



FERTILIZACIÓN AZUFRADA EN LA ARGENTINA: ¿QUÉ CONOCEMOS Y QUÉ FALTA CONOCER?

Torres Duggan, M.^{1,2*}; Rodríguez, M.B.³

¹ Tecnoagro; ² Asociación Argentina de la Ciencia Del Suelo (AACS); ³ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (FA-UBA);

* Autor de contacto: torresduggan@tecnoagro.com.ar; Girardot 1331 (C1427AKC), CABA; 011-4553-2474

PALABRAS CLAVE

Azufre

Azufre elemental

Fuentes azufradas

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años el S recibió poca atención como nutriente agrícola a nivel global debido a que el mismo era aportado indirectamente a través de otras fuentes como las precipitaciones (asociado a áreas industriales) o fertilizantes fosfatados que aportaban también S (e.g. superfosfato simple de calcio). Sin embargo, durante las últimas décadas, debido a la intensificación de los sistemas de producción y la adopción de fertilizantes más concentrados en fósforo (P), con bajos o nulos contenidos de S, comenzaron a expandirse las deficiencias de S en diversos países alrededor del mundo, como EE.UU, China, India, entre otros (Torres Duggan & Rodríguez, 2011). En el sur de América Latina, Brasil y Argentina son los principales países donde este nutriente se ha convertido en un factor limitante de la productividad de los cultivos, evidenciando una adopción creciente dentro de los programas de fertilización. En la Argentina el S es el tercer nutriente limitante de los rendimientos de los cultivos de grano en la Región Pampeana. El objetivo del presente trabajo es revisar y discutir el estado del conocimiento sobre fertilización azufrada en la Argentina. Este escrito es un sumario de la presentación realizada por los autores en el Simposio de “Fertilización de cultivos: otros nutrientes” a efectuarse en el marco del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuestas a la fertilización azufrada

Las primeras evidencias de deficiencias de S fueron observadas en el sur de Santa Fé, en el área de Casilda, principalmente en el cultivo de soja (Martínez & Cordone, 1998; Cordone *et al.*, 2002). A partir de estos antecedentes, las deficiencias de S y las respuestas a la aplicación del mismo, comenzaron a reportarse en otras regiones y diversos cultivos, motivando un aumento marcado en la adopción de la fertilización azufrada (Torres Duggan *et al.*, 2012). En la Figura 1 se presenta un sumario de los valores medios de respuesta y eficiencia de uso de azufre en los principales cultivos de granos.

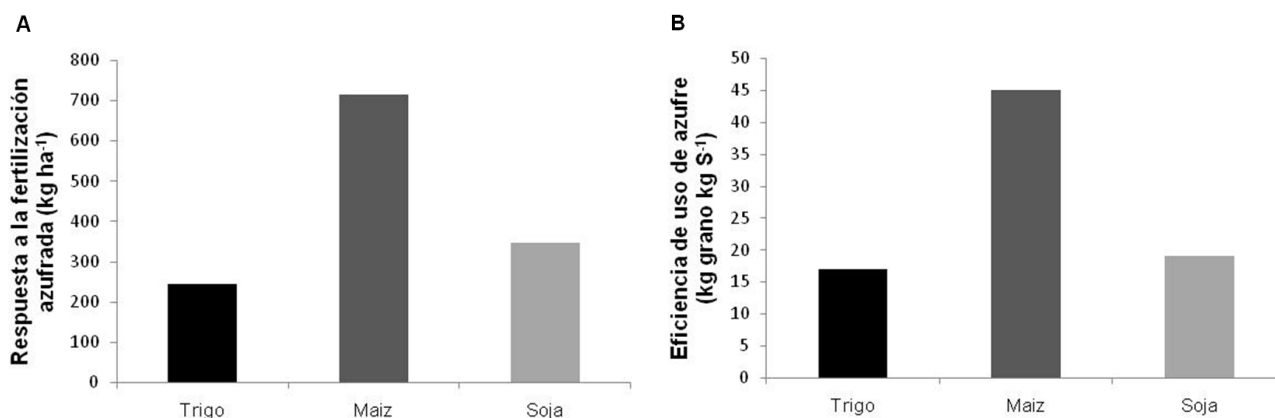


Figura 1. Respuesta a la fertilización azufrada (A) y eficiencia de uso de azufre (B) en cultivos de grano de la Región Pampeana (adaptado de Álvarez & Steinbach, 2012).

