

EFICIENCIA AGRONÓMICA DEL AZUFRE ELEMENTAL RELATIVA A UNA FUENTE AZUFRADA SOLUBLE EN TRIGO EN LA REGIÓN PAMPEANA

MARTIN TORRES DUGGAN^{1*}; MÓNICA B. RODRIGUEZ²; RAÚL S. LAVADO³ & RICARDO MELGAR⁴

1: Tecnoagro S.R.L. Girardot 1331; C1427AKC; Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes;

2: Facultad de Agronomía; Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires; 3: INBA-CONICET/FAUBA.

Buenos Aires; 4 EEA Pergamino-INTA. Buenos Aires.

Correo electrónico: torresduggan@tecnoagro.com.ar

Recibido: 28-12-090

Aceptado: 26-05-10

RESUMEN

La eficiencia agronómica del azufre elemental (AE) en relación a fuentes azufradas solubles y sulfatadas, depende de su reactividad (*e.g.* tamaño de partícula) y de las condiciones edafo-climáticas. Para las condiciones de la Región Pampeana, algunas publicaciones sugieren que el AE puede ser una fuente de S tan efectiva como las fuentes solubles, aunque la información no concluyente. Se hipotetiza que en las condiciones de la Región Pampeana, ambas fuentes poseen similar eficiencia agronómica en la mayoría de los años. Los objetivos del trabajo fueron: i. Evaluar la respuesta al agregado de S con una fuente reactiva de AE en relación a un fertilizante azufrado sulfatado, aplicado en trigo en diferentes dosis y en distintas condiciones edafo-climáticas; ii. Comparar, para el conjunto de experimentos, la eficiencia agronómica del S aplicado con las distintas fuentes. iii. Relacionar las respuestas a la fertilización azufrada con variables de suelo y clima. Se realizaron ocho ensayos de campo durante dos años consecutivos en lotes de producción ubicados en la Región Pampeana. Se aplicó un diseño en bloques completos aleatorizados con cuatro o seis repeticiones en un arreglo factorial de tratamientos (factor 1: fuente azufrada, factor 2: dosis de S). Los tratamientos fueron: un testigo absoluto; fertilización con AE micronizado (95% de S) en dos niveles de dosis y fertilización con sulfato de amonio granulado (SA, 24% S), también en dos niveles de dosis. Las dosis evaluadas fueron 10 y 30 kg ha⁻¹ de S (año 1) y 15 y 30 kg ha⁻¹ (año 2). La fertilización azufrada afectó significativamente ($p < 0,05$) los rendimientos del trigo en cuatro de cinco sitios en el primer año y en todos los sitios durante el segundo año de experimentos. Las respuestas del trigo al S se ubicaron en el rango de 231 a 857 kg ha⁻¹ en el primer año y entre 702 y 2.119 kg ha⁻¹ en el segundo año. No se observaron efectos significativos de fuente (efectividad) en las respuestas observadas o en la eficiencia agronómica del S aplicado (kg de grano/kg de S aplicado en la mayoría de los sitios), confirmando que, para el conjunto de experimentos, ambos fertilizantes fueron igualmente efectivos para proveer SO₄²⁻ al cultivo. Tampoco se detectó efecto significativo de dosis o interacción fuente x dosis ($p > 0,05$) en la mayoría de los sitios. La dosis más baja (10 o 15 kg ha⁻¹) fue suficiente para cubrir el requerimiento de S del cultivo. Se observó una asociación positiva entre las respuestas y el contenido de MO del suelo y las precipitaciones (macollaje y total del ciclo) y una relación inversa con el contenido de S-SO₄²⁻ disponibles a la siembra, ésta última con bajo ajuste (r^2 medio=0,18). No se observó asociación entre las respuestas y la temperatura en macollaje o en el ciclo. Se concluye que el AE resultó una fuente azufrada con similar eficiencia que el SA para aportar S al trigo en la Región Pampeana.

Palabras clave. Azufre elemental, sulfato de amonio, eficiencia agronómica, respuesta.

