Pendias. 2001. Trace elements in soils and plants (3rded). Boca Raton:CRC. 671 p.
- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. *Geoderma* 122:143-149.
- Lehoczky, É., y Z. Kiss. 2006. Study of the transfer coefficient of cadmium and lead in ryegrass and lettuce. *Com. Soil Sci. Plant Analysis*. 37:2531-2539.
- Lindsay, W.L., y W.A. Norwell. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- López, P.L., y J.M. Mandado. 2002. Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios Geol* 58:133-144.
- Luzio, W. 2010. Suelos de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 364 p.
- Madrid, F., R. Reinoso, M.C. Florido, E. Díaz Barrientos, F. Ajmone-Marsan, C.M.Davidson y L. Madrid. 2007. Estimating the extractability of potentially toxic metals in urban soils: A comparison of several extracting solutions. *Environmental Pollution* 147:713-722.
- McDowell, R.W, M.D. Taylor, y B.A. Stevenson. 2013. Natural background and anthropogenic contribution of cadmium to New Zealand soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 165:80-87.
- Mengel, K., y E.A. Kirkby. 1987. Principles of plant nutrition. Fourth edition. International Potash Institute, Berne, Switzerland. 685 p.
- Neall, V.E. 2006. Volcanic Soils. *Encyclopedia of life supporting systems, EOLSS. Land use and landcover VII:1-24. On-line www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C19/E1-05-07-13.pdf*
- Nicholson, F.A., S.R. Smith, B.J. Alloway, C. Carlton-Smith, y B.J. Chambers. 2003. An inventory of metales pesados inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment* 311:205-219.
- Qiao, M., C. Cai, Y. Huang, Y. Liu., A. Lin, y Y. Zheng. 2011. Characterization of soil metales pesados contamination and potential health risk in metropolitan region of northern China. *Environ Monit Asses* 172:353-365.
- Rothbaum H. P., R. L. Goguel, A. E. Johnston y G.E.G. Mattingly. 1986. Cadmium accumulation in soils from long continued applications of superphosphate. *Journal of Soil Science* 37: 99-107.
- SAS Institute. 2008. SAS/STAT user's guide, Version 9.2. SAS Inst., Cary, NC.
- Sierra, M., F.J. Martínez, y J. Aguilar. 2007. Baselines for trace elements and evaluation of environmental risk in soils of Almería (SE Spain). *Geoderma* 139:209-219.
- Tudoreanu, L., y C. Phillips. 2004. Empirical models of cadmium accumulation in maize, ryegrass and soya bean plants. *J. Sci. Food Agric.* 84:845-852.
- Villanueva, L. 2003. Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz (*Zea mays* L). Tesis de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Departamento de Postgrado y Postítulo. Universidad de Chile. 120 p.
- Wong, S.C., X.D. Li, G. Zhang, S.H. Qi, y Y.S. Min. 2002. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution* 119:33-44.



Trigo candeal en la VIII Región del Bío-bío, Chile

Respuestas en rendimiento a la aplicación de fósforo, azufre y zinc en maíz tardío en la región pampeana norte argentina

Carlos L. Michiels*

Introducción

El maíz es uno de los cultivos más importantes de Argentina. A su vez, desde el punto de vista productivo, el maíz es una actividad fundamental dado su aporte en la sostenibilidad de la capacidad productiva de nuestros suelos. En la región pampeana, el rendimiento potencial de maíz se maximiza en las fechas de siembra tempranas debido a mayores tasas de crecimiento por planta y, por ende, mayor fijación de estructuras reproductivas durante el periodo crítico (Andrade et al., 1996; Otegui et al., 2004). Esto se debe a que el cultivo explora una estación de crecimiento más favorable en términos de radiación y de temperatura. Sin embargo, en amplias regiones de la zona núcleo pampeana, existen restricciones como la disponibilidad hídrica, que hacen poco viable el uso de aquel concepto como único elemento de análisis a la hora de planificar un cultivo de maíz (Otegui et al., 2002).

En este sentido, muchos estudios concluyen que las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento en los cultivos de secano (Andrade et al., 1996; Dardanelli et al., 2004). Por lo tanto, la elección de la fecha de siembra constituye una decisión de gran impacto sobre la dinámica del agua en el cultivo de maíz en secano, ya que la oferta de agua se basa en las precipitaciones ocurridas durante el periodo comprendido entre la madurez fisiológica del cultivo precedente y la siembra, y las ocurridas durante el ciclo del cultivo (Maddoni, 2009).

Actualmente, en la región pampeana argentina coexisten al menos dos sistemas de producción de maíz. Por un lado, el sistema tradicional de producción denominado "Maíz temprano" (MTe), donde el cultivo se siembra hacia fines del invierno-inicio de primavera y, por otro lado, el sistema usualmente denominado "Maíz tardío" (MTa), en el que el cultivo se siembra a fin de primavera-inicio de verano en una ventana de 1-1.5 meses desde mediados de noviembre hasta, usualmente, inicio de enero. Ambos sistemas productivos exploran diferentes ambientes, ya sea por ubicar sus etapas fenológicas bajo distintas condiciones climáticas como por implantarse sobre condiciones de estado del suelo diferentes (Bert y Satorre, 2012). Así, cada sistema presenta ventajas y desventajas que se manifiestan en distintos rendimientos.

Tradicionalmente, MTe fue el sistema productivo predominante, sin embargo, durante las últimas campañas, el MTa ha expresado buenos resultados productivos y, en consecuencia, ha aumentado su frecuencia entre los productores. La fecha de siembra tardía en maíz aparece como una alternativa interesante,

ya que permite implantar el cultivo cuando el perfil del suelo tiene mayor cantidad de agua disponible y esto lo independiza en parte, de las variaciones en la oferta de agua durante su ciclo. Tomar la decisión de sembrar maíz fuera de la fecha óptima conlleva sacrificar rendimiento potencial en pos de darle estabilidad a este cultivo en regiones donde los periodos de balance hídrico negativo son frecuentes durante la estación de crecimiento (Duarte, 2002). En la región pampeana, en general, es frecuente la ocurrencia de bajas precipitaciones en enero, lo que sumado a la alta demanda atmosférica que se registra en esta época resulta en sequías estacionales (Maddoni, 2011). Tanto el agua como el nitrógeno (N) deben ser provistos en cantidad y oportunidad para asegurar un estado fisiológico óptimo al momento de la floración del cultivo de maíz, momento alrededor del cual, en mayor medida, se determina el rendimiento (Andrade et al., 1996). Una posibilidad para evitar la coincidencia de la floración del maíz con la sequía estacional del verano, es sembrar el cultivo al final de la estación primaveral, de manera que la floración femenina ocurra a mediados del verano y el periodo de llenado de los granos se desplace a finales del verano y otoño (Maddoni, 2011).

Una de las principales ventajas de esta decisión de manejo es que aumentan los rendimientos mínimos, otorgándole más estabilidad al productor en su sistema de producción. Sin embargo, en torno a esta decisión de manejo se asumen algunos cambios en el paquete tecnológico aplicado respecto a MTe. En primer término se asume que el cultivo tiene una menor demanda de insumos tales como semilla, debido a la menor densidad de siembra, agroquímicos por una rápida cobertura del suelo en estadios tempranos, y fertilizantes debido a que la demanda general del cultivo es menor en términos de requerimientos de nutrientes y la disponibilidad es mayor por transcurrir el mismo su ciclo con mayores temperaturas medias.

Lo citado anteriormente ocurre porque en fecha de siembra tardía hay una menor proporción de crecimiento reproductivo sobre el vegetativo, debido al deterioro de las condiciones de radiación, una baja en las temperaturas durante el llenado de granos y un mejor ambiente para el crecimiento inicial (Cirilo y Andrade, 1994). A su vez, la mineralización de la materia orgánica del suelo aumenta con las mayores temperaturas en siembras tardías, reduciendo así la respuesta al agregado del nutriente (Melchiori y Caviglia, 2008).

En toda la región pampeana ha sido bien estudiado que los mayores rendimientos de MTe se obtienen con ofertas

* Ing. Agr. Especialista en Fertilidad y Fertilizantes. Asesor privado. Consultor de empresas. Correo electrónico: michielscarlos@gmail.com

de N (N-nitrato suelo + N fertilizante aplicado) de 140 kg N ha⁻¹, para la pampa arenosa (Barraco y Díaz-Zorita, 2005) hasta ofertas de 180 kg N ha⁻¹ para la región núcleo maicera (García et al., 2010); existiendo también suficiente información relativa a la importancia de la fertilización con nutrientes como fósforo (P) y azufre (S) (García et al., 2010). Además de los macronutrientes, en las últimas campañas se diagnosticaron y midieron respuestas a micronutrientes, especialmente el zinc (Zn) (Michiels y Ruffo, 2012).

Para MTa se han documentado respuestas en rendimiento y dosis óptimas de N de 150 kg ha⁻¹ en la pampa arenosa (Proot et al., 2011), así como avances en la calibración de umbrales críticos de N en Entre Ríos (Díaz Valdez et al., 2014), entre otros trabajos. Sin embargo, la información sobre otros nutrientes como P, S y Zn sigue siendo escasa y poco consistente.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de MTa a la fertilización con N, P, S y Zn en una red de evaluación durante dos campañas (2012-2013 y 2013-2014), para generar información que ayude en la toma de decisiones de la nutrición de MTa a técnicos y productores. Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar la respuesta en rendimiento de MTa a la nutrición completa (NPSZn) vs. la nutrición básica (N o NP)
- Validar localmente umbrales de diagnóstico para Zn

Materiales y métodos

Se realizaron ensayos en 10 sitios experimentales ubicados en diversas localidades de la región pampeana Norte durante las campañas 2012-2013 y 2013-2014. Los tratamientos evaluados incluyeron: N; NP; NPS y NPSZn. Las fuentes utilizadas fueron urea (46-0-0), fosfato monoamónico (FMA) (11-52-0), MES10™ (12-40-0-10S) y MESZ™ (12-40-0-10S-1Zn), estos dos últimos productos

Tabla 1. Tratamientos evaluados en los diez sitios experimentales.

Tratamiento	N	P	S	Zn
----- kg ha ⁻¹ -----				
N	180			
NP	180	35		
NPS	180	35	20	
NPS + Zn 0.5	180	35	20	0.5
NPS + Zn 1.0	180	35	20	1.0
NPS + Zn 1.5	180	35	20	1.5
NPS + Zn 2.0	180	35	20	2.0

de Mosaic Argentina S.A. Las dosis de N, P y S fueron de 180 kg N ha⁻¹ (N suelo + N fertilizante), 35 kg P ha⁻¹, 20 kg S ha⁻¹. Se evaluaron 4 dosis de Zn: 0; 1.0; 1.5 y 2.0 kg Zn ha⁻¹ (**Tabla 1**).

Los tratamientos fueron aplicados a la siembra e incorporados al costado y debajo de la línea de siembra con máquina estándar. Los tratamientos se balancearon con N a una dosis final de 180 kg N ha⁻¹ entre disponibilidad en el suelo a la siembra más N aplicado como fertilizante, mediante la aplicación de urea a la siembra y en algunas situaciones incorporada en forma previa a la misma.

El diseño fue en bloques completos al azar y se realizaron cuatro repeticiones de cada tratamiento. Las parcelas estándar fueron de 30 m y al menos 8 surcos de ancho pero se ajustaron de acuerdo al equipo de siembra disponible en cada sitio. Las diferencias no fueron significativas en términos operativos como para detallar las mismas.

Se realizó una caracterización inicial de los sitios donde se realizaron los ensayos (**Tabla 2**). Para ello en cada sitio

Tabla 2. Caracterización química de los suelos pertenecientes a los diez sitios experimentales.

Año	Sitio	MO	pH	Pe	N-NO ₃	S-SO ₄	Zn
		%	----- mg kg ⁻¹ -----				
2012	Adelia María	2.5	6.0	26	16	7	0.6
	Alejo Ledesma	1.9	6.5	18	17	7	0.7
	América	1.3	6.0	14	10	2	0.5
	Charras	0.9	6.0	9	9	6	0.2
	Pergamino	2.7	5.8	12	10	7	0.7
2013	Río Cuarto	1.3	6.3	14	8	6	0.3
	América	1.5	6.0	14	23	3	0.8
	Oliveros	2.1	5.5	18	15	11	0.8
	Pergamino	3.3	5.5	23	24	5	1.1
	Pasco	2.6	5.9	16	27	14	0.3

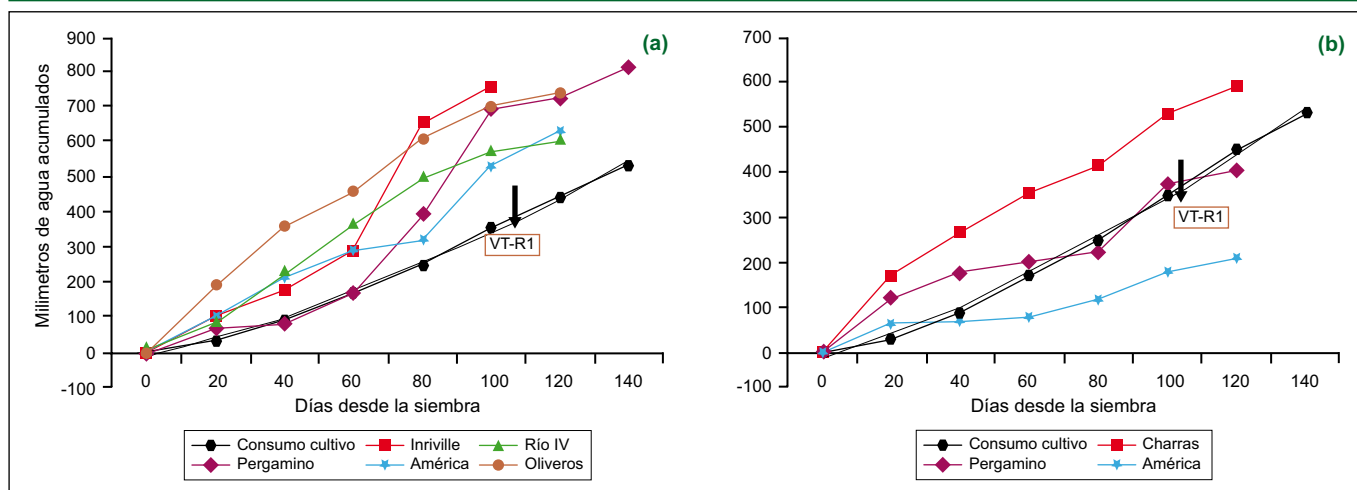


Figura 1. Consumo estimado de agua (Andriani, 1997) y precipitaciones acumuladas en localidades cercanas a los sitios experimentales durante el ciclo de cultivo para las campañas 2012-2013 (a) y 2013-2014 (b).

Tabla 3. Rendimientos por sitio de los distintos tratamientos para los ensayos de las campañas 2012-2013 y 2013-2014. Se indica la significancia de las diferencias entre tratamientos dentro de cada sitio.

Sitio	N	NP	NPS	NPS 0.5 Zn	NPS 1.0 Zn	NPS 1.5 Zn	NPS 2.0 Zn	C.V. (%)	Valor p
2012									
Adelia María	8633 E	8505 F	8884 C	8783 D	8808 CD	8987 B	9168.5 A	0.56	0.0001
Alejo Ledesma	10 338	10 601	10 966	10 911	10 683	10 659	11 114	5.6	0.87
América	7297 C	7748 BC	8187 AB	8062 AB	8339 AB	8644 A	8331.5 AB	3.06	0.017
Charras	11 608 C	12 769 A	12 700 AB	12 292 AB	12 459 AB	12 118 BC	12 143 BC	4.49	0.03
Pergamino	6990 D	6845 D	7900 C	8060 BC	8625 AB	8620 AB	8966 A	8.91	< 0.0001
Río Cuarto	11 950	12 217	12 342	12 452	12 424	12 013	12 841	6.79	0.92
2013									
América	7676	7940	7977	7945	7841	7737	7754	7.5	0.98
Oliveros	9554	9451	9290	9328	9413	9319	9068	2.5	0.15
Pergamino	12 018	12 036	12 598	12 826	13 433	12 263	12 246	8.9	0.51
Pasco	7736	7376	7497	7493	8079	6324	7615	18.9	0.72

y previo a la siembra, se tomaron muestras compuestas representativas de los primeros 20 cm del perfil de suelo. Las muestras fueron enviadas a laboratorios comerciales de análisis de suelos, donde se determinó la concentración de P extractable (Pe, método de Bray y Kurtz I), N-NO₃⁻ (método del ácido fenoldisulfónico), azufre como sulfato (S-SO₄⁻², extracción por método de Morgan y determinación por turbidimetría con BaCl₂), materia orgánica (MO, método de Walkley y Black) y pH en agua relación 1: 2.5 (potenciometría). También se evaluó la disponibilidad de Zn, la cual se determinó utilizando el método conocido como DTPA (solución extractora DTPA). A su vez fueron tomadas muestras en las profundidades de 20-40 cm y de 40-60 cm donde se determinaron los contenidos de N-NO₃⁻ y S-SO₄⁻² y, N-NO₃⁻ respectivamente.

Los datos fueron analizados utilizando el procedimiento MIXED de SAS (Littell et al., 1996). Se analizaron todas las localidades en forma conjunta considerando al sitio

como un factor fijo y a los años y bloques, anidados en las localidades, como factores aleatorios. Las diferencias entre medias fueron evaluadas mediante el test de mínima diferencia significativa ($\alpha = 0.10$). La relación entre la respuesta a la fertilización con Zn a dosis de 1.0 kg ha⁻¹ y las propiedades del suelo se analizó mediante análisis de correlación y regresión lineal.

Resultados y discusión

Los parámetros de fertilidad química fueron variables dentro de los valores promedios encontrados en la región donde se condujeron los ensayos y en concordancia con lo relevado por distintos autores en numerosas publicaciones dentro de la región pampeana (Sainz Rosas et al., 2013) (Tabla 2). Los porcentajes de materia orgánica y los valores de pH estuvieron dentro del rango considerado normal para el desarrollo de cultivos sin limitaciones correspondientes a lotes en producción

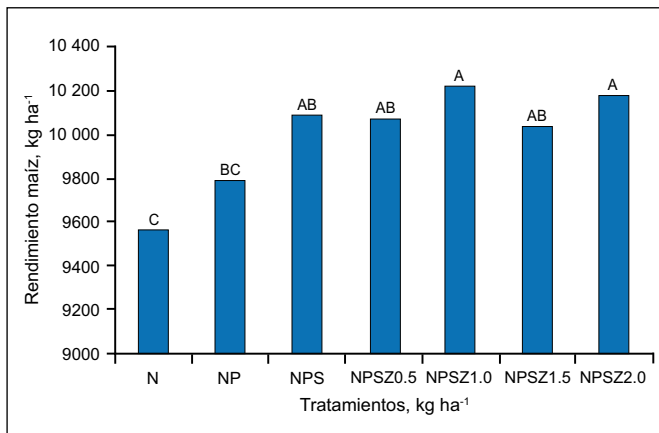


Figura 2. Rendimientos promedio de maíz para los tratamientos con N, P, S y Zn para los nueve ensayos conducidos en las campañas 2012-2013 y 2013-2014. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.10$).

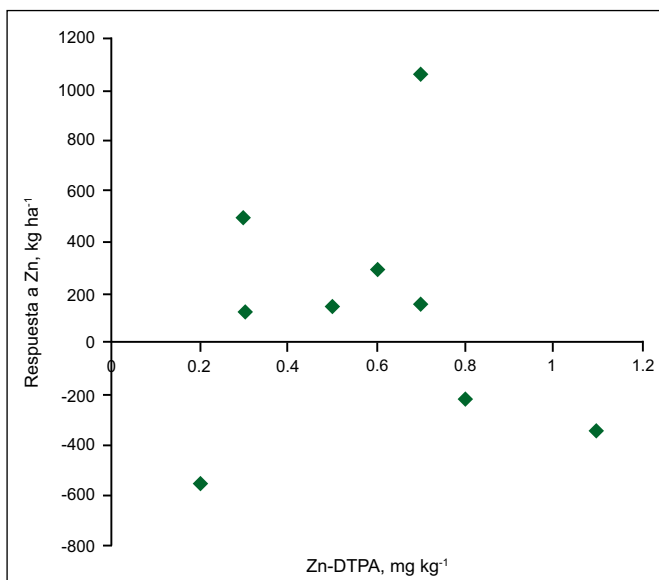


Figura 3. Relación entre la respuesta a la aplicación de Zn y el nivel de Zn del suelo extraído con DTPA para los 10 sitios experimentales.

agrícola continua. Los niveles de Pe se ubicaron dentro de los rangos medios de la región y cercanos o por encima del umbral de respuesta de 19 mg kg^{-1} P Bray-1 (Gutiérrez Boem et al., 2010). Relativo a $\text{S-SO}_4^{=}$, los valores encontrados estuvieron por debajo del umbral de 10 mg kg^{-1} citado en la red de ensayos de larga duración de CREA Sur de Santa Fe (García et al., 2010). Con respecto a Zn, salvo un sitio con valor cercano al umbral citado por la literatura (Martens y Lindsay, 1990), el resto de las muestras presentaron valores por debajo del rango de suficiencia para el método utilizado.

La relación entre las precipitaciones acumuladas (Pp) en ciclo de cultivo para los sitios de experimentación y el consumo de agua (C) (Andriani, 1997), se presentan en la **Figura 1 a y b**. En la campaña 2012, las Pp durante el periodo crítico del cultivo (VT-R1) estuvieron cercanas o por debajo del C en la mayoría de sitios evaluados (**Figura 1a**), mientras que para 2013 ocurrió lo contrario (**Figura**

1b), poniendo de manifiesto el contraste en cuanto a oferta hídrica entre ambas campañas.