Las respuestas indicadas en la Figura 1 son estadísticamente significativas ($P < 0,05$) y además son rentables considerando que, en la mayor parte de los casos, las eficiencias de uso de S medias superan las relaciones de precios entre los granos y el S (tomando como referencia la del yeso agrícola). Así, las relaciones de precios del período 2004-2011 fueron 9, 10 y 5 kg grano kg S⁻¹ de trigo, maíz y soja, respectivamente (Steinbach & Alvarez, 2012).

Diagnóstico de deficiencias de azufre

Los análisis de suelos se utilizan frecuentemente para predecir la disponibilidad de S para los cultivos. Sin embargo, el éxito de los mismos ha sido variable según la región (Mikkelsen & Norton, 2013). La determinación de SO₄²⁻ en el suelo es uno de los métodos más utilizados. Existen diferentes tipos de extractantes que permiten evaluar el contenido de SO₄²⁻ en la solución del suelo, el adsorbido y en algunos casos el S orgánico. En la Argentina los extractantes más utilizados son el fosfato de calcio, acetato de amonio y fosfato de potasio. Es interesante resaltar que, de acuerdo a un reciente estudio intra e inter-laboratorio realizado por Russi *et al.* (2012) para evaluar la performance analítica en la determinación de SO₄²⁻, se presentan similares resultados a pesar de la utilización de diferentes extractantes.

En términos generales, no se han observado relaciones consistentes y estables entre la respuesta a la aplicación de S y la concentración de SO₄²⁻ en el suelo a la siembra o con otras variables de suelo o de manejo (Gutiérrez Boem, 2010). Sin embargo, existen algunas excepciones, principalmente en el norte de la Región Pampeana (Pampa Ondulada y Pampa Plana), donde se han reportado umbrales preliminares de 10 ppm de S-SO₄²⁻ en redes de ensayos de larga duración (García *et al.*, 2010). Debido a las dificultades para predecir la respuesta al agregado de S en base a la concentración de SO₄²⁻ en el suelo, además de ésta variable se tienen en cuenta otros factores o condiciones ambientales del sitio de producción, como los antecedentes de respuestas a S y otros nutrientes en la zona o en el propio establecimiento; estado de degradación del suelo; nivel de productividad de los cultivos; aportes de S en napas y agua de riego, entre otros. El nivel de productividad esperado en el cultivo es importante ya que, cuando el nivel de rendimientos es bajo, el suelo frecuentemente es capaz de proveer S para cubrir la demanda de S del cultivo. Esto explica en parte la baja frecuencia de respuestas a la aplicación de S en sistemas de secano ubicados en áreas sub-húmedas o semiáridas de la Región Pampeana. En estos ambientes donde la disponibilidad hídrica constituye el principal factor limitante de la productividad

de los cultivos, los rendimientos medios y la demanda de S de los cultivos son más bajos que aquellos ubicados en la porción húmeda de dicha región. Asimismo, debido a mayor contenido de arena en su composición granulométrica, la mayor relación MO/arcilla, garantiza elevados niveles de mineralización de N y S. Recientemente se han realizado algunas investigaciones que representan un avance en el diagnóstico de deficiencias de S, basados en los análisis de tejido en el cultivo de trigo (e.g. relación N:S en planta entera en el estadio Z31) o de evaluaciones del índice de verdor en el canopeo de maíz en el estadio de V6-V14 (Echeverría *et al.*, 2011; Pagani & Echeverría, 2012). Considerando que el S se absorbe y acumula aún en estadios ontogénicos avanzados, la ventana de intervención agronómica para efectuar el diagnóstico y la aplicación de S es mayor a la del N. Independientemente del método de diagnóstico utilizado, la abundante información disponible sobre respuestas al agregado de S, permiten definir como dosis optimas aquellas ubicadas en el rango de 15-20 kg ha de S ha⁻¹, donde los incrementos en el rendimiento se estabilizan (Torres Duggan *et al.*, 2012).