AGRONOMIC EFFICIENCY OF ELEMENTAL SULPHUR IN WHEAT RELATIVE TO A SOLUBLE SULPHUR SOURCE IN THE PAMPAS REGION

ABSTRACT

Agronomic efficiency of elemental sulphur (AE) compared with soluble and S-sulphate sulphur sources depends on reactivity of AE (*e.g.* particle size) and environmental conditions (soil and climate). Although there is published information suggesting that elemental sulphur has similar effectiveness than soluble sulphur sources, the information is not conclusive. We hypothesized that agronomic efficiency of AE and soluble S sources are similar under the Pampas Region conditions. The objectives of the study were to: i. Evaluate S grain response to a reactive source of AE compared to a soluble S source under different S rates and soil and climate conditions. ii. Compare, for the group of experiments, agronomic S efficiency between S sources. iii. Relate S responses with soil and climatic variables. Eight field experiments were conducted during two successive years on cropping systems in the Pampas Region. The experimental design was a randomized complete block with four or six replicates and a factorial treatment arrangement (factor 1: S source, factor 2: S rate). The treatments were: check (without S application), fertilization with a micronized source of AE (95% of S) and a fertilization treatment with ammonium sulphate (SA, 24%). Both sulphur sources were applied at two S rates. Sulphur rates were 10 and 30 kg ha⁻¹ (year 1) and 15 and 30 kg ha⁻¹ (year 2). In the first year, wheat responded significantly to S in four of five sites ($p < 0.05$) with yield increases of 231 to 857 kg ha⁻¹. Significant yield increases were observed in all sites in the second year, ranging from 702 to 2,119 kg ha⁻¹. There were no significant differences in grain yield among S sources, rates or interaction source x S rates ($p > 0.05$) in most sites. When all sites were combined, sulphur sources presented similar agronomic S efficiencies ($p > 0.05$). The lower S rate (10 or 15 kg ha⁻¹) was enough to provide S to the crop under the Pampas Region conditions. Grain yield responses to S were positively correlated with organic matter content and rainfall (during tillering or the whole crop cycle) and inversely associated with SO₄²⁻ at planting, although with a poor adjustment. No correlation was detected between S response and temperatures during tillering or the whole crop cycle.

Key words. Elemental sulphur, ammonium sulphate, agronomic efficiency, response.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se viene observando una creciente expansión de la fertilización azufrada en los cultivos de grano que se desarrollan en la Región Pampeana. Esto se debe, entre otros factores, al aumento en los casos de respuestas al agregado de azufre (S) en los cultivos y al bajo costo de los fertilizantes azufrados, en relación a los nitrogenados y fosfatados. Por ello, actualmente el S, junto con el nitrógeno (N) y fósforo (P) son los principales nutrientes incluidos en los programas de fertilización en la Región Pampeana (García & Echeverría, 2008). La fertilización azufrada se incrementó considerablemente en los últimos años. La reposición actual del S extraído por los principales cultivos de granos en esta región (trigo, maíz, soja, girasol) es del 42% (García & Salvagiotti, 2009). Las respuestas medias al agregado de S en trigo se ubican en el rango de 200-600 kg ha⁻¹, para dosis de 5-20 kg ha⁻¹ de S (FAO, 2004; Reussi Calvo *et al.*, 2006). Los ambientes donde se han observado respuestas a la fertilización azufrada poseen características particulares: suelos con extensa historia agrícola, bajos contenidos de MO, altas respuestas a N y P y varios años bajo siembra directa (Gutiérrez Boem, 2006).

Las principales fuentes azufradas utilizadas en la Región Pampeana en cultivos de granos son el sulfato de amonio (SA, 21-0-0+24% S), yeso agrícola (0-0-0+15-18% S) y superfosfato simple de calcio (SPS, 0-21-0+12% S) (Torres Duggan, 2008; Torres Duggan & Rodríguez, 2009). Todas estas fuentes son solubles en agua y presentan el S en forma de SO₄²⁻, inmediatamente disponible para las plantas (Haneklaus *et al.*, 2000; Tabatabai, 2005). En cambio, el azufre elemental (AE) es una fuente azufrada aún poco utilizada, pero con consumo creciente. En otras regiones de Latinoamérica, como también en China y África, su aplicación en la agricultura se incrementó considerablemente en los últimos años (Randazzo, 2008). El AE es un mineral insoluble en agua y muy abundante en la naturaleza. La principal ventaja del AE como fertilizante azufrado es su concentración en S, superior a cualquier otro fertilizante azufrado (>90% de S). Este atributo reduce los costos de elaboración y transporte. En la Argentina, se disponen de importantes yacimientos de este mineral (Peroni & Castro, 2005). Sin embargo, a diferencia de las fuentes sulfatadas, el AE requiere ser oxidado en el suelo para liberar SO₄²⁻ disponibles para las plantas. Este proceso involucra a diversos organismos: quimioautotróficos, fotoautotróficos y heterótrofos (Germida & Janzen, 1993).

