

BORO, UN NUTRIENTE QUE CREA INCERTIDUMBRE: EXPERIENCIAS DE FERTILIZACIÓN EN LA REGIÓN PAMPEANA

**Jorgelina C. Montoya¹, Alfredo Bono¹, Mirian Barraco² y
Martín Diaz-Zorita³**

¹Estación Experimental Agropecuaria Anguil, ²Estación Experimental Agropecuaria General Villegas, ³ Cátedra de Cerealicultura (FAUBA) y Nitragin Argentina S.A.

RESUMEN

El boro es uno de los micronutrientes esenciales más importantes para las plantas. Si bien está involucrado en diversas funciones fisiológicas, aún no se conoce exactamente su función en los mecanismos de los cuales participa. Los rangos de concentración de suficiencia y toxicidad son muy estrechos y variables entre especies. La deficiencia de B en cultivos es un problema ampliamente reconocido en diferentes ambientes agropecuarios de la región pampeana. Existe en rocas y minerales, adsorbido a los coloides y como ácido bórico en la solución del suelo, con alta vulnerabilidad a lixiviar. Las deficiencias de B son frecuentes en suelos con pH > 6,5; ya que es adsorbido. Los contenidos de MO influyen la disponibilidad de B, es considerada la principal fuente a través de la mineralización. Aunque, la afinidad de la MO por el B puede afectar su concentración en la solución del suelo, estableciendo un equilibrio entre el B en solución y el adsorbido, estando la mayor parte adsorbida. Las plantas responden al B en solución. Se cuenta con una diversidad de métodos analíticos en suelo y planta para su determinación; pero los métodos de diagnóstico no siempre son precisos o adecuados. El objetivo de esta monografía es analizar la información disponible referente a las metodologías de determinación de B, métodos de diagnóstico y respuestas de los cultivos a la fertilización boratada. El método de

extracción con agua caliente es el más utilizado aunque los métodos de diagnóstico basados en sus resultados no siempre son adecuados. Este método ha tenido ciertas modificaciones para mejorar la extracción, pero no se han realizado estudios profundos en cuanto a su correlación con las respuestas de los cultivos. Los métodos de diagnóstico basados en análisis de tejido vegetal reflejan el estado nutricional del cultivo, pero están condicionados por situaciones de estrés que podrían afectar la absorción del B por las plantas. En general abunda la información de respuestas positivas al agregado de este elemento en cultivos de girasol, tanto con aplicaciones foliares como al suelo. Algunos estudios muestran contribuciones significativas de la fertilización boratada sobre la producción de pasturas y cultivos tales como maíz.

INTRODUCCION

En esquemas agrícolas intensivos, la fertilización se ha convertido en una herramienta indispensable para lograr una producción sustentable. Si bien los nutrientes que en mayor medida limitan los rendimientos de los principales cultivos de la Región Pampeana son el nitrógeno y el fósforo, en los últimos años se ha comenzado a encontrar respuesta a la fertilización con azufre y micronutrientes como el boro. Ratto y Diggs (1990) realizaron el primer mapa de contenidos de B en suelos de la Pradera Pampeana (Figura 1) donde sólo algunos partidos del Sur de la provincia de Buenos Aires mostraron niveles por encima de 1 mg kg^{-1} , considerado el límite crítico para este nutriente.



Zonas	Niveles de B en Suelos Mínimos y Máximos mg kg⁻¹
1-A	0,6 - 0,8
1-B	0,3 - 0,8
1-C	0,4 - 0,6
2	0,8 - 1,2

Figura 1: Agrupación del área relevada según tipo de suelo y contenido de B disponible (Ratto, Diggs. 1990).

Sumado a los elementos minerales N, P, K, S, Ca y Mg, definidos como macronutrientes, las plantas requieren de otros

elementos que se denominan micronutrientes debido a las mínimas cantidades requeridas. El boro es uno de los micronutrientes esenciales más importantes. Los requerimientos de B por las plantas difieren dentro del reino vegetal. Es esencial para el crecimiento normal de monocotiledóneas, dicotiledóneas, coníferas, helechos y varias especies de diatomeas, pero no lo es para hongos y gran parte de las algas. Algunas gramíneas (ej. trigo, avena) tienen menores requerimientos que dicotiledóneas (ej. brócoli) y otras monocotiledóneas (ej. maíz) (Hu *et al.* 1996). Si bien el B está involucrado en diversas funciones fisiológicas, aún no se conoce exactamente su función en los mecanismos de los cuales participa (Marentes *et al.* 1997). Las principales funciones y efectos del B se resumen en la Figura 2 (Römheld, Marschner 1991).

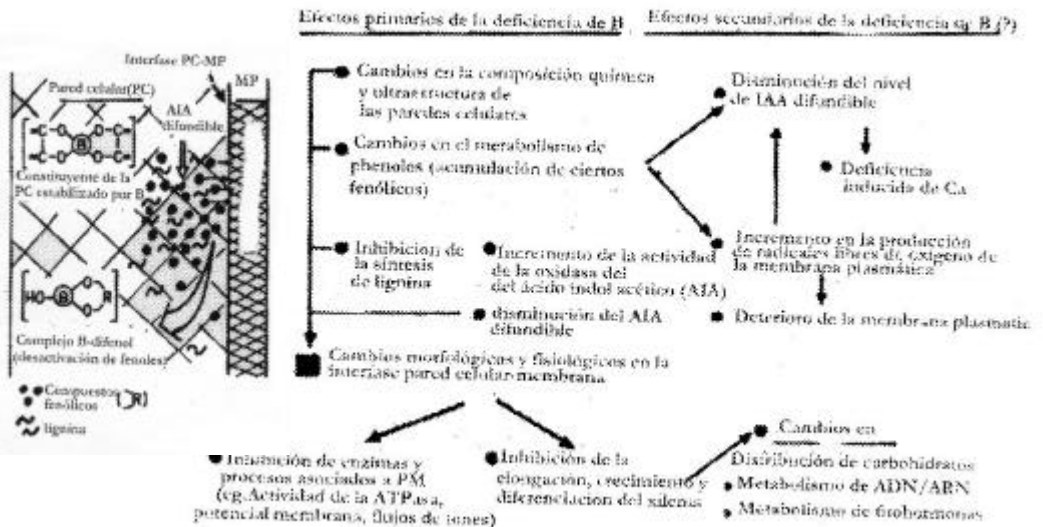


Figura 2: Funciones del B en el metabolismo de la pared celular, y efectos primarios y secundarios de las deficiencias de B.

Las deficiencias de B en cultivos susceptibles es un problema ampliamente reconocido en varios países. En Argentina, estudios de disponibilidad de micronutrientes en el área maicera núcleo mostraron que 30 % de los suelos considerados corresponden a la

categoría de “deficientes”, tomando un nivel crítico de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$, analizado mediante el método de extracción con CaCl_2 $0,02\text{M}$ y las lecturas por coloración con azometina-H (Ratto de Míguez, Fatta 1990). El material parental, pH y la materia orgánica (MO) influyen sobre la disponibilidad de B para las plantas.

La mayoría de los suelos contienen entre 2 y 200 mg kg^{-1} de B, pero el rango más frecuente es de 7 a 80 mg kg^{-1} . El B existe en dos formas principales en el suelo; en rocas y minerales: adsorbido sobre la superficie de arcillas y/o hidróxidos de Fe y Al combinados con la MO y como ácido bórico (B(OH)_3) no ionizado en la solución del suelo (Tisdale *et al.* 1985). Debido a la naturaleza no iónica del B disponible tiene alta vulnerabilidad a lixiviar, principalmente en suelos de textura gruesa o bien en zonas húmedas. Los excesos de B suelen ser comunes en zonas áridas y semiáridas. Por otro lado, la mayoría de los problemas de toxicidad resultan del uso de aguas de riego con elevadas concentraciones de este nutriente.

Las deficiencias de B son frecuentes en suelos con $\text{pH} > 6,5$. Muchos investigadores han sugerido que los contenidos de MO influyen sobre la disponibilidad de B para las plantas. Si bien la adsorción de B en la MO es insignificante, ésta es considerada la principal fuente de B disponible a través de la mineralización (Moraghan, Mascagni 1991).

Existe un equilibrio entre el B en solución y el adsorbido, estando la mayor parte en forma adsorbida. La concentración de equilibrio en la solución del suelo depende primeramente del B total (soluble + adsorbido), número de sitios de adsorción y contenido de humedad. Las plantas responden principalmente a la concentración de B en la solución (Keren, Bingham 1985). En suelos con altos niveles de B total, el agregado de MO puede conducir a menores concentraciones de B soluble y por lo tanto reducir su disponibilidad y por ende en algunos casos su toxicidad. Mientras que en suelos arenosos donde la lixiviación conduce a bajos niveles de B total, la adición de MO puede reducir las pérdidas por lavado y aumentar la nutrición de B a las plantas (Yermiyahu *et al.* 2001).

EVALUACIONES DE LOS CONTENIDOS DE BORO

Se dispone de diversos métodos analíticos en suelo y planta para la determinación de B. Pero los métodos de diagnóstico derivados no siempre son precisos o adecuados, obteniéndose respuestas aleatorias en los cultivos. El objetivo de este artículo es analizar y discutir la información disponible referente a las metodologías de determinación de B, métodos de diagnóstico y respuestas de los cultivos a la fertilización con B.

Debido a la variedad de factores que afectan la disponibilidad de B, es difícil definir valores precisos para el diagnóstico del estado nutricional de suelos y plantas. Se han desarrollado diversos métodos analíticos con el objetivo de su cuantificación y relación con los requerimientos de las plantas. Además, la preparación de las muestras, su manipuleo y los métodos de extracción pueden afectar la cantidad del micronutriente extraído del suelo y tejidos vegetales.

Métodos analíticos para determinación de B total

En general, los contenidos totales de micronutrientes no se hallan relacionados con la cantidad disponible, por lo que no son buenos indicadores para cubrir los requerimientos de las plantas (Ratto de Míguez 1982).

Métodos de extracción

La extracción es una etapa clave en la cuantificación de B en el suelo. Según los extractantes empleados dependerán las formas de B que se extraen del suelo y posteriormente se cuantificarán (Tabla 1). De acuerdo al objetivo del análisis deberá seleccionarse la metodología a emplear.

El procedimiento de extracción con agua caliente es la base de la mayoría de los análisis de suelo. Actualmente se usa una solución CaCl_2 0,01 a 0,02M en vez de agua, ya que provee una solución límpida, sin color. De esta manera no se necesita utilizar carbón para decolorar, lo cual incurría en errores ya que este compuesto adsorbe B durante la extracción. Las mayores

desventajas de este método es el tiempo que insume, requiere de equipamiento especializado para el reflujo de la muestra durante la extracción, y el procedimiento está limitado a la extracción de un solo elemento (Sims, Johnson 1991). Otros métodos de extracción han sido probados exitosamente, por ejemplo la solución Morgan (NaOAc-HOAc), manitol y CaCl_2 caliente (Johnson, Fixen 1990).

Ron *et al.* (1999), trabajando con suelos del SO bonaerense, usaron acetato de amonio por sus ventajas frente a la extracción con agua caliente: requiere menor tiempo, puede ser implementado como análisis de rutina, no es susceptible a pérdidas en forma de vapor, puede ser usado en suelos calcáreos y no calcáreos, y extrae más porque incluye una fracción de B adsorbido a los minerales.

Tabla 1: Métodos de extracción de B del suelo.

Método	Tipo de muestra	Características	Bibliografía
Agua caliente	Suelo, B extraíble (soluble en agua).	Extracción con agua caliente en un condensador con reflujo.	Berger, Truog 1939. Dible <i>et al.</i> 1954. Baker 1964. Wear 1965. Gupta 1967. Bingham 1982.
Extracto de saturación	Suelo, B en solución (para determinar niveles de toxicidad)	Se recoge con vacío el extracto de la pasta de suelo saturado. Se toma una alícuota que se lleva a sequedad, se destruye la MO flameándola. Se resuspende con HCl.	Bingham 1982.
Manitol-CaCl_2	Suelo, B en solución + adsorbido.	Se agita, centrifuga y filtra la suspensión. El extracto no presenta interferencias para su cuantificación con el método de Azometina-H.	Bingham 1982.

Métodos para la cuantificación

Luego de la etapa de extracción, se aplican técnicas analíticas que permitan cuantificar el nitrógeno. Se han utilizado distintas técnicas, las que se detallan a continuación para mejorar su precisión o para su simplificación.

El análisis directo sobre los extractos de suelo sin tratamientos previos es posible mediante la espectrometría de emisión en plasma de corriente directa, que resulta aceptable frente a las técnicas colorimétricas. Actualmente, para la determinación de nitrógeno se utiliza con la espectrometría de absorción atómica, con una precisión cercana al 1%. La exactitud de este método es del 1%. El análisis de activación neutrónica, que requiere un tiempo de 24 h, utilizando como extractante agua destilada (Ulrich 1991). La mayor limitante de este método es su costo.