Fuentes azufradas

Existe una amplia gama de fuentes azufradas utilizadas en fertilización de cultivos. Se pueden diferenciar dos tipos principales: (1) fuentes que presentan el S en forma de SO₄²⁻ (solubles en agua) y (2) azufre elemental (S⁰, insoluble en agua). El SO₄²⁻ es la forma biodisponible para las plantas, mientras que el S⁰ se debe oxidar en el suelo antes de proveer S disponible. El proceso de oxidación es complejo y está regulado principalmente por el tamaño de partícula del S⁰, la temperatura y la humedad edáfica (Til, 2010). Si bien no es posible establecer un tamaño óptimo de partícula del S⁰ para garantizar la biodisponibilidad del S en todas las condiciones edafoclimáticas, la evidencia experimental de los últimos años indica que las granulometrías más apropiadas son las inferiores a 150-200 µm (Schoneau *et al.*, 2008). En cuanto a las condiciones ambientales, la tasa de oxidación del S⁰ aumenta linealmente en el rango de 10-40 °C, siendo muy baja por debajo de 4-6°C. La disponibilidad hídrica óptima para maximizar este proceso es aquella ubicada próxima a capacidad de campo. Condiciones de sequía o anegamiento limitan significativamente la oxidación del S⁰ en suelo. En la Argentina, los fertilizantes azufrados más utilizados son el superfosfato simple de calcio (SFS); el yeso agrícola (Y) y el tiosulfato de amonio (TSA) (Torres Duggan *et al.*, 2012). Este último fertilizante líquido, es mezclado con el UAN en diferentes proporciones. Es importante resaltar que la Argentina es el principal mercado de fertilizantes líquidos de América del Sur. En los últimos tiempos se observa mayor oferta de mezclas químicas que contienen N, P y S, donde éste último se encuentra en dos formas químicas: S-SO₄²⁻ y S⁰. Si bien la utilización de S⁰ en fertilización de cultivos no es una práctica nueva, la innovación en estas fuentes radica en que el S⁰ ha sido incorporado en forma micronizada dentro de la matriz de los gránulos de fertilizantes convencionales como el MAP. Los tamaños de partículas son pequeños (e.g. <40 µm). Las principales ventajas de estos productos para la industria de fertilizantes son la mayor seguridad en el manipuleo del S⁰ (material que puede generar una ignición durante etapas de secado). Desde el punto de vista agronómico, se destacan la mayor tasa de oxidación del S⁰ y concentración de S en el fertilizante comparado con mezclas físicas de fertilizantes que utilicen SO₄²⁻ y una relación P:S equilibrada para cultivos como soja, que es el principal cultivo en términos de área sembrada en el sur de América Latina.