Los rendimientos por sitio se pueden ver en la **Tabla 3**. El análisis conjunto de todos los sitios mostró un efecto significativo de los tratamientos ($p = 0.0059$), localidades ($p < 0.0001$) e interacción entre localidad y tratamiento ($p = 0.041$). Por alto coeficiente de variación, el sitio Pasco fue descartado para este análisis integrado de los sitios. El rendimiento promedio de los tratamientos en los nueve sitios se presenta en la **Figura 2**. El rendimiento más elevado se obtuvo con el tratamiento NPS+Zn (1 kg ha^{-1}). La respuesta promedio de dicho tratamiento fue del 7% (662 kg ha^{-1}) y 4.4% (435 kg ha^{-1}) respecto a N y NP, respectivamente siendo ambas estadísticamente significativas ($p < 0.10$). No se observaron diferencias significativas entre NPS+Zn (1 kg ha^{-1}) y NPS, ni entre este último con NP. Considerando sólo los sitios donde se observó una respuesta significativa, el tratamiento N+P+S+Zn de 1.0 kg ha^{-1} rindió 11% (926 kg ha^{-1}), 7% (591 kg ha^{-1}) y 2% (140 kg ha^{-1}) más que N, NP y NPS, respectivamente.

En el análisis individual por sitio, se observó respuesta significativa a los tratamientos en 4 de las 9 localidades, mientras que en las otras 5 no se detectó una respuesta significativa. Los cuatro sitios con respuesta correspondieron a la campaña 2012-2013: Adelia María, América, Charras y Pergamino. Las respuestas fueron significativas a P en América y Charras, dos sitios con niveles de Pe menores de 15 mg kg^{-1} , pero no se observó respuesta en sitios de Pe similares como Pergamino 2012. En el caso de S, las respuestas significativas se registraron en Adelia María y Pergamino, pero estas respuestas no se pudieron correlacionar con niveles de $\text{S-SO}_4^{=}$ u otras variables. La respuesta a la aplicación de Zn fue significativa en Adelia María, América y Pergamino.

A diferencia de lo observado en otras redes en MTe (Michiels y Ruffo, 2012), estas respuestas no estuvieron correlacionadas con la concentración de MO. Tampoco se encontró relación con las otras propiedades de suelo analizadas como pH y contenido de Zn (**Figura 3**). Esta red demuestra que la deficiencia de nutrientes como P, S y Zn puede ser un factor limitante de la productividad del MTa en la región pampeana y que los mismos deben ser considerados en los planes de nutrición del cultivo.

Agradecimientos

A los cooperadores que llevaron adelante estos ensayos.

A los propietarios de los establecimientos, encargados y responsables de campos que hicieron un valioso aporte para que esto se concretase en situaciones reales de producción.

A Mosaic de Argentina S.A. por el soporte financiero para estos ensayos.

Bibliografía

- Andrade, F.H., A.G. Cirilo, S.A. Uhart, y M.E. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Dekalb Press. 292 p. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires.
- Andriani, J.M. 1997. Uso del agua y riego. Capítulo del libro "El cultivo de soja en la Argentina", editado por Laura Giorda y Hector Baigorri. E.E.A. Marcos Juaréz. INTA. Editorial Editar San Juan. Argentina. pp. 141-150.
- Barraco, M., y M. Díaz Zorita. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivo de maíz en Hapludoles típicos. *Ciencia del Suelo* 23:197-203.
- Bert. F., y E.H. Satorre. 2012. Sistemas de producción de maíz: maíz temprano y tardío en Manual de Cultivo de Maíz 2012. Aapresid. www.aapresid.org.ar. Rosario. Argentina.
- Cirilo, A.G., y F.H. Andrade. 1994. Sowing date and maize productivity: Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science* 34:1039-1044.
- Dardanelli, J., D. Collino, M.E. Otegui, y V. Sadras. 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción. En: Satorre, E.H., R.L. Benech Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui, y R. Savin. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, FAUBA. pp. 377-434.
- Díaz Valdez, S., F.O. García, y O.P. Caviglia. 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. En *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACs. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. 5-9 Mayo 2014.
- Duarte, G. 2002. Modelos de producción de maíz en la región de la Pampa Arenosa. *Guía Dekalb del cultivo de maíz*. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 220-221.
- 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*. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 p.
- Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para Soja, Maíz y Trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mayo 31 a 4 Junio de 2010. Rosario. Argentina.
- Littell, R.C., Milliken, G.A. Stroup, W.W., and Wolfinger, R.D. 1996. *SAS system for mixed models*. SAS Institute, Cary, NC. 633 p.
- Maddonni, G.A. 2009. Fecha de siembra como estrategia de manejo de agua en maíz. XVII Congreso Aapresid. Actas. Rosario, Santa Fe, 19 al 21 de agosto de 2009. Rosario: Aapresid. 195 p.
- Maddonni, G.A. 2011. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - A probabilistic approach. *Theoretical Application Climatology* 107:325-345.
- Martens, D.C. y W.L. Lindsay. 1990. Testing soils for Copper, Iron, Manganese, and Zinc. En: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, pp. 229-264.
- Melchiori, R.J.M., y O.P. Caviglia. 2008. Maize kernel growth and kernel water relations as affected by nitrogen supply. *Field Crops Research* 108:198-205.
- Michiels, C. L. y M.L. Ruffo. 2012. El zinc limita el rendimiento del maíz en la región pampeana argentina. *Actas CD XIX Congreso Latinoamericano – XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 16-20 de Abril de 2012. Mar del Plata, Buenos Aires. Argentina.
- Otegui, M.E., J. Mercau, y F.J. Menéndez. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En: Satorre, E.H. (Ed.) *Guía Dekalb del cultivo de maíz*. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 172-178.
- Otegui, M.E., y M. López Pereira. 2004. Fecha de siembra. En: Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, FAUBA. pp. 259-275.
- Proot, A., M. Barraco, C. Scianca, y C., Álvarez. 2010. Efecto de la fertilización nitrogenada y de la densidad de siembra sobre los rendimientos y la eficiencia de uso de agua en maíces tardíos en la pampa arenosa. *EEA INTA Villegas. Memoria técnica 2010-2011*.
- Sainz Rozas, H., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? *Simposio Fertilidad 2013*. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. p. 62.72.



Deficiencia de Zn en maíz

La tarea de detectar efectos de compuestos biológicos sobre el rendimiento de cultivos

Gerardo Rubio^{1*} y Martín Díaz-Zorita²

El número de microorganismos con potenciales efectos benéficos para los cultivos es muy elevado. Genéricamente, pueden ser denominados microorganismos promotores del crecimiento de las plantas (MPCP). Actualmente constituyen una de las áreas más activas dentro de las investigaciones agronómicas. Entre las acciones beneficiosas se encuentra la fijación libre o simbiótica de nitrógeno (N), la solubilización de fósforo (P) y otros nutrientes, el control de agentes patógenos, el aporte de sustancias que estimulan el crecimiento de la planta (típicamente auxinas y ácidos orgánicos precursores de la síntesis de hormonas) y de controladores de estrés (Ejemplo, moléculas señal de comunicación entre microorganismos y plantas) (Dutta y Podile 2009; Lugtenbertg y Kamilova, 2009) (**Tabla 1**).

Muchos de los estudios que describen los modos de acción de microorganismos potencialmente benéficos han sido desarrollados en macetas bajo condiciones controladas tanto en cámaras de crecimiento como en invernáculos (Van Dommelen et al., 2009; Rodrigues et al., 2008) y tienen limitada extrapolación a condiciones corrientes de producción. Los ensayos a campo que evalúan los aportes de la inoculación con microorganismos en cultivos extensivos bajo prácticas corrientes de producción son menos frecuentes. Además, la interpretación de sus resultados es variada y no siempre conclusiva. Esto en parte se explica por la complejidad en los diseños experimentales para analizar múltiples modos de acción como también del resultado de las interacciones con diversas condiciones de estrés a mitigar por la actividad de los microorganismos. Los diseños experimentales frecuentes consideran sitios individuales durante pocas campañas de producción o varias localidades en un mismo ciclo productivo explorando diversas condiciones ambientales. En cada sitio, los tratamientos normalmente se disponen según diseños en bloques completos aleatorizados o en parcelas divididas según factores principales de manejo representativos de

prácticas de producción del cultivo (Ejemplo, fertilización, genotipos, etc.).

Este tipo de diseño experimental muestra algunas limitaciones para el análisis e interpretación de los resultados por la ocurrencia de interacciones temporales y espaciales de carácter aleatorio. Es por esto que algunos estudios se han desarrollado considerando abundantes localidades y en múltiples ciclos productivos. De este modo, se explora un amplio rango de condiciones ambientales bajo prácticas frecuentes de manejo de la producción de los cultivos en estudio. En estos trabajos se pueden describir los efectos asociados a factores fijos (Ejemplo, tipo de suelo) o aleatorios (condiciones ambientales durante los ciclos productivos) (Díaz-Zorita y Fernández-Canigia, 2009). Una mejor interpretación de los resultados requiere del análisis según la frecuencia de su ocurrencia además de discriminar entre factores jerárquicos que influyen sobre la productividad y respuesta a la producción. Dada la gran variabilidad en las respuestas a la inoculación con microorganismos, estos estudios requieren de una vasta cantidad de casos (o ensayos) para hallar diferencias significativas entre tratamientos.

Por un lado, se debe considerar que aunque en algún trabajo particular un microorganismo haya sido identificado como MPCP, el mismo no necesariamente ejercerá un efecto similar en cualquier circunstancia. Para que se produzcan efectos simbióticos entre plantas y microorganismos deben darse condiciones que determinen un mutuo beneficio. Usualmente esas condiciones están circunscriptas a un estrecho margen. En tal sentido, debe recordarse que el objetivo fundamental de cualquier especie es el de perpetuarse a sí misma por medio de la conservación de sus genes a través del tiempo más que el de colaborar para la perpetuación de los genes de sus vecinos. Por otro lado, también es importante considerar que la evaluación de la respuesta al agregado de compuestos de origen biológico

tiene la particularidad que, en caso de producirse, suele ser de magnitudes reducidas, y estar sujeta a complejos y variables factores. De hecho, la mayoría de los trabajos publicados que utilizan técnicas de análisis convencionales arroja efectos no significativos (Lugtenbertg y Kamilova, 2009). Indudablemente, la evaluación de estos tratamientos constituye no solamente un desafío para los investigadores, sino también para los proveedores de servicios que desarrollan soluciones de origen biológico.

Tabla 1. Tipos de microorganismos benéficos para el crecimiento de las plantas, sus efectos sobre las plantas y algunos ejemplos.