Tabla 2: Métodos para la determinación de nitrógeno en suelos.

Método	Rango (mg kg ⁻¹)	Tipo de muestras	Bibliografía
Carmín (colorimétrico)	0,5-10	Extractos de suelo	Bingham 1982. Hatcher, Wilcox 1950.
Curcumina (colorimétrico)	0,1-2,0	Extractos de suelo y plantas	Bingham 1982. Naftel 1939. Dible <i>et al.</i> , 1954. Johnson, Ulrich 1959. Ratto de Míguez 1982. Jacson 1970.

Interferencias por NO₃⁻.

Curcumina modificado (colorimétrico)	0-1,0	Agua	Se compleja el H_3BO_3 con 2-etil-1,3-hexanediol (en $CHCl_3$), convirtiendo el complejo a un nuevo complejo de rosocian usando una solución de curcumina en ácido acético glacial y el agregado de H_2SO_4 concentrado. Procedimiento rápido y preciso.	Bingham 1982. Goldman <i>et al.</i> , 1975.
Quinalizarina (colorimétrico)			Interferencias por NO_3^- .	Ratto de Míguez 1982. Jacson 1970.
Azometina-H (colorimétrico)	0,5-10	Suelo, plantas, fertilizantes, lodos y agua.	Azometina-H forma un complejo coloreado con H_3BO_3 en solución acuosa. Rápido, confiable y más conveniente que los anteriores métodos.	Bingham 1982. Shanina <i>et al.</i> 1967. Basson <i>et al.</i> 1969. Wolf 1971, 1974. John <i>et al.</i> 1975.
Manitol (potenciométrico)	0,1-1,0	Agua	Determinación directa de B en solución acuosa. El H_3BO_3 más manitol se titula como ácido monobásico fuerte.	Bingham 1982. Foote 1932. Wilcox 1932.

Tetrafluoroborato (potenciométrico)	1,0-500 μg muestra ⁻¹	Agua	Las concentraciones suelen ser bajas por lo que la muestra es concentrada en resinas específicas de intercambio iónico, además se remueven interferencias de otros aniones. Se eluye el B formando BF_4^- y se realiza la determinación potenciométrica con electrodo específico.	Bingham 1982. Carlson, Paul 1968, 1969.
---	---	------	--	--

Métodos de extracción y determinación en tejidos vegetales

Una de las formas de extracción en planta consiste en reducir a cenizas secas (el B puede volatilizarse en cenizas húmedas). Para la extracción posterior del B de las cenizas se han usado H_2SO_4 0,36N; NaNO_3 0,16N o HCl 0,5N, variando en algunos casos los tiempos y temperaturas (Ratto de Míguez 1982). También se ha utilizado un método de digestión del material triturado con ácido nítrico concentrado (Ratto de Míguez *et al.* 1985). La determinación posterior normalmente se realiza por el método de azometina-H.

Deficiencia y Toxicidad

Las deficiencias de micronutrientes son ampliamente reconocidas pero no siempre fáciles de diagnosticar. Por un lado, incrementos de rendimiento como resultado de mejores prácticas culturales también pueden aumentar la incidencia de dichas deficiencias; y por otro lado, la disponibilidad de B decrece bajo condiciones de suelo seco, lo cual impide su accesibilidad para la absorción. Por lo tanto, el B disponible para las plantas debe considerarse un factor dinámico.

El B no es móvil en las plantas por lo que los síntomas de deficiencia se hacen visibles en los órganos en crecimiento. Se presenta clorosis y oscurecimiento de las hojas jóvenes, muerte de los puntos de crecimiento, desórdenes en el desarrollo de los ápices de crecimiento, lesiones en tallos y raíces y multiplicación en la división celular. Las hojas toman formas más simples y se observa encrespamiento (Jones 1991).

Los análisis de suelo y de planta han sido utilizados como diagnósticos. Mediante el método de extracción con agua caliente Keren y Bingham (1985) estudiaron los requerimientos de fertilización de algunas especies. Concluyeron que si los valores obtenidos son menores a los presentados en la Tabla 3, sería necesario fertilizar con B.

Tabla 3: Rangos de concentración de B extractable en suelo por el método de agua caliente (mg kg^{-1}) para diferentes especies.

Concentraciones mínimas para óptimo rendimiento		
< 0,10	0,10 - 0,50	0,50 - 1,00
Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	Tomate (<i>Lycopersicon lycopersicum</i>)	Trébol (<i>Trifolium sp.</i>)
Maíz (<i>Zea mays</i>)		Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
Avena (<i>Avena sativa</i>)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)		
Soja (<i>Glycine max</i>)		
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)		

De todos los micronutrientes el B presenta el rango más estrecho entre deficiencia y toxicidad. Dicho rango depende de las especies consideradas, e incluso hay variedades que presentan

diferente grado de susceptibilidad. Mass (1984) correlacionó los rendimientos con la concentración de B en una solución donde crecían diferentes especies, asumiendo que dicha concentración representaba el B disponible en la solución del suelo. Bajo esas condiciones definió rangos de concentración, por encima de los cuales se podía identificar reducción de rendimiento y/o aparición de síntomas de fitotoxicidad (Tabla 4).

Tabla 4: Umbrales superiores de concentración de B en solución acuosa (mg kg^{-1}) para diferentes especies.

Sensibles (0,3-1,0)	Semitolerantes (1,0- 4,0)	Tolerantes (4,0- 15,0)
Limón (<i>Citrus limon</i>)	Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	Avena (<i>Avena vulgare</i>)
	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Tomate (<i>Lycopersicon lycopersicum</i>)

La concentración de los micronutrientes en los tejidos vegetales refleja su disponibilidad en el suelo. La interpretación de los resultados requiere del conocimiento de las interacciones con otros nutrientes, edad fisiológica, tamaño y parte de la planta, especie e incluso en algunos casos la variedad, y otros parámetros relevantes. La interpretación de los resultados de los análisis generalmente se centra en la comparación de los valores obtenidos con un valor mínimo "crítico". Dicho valor ha sido definido de diversas maneras pero esencialmente es aquella concentración correlacionada con un 10 % de disminución del rendimiento; o aquella concentración a la cual se observan síntomas de deficiencia. En la Tabla 5 se detallan valores para algunos cultivos de interés en

diferentes momentos y órganos de las plantas muestreados (Jones *et al.* 1990).

Tabla 5: Valores críticos de B (mg kg⁻¹) para algunas especies de interés.

Especie	Momento	Órgano muestreado	Valor crítico (mg kg⁻¹)
Maíz	Formación de la espiga	Hoja de la espiga	10,0
	-	Hojas superiores	12,2
	5 semanas	Planta entera	1,8
Sorgo	35 días después de la siembra	Hojas intermedias	10,0
	Llenado de grano completo	Segunda hoja debajo de la panoja	5,0
Girasol	Floración	Hojas superiores maduras	34

Los análisis de planta podrían ser más útiles que los de suelo como herramienta de diagnóstico. Ya que si las plantas responden al B en solución, en condiciones de déficit hídrico pueden presentarse carencias en los tejidos vegetales, cuando en realidad el suelo no presenta dicha carencia sino que no se encuentra disponible en la solución.

En el desarrollo de los análisis de suelo, muchos investigadores han tratado de relacionar la concentración de un determinado micronutriente con algunas propiedades del suelo tales como pH, MO, capacidad de intercambio catiónico, contenido de arcilla y disponibilidad de otros nutrientes. La inclusión de los efectos de las variables del suelo debería ser parte necesaria del desarrollo de los métodos de diagnóstico (Mortvedt 1980). Por ejemplo, Martens

(1968) usando un análisis de regresión múltiple para demostrar el consumo de B por el maíz, obtuvo una mejor predicción cuando usó el dato de B extractable por el método de agua caliente y el pH del suelo. Resultados similares obtuvieron Ratto de Míguez *et. al.* (1996) trabajando en suelos clasificados como Argiudoles y Haplustoles Típicos; quienes mediante el método de extracción a ebullición con CaCl_2 y reacción colorimétrica con azometina-H encontraron que el B extraíble es un índice de disponibilidad para las plantas y la MO parece ser el reservorio principal del elemento en el conjunto de los suelos pampeanos. Además, el pH debería ser considerado como variable importante en la zona sudeste de la región pampeana por su posible influencia sobre la adsorción.

RESPUESTAS A LA FERTILIZACIÓN. EXPERIENCIAS EN LA REGIÓN PAMPEANA.

La fertilización con micronutrientes no es una práctica frecuente en los sistemas de producción de Argentina. Sin embargo, diferentes estudios de suelo indican que el B sería uno de los micronutrientes con probables respuestas económicas a la fertilización. En algunos casos, en cultivos de girasol, maíz y alfalfa se han observado síntomas de deficiencia. Sin embargo, los ensayos de fertilización en general han presentado respuestas aleatorias a la fertilización con B.

Girasol

El girasol es extremadamente sensible a la deficiencia de B; y su carencia puede afectar gravemente la producción. En zonas de cultivo españolas se han detectado problemas de deficiencias de B afectando económicamente la producción de girasol (Alba Ordoñez, Llanos Company 1990). Palmer *et al.* (1988) realizaron estudios donde el girasol crecía en un sustrato de arena de río y perlita con una solución nutritiva y 8 concentraciones de B en un rango desde deficiente ($0,004 \text{ mg l}^{-1}$) a supraóptimo ($3,95 \text{ mg l}^{-1}$). Las plantas que recibieron las dosis menores a $0,08 \text{ mg l}^{-1}$ presentaron síntomas de deficiencia. El área foliar, producción de materia seca, tamaño de

capítulo, el número y peso de los granos se vieron afectados por la carencia de B, hasta el punto de muerte del meristema apical.

En la región pampeana se realizaron 20 ensayos, en los cuales 85 % tuvo síntomas de deficiencia y en un 60 % hubo aumentos de producción de 9,8 a 45 % respecto al testigo sin fertilizar. Dichos incrementos no se correlacionaron con el contenido de B en suelos (método con CaCl_2 y azometina-H) ni en hojas (digestión ácida y azometina-H). Los máximos valores de B en suelo ($1,20 \text{ mg kg}^{-1}$) en general estuvieron asociados a lotes con los mayores contenidos de MO (5 %) (Diggs *et al.* 1988).

En Yugoslavia, se comparó un tratamiento control fertilizado con N, P y K (84, 90 y 70 kg ha^{-1} , respectivamente) con un tratamiento de iguales características más el agregado de B (10 kg ha^{-1}); el suelo tenía 35 mg kg^{-1} de B disponible (no se cita metodología). Obtuvieron incrementos de rendimiento en promedio de 12,4 % por sobre el testigo que produjo 2985 kg ha^{-1} (Milutovic, Stanojevic 1988). Estudios realizados en la región subhúmeda pampeana obtuvieron respuestas variables a la fertilización con B. Por ejemplo en la campaña 1998/99 se hubiese esperado que los suelos con los menores niveles de B tuvieran las mayores respuestas. Pero al igual a otros ensayos de fertilización y especialmente en los que se estudian los micronutrientes, no se puede arribar a conclusiones certeras sin considerar demás variables edafoclimáticas que condicionan las respuestas (Tabla 6, Figura 3) (Bono *et al.* 1999). En cambio en la campaña 1999/2000 hubo respuestas significativas cuando las mezclas de fertilizantes contenían B, alcanzando incrementos de 500 a 800 kg ha^{-1} en suelos con $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de B disponible (Bono *et al.* 2000a).

Tabla 6: Tratamientos de fertilización con B ensayados en la campaña 1998/99 en la región subhúmeda pampeana.

Tratamiento	N	P	B [†]
	(kg ha ⁻¹)		
Testigo	-	-	-
N + P	46	12	
N + P + B1	46	12	0,5s
N + P+B2	46	12	0,5s + 0,5f

[†] s: sólido en la línea a la siembra. f. foliar en estado de estrella.

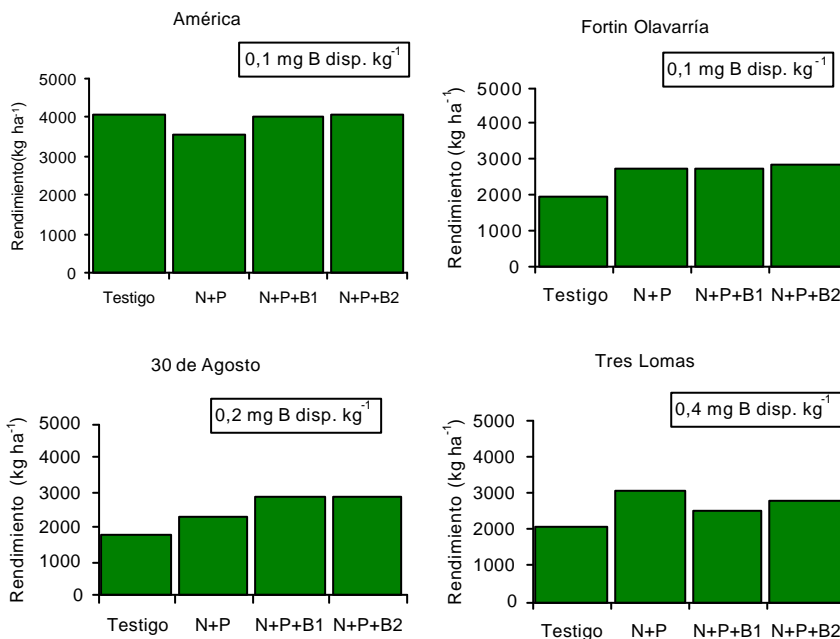


Figura 3. Rendimiento en grano de girasol en la zona subhúmeda de la región pampeana durante la campaña 1998/99.

González Fernández *et al.* (1985) concluyeron que el análisis de hoja (reducido a ceniza seca a 470 °C y disolución con HCl 0,1N) fue un método eficaz y fiable para evaluar el estado nutricional de girasol. En cambio, el método de B soluble en suelo (método de extracción con agua caliente) tuvo poca sensibilidad. Por otro lado, con valores superiores a 0,26 mg kg⁻¹ no debería haber deficiencias, sobre todo si la disponibilidad de agua no fuese limitante. La fertilización foliar fue adecuada para corregir deficiencias cuando los valores en hoja fueron inferiores a 34 mg kg⁻¹.

El girasol es sensible a los suelos ácidos. Pero, el B está se encuentra menos disponible a valores de pH altos. Respecto a este tema, Quaggio *et al.* (1985) encontraron que el encalado aumentó la eficiencia en el consumo de boro. Además, usaron ecuaciones de regresión para estimar el rendimiento; y cuando se consideró el pH del suelo y la concentración de B en hojas se obtuvo un coeficiente de determinación (R²) de 0,93; y al considerar el P el R² creció a 0,96.

El girasol es una planta particularmente sensible a las deficiencias de B, característica que ha sido empleada para el análisis de niveles edáficos de este elemento a través de la evaluación de síntomas visuales de deficiencia y toxicidad. Pero sólo recientemente, y en sistemas intensivos de producción, se ha reconocido a esta deficiencia con una relevancia económica importante. Las deficiencias se manifiestan al emerger las plántulas (fallas en el desarrollo y expansión de cotiledones), al aparecer las hojas (pequeñas y deformadas, con manchas pardo-rojizas) y durante el desarrollo del cultivo (rotura del tallo y caída de los capítulos, mal llenado de los capítulos, adelantamiento de la madurez, etc.). El sistema radical de las plantas también es afectado, la elongación de las raíces se detiene en condiciones de deficiencias severas de este nutriente. Desde el punto de vista del rendimiento, el desprendimiento de los capítulos (síntoma de “corte de cuchillo”) es de gran incidencia sobre el mismo al afectar directamente el número de granos cosechables.

Los suelos de textura más fina presentan valores de B soluble más altos que los de textura gruesa, relacionado en parte con las pérdidas por lavado en estos últimos. Según Ratto de Miguez y Diggs (1990) el área correspondiente al noroeste bonaerense (suelos

arenosos con moderada a baja provisión de MO) está expuesta con mayor probabilidad que otras áreas de la región pampeana a la ocurrencia de casos de carencias en este elemento. Las deficiencias de B dependen no sólo de la disponibilidad de este elemento en el suelo, sino también de la ocurrencia de situaciones extremas de temperatura y de deficiencias hídricas que alteran su normal provisión a las plantas. Altas temperaturas y sequías regulan la provisión de B e intensifican los riesgos de aparición de su carencia. Estudios en el oeste bonaerense describen mayores niveles de respuesta en campañas con baja provisión de agua que en campañas con adecuada oferta de agua para los cultivos (Figura 4).

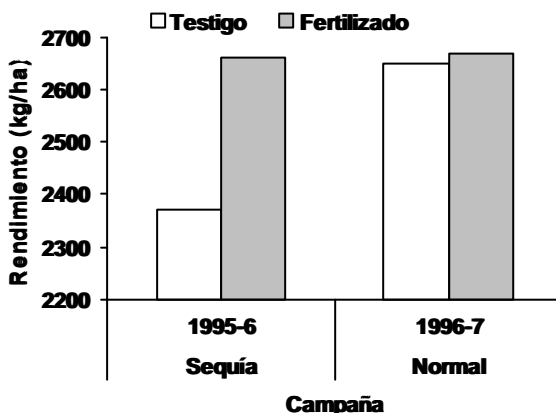


Figura 4: Producción de grano de cultivos de girasol fertilizados con B en la región de la pampa arenosa. Promedio de 13 sitios en 1995-96 (Díaz-Zorita y Duarte, 1996) b) y de 8 sitios en 1996-97 (Díaz-Zorita, 1997).

Existen diversas metodologías de evaluación de la susceptibilidad del cultivo de girasol a carencias de B. En general los análisis de material vegetal (plántulas de hasta 30 días de emergidas, hojas en floración) no resultan confiables dada la heterogeneidad de materiales genéticos presentes en el mercado y las interacciones entre productividad de materia seca y la ocurrencia

de interferencias por factores de manejo (ej. aplicaciones de herbicidas). Los métodos de diagnóstico por análisis de suelos son relativamente sensibles si se consideran los tipos de suelos y otras propiedades ambientales. Por ejemplo, sobre la base de 13 lotes de experimentación en el oeste de Buenos Aires, el 70 % de las diferencias en la respuesta a la aplicación foliar de B fueron explicados por las variaciones en los contenidos de B en los suelos extraídos por el método de Mehlich III (Figura 5). Otros estudios sugieren que el reconocimiento visual y la cuantificación de síntomas se relaciona estrechamente con los incrementos en la producción por agregado de este elemento (Diggs *et. al.*1992).

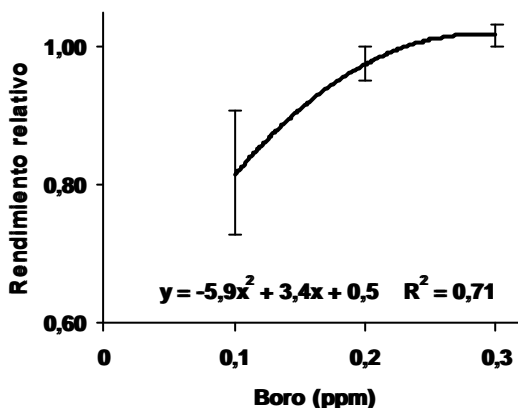


Figura 5: Producción relativa de grano de 13 cultivos de girasol en siembra directa en el oeste bonaerense fertilizados con B en estadios de desarrollo vegetativo (Duarte y Díaz-Zorita, inédito).

Las deficiencias de B pueden ser prevenidas o corregidas tanto por aplicaciones foliares como por aplicaciones al suelo en dosis de 1 kg ha⁻¹ de B en suelos arenosos y hasta 3 kg ha⁻¹ de B en suelos arcillosos (Asad *et al.* 2001). El girasol es tolerante a altas concentraciones de B en aplicaciones foliares, mostrando síntomas de toxicidad cuando la concentración supera 10 veces los niveles de suficiencia. Las aplicaciones foliares en etapas vegetativas pueden realizarse con dosis inferiores en este elemento (Figura 6). En la región pampeana se han descripto aumentos medios del 20 % (Diggs *et. al.* 1992) y de hasta el 33 % en el oeste bonaerense (Díaz-Zorita,

Duarte 1998) en la producción de grano con aplicaciones foliares en etapas vegetativas. En la mejora de la productividad de los cultivos no sólo se observan incrementos en los rendimientos en grano, sino también en el crecimiento de las plantas y en algunos casos en la concentración de materia grasa de los granos.

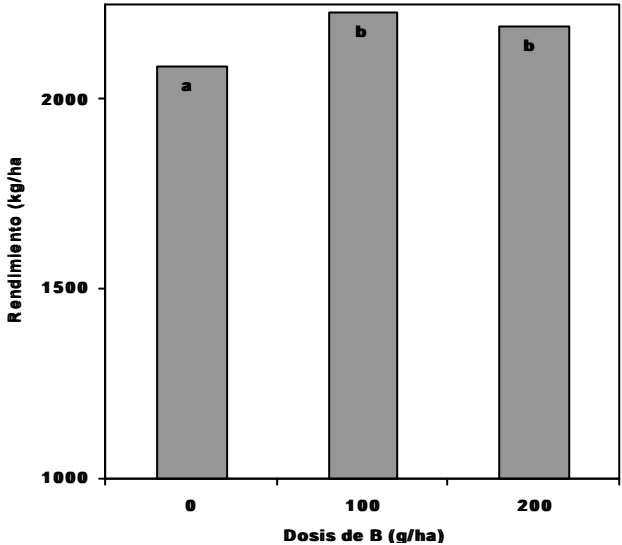


Figura 6: Producción de girasol según niveles de fertilización foliar con boro en 5 sitios experimentales del Este de La Pampa y Oeste de Buenos Aires (Díaz-Zorita *et al.* 2003)

Maíz

En tres de 10 ensayos en maíz realizados en el Norte de la región pampeana se obtuvieron incrementos de rendimiento promedio de $0,78 \text{ Mg ha}^{-1}$ al agregado de $0,5 \text{ kg B ha}^{-1}$ como fertilizante foliar en estado V4-5 ($P > 0,05$ en dos casos y $P < 0,01$ en un caso) (Melgar *et al.* 2001). Cabe destacar que tanto en el tratamiento control como en los demás se fertilizó con dosis variables de P y N que oscilaron entre 5-26 y 60-160 kg ha^{-1} , respectivamente. Es común encontrar respuestas a micronutrientes cuando se han suplido los requerimientos de los macronutrientes.

Alfalfa

El B es probablemente el principal micronutriente limitante en la producción de alfalfa. El nivel mínimo de B disponible en suelo (soluble en agua caliente) sería $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$ y por encima de $0,9 \text{ mg kg}^{-1}$ podría provocar fitotoxicidad (Bolton 1962).

Evaluaciones realizadas durante tres años en la zona subhúmeda de la región pampeana resultaron en que la combinación de N ($45, 54$ y 63 kg ha^{-1}) con P y micronutrientes mejoró la eficiencia de uso del N ($19-69 \text{ kg MS ha}^{-1}$ por cada kg de N aplicado) (Bono *et al.* 2000b). Con estos resultados nuevamente se demuestra que las deficiencias de B comienzan a notarse en sistemas de alta producción cuando los requerimientos de los macronutrientes han sido cubiertos.

Para la máxima expresión de la fijación biológica del nitrógeno, se requiere de la disponibilidad de nutrientes específicos (calcio, boro, azufre, fósforo, molibdeno, cobalto, magnesio, hierro) involucrados en diferentes procesos fisiológicos y estructurales del mecanismo de fijación. Por lo tanto, el logro de una adecuada nutrición nitrogenada de una pastura con base en especies de leguminosas, como lo es la alfalfa, no sólo depende de la oferta edáfica del nitrógeno y de la adecuada nodulación dada por el uso de inoculantes de calidad y manejo correcto de la inoculación, sino también de la provisión oportuna de los nutrientes específicos para la planta y para el *Rhizobium*, como el B (Tabla 7). Estudios en el Oeste de la provincia de Buenos Aires y en el centro de Santa Fe, entre

otros, son coincidentes en mostrar que pasturas de alfalfa adecuadamente provistas en fósforo respondieron produciendo también una mejora en la nodulación de los cultivos.

Tabla 7: Fertilización con B y nodulación de alfalfa en la implantación en 6 ambientes del centro-oeste de Buenos Aires. Campaña 1997 (Amador, inédito).

Sitio	Nódulos		Altura	
	(nº planta ⁻¹)		(cm)	
	Control	Con B	Control	Con B
Salazar ML	23	33	3,0	4,7
Salazar L	6	13	2,5	3,6
Daireaux	5	9	3,6	3,4
Daireaux ML	3	4	1,5	1,2
Bonifacio	4	9	4,9	4,4
Promedio	8,2	13,6	3,1	3,5

Soja

Durante la campaña 2000/01 se realizó una red de 28 ensayos en la región pampeana. El rango de valores de B disponible fue de 0,17 a 0,54 mg kg⁻¹. La mayoría de los sitios tenían niveles inferiores a los valores umbrales mínimos (0,25 a 0,50 mg kg⁻¹). Aún así, no se obtuvieron respuestas a la fertilización con B lo que revela la necesidad de desarrollar valores críticos basados en información regional (INTA-Fertilizar 2001).

CONSIDERACIONES FINALES

El B debe considerarse un factor dinámico para las plantas. Su disponibilidad está condicionada por variables de suelo, tales como humedad, pH, contenido de MO, textura, relación con otros nutrientes; y por variables que dependen de las plantas. Los rangos

de concentración de suficiencia y toxicidad son muy estrechos, y variables entre especies.

Si bien el método de extracción con agua caliente es el más utilizado, los métodos de diagnóstico basados en sus resultados no siempre son adecuados. Por otro lado, los métodos de diagnóstico basados en análisis de tejido vegetal, si bien reflejan el estado nutricional del cultivo, están muy condicionados por situaciones de estrés que podrían afectar la absorción del B por las plantas. Ambas técnicas analíticas deberían estar complementadas para un mejor diagnóstico con estudios profundos en cuanto a sus correlaciones y calibraciones respecto a las respuestas de los cultivos.

Normalmente, cuando se desarrollan métodos de análisis de suelos se busca la estandarización de los mismos y la homogeneidad en las técnicas analíticas, de forma tal que sus resultados sean comparables aún bajo una diversidad de situaciones. Tal vez, no se debería pretender encontrar el extractante "ideal" para todos los suelos; sino adaptar técnicas de uso regional con la inclusión de factores de suelo que afectan la extractabilidad y disponibilidad del B para las plantas.

BIBLIOGRAFIA

- Alba Ordoñez A, M Llanos Company. 1990. El cultivo de girasol. Agroguías Mundi-Prensa. Castelló 37. 28001 Madrid. 158 pp.
- Asad A, FPC Blamey. DG Edwards. 2001. Boron nutrition of sunflower crops. XIV Reuniao Nacional de Pesquisa de Girassol y II Simposio Nacional sobre a Cultura do Girassol, Rio Verde (GO), Brasil.14-19
- Baker AS. 1964. Modifications in the curcumin procedure for the determination of boron in soil extracts. J. Agric. Food Chem. 12: 367-370.
- Basson WD, RG Böhmer, DA Stanton. 1969. An automated procedure for the determination of boron plant tissue. Analyst (London). 94: 1135-1141.

- Berger KC, E Truog. 1939. Boron determination in soils and plants. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 11: 540-54.
- Berger KC, PF Pratt. 1963. Advances in secondary and micronutrients fertilization. *In* MH McVickar, GL Bridger, LB Nelson (eds.) *Fertilizers Technology and Usage*. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. 287-340 pp.
- Bingham FT. 1982. Boron. *In* AL Page (ed.) *Methods of Soils Analysis, Part. 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monograph, 2nd ed. ASA-SSSA, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. 9: 431-447.
- Bolton JL. 1962. Alfalfa. Botany, Cultivation, and Utilization. N Polunin (ed.). *World Crpos Series*. Interscience Publishers, Inc. New York. 474 pp.
- Bono AA, JC Montoya, FJ Babinec. 1999. Fertilización de girasol en la región subhúmeda pampeana. Informe técnico. EEA Anguil, INTA-ASP.
- Bono AA, JC Montoya, FJ Babinec. 2000a. Fertilización de girasol en la región subhúmeda pampeana. Informe técnico. EEA Anguil, INTA-ASP.
- Bono AA, JC Montoya, FJ Babinec. 2000b. Fertilización de pasturas perennes en base a alfalfa en la región subhúmeda pampeana. Informe técnico. EEA Anguil, INTA-ASP.
- Carlson RM, JL Paul. 1968. Potenciometric determination of boron as tetrafluoroborate. *Anal. Chem.* 40: 1292-1295.
- Carlson RM, JL Paul. 1969. Potenciometric determination of boron in agricultural samples. *Soil Sci.* 108: 266-272.
- Díaz-Zorita M, Duarte G A, Fornasero M. 2003. Fertilización foliar con nitrógeno y boro en girasol en la región de la pampa arenosa-Campaña 2002-03. *En* CREA (ed.). XII Congreso Zona Oeste Arenoso AACREA. La Sustentabilidad de las Empresas CREA. CREA, Mar del Plata, BA. Argentina. 2.10 (4 pp).
- Díaz-Zorita M, GA Duarte. 1996. Productividad de cultivos de girasol fertilizados con N en la región de la pampa arenosa (Campaña

- 1995-96): Actas 8vo Congreso AACREA- Zona Oeste Arenoso. Colón (Arg).
- Díaz-Zorita M, GA Duarte. 1997. El nitrógeno y la producción de girasol en la región de la pampa arenosa. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz (Arg).
- Díaz-Zorita M, G.A Duarte. 1998. Aplicaciones foliares de boro en girasol en el noroeste bonaerense. Actas III Reunión Nacional de Oleaginosos. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina. pp. 123-124.
- Dible WT, E Truog, KC Berger. 1954. Boron determination in soils and plants. Anal. Chem. 26: 418-421.
- Diggs C, MS Ratto de Miguez, VM Shorrocks. 1988. Deficiencias de boro en girasol. Estudios en cultivos a campo en la pradera pampeana. 12th International Sunflower Conference. Proceedings. Yugoslav Association of Producers of Plant Oil and Fats. Vol. 1.
- Diggs CA, MS Ratto de Miguez, VM Shorrocks. 1992. La evaluación de síntomas de deficiencias de B. El método más confiable para decidir fertilizaciones de B en girasol. 13th International sunflower conference. Palazzo dei Congressi. Pissa. Italy.
- Foote FJ. 1932. Determination of boron in waters. Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 4: 39-42.
- Goldman E, S Taormina, M Castillo. 1975. A modified curcumin method for determining trace amount of boron. J. Am. Water Works Assoc. 67: 14.
- González Fernández P, C García Baudín, T Madueño Esquinas, JM Melero Vara. 1985. La deficiencia de boro en el girasol cultivado en España. XI Conferencia internacional de Girasol. ASAGIR-ISA. Mar del Plata, Argentina. 243-248 pp.
- Gupta UC. 1967. A simplified method for determining hot-water soluble boron in podzols soils. Soil Sci. 103: 424-428.

- Gupta UC. 1968. Relationship of total and hot-water soluble boron and fixation of added boron, to properties of Podzol soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32: 45-47.
- Hatcher JT, LV Wilcox. 1950. Colorimetric determination of boron using carmine. *Anal. Chem.* 22: 597-569.
- Hu H, PH Brown, JM Labavitch. 1996. Species variability in boron requirements is correlated with cell wall pectin. *J. Exp. Bot.* 47: 227-232.
- INTA-Fertilizar. 2001. Soja. Respuesta a la fertilización en la región pampeana. Resultados de la campaña 2000/01. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino. 24 pp.
- Jacson ML. 1970. Determinación de boro en los suelos y en los tejidos vegetales. *En Omega SA (ed.) Análisis Químico de Suelos.* 500-523 pp.
- John MK, HH Chuah, JH Neufeld. 1975. Application of improve azometina-H method to the determination of boron in soils and plants. *Anal. Lett.* 8: 559-568.
- Johnson CM, A Ulrich. 1959. Analytical method for use in plant analysis. *California Agric. Exp. Stn. Bull.* 766.
- Johnson GV, PE Fixen. 1990. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum, and chlorine. *In* RL Westerman (ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*, 3rd ed. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. 3: 265-273.
- Jones JB, HV Heck, R Voss. 1990. Plant analysis as aid in fertilizing corn and grain soghum. *In* RL Westerman (ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*, 3rd ed. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. 3: 521-547 pp.
- Jones JB. 1991. Plant tissue analysis in micronutrients. *In* JJ Mortvedt, FR Cox, LM Shuman, RM Welch (ed.). *Micronutrients*

- in Agriculture, 2nd ed. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA. 4: 477-522.
- Keren R, FT Bingham. 1985. Boron in Water, Soils, and Plant. *In* BA Stewart (ed.) *Adv. In Soil Sc.* 1: 229-276.
- Marentes E, RA Vanderpool, BJ Shelp. 1997. Boron-isotope fractionation in plants. *Can. J. Plant Sci.* 77: 627-629.
- Martens DC. 1968. Plant availability of extractable boron, copper, zinc as related to selected soil properties. *Soil Sci.* 106: 23-28.
- Melgar RJ, J Lavandera, M Torres Duggan, L Ventimiglia. 2001. Respuesta a la fertilización con boro y zinc en sistemas intensivos de producción de maíz. *Ciencia del Suelo.* 19: 109-114.
- Milutovic S, D Stanojevic. 1988. Effect of Zn and B on seed yield, oil content and morphological traits of sunflower. 12th International Sunflower Conference. Proceedings. Yugoslav Association of Producers of Plant Oil and Fats. Vol. 1.
- Moraghan JT, HJ Mascagni. 1991. Environmental and soil factors affecting micronutrients deficiencies and toxicities. *In* JJ Mortvedt, FR Cox, LM Shuman, RM Welch (ed.). *Micronutrients in Agriculture*, 2nd ed. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA. 4: 371-426.
- Mortvedt JJ. 1980. Micronutrient soil test: Correlation and interpretations. *In* TR Peck, JT Cape JR., DA Whitney (ed). *Soil testing: Correlating and Interpreting the Analytical Results.* ASA Special Publication. 677 S. Segoe Rd. Madison, WI. 53711. 29: 99-117.
- Naftel J. 1939. Colorimetric microdetermination of boron. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 11: 407-409.
- Palmer JH, PJ Hocking, PJ Randall. 1988. Effects of an imposed 12-day period of boro deficiency on reproductive development in sunflower. 12th International Sunflower Conference. Proceedings. Yugoslav Association of Producers of Plant Oil and Fats. Vol. 1.

- Quaggio JA, MRG Ungaro, PB Gallo, H Cantarella. 1985. Sunflower response to lime and boron. XI Conferencia internacional de Girasol. ASAGIR-ISA. Mar del Plata, Argentina. 209-215 pp.
- Ratto de Miguez S, C Diggs, C Ras, Z M de Sesé. 1996. Relación del boro extraíble con CaCl_2 0,02M con algunas variables edáficas en suelo pampeanos. XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas. AACCS. Sta. Rosa, LP, Argentina. 131-132 pp.
- Ratto de Miguez S, N Fatta. 1990. Disponibilidad de micronutrientes en suelos del área maicera núcleo. Ciencia del Suelo. 8: 9-15.
- Ratto de Míguez S, ZM de Sesé, I Mizuno. 1985. Boro: Determinación de su contenido en suelos y plantas utilizando azometina-H. Rev. Facultad de Agronomía, UBA. 6: 189-197.
- Ratto de Míguez S. 1982. Boro: un nutriente poco conocido. Rev. Facultad de Agronomía, UBA. 3: 189-212.
- Ratto de Miguez, S. y C. Diggs. 1990. Niveles de boro en suelos de la pradera pampeana. Aplicación al cultivo de girasol. Ciencia del Suelo 8: 93-100.
- Römheld V, H Marschner. 1991. Function of micronutrients in plants. *In* JJ Mortvedt, FR Cox, LM Shuman, RM Welch (ed.). Micronutrients in Agriculture, 2nd ed. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wi, USA. 4: 297-328.
- Ron MM, SG de Bussetti, T Loewy. 1999. Boro extraíble en suelos del sudoeste bonaerense. Ciencia del Suelo. 17:54-57.
- Shanina TM, NE Gelman, VS Mikhailovskaya. 1967. Quantitative analysis of heteroorganic compounds. Spectrophotometric microdetermination of boron. J. Anal. Chem 22: 663-667.
- Sims JT, V Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. *In* JJ Mortvedt, FR Cox, LM Shuman, RM Welch (ed.). Micronutrients in Agriculture, 2nd ed. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wi, USA. 4: 427-476.
- Tisdale SL, WL Nelson, YD Beaton. 1985. Soil Fertility and Fertilizers. 4th ed. Macmillan Publishing Company. 866 Third Avenue, New York, New York 10022. 754 pp.

- Ure AM. 1991. Atomic absorption and flame emission spectrometry. *In* KA Smith. Soil Analysis, Modern Instrumental Techniques, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc. 270 Madison Avenue, New York, New York 10016, USA. 1-62 pp.
- Wear JI. 1965. Boron. *In* CA Black (ed.) Methods of Soils Analysis, Part. 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph. ASA-SSSA, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. 9: 1059-1063.
- Wilcox LV. 1932. Electrometric titration of boric acid. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 4: 38-39.
- Wolf B. 1971. The determination of boron in solis extracts, plant material, compost, manures, water and nutrient solution. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 2: 363-374.
- Wolf B. 1974. Improvements in the azomethine-H method for the determination of boron. *Soil. Sci. Plant Anal.* 5: 39-44.
- Yermiyahu U, R Keren, Y Chen. 2001. Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1436-1441.

DIAGRAMACION, COMPOSICIÓN E IMPRESIÓN

Beatriz E. García
Omar A. Bortolussi
Luisa Blatner de Mayoral

Impreso en los talleres gráficos de la
EEA Anguil "Ing.Agr. Guillermo Covas- INTA
Tirada 1000 ejemplares

Diciembre de 2003