Efectividad agronómica de fuentes azufradas

Desde que comenzaron a detectarse las deficiencias de S en los agro-ecosistemas pampeanos, se han realizado numerosas investigaciones tendientes a evaluar tanto aspectos del diagnóstico de la disponibilidad de S para los cultivos, como así también cuestiones vinculadas con la tecnología de fertilización. La mayor parte de los estudios se han realizado utilizando fertilizantes sulfatados, considerados de inmediata disponibilidad para las plantas. En términos generales, se han observado pequeñas diferencias en respuesta a la aplicación de S en trigo y soja entre las diferentes fuentes sulfatadas evaluadas cuando las mismas se compararon bajo las mismas condiciones de dosis y método de aplicación (Torres Duggan *et al.*, 2012). En maíz y girasol se dispone de menor cantidad de estudios donde se realicen comparaciones de dos o más fuentes azufradas. A diferencia de la abundante información publicada sobre efectividad de fertilizantes sulfatados, existen escasos antecedentes locales que informen evaluaciones del S⁰ ya sea como única fuente o en comparación con fuentes azufradas solubles. Sin embargo, en los últimos años se han reportado algunos resultados promisorios en esta temática. Así, en una red de experimental realizada en 8 sitios en trigo y 9 de soja de 1^o en la Pampa Ondulada y Pampa Plana, se observó similar efectividad agronómica (respuesta) y EUS entre el sulfato de amonio (SA) y el S⁰ micronizado, ambas fuentes aplicadas a la siembra y con la misma dosis de S (Torres Duggan *et al.*, 2010; Torres Duggan 2011). Integrando la información de fuentes y dosis evaluadas, las respuestas medias a la aplicación de S fueron de 600 y 1400 kg ha⁻¹ en los experimentos de trigo del primer y segundo año, respectivamente, mientras que en el cultivo de soja de 1^o las respuestas fueron de 558 y 297 kg ha⁻¹. En algunos sitios y bajo determinadas condiciones (e.g. bajos contenidos de MO o sequía) la performance agronómica del SA fue mayor a la del S⁰ micronizado, posiblemente debido a condiciones desfavorables para la oxidación del S⁰. De acuerdo a éstos resultados, existirían condiciones adecuadas para la oxidación de fuentes micronizadas de S⁰ en el área central y norte de la Región Pampeana. Sin embargo, es importante evaluar las condiciones edáficas y ambientales del sitio de producción para analizar la performance esperada del S⁰ en relación a fuentes solubles (Figura 1).

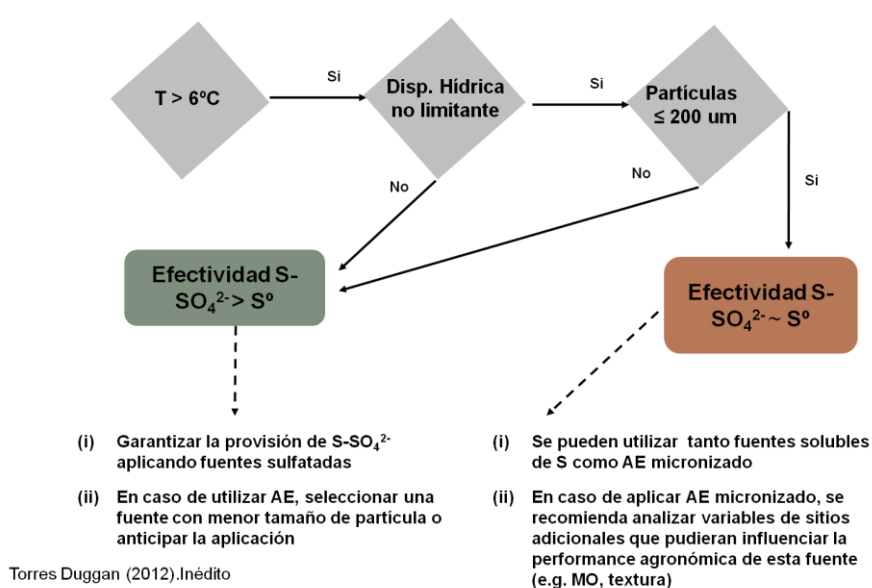


Figura 2. Modelo conceptual del comportamiento esperado de fuentes azufradas en la Región Pampeana argentina (Torres Duggan, inédito).