Tipo	Efectos	Ejemplos
Biofertilizantes	Incrementan el suministro de nutrientes del huésped	Fijación biológica de N Mineralización de P orgánico Solubilización de P inorgánico
Biomejoradores del rendimiento	Producen fitohormonas (AIA, giberelinas, etileno)	Producción de fitohormonas y precursores de fitohormonas
Biocontroladores	Controlan agentes fitopatógenos	Producción de antibióticos, HCN, enzimas hidrolíticas

¹ INBA-CONICET y Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía (UBA), Buenos Aires, Argentina

² Monsanto BioAg, Pilar (Buenos Aires), Argentina

* Autor de contacto. Correo electrónico: rubio@agro.uba.ar

Normalmente, a medida que aumenta el nivel de aplicación de una tecnología, la productividad por hectárea también crece, pero los sucesivos incrementos son, cada vez, de menor magnitud. Por lo tanto, la comprobación de estos eventuales incrementos en el rendimiento (o la falta de ellos) es más difícil de evaluar. Y aquí podemos distinguir dos casos contrastantes, que llamaremos A y B (Figura 1). El caso A, lo ejemplificamos a través de un nutriente como el N y el caso B, a través de los MPCP. En los casos A es esperable hallar respuestas variables desde 0 hasta más de dos dígitos porcentuales. Los “insumos” agrupados en los casos A suelen poseer algún parámetro que permite predecir, con menor o mayor precisión, las eventuales respuestas en el crecimiento de los cultivos ante su agregado. Por ejemplo, la disponibilidad de N-nitrato del suelo permite diagnosticar y estimar las probables respuestas al agregado del N en muchos cultivos. Las respuestas nulas o pequeñas se agrupan en aquellos sitios en los cuales el contenido de N-nitrato es mayor a determinado umbral, mientras que las mayores se agrupan en aquellos suelos pobres en N-nitrato. En los casos del tipo B (MPCP), usualmente no existe un parámetro confiable que permita predecir la eventual respuesta del cultivo a su agregado. Por otro lado, si efectivamente hay respuesta, la misma es de menor magnitud relativa que en el caso A, usualmente de un solo dígito porcentual. Estos puntos llevan a la cuestión central de este reporte, que es la disyuntiva de cómo evaluar estos casos que frecuentemente describen situaciones de uso de tecnologías de origen biológico aplicadas para la producción de cultivos.

El método clásico de analizar experimentos de campo en agronomía es realizar ensayos con 3 a 5 repeticiones y considerar un nivel de significancia (α) del 5% para la diferenciación entre medias de los tratamientos bajo evaluación. No necesariamente este es el diseño más adecuado para analizar los casos tipo B.

Las herramientas estadísticas

Al experimentar con compuestos biológicos con fines agronómicos deben ser tenidos especialmente en cuenta los tres principios básicos del diseño de experimentos: la aleatorización, el control local y la replicación.

La aleatorización se refiere a la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales. Esta asignación debe ser realizada totalmente al azar de modo tal que cada posible asignación de tratamientos a las unidades tenga la misma probabilidad de ocurrencia para remover sesgos y fuentes de variación ajenas a los tratamientos. Con el control local se trata de minimizar, a través de un estricto control de las condiciones experimentales, el hecho de que no todas las fuentes de variación ajenas son removidas por la aleatorización y la replicación. En experimentos de campo esto implica extremar el control de las variables que puedan afectar la sanidad, la nutrición y el estado hídrico de los cultivos. También se incluye en el control local la agrupación de las unidades experimentales dentro de bloques homogéneos.

Finalmente, la replicación es la estructura de repetición del experimento básico. En el campo, los tratamientos deben ser aplicados a varias unidades experimentales.

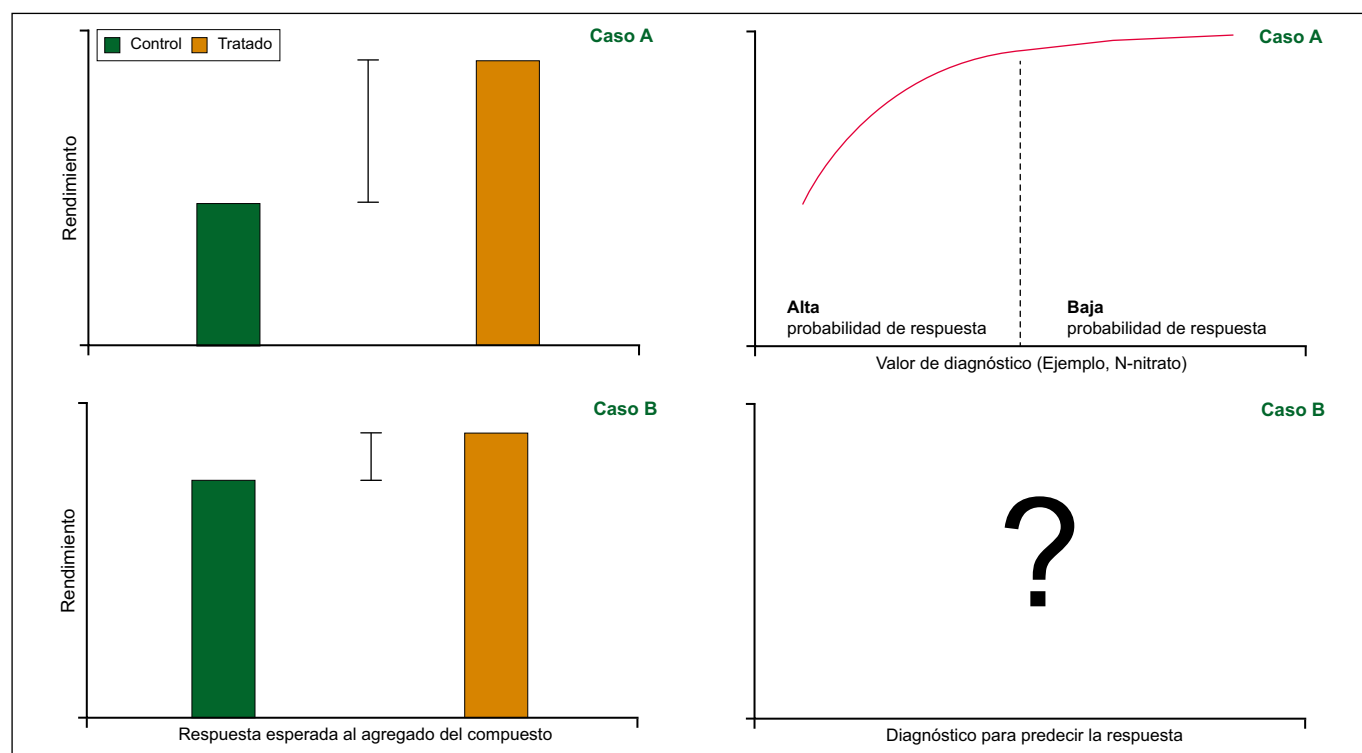


Figura 1. Casos A y B de la respuesta al agregado de un compuesto o de un fertilizante. En el caso A (Ejemplo, N) existen parámetros que permiten predecir la respuesta esperada (Ejemplo, disponibilidad de N-nitrato). En la zona de alta probabilidad de respuesta, es esperable obtener incrementos de mayor magnitud. En el caso B (Ejemplo, MPCP) usualmente no existen parámetros que permitan predecir la respuesta al agregado del producto. Además, la respuesta esperada suele ser de menor magnitud.

Determinar el número de repeticiones es una de las etapas claves en el diseño de experimentos y en la estimación del efecto promedio del tratamiento y de su variabilidad; más aún en casos en que se espera que los tratamientos ejerzan efectos pequeños sobre las variables de respuesta. Existen varias formas de calcular el número adecuado de repeticiones por tratamiento. Una de ellas, recomendada para evaluar efectos de tratamientos (biológicos o no) sobre parámetros del crecimiento de plantas, es la propuesta por Clewer y Scarisbrick (2001). La misma requiere definir de antemano el nivel de confianza para controlar el riesgo de error de tipo I, de rechazar la hipótesis nula de ausencia de efecto cuando los tratamientos no difieren en forma verdadera entre sí. Este riesgo se controla con el nivel de confianza, cuyo valor depende del porcentaje de seguridad a considerar (generalmente el 95%, $\alpha = 0.05$). También se requiere de antemano una estimación del desvío estándar de la población y del intervalo de confianza que se considera suficiente para establecer las diferencias entre tratamientos. La fórmula propuesta es:

$$r = 2 \frac{t^2 s^2}{d^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

dónde r es el número de repeticiones, t es el valor t de Student para el nivel de confianza deseado y los grados de error del muestreo inicial, s es el desvío estándar en el pre-muestreo y d es la diferencia a detectar o magnitud esperada de respuesta.

En la **Figura 2** se presenta un ejemplo para ilustrar la determinación del número de repeticiones. Se observa que el número "clásico" de repeticiones (4 ó 5) y de nivel de confianza (95%), en este caso, sería suficiente para detectar incrementos en el rendimiento de más del 15% pero insuficiente para detectar diferencias menores.

La comparación entre unidades o parcelas con plantas inoculadas y controles sin inocular se suele realizar mediante franjas apareadas. Estas franjas se distribuyen en amplias áreas cubriendo diferentes condiciones de sitio (Ejemplo, tipo de suelo) y se establecen en una o varias campañas productivas. Dentro de cada par de franjas, y considerando las diferentes condiciones de sitio a incluir como factor anidado de análisis, se establecen aleatoriamente un número de sectores de evaluación geoposicionados donde se realizan las evaluaciones de productividad de los cultivos. Para el análisis de los resultados se consideran metodologías de estadística descriptiva (media y parámetros de dispersión) de cada uno de los tratamientos discriminando según factores espaciales (sitio) y temporales (campañas). Además se utiliza el análisis de la varianza bajo un diseño factorial en parcelas divididas con campañas y tratamientos bajo análisis como factores principales y sitios como factor dividido. En caso de ser necesario, se aplican transformaciones de los datos para cumplimentar los supuestos de normalidad del error y homogeneidad de varianzas. Este procedimiento experimental puede

involucrar alta inversión (área bajo estudio, extensión del cultivo, etc.), aunque permite alcanzar una elevada cantidad de observaciones limitando la complejidad operativa de extensos y complejos diseños experimentales.

Resultados de este tipo de evaluaciones, establecidas en cultivos de trigo en sitios representativos del área sudoeste de Buenos Aires mostraron que la cantidad de muestras requeridas para describir, con un 95% de confianza, diferencias en producción entre cultivos inoculados con *Azospirillum brasilense* con respecto al control sin inoculación difieren entre campañas. Por ejemplo, en condiciones normales de producción serían necesarias entre 60 y 75 observaciones mientras que en años con sequías y menores rendimientos se requerirían unas 200. Esta abundante cantidad de observaciones puede reducirse al limitar la ubicación de las muestras a sitios espacialmente homogéneos (Díaz-Zorita et al., 2015).