La velocidad de oxidación y, por lo tanto, el período en el cual el S es completamente oxidado, depende de factores asociados con el ambiente, tipo de suelo y propiedades del azufre elemental (Horowitz & Meurer, 2007). Los principales factores ambientales que afectan las tasas de oxidación son la temperatura, la disponibilidad

hídrica y el contenido de MO del suelo, variables que inciden en la actividad y población microbiana edáfica (Wen *et al.*, 2003). Otros factores importantes que regulan el período requerido para la oxidación completa del AE (*i.e.* velocidad o tasa de oxidación) son las propiedades del fertilizante, principalmente su concentración y granulometría (Horowitz & Meurer, 2007). Las fuentes de AE más concentradas y con menor granulometría (*e.g.* micronizado) incrementan la velocidad de oxidación y provisión de SO₄²⁻ y por lo tanto, son consideradas más reactivas en el suelo. Los modelos de liberación de S desde el AE propuestos por McCaskill & Blair (1989), a partir de diferentes tamaños de partículas iniciales de fertilizantes azufrados, indican que, cuando se utilizan fuentes de AE con granulometrías muy finas (menores a 100 μm), es posible oxidar todo el AE en alrededor de 100 días. La mayor velocidad de oxidación del AE mejoraría la aptitud para su aplicación en cultivos anuales o donde se presenten situaciones ambientales limitantes para la oxidación del AE (*e.g.* bajas temperaturas).

La información experimental disponible sobre evaluación agronómica de fertilizantes azufrados se refiere principalmente a fuentes azufradas solubles, las cuales, comparadas entre ellas, han mostrado similar eficiencia agronómica. Esto incluye también la comparación de fuentes sulfatadas con alta solubilidad en agua como el SPS o SA con otras poco solubles como el yeso agrícola (Torres Duggan *et al.*, 2006; Gutiérrez Boem *et al.*, 2007). Sin embargo, la investigación en condiciones de campo sobre las respuestas y la eficiencia agronómica del S aplicado como AE en relación a fertilizantes azufrados solubles de uso convencional ha sido escasamente explorada en la Argentina. Existe información que indica buena aptitud del AE para ser usado en cultivos de grano, como la reportada por Tysko & Rodríguez (2006). La información reportada en la literatura internacional sobre la respuesta a la fertilización con AE en relación a fertilizantes azufrados sulfatados es variable. La eficiencia agronómica depende de varios factores, entre ellos: tipo de suelo, propiedades físicas del AE, dosis, entre otros (Lefroy *et al.*, 1994; Girma *et al.*, 2005; Horowitz & Meurer, 2007). Cuando se presentan condiciones poco favorables para la oxidación del AE (*e.g.* baja temperatura o humedad edáfica), la respuesta de las fuentes azufradas solubles puede ser mayor. Se hipotetiza que, para las condiciones de la Región Pampeana, los dos tipos de fuentes azufradas tienen similar impacto sobre el rendimiento y eficiencia agronómica del S aplicado.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

- 1- Evaluar la respuesta a la fertilización con una fuente reactiva de AE en relación a un fertilizante azufrado

- sulfatado, aplicado en trigo, ante distintas dosis de S y en diferentes condiciones edafo-climáticas.
- 2- Comparar, para el conjunto de experimentos, la eficiencia agronómica del S aplicado con las distintas fuentes.
 - 3- Relacionar las respuestas a la fertilización azufrada con variables de suelo y clima.

resultante del proceso de micronizado (partículas de 200 μm) y posterior granulado o aglomerado a un tamaño adecuado para el manipuleo y aplicación a campo (rango 2-4 mm). Como fuente azufrada soluble se aplicó SA granulado (21-0-0+24 S). El factor 2 tuvo dos niveles: 10 y 30 kg ha^{-1} (primer año) y 15 y 30 kg ha^{-1} (segundo año).

Previo a la siembra los fertilizantes se aplicaron al voleo en superficie. En todas las parcelas se aplicó una fertilización de base con 100 kg ha^{-1} de N y 10 kg ha^{-1} de P para evitar deficiencias de estos nutrientes. