

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).

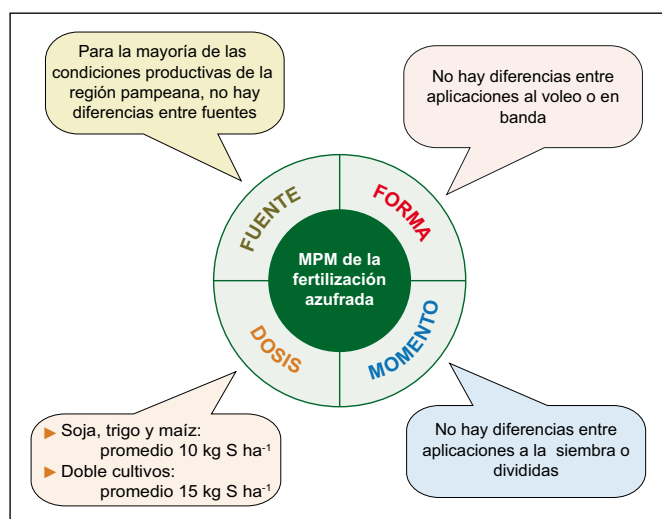


Figura 1. Pautas a seguir para cumplir con las mejores prácticas de manejo (MPM) de la fertilización azufrada en los principales cultivos extensivos de la región pampeana argentina.

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.

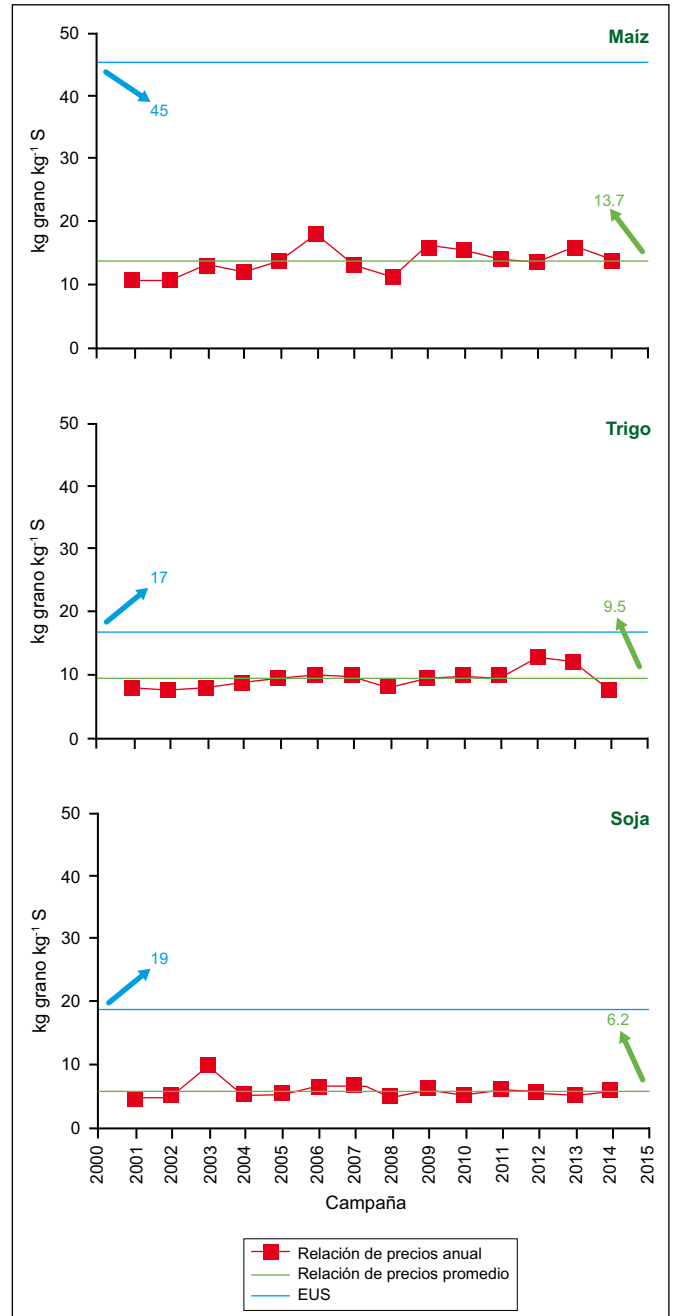


Figura 2. Eficiencia de uso del azufre (EUS) y relación de precio (kg grano kg⁻¹ S) entre el yeso y los cultivos de soja, trigo y maíz (Correndo et al., 2015). La EUS surge de una serie de ensayos realizados en la región pampeana argentina durante las campañas 1995-2009 (Steinbach y Álvarez, 2012).

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

- Bruuselman 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]