Métodos de aplicación

La forma y momento de aplicación del S se debe seleccionar en base a la información experimental disponible en el sitio de producción, para lograr la mayor sincronía posible entre la oferta del nutriente y la demanda del mismo. Por ello, el método de aplicación puede variar según el tipo de suelo, condiciones climáticas y características del sistema de producción. De acuerdo con algunos pocos estudios que se han realizado en esta temática en la porción húmeda de la Región Pampeana, se observan pequeñas diferencias entre diferentes momentos (e.g. siembra; pre-siembra; post-emergencia) o formas de colocación del S (e.g. voleo en pre-siembra o post-emergencia; bandas a la siembra; entre otros) en cultivos de grano de aplicación cuando se utilizan fuentes sulfatadas (Prystupa *et al.* 2012). Esto podría deberse a la baja capacidad de fijación de SO_4^{2-} y la despreciable magnitud de las pérdidas de S por lixiviación de SO_4^{2-} en suelos con texturas medias ubicados en el área central de la Región Pampeana. La residualidad del S en las secuencias de cultivo de las áreas templadas de la Argentina ha sido extensamente observada en la mayoría de los agro-ecosistemas. Así, se puede aplicar el S (y el P) en el cultivo de trigo para cubrir la demanda del doble cultivo trigo/soja de 2º o cebada/soja de 2º obteniendo similares EUS a las observadas en aplicaciones independientes a cada cultivo.

Actualmente no se dispone de investigaciones que hayan analizado la capacidad de oxidación del S^0 con diferentes métodos de aplicación y bajo distintas condiciones edafo-climáticas y cultivos de la Argentina. Por consiguiente se deben considerar criterios y lineamientos provenientes de países donde se han realizado calibraciones al respecto, principalmente EE.UU, Australia y Nueva Zelanda. Así, cuando las condiciones son restrictivas para la oxidación del S^0 (e.g. baja temperatura o disponibilidad hídrica) se recomienda aplicar una fuente de S que aporte SO_4^{2-} o seleccionar una fuente de S^0 micronizada de alta reactividad en el suelo que permita proveer S disponible dentro del ciclo del cultivo. La aplicación del S^0 en forma anticipada a la siembra es otra estrategia para implementar en estas condiciones.

Necesidades de investigación

Existen aún algunos vacíos de conocimiento sobre la fertilización azufrada (e.g. diagnóstico y tecnología de aplicación) como así también sobre la química y dinámica del S en el sistema suelo-planta, que es necesario ir explorando para tener una mejor comprensión de los procesos del S en el suelo y los factores reguladores como base para desarrollar prácticas de manejo de la fertilización azufrada. Algunos de las prioridades de investigación donde sería deseable generar nuevo conocimiento son:

- (1) Química y bioquímica del S en el suelo: formas químicas; contenidos de S en relación a otros elementos como el N, P y S; isothermas de adsorción; organismos transformadores del S, entre otros.
- (2) Dinámica del S en el sistema suelo-planta: absorción de S en diferentes cultivos y estados ontogénicos; pérdidas de S por lixiviación de SO_4^{2-} en diferentes tipos de suelos y/o condiciones edafo-climáticas; mineralización aparente de S; entre otros.
- (3) Oxidación del S^0 : estudios que permitan conocer la tasa de oxidación del S^0 en diferentes condiciones edáficas y ambientes (gradientes termo-hídricos), los principales factores reguladores que permitan generar modelos de fertilización calibrados regionalmente.

- (4) Efectividad agronómica de fuentes azufradas: en especial es importante seguir profundizando los estudios sobre la performance agronómica relativa a fuentes azufrada solubles de diferentes fuentes de S⁰ (distinta reactividad en el suelo) en diferentes cultivos y condiciones agro-ecológicas
- (5) Momentos y formas de aplicación de S: resulta importante propender hacia estudios inter y transdisciplinarios que integren aspectos de la dinámica del S en el suelo en relación a los momentos y formas de aplicación del S.