Aproximaciones probabilísticas

Las respuestas de los cultivos a los productos de origen biológico no se relacionan estrechamente con factores fijos únicos que pueden ser evaluados de antemano. Esta es una diferencia sustancial con la respuesta a los fertilizantes, que puede ser anticipada, al menos parcialmente, mediante análisis de suelo. Este comportamiento limita la posibilidad de predicción certera para su aplicación sustentando decisiones de manejo productivo. En estos casos, se requiere un análisis alternativo de los datos experimentales que integre poblaciones extensas de pares de casos con y sin la aplicación del tratamiento correspondientes a condiciones representativas de su ámbito de aplicación

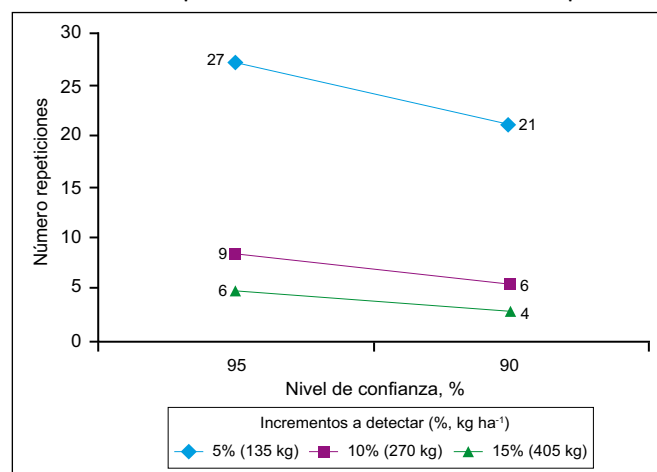


Figura 2. Estimación del número de repeticiones. Se analiza un caso en el que queremos evaluar el efecto de un compuesto biológico X aplicado sobre un cultivo de soja de un área determinada. De la campaña anterior, en esta área, se posee el dato que el cultivo alcanzó un rendimiento promedio de 2764 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación de 8.99%, lo cual significa un desvío estándar de 248.48 y una variancia de 61 744. Utilizando la (Ec. 1), y la información descrita de la campaña anterior, se calcula el número de repeticiones para poder detectar incrementos en el rendimiento del 5 al 15% y utilizando dos niveles de confianza, 90 y 95%.

(Ejemplo, región, tipo de manejo del cultivo, etc.). Cuando los datos disponibles son escasos y se dispone de opiniones expertas de soporte en su análisis se pueden emplear herramientas tales como la simulación Monte Carlo o el análisis de distribución de frecuencias Betapert (Berger y Pena, 2013). Estos métodos permiten estimar la probabilidad de distribución de resultados de variables aleatorias para el análisis de incertidumbre (Berger y Pena, 2013). En el caso de disponer de un número elevado de casos, es recomendable analizar la distribución acumulada de los resultados. En su interpretación se pueden identificar no solo los rangos de respuestas sino las proporciones con respecto a niveles de referencia.

Los resultados pueden ser descriptos por funciones de distribución a partir de los datos empíricos de las evaluaciones. Por ejemplo, en la **Figura 3** se presentan las distribuciones de frecuencias acumuladas de respuestas a la inoculación con rizobios en cultivos de soja según dos regiones contrastantes (Argentina y Brasil) y con *Azospirillum brasilense* en cultivos diferentes (trigo y maíz). Estas evaluaciones se desarrollaron en condiciones normales de producción agrícola en diversas regiones y múltiples campañas. En promedio, sobre 163 casos en Brasil se observó una respuesta media de 146 kg ha⁻¹ a la inoculación de soja con rizobios y 95% de sitios con respuesta positiva, mientras que en Argentina el mismo tratamiento, evaluado en 839 casos, mostró respuestas medias de 216 kg ha⁻¹ con resultados positivos en el 79% de los sitios. En el caso de la inoculación con *Azospirillum brasilense* en cereales, sobre 432 sitios cultivados con

trigo la respuesta media fue de 243 kg ha⁻¹, mientras que en maíz y al evaluar 225 sitios la mejora media de rendimientos fue de 524 kg ha⁻¹. Los casos positivos de respuesta fueron 81% en trigo y 86% en maíz.

Esta aproximación difiere de los análisis tradicionales y, en término de decisiones de aplicación de tecnologías de manejo productivas, es una medida más real de evaluación del comportamiento de los cultivos a la utilización de productos biológicos. Los resultados determinísticos, normalmente expresados por el valor medio de la respuesta a la aplicación del tratamiento biológico, son reemplazados por la distribución de valores y una respuesta probabilística.

Consideraciones finales

En el laboratorio se han comprobado numerosos efectos benéficos para las plantas superiores de la presencia de diversos microorganismos. Sin embargo, sólo alguno de estos efectos benéficos se han corroborado en condiciones de invernáculo. En condiciones de campo, las comprobaciones efectivas han sido aún más escasas. Comprender las variaciones de las respuestas en las distintas condiciones es clave para poder evaluar la potencialidad de su incorporación a las prácticas del cultivo. Las razones pueden responder a distintos orígenes. Por ejemplo, una bacteria de comprobado efecto biocontrolador en el laboratorio puede, a su vez, ser biocontrolada por otro microorganismo en el suelo. Por otro lado, la producción de metabolitos secundarios causantes de los potenciales efectos positivos en el

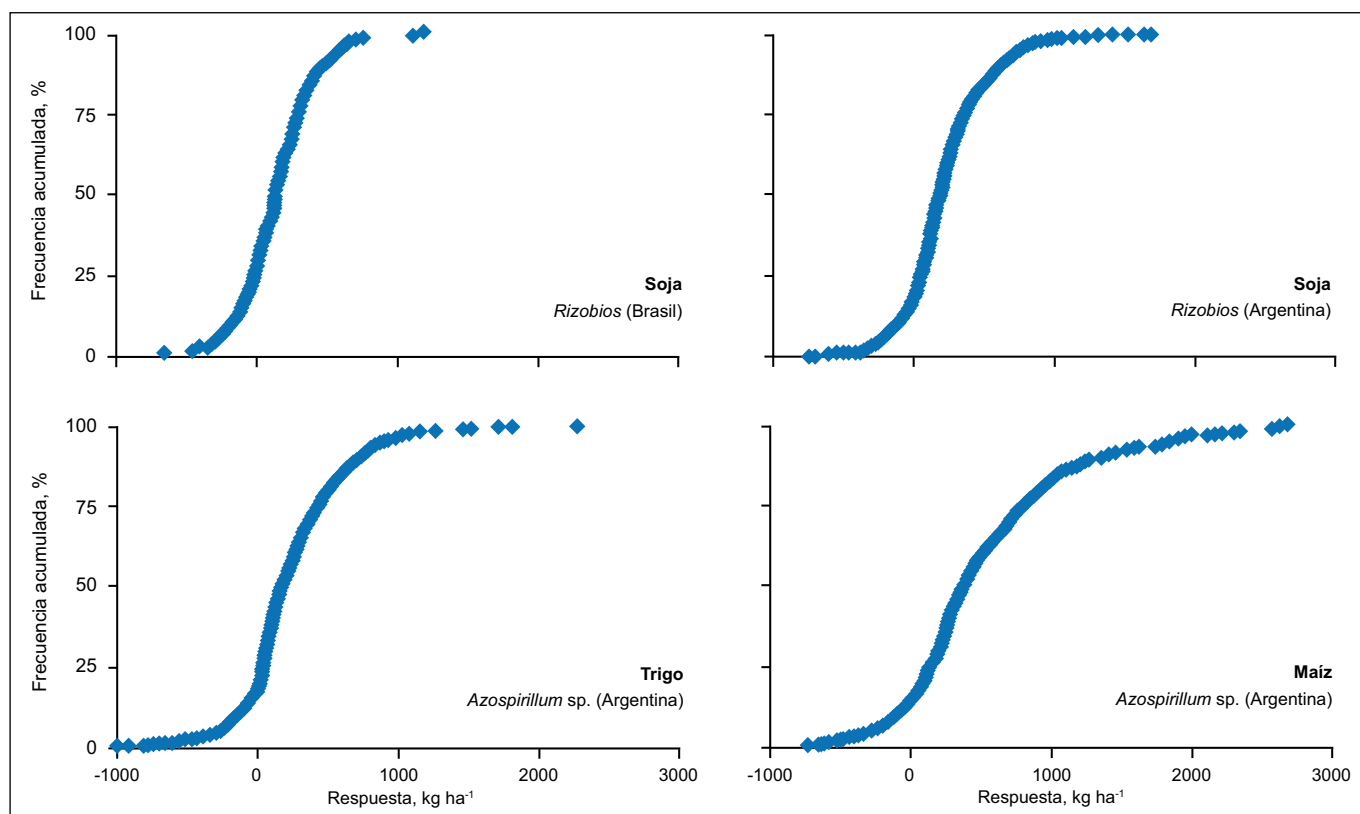


Figura 3. Distribución de frecuencias acumuladas de respuestas en producción de granos a la inoculación de soja con *Rizobios* en Argentina y en Brasil y de trigo y maíz con *Azospirillum brasilense* en Argentina (Fuente: Monsanto BioAg Agronomía, datos propios).

crecimiento de las plantas, es regulada por condiciones que pueden variar entre el laboratorio y el campo.

El efecto de los MPCP debe ser necesariamente analizado en el contexto de la menor magnitud de las eventuales respuestas. En estos casos, es aún más significativo seguir estrictamente los tres principios básicos del diseño experimental. Se debe prestar especial atención para ajustar las condiciones del ensayo de modo tal de reducir el error experimental. Asimismo, además de la variable rendimiento, es recomendable utilizar variables de respuesta alternativas que puedan expresar mayor sensibilidad.

Por último, hay que considerar que los protocolos de diseño y análisis de experimentos utilizados en el ámbito de la investigación científica no necesariamente son seguidos por otros interesados en el tema, como los adoptantes de la práctica. Por ejemplo, la incorporación de una práctica de manejo puede ser resultado de otros procedimientos de análisis, tales como usar un nivel de confianza de 10% en lugar de 5% en los análisis estadísticos. O también, a partir de análisis de distribuciones de valores y respuestas probabilísticas considerando abundantes datos provenientes de evaluaciones de respuestas desarrolladas en condiciones representativas de producción.

Bibliografía

- Berger A., y B. Pena. 2013. Decisiones riesgosas en empresas agropecuarias. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. 100 pp.
- Clewer A., y D. Scarisbrick. 2001. Practical Statistics and Experimental Design for Plant and Crop Science. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra.
- Díaz-Zorita M. y M.V. Fernández Canigia. 2009. Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. Eur. J. Soil Biol 45:3-11.
- Díaz-Zorita, M., M.V. Fernández Canigia, O.A. Bravo, A. Berger y E.H. Satorre. 2015. Field evaluation of extensive crops inoculated with *Azospirillum* sp. En Cassan, FD, Y Okon y CM Creus. Handbook for *Azospirillum*. Springer International Publishing Switzerland 435-445.
- Dutta, S., y A. R. Podile. 2009. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): the bugs to debug the root zone. Critical Reviews in Microbiology 36, 232-244.
- Lugtenberg B. y F. Kamilova. 2009. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. Annu. Rev. Microbiol. 63:541-556.
- Rodrigues E., L. Rodrigues, A. Martínez de Oliveira, V. Baldani, K. dos Santos Teixeira, S. Urquiaga y V. Reis. 2008. *Azospirillum amazonense* inoculation: effects on growth, yield and N₂ fixation of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Soil 302:249-261.
- Van Dommelen, A., A. Croonenborghs, S. Spaepen, y J. Vanderleyden. 2009. Wheat growth promotion through inoculation with an ammonium-excreting mutant of *Azospirillum brasilense*. Biol. Fertil. Soils 45:549-553.



XXI Congreso Latinoamericano
de la Ciencia del Suelo

XV Congreso Ecuatoriano
de la Ciencia del Suelo

“Todos los Suelos en la Mitad del Mundo”
El suelo, soporte de la diversidad de paisajes, vida y cultura

Quito-Ecuador
Hotel J.W. Marriott
24-28 de Octubre de 2016



Avances en las evaluaciones de boro y zinc en el cultivo de caña de azúcar en suelos derivados de ceniza volcánica de Guatemala

O. Pérez¹, F. Hernández¹, A. Velasquez², C. Ramirez³, J. Tayun⁴, L. San Juan⁵, R. Duarte⁶, V. Azañon⁷, C. Martínez⁷, M. Melgar¹, A. Sacbaja⁸, y A. Merino⁹

Introducción

Los micronutrientes al igual que los macronutrientes son muy importantes en la nutrición de la caña de azúcar, pero hasta ahora no se han estudiado a nivel local y no se conoce si están limitando la producción de caña y azúcar en la región. Los micronutrientes cumplen funciones esenciales en procesos enzimáticos, de óxido-reducción, formación de clorofila y transporte de azúcares entre otros. Recientemente se ha encontrado que los micronutrientes desempeñan papeles importantes en la resistencia de las plantas al estrés biótico y abiótico (Kirkby y Römheld, 2007).

A nivel global, las deficiencias de micronutrientes en la agricultura se están generalizando en muchos países según algunos autores debido a varias causas como el declinamiento de la fertilidad del suelo por el monocultivo, una mayor demanda de micronutrientes por prácticas agronómicas intensivas, por el uso de variedades nuevas de alto rendimiento, por el uso de fertilizantes concentrados con mayor pureza y por la expansión del cultivo en zonas marginales de baja fertilidad natural (Meyer et al., 1999; Fageria et al., 2002). Entre todos los micronutrientes, el B y el Zn se reportan como los nutrientes más deficitarios en los suelos de la mayoría de países (Fageria et al., 2002; Mellis et al., 2008), aunque las respuestas a estos micronutrientes han sido muy variables.

En Guatemala, en los dos últimos años se han iniciado algunas aplicaciones comerciales de micronutrientes especialmente de B y Zn con resultados inciertos y hay bastante interés en el tema en los diferentes ingenios. Los suelos de la zona cañera del país son suelos derivados de ceniza volcánica donde predominan los suelos Molisoles, Andisoles, Entisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Alfisoles. Los objetivos del presente trabajo fueron: determinar la respuesta a las aplicaciones de B y Zn en los distintos suelos dedicados al cultivo de caña de azúcar, estimar el nivel crítico en el suelo y determinar la efectividad de las aplicaciones foliares de B.

Metodología

Se establecieron 10 experimentos con la misma estructura básica de tratamientos diseñados para conocer la

respuesta del cultivo a B y Zn en distintos suelos de la zona cañera de Guatemala. Ocho de ellos se establecieron en el 2013 y dos fueron establecidos en el 2014. Cinco de los ocho primeros experimentos fueron continuados en un segundo ciclo para obtener datos de primera soca. Un experimento adicional con otra estructura de tratamientos fue establecido el 2014 en un semillero básico de caña de finca Belén de ingenio La Unión.

En la **Tabla 1** se presentan las principales características químicas de los suelos de los sitios estudiados incluyendo el sitio del ensayo exploratorio adicional (con asterisco están marcados los sitios que se evaluaron por dos años (plantía y soca1).

La estructura básica de tratamientos consistió en la evaluación de tres niveles de B y dos tratamientos con Zn y un tratamiento control sin aplicación. Los tres tratamientos con B fueron dos aplicados al suelo en dosis de 2 y 4 kg de B ha⁻¹ y uno aplicado en forma foliar en dosis 1.025 gr de B l⁻¹ de agua. Los dos tratamientos con Zn fueron aplicaciones al suelo en dosis de 5 y 10 kg de Zn ha⁻¹. En el ensayo adicional de finca Belén se evaluaron niveles crecientes de B aplicados al suelo (0, 2, 4 y 8 kg de B ha⁻¹) y aplicaciones foliares con una y dos aplicaciones en las mismas dosis citadas. En ambos tipos de experimentos se evaluaron otros tratamientos que incluyeron la evaluación de otros micronutrientes y combinaciones entre ellos que no se reportan en este trabajo.

El diseño experimental utilizado en la red de 10 ensayos fue bloques al azar con 4 repeticiones por sitio con unidades experimentales de cinco surcos y 10 m de largo. En el ensayo exploratorio adicional el diseño experimental utilizado fue bloques al azar con tres repeticiones con unidades experimentales de 3 surcos por 8 m de largo.

Las fuentes utilizadas en todos los ensayos para B fue Solubor (20.5% B) y para Zn, sulfato de zinc (22% Zn). La aplicación al suelo de estos fertilizantes fue hecha en solución diluyendo la dosis en el equivalente de 200 l de agua por hectárea y aplicados en el fondo del surco previo a la siembra con excepción del ensayo adicional de finca Belén donde los productos fueron aplicados en forma directa sin diluir, siempre aplicados en el fondo del surco al momento de la siembra. En los cinco ensayos que

¹ Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar-Cengicaña

² Ingenio Tzulá

³ Ingenio Palo Gordo

⁴ Ingenio Magdalena

⁵ Ingenio Madre Tierra

⁶ Ingenio Pantaleón

⁷ Ingenio La Unión

⁸ Facultad de Agronomía-USAC

⁹ Universidad de Santiago de Compostela, España

Tabla 1. Sitios y características químicas de los suelos evaluados.

Finca ²	Suelo	Variedad sembrada ¹	Textura	pH	MO %	B ppm	Zn, ppm	
							DTPA	Mehlich 1
Belén, La Unión	Andisol	V2	AF	5.8	3.4	0.06		2.5
Buena Vista, Tululá	Vertisol	V1	FAr	6.0	2.5	0.4		3.3
Virginia, La Unión	Molisol	V1	F	6.8	3.4	0.38		2.2
El Retiro, Madre Tierra*	Entisol	V2	AF	6.3	2.0	0.06	3.7	5.6
Botón Blanco, Magdalena	Entisol	V1	FA	6.5	2.5	0.39	2.8	4.8
Xoluta, Magdalena*	Alfisol	V2	FAr	6.8	1.9	0.44	8.8	17.2
La Libertad, Palo Gordo*	Andisol	V2	FA	6.3	7.7	0.06	0.4	2.0
Pachonté, Palo Gordo	Inceptisol	V3	FAr	5.7	3.8	0.22	1.4	3.9
Limonés, Pantaleón*	Molisol	V1	FA	6.3	5.6	0.12	1.9	2.6
Santa Margarita, Tululá	Vertisol	V1	Ar	6.7	2.7	0.02	3.3	4.3
Margaritas, La Unión*	Andisol	V1	FA	6.0	6.0	0.20	0.8	1.7

¹ V1: CP72-2086; V2: CP73-1547; V3: Mex79-431

² Fincas con "*" fueron evaluados por dos años

se les dio continuidad en un segundo año de evaluación la aplicación fue dirigida en la banda del surco de caña entre los 30-50 ddc, siempre en solución y en las mismas dosis y productos.

En los tratamientos aplicados en forma foliar, (20.5% B) se asperjó una solución de Solubor en la dosis indicada en 200 l de agua. Se hicieron dos aplicaciones foliares que se realizaron la primera entre los 70-90 días después de la siembra (dds) o corte (ddc) y la segunda aplicación fue realizada entre los 120-150 dds/ddc. En el ensayo adicional de finca Belén las aplicaciones foliares fueron realizadas en el tratamiento de una aplicación a los 70 dds y en el tratamiento de dos aplicaciones la primera fue realizada a los 70 dds y la segunda a los 120 dds. La fertilización base en todos los ensayos consistió en la aplicación de NPKS el cual constituyó el control o testigo solo variando en los casos de campos aplicados con vinaza (finca Limonés de Pantaleón y Santa Margarita de Tululá) donde no se aplicó K por los altos contenidos en el suelo.

Previo al corte se realizó un muestreo para determinar el porcentaje de sacarosa en cada uno de los tratamientos extrayendo aleatoriamente cinco tallos molederos en cada una de las unidades experimentales. La edad de corte de los experimentos varió de 10 a 12 meses. El corte y pesado fue de la totalidad de los tallos producidos en cada unidad experimental expresando el rendimiento de caña finalmente en toneladas métricas ha⁻¹. En el caso del ensayo adicional de finca Belén el corte se hizo a la edad de 6 meses cortando al punto natural de quiebre de cada tallo, con mediciones de altura y población de tallos.

El análisis estadístico consistió en análisis de varianza individual y combinado por años en los sitios con dos años de evaluación, comparación de medias de interés a través de contrastes ($p < 0.05$) y análisis de regresión. También se realizó un análisis gráfico para la definición del nivel crítico según la metodología de Cate y Nelson (1965).

Resultados y discusión

Respuesta a Boro

En la **Tabla 2** se presentan las medias del rendimiento de caña en toneladas de caña por hectárea y las comparaciones estadísticas entre ellas como respuesta a la aplicación de B en los 10 sitios evaluados.

En la **Tabla 2** se observa que en cinco de los 10 sitios evaluados (El Retiro, La Libertad, Limonés, Buena Vista y Margaritas) se encontraron respuestas positivas en forma significativa ($P:0.05$) de algunos de los tratamientos con B respecto al control. En la finca El Retiro se encontró un incremento promedio (plantía y soca1) hasta del 20% más de peso de caña con el tratamiento de B en forma foliar e incrementos del orden del 15% con las aplicaciones al suelo. La alta respuesta del cultivo a la aplicación de B en este sitio fue congruente con el bajo análisis de B del suelo (0.06 ppm), con el bajo contenido de materia orgánica (2.0%) y por la textura arenosa característico de los suelos Entisoles de la región.

En la finca La Libertad el incremento promedio observado en dos años en el rendimiento de caña fue del 7% más con la aplicación de 2 kg de B al suelo cuyo efecto fue estadísticamente significativo. En este sitio también se obtuvo respuesta positiva a la aplicación de B en forma foliar. Al igual que en el primer sitio, la respuesta observada fue congruente con el bajo nivel de B en este suelo que fue de 0.06 ppm. El menor incremento relativo obtenido con la aplicación de B en la finca La Libertad con respecto al obtenido en la finca El Retiro (toda vez que tenían los mismos valores bajos de B), podría ser debido al alto contenido de MO del suelo de la Libertad (7.7%) el cual es una fuente importante de B. Los contenidos altos de materia orgánica son comunes en los suelos Andisoles de Guatemala como los de finca La Libertad. En la finca Limonés (suelo Molisol) la aplicación de B (4 kg ha⁻¹ al

Tabla 2. Rendimiento promedio de caña (TCH, toneladas métricas ha⁻¹) según la aplicación de B al suelo y foliar en 10 sitios.

Tratamiento	-- Medias de dos ciclos de cultivo (caña planta y soca 1) --						----- Medias de caña planta -----			
	El Retiro	La Libertad	Limonas	Margaritas	Xoluta	Virginia	Buena Vista	Sta Margarita	Botón Blanco	Pachonte
Control	107 b	133 b	201 b	134 a	152 a	170 ab	84 b	132 b	137 a	126 a
2 kg B	123 ab	142 a	201 b	137 a	151 a	170 ab	91 a	140 ab	145 a	126 a
4 kg B	122 ab	136 ab	213 a	132 a	144 a	164 b	78 c	147 a	143 a	129 a
B Foliar	129 a	138 ab	206 ab	133 a	143 a	189 a	92 a	147 a		130 a
B y Mo del suelo										
B, ppm	0.06	0.06	0.12	0.20	0.44	0.4	0.4	0.02	0.39	0.22
MO, %	2.0	7.7	5.6	6.0	2.0	3.4	2.5	2.7	2.0	3.8

Medias con igual letra no tienen diferencia significativa (p <= 0.05)

suelo) incrementó en promedio de dos ciclos (plántula y soca 1) en forma significativa 6% más el tonelaje de caña con respecto al control. Esta respuesta corresponde con el contenido bajo de B en este sitio con 0.12 ppm. En caña planta se observó la misma tendencia de respuesta aunque en ese entonces no se alcanzaron diferencias estadísticamente significativas (Pérez et al., 2014).

Los otros suelos que presentaron incrementos significativos con las aplicaciones de B fueron los dos suelos Vertisoles evaluados (Santa Margarita y Buena Vista). En la finca Santa Margarita con un contenido muy bajo de B (0.02 ppm) se obtuvieron incrementos del 11% más de caña con el tratamiento de B foliar y con el tratamiento de 4 kg de B aplicado al suelo. Por su parte el otro suelo Vertisol de la finca Buena Vista con 0.4 ppm de B en el suelo presentó respuesta positiva a la aplicación foliar de este elemento con un incremento de 10% en forma significativa y con similar efecto que la aplicación de 2 kg de B ha⁻¹ al suelo. En este último suelo fue evidente que la aplicación de 4 kg de B produjo merma en el rendimiento de caña.

En la finca Virginia que es un suelo Molisol de textura franca de alta fertilidad la aplicación al suelo de 4 kg de B ha⁻¹ redujo el rendimiento de caña, pero no así cuando la aplicación de B fue realizada en forma foliar que tuvo una respuesta positiva a la aplicación aunque no significativa con respecto al control. La reducción del rendimiento de caña al pasar de aplicar 2 a 4 kg de B ha⁻¹ se observó en forma consistente en siete de los 10 experimentos (**Tabla 2**), por lo que es muy importante tener en cuenta no aplicar más de 2 kg de B ha⁻¹ para evitar riesgos de mermar la producción.

En los sitios restantes (Margaritas, Xoluta, Botón Blanco y Pachonte) no se observaron efectos del B en la producción en ninguna de las dosis y formas de aplicación y los resultados fueron variables y no significativos. La no respuesta del cultivo al B en estos ensayos estaría relacionada a los contenidos medios y adecuados de B

del suelo que en todos los casos estuvieron iguales o arriba de 0.20 ppm (Pérez et al., 2014).

En cuanto a la variable concentración de azúcar (% sacarosa), los análisis estadísticos indicaron que las aplicaciones de B tanto al suelo como en forma foliar no tuvieron efectos significativos en esta variable.

Respuesta a Zinc

En la **Tabla 3** se presentan las medias del rendimiento de caña en toneladas de caña por hectárea y las comparaciones estadísticas entre ellas como respuesta a la aplicación de Zn en los 10 sitios evaluados.

En la **Tabla 3** se observa que solo en dos sitios de 10 (Santa Margarita y Botón Blanco) se encontraron respuestas positivas en forma significativa (P:0.05) a las aplicaciones de Zn. Uno de estos suelos es un Vertisol de la finca Santa Margarita y el otro es un Entisol Arenoso de la finca Botón Blanco. En ambos sitios se tuvo un incremento medio de 15% de caña con la aplicación de 10 kg de Zn ha⁻¹, y entre 10 y 14% de incremento con la aplicación de 2 kg de Zn para Santa Margarita y Botón Blanco respectivamente, indicando la consistencia de los resultados del efecto positivo del Zn en estos dos suelos. Los efectos significativos del Zn en estos dos sitios no concordaron en forma directa con los niveles de Zn presentes en el suelo ya que los niveles de Zn en ambos sitios eran de 3.3 y 2.8 ppm de Zn (DTPA) para Santa Margarita y Botón Blanco respectivamente, los cuales se consideran adecuados. Sin embargo es importante indicar que ambos suelos se caracterizan por tener bajos contenidos de MO y por ser contrastantes en su textura, uno es Arcilloso (Santa Margarita) y el otro es Arenoso (Botón Blanco) y similares en pH (6.7 y 6.5). En la finca La Libertad con contenido bajo de Zn en el suelo (0.37 ppm) la aplicación de Zn no alcanzó significancia estadística, pero se observa que en promedio los dos tratamientos aplicados superaron al Control sin aplicación en 2 y 7.6%. Este sitio en contraposición con los dos primeros suelos tenía un alto contenido de MO (7.7%) y un pH similar (6.3).

Tabla 3. Rendimiento promedio de caña (TCH, toneladas métricas ha⁻¹) según dos niveles de Zn aplicados al suelo en 10 sitios.

Tratamiento	-- Medias de dos ciclos de cultivo (caña planta y soca 1) --						----- Medias de caña planta -----			
	El Retiro	La Libertad	Limonas	Margaritas	Xoluta	Virginia	Buena Vista	Sta Margarita	Botón Blanco	Pachonte
Control	107 a	133 a	201 a	134 a	152 a	170 a	84 a	132 b	137 b	126 a
5 kg Zn	98 a	130 a	201 a	139 a	150 a	192 a	89 a	145 a	156 ab	123 a
10 kg Zn	112 a	140 a	204 a	141 a	164 a	174 a	86 a	151 a	159 a	128 a
Zn, MO y pH del suelo										
ppm	3.60	0.37	1.87	0.79	9.0	2.2	3.3	3.3	2.8	1.42
MO, %	2.0	7.7	5.6	6.0	2.0	3.4	2.5	2.7	2.0	3.8
pH, agua	6.3	6.3	6.3	6.0	6.8	6.8	6.0	6.7	6.5	5.7

Medias con igual letra no tienen diferencia significativa (p <= 0.05)

Es interesante observar que independientemente de la respuesta en términos estadísticos, en todos los casos se observa que la aplicación de la dosis más alta de Zn (10 kg ha⁻¹) el rendimiento de caña promedio siempre fue mayor al rendimiento de caña obtenido con el tratamiento control, lo que no sucedió con la aplicación de la dosis baja (5 kg) en donde se observa que el efecto promedio de Zn fue variable. Estos resultados indican que probablemente se necesiten aplicar dosis más altas de Zn en estos suelos de los aquí evaluados y la necesidad de hacer más investigación incluyendo además de las dosis, fuentes y formas más eficientes de aplicación, incluyendo las épocas de aplicación de este elemento (Pérez et al., 2014).

Dosis de B en ensayo de semillero

Los resultados de aplicaciones de B, indicaron efectos estadísticamente significativos de las dosis de B en el peso de la caña, congruentes con los bajos contenidos de B en el suelo en este sitio (0.06 ppm). La respuesta promedio observada y la tendencia de la respuesta (regresión cuadrática) del peso de caña (semilla de caña), población (miles de tallos ha⁻¹) y altura de tallos (cm) según las dosis de B aplicadas se presentan en la **Figura 1**.

Se observa que al aumentar las dosis de B el rendimiento de caña tiene tendencia cuadrática. El rendimiento más alto de caña observado se obtuvo con la aplicación de 2 kg de B ha⁻¹ con un incremento del 16% más de peso de semilla de caña, el cual coincide y es congruente con los resultados del primer grupo de experimentos analizados. De acuerdo al modelo de regresión cuadrático se estima que aplicaciones por arriba de 3.0 kg de B ha⁻¹ disminuyen los rendimientos de caña. De acuerdo al modelo regresión cuadrático se estima que la aplicación de 8 kg de B ha⁻¹ redujo el rendimiento de caña en 16% en este suelo Arenoso. La reducción del rendimiento de caña con el aumento de las dosis de B se debería principalmente a la reducción del número de tallos por área por fitotoxicidad de B y a una reducción del crecimiento de la caña. Franco et al., 2011 en suelos de Brasil reporta disminución de los rendimientos en caña de azúcar.

En cuanto a las aplicaciones foliares en este experimento se encontró que el tratamiento con dos aplicaciones de B (70 y 120 dds) fue superior al tratamiento que llevo una sola aplicación (70 dds).

Los rendimientos de semilla de caña fueron de 74.9 y 63.9 t ha⁻¹, para dos y una aplicación respectivamente. De la misma manera se verificó que la aplicación foliar fue efectiva al igual que las aplicaciones al suelo.

Nivel crítico de disponibilidad de B

En la **Figura 2** se presenta en forma gráfica la relación del B extraído (agua caliente) y el rendimiento relativo de caña en porcentaje (RR %) de acuerdo al método gráfico de Cate y Nelson.

En la **Figura 2** se observa que el 92% de los datos se ubicaron en los dos cuadrantes positivos opuestos generando un valor crítico preliminar de 0.20 ppm de B asociado con el 95% de los RR. Se observa que todos los suelos con valores de B menores a este valor, todos respondieron positiva y significativamente a las aplicaciones de este elemento por lo que el valor de 0.20 discrimina los suelos con alta probabilidad de respuesta a la aplicación de B de los que no se esperan respuestas. Aunque es importante mencionar que hubo un sitio con un valor de 0.43 ppm de B y que presentó respuesta significativa a su aplicación, tratándose de un suelo Vertisol con bajo contenido de MO (finca Buena Vista), resultado que sugiere más investigación puntual para estos suelos. El valor de 0.20 ppm de B concuerda con los valores críticos utilizados en Brasil y otros países para caña de azúcar (Raij et al., 1996).

Conclusiones

El B incrementó el rendimiento de caña en forma significativa en cinco de los 10 sitios estudiados. Las respuestas estuvieron relacionadas directamente con el nivel de B en el suelo y las magnitudes de respuesta estuvieron relacionados con el orden de suelos. Se observaron incrementos de 6-7% en Andisoles y Molisoles, 10% en Vertisoles y de 20% en un Entisol Arenoso.