CONCLUSIÓN

La práctica de la fertilización azufrada se desarrolló marcadamente en las últimas décadas en la Argentina. La información experimental disponible muestra que hay pocas diferencias en efectividad agronómica entre fuentes sulfatadas, y entre métodos de aplicación de las mismas. Asimismo, existen algunos antecedentes que muestran respuestas a S similares entre el S⁰ y fuentes sulfatadas, tanto en cultivos de invierno (e.g. trigo) y verano (e.g. maíz) en la Pampa Ondulada y Plana. Estos resultados indicarían que las condiciones termo-hídricas en esas regiones serían adecuados para garantizar la oxidación del S⁰ micronizado dentro del ciclo de los cultivos. Sin embargo, existe muy pocas mediciones directas de la oxidación del S⁰, aspecto que debería ser considerado en investigaciones tendientes a desarrollar modelos de fertilización con este tipo de fuentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Cordone G; F Martinez & R Abrate. 2002. Resultados de fertilización en trigo/soja II. INTA Casilda. Campaña 2000/01. *Informaciones Agronómicas* Nº13. INPOFOS.
- Echeverría, H.; N. Reussi Calvo; A. Pagani, L. Fernández. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencias de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. En: Simposio Fertilidad 2011.
- García, F.O.; M. Boxler, A. Berardo; I.A. Ciampitti; A. Correndo; N. Reussi Calvo; F. Bauschen; L. Firpo; J. Minteguiaga and R. Pozzi. 2010. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009, IPNI-CREA-ASP. Segunda Edición,. 63 p.
- Gutierrez Boem, F. 2010. Regulación y diagnóstico de la disponibilidad de azufre. En: Fertilidad de suelos, caracterización y manejo en la Región Pampeana. Sección 4, Capítulo 2. R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez & Raúl S. Lavado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p 337-352.
- Martinez, F & G Cordone. 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en soja. Soja, campaña 97/98, INTA Oliveros, 53-57 .
- Mikkelsen, R & R Norton. 2013. Soil and fertilizer sulfur. *Better Crops*. 97 (2). 9 p.
- Pagani, A.; Echeverría, H.E. 2012. Influence of sulfur deficiency on chlorophyll-meter readings of corn leaves. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.* 175:604-613
- Prystupa, P.; M. Torres Duggan; G. Ferraris. 2012. Fuentes y formas de aplicación de azufre y micronutrientes en la Región Pampeana. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Capítulo 6. Sección 2. Álvarez, R; P. Prystupa; M. Rodríguez.; C. Álvarez (editores). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 623 p.
- Russi, D; F Gutiérrez Boem; P Prystupa & G Rubio, G. 2012. Communication in *Soil Science and Plant Analysis* 43:2535-2543.
- Schoneau, J.L & SS Malhi. 2008. Sulfur form and cycling processes in soil and sulfur fertility. Chapter 1. In: Sulfur: A missing link between Soils, Crops, and Nutrition. Joseph Jez (Editor). Agronomy Monograph N°50. ASA, CSSA, SSSA. 313 p.
- Steinbach, HS & R Alvarez. 2012. Revisión del efecto de la fertilización con azufre sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja en La Región Pampeana XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. 16-20 de abril
- Til, A.R. 2010. Sulphur and sustainable agriculture. First edition, IFA, Paris, France. pp. 70
- Torres Duggan M; MB Rodríguez; RS Lavado & R Melgar. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*. 28: 67-77.
- Torres Duggan, M. 2011. Fuentes azufradas en cultivos de grano de la Región Pampeana. Tesis Magister Scientiae (Ciencias del Suelo). Universidad de Buenos Aires. 96 pp.
- Torres Duggan, M & MB Rodríguez. 2011. Update and outlook of sulphur fertilizer use in Brazil, Argentina and other Southern Cone countries. Proc Sulphur World Symposium 2011. New York City, USA. pp 35.
- Torres Duggan, M.; R Melgar; MB Rodríguez; RS Lavado & IA Ciampitti. 2012. Sulfur fertilization in the Argentine Pampas region: a review. *Agronomía & Ambiente*, 32 (1-2) 61-73.