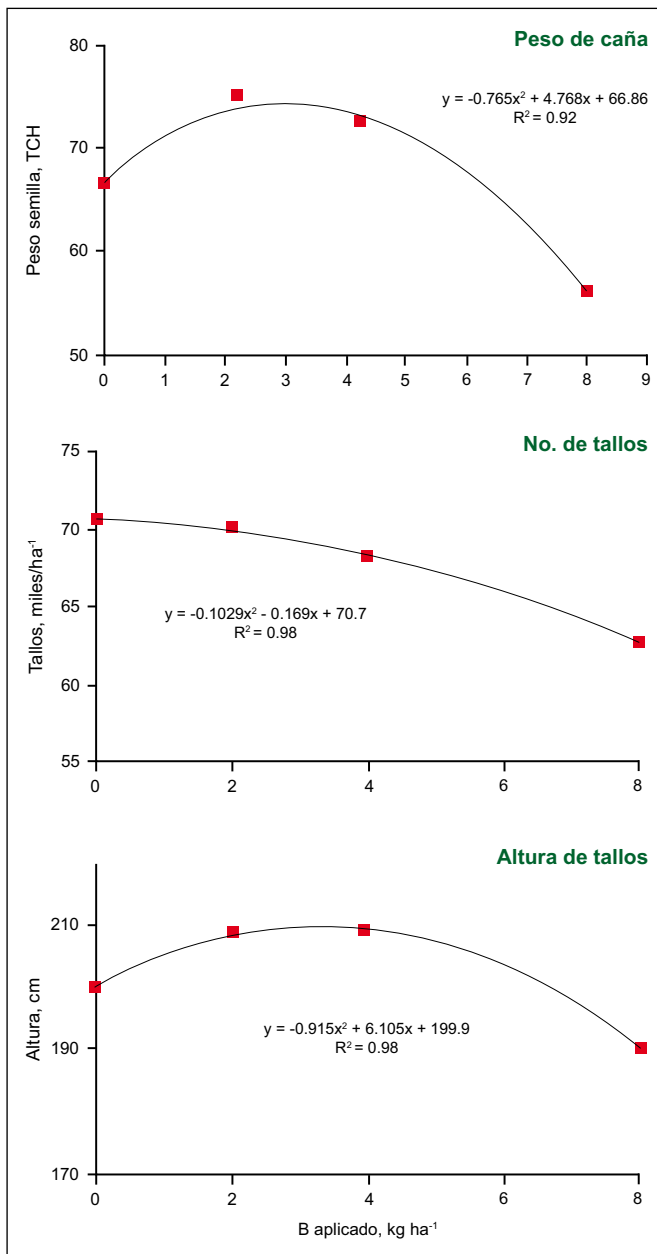


Figura 1. Respuesta observada y estimada del peso de caña (semilla), población y altura de tallos a las dosis crecientes de B aplicadas al suelo

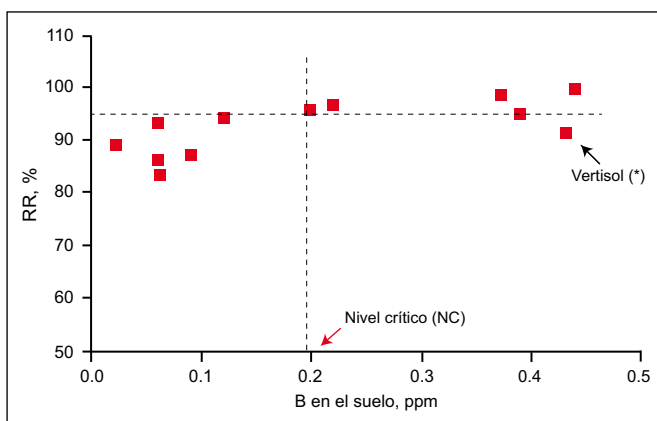


Figura 2. Nivel crítico de B en el suelo (agua caliente) asociado al 95% de RR en 12 sitios.

La aplicación de B en forma foliar fue efectiva en corregir la deficiencia de B igual que las aplicaciones al suelo de este elemento y se encontró que dos aplicaciones fueron más efectivas que una aplicación

Se determinó que niveles de B en el suelo, menores a 0.20 ppm (agua caliente) se esperan respuestas a las aplicaciones de este elemento.

Se encontró que dosis de B arriba de 2 kg ha⁻¹ aplicadas al suelo en el fondo del surco hay riesgos de pérdidas en la producción.

El Zn incrementó el rendimiento de caña en forma significativa en dos sitios de 10. Estos fueron en un suelo Entisol Arenoso y el otro en un Vertisol con alto contenido de Arcilla. Los incrementos fueron del orden de 15% más de tonelaje de caña con la aplicación de 10 kg de Zn ha⁻¹. No se encontró una relación directa entre el contenido de Zn del suelo y las respuestas observadas.

El B y el Zn no influyeron significativamente en la variación de la concentración de azúcar

Bibliografía

- Cate, J.R.B., y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. International Soil Testing Series, Technical Bulletin 1. Raleigh. Agricultural Experiment Station, North Carolina State University.
- Fageria, N.K., V.C. Baligar y R.B. Clark. 2002. Micronutrients in Crop Production. Advances in Agronomy. Vol 77. pp 185-268.
- Franco, H.C.J., E. Marian, A.C. Vitti, C.E. Faroni, R. Otto y P.C. Trivelin. 2011. Sugar Tech 13(1):86-95.
- Meyer, J.H., A.W. Schumann, B.L. Schroeder, R.A. Wood, y A.L. Rampersad. 1999. Review of research on the micronutrients requirement of sugarcane in southern Africa. In Proc. S Afr Sug Technol ASS. pp 63-70.
- Kirkby, E.A., y V. Römheld. 2007. Micronutrients in plant physiology. Functions, uptake and mobility. Proceedings 543. The international fertilizer society, United Kingdom.
- Mellis, E.V., J.A. Quaggio, y L.A. Junqueira. 2008. [Enlínea]. Zinc Fact Sheet: Sugarcane. http://www.zinc.org/wp-content/uploads/sites/4/2015/04/pdf_Sugarcane-fact-sheet.pdf [Consultado 29/08/2014]
- Pérez, O.F., C. Hernández, L. Ramírez, J. Ampudia, L. Tayun, R. San Juan, R. Duarte, V. Azañon, C. Martínez, A. Merino, A. Sacbaja, y M. Melgar. 2014. Respuesta exploratoria a las aplicaciones de B y Zn en suelos derivados de ceniza volcánica de Guatemala. Avances. En: Memoria de Presentación de Resultados de Investigación Zafra 2012-2013. Cengicaña, Guatemala.
- Raij, B. Van, H. Cantarella, J.A. Quaggio, y A.M.C. Furlani. 1996. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. IAC, Campinas (Boletín Técnico 100).

Cursos y Simposios

1. Fertilizer Latino Americano 2016

Organiza : Argus FMB, CRU
Lugar : Cartagena, Colombia
Fecha : Enero, 27-29, 2016
Información : fmb.conferences@argusmedia.com
<http://argusmedia.com/Spanish/Events/Argus-Events/Americas/FLA/Home>

2. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Organiza : AACS-UNRC
Lugar : Río Cuarto, Córdoba, Argentina
Fecha : Junio 27-Julio 1, 2016
Información : <http://congresosuelo2016.org.ar>

3. XII Conferencia Internacional de Agricultura de Precisión

Organiza : ISPA-IPNI-PrecisionAg
Lugar : Union Station, St. Louis, MO, EE.UU.
Fecha : Julio 31-Agosto 3, 2016
Información : <https://www.ispag.org/icpa>

4. Conferencia InfoAg 2016

Organiza : IPNI-PrecisionAg
Lugar : Union Station, St. Louis, MO, EE.UU.
Fecha : Agosto, 2-4, 2016
Información : <http://www.infoag.org>

5. III Simposio Nacional de Sorgo – I Conferencia Internacional de Sorgo

Organiza : AIANBA
Lugar : Pergamino, Buenos Aires, Argentina
Fecha : Agosto, 3-4, 2016
Información : <http://simposiodesorgo.com.ar>

6. Simposio Brasileño de Educación del Suelo

Organiza : SBCS
Lugar : Sao Paulo, SP, Brasil
Fecha : Septiembre, 7-10, 2016
Información : <http://www.sbc.org.br>
<http://viiiisbes.fflch.usp.br>

7. 13^{avo.} Congreso Internacional de Cítricos

Organiza : IAC-IAPAR
Lugar : Foz de Iguazú, PR, Brasil
Fecha : Septiembre, 18-23, 2016
Información : icc2016@fbeventos.com
<http://www.icc2016.com>

8. XVIII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo

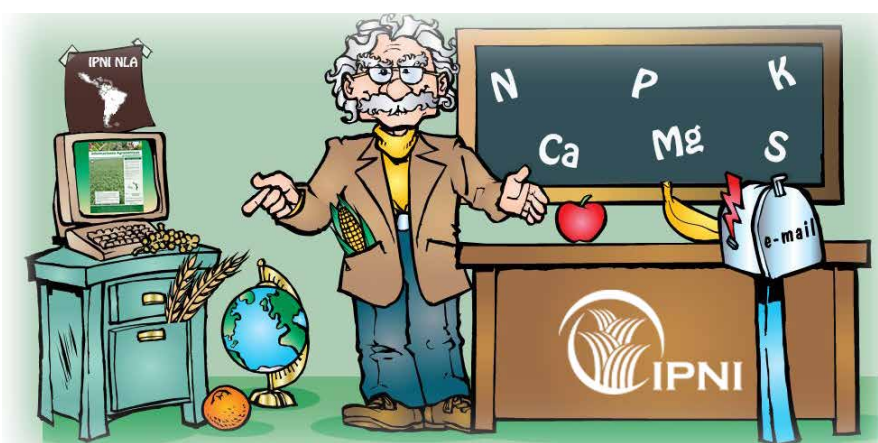
Organiza : SCCS
Lugar : Villa de Leyva – Colombia
Fecha : Octubre, 5-8, 2016
Información : oficinappal@sccsuelo.org
<http://www.sccsuelo.org>

9. XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SECS
Lugar : Quito, Ecuador
Fecha : Octubre, 24-28, 2016
Información : info@secsuelo.org
<http://www.secsuelo.org>

10. 7^{ma.} Conferencia de la Iniciativa Internacional de Nitrógeno

Organiza : Universidad de Melbourne
Lugar : Melbourne, Australia
Fecha : Diciembre, 4-8, 2016
Información : <http://www.ini2016.com>



Publicaciones Disponibles IPNI-Norte de Latinoamérica

Título de la Publicación	Costo (U\$S)
<p>Manual de Arroz. Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes: Esta publicación contiene información que permite desarrollar estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales.</p> <p>Guía Práctica para el Manejo de Nutrientes en Arroz: Contiene una discusión concisa y muy práctica de las estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. Excelente herramienta de apoyo en el contacto diario con los agricultores.</p>	45.00
<p>Palma de Aceite. Manejo para Rendimientos Altos y Sostenidos: La palma de aceite es uno de los cultivos con mayor expectativa de crecimiento a nivel mundial, existe una gran demanda entre los palmicultores y agrónomos por conocimientos y publicaciones sobre su manejo adecuado.</p>	45.00
<p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.</p> <p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.</p> <p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.</p>	45.00
<p>4R de la Nutrición de Plantas. El concepto de los 4R, los 4 Requisitos, del "MANEJO RESPONSABLE DE NUTRIENTES" es un enfoque nuevo e innovador para las mejores prácticas de manejo de los fertilizantes adoptado por la industria mundial de fertilizantes. Este enfoque considera dimensiones económicas, sociales y ambientales del manejo de nutrientes y es esencial para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El concepto es simple—aplicar la fuente correcta de nutrientes, en la dosis, el momento y el lugar correctos—pero la implementación usa el conocimiento en forma intensiva y es específica para cada sitio.</p>	40.00
<p>Manual Internacional de Fertilidad de Suelos: Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo</p>	15.00
<p>Uso Eficiente de Nutrientes: Esta publicación resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes.</p>	15.00
<p>Nutrición y Fertilización del Mango: Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.</p>	15.00
<p>Nutrición de la Caña de Azúcar: Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña.</p>	8.00
<p>Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en http://nla.ipni.net</p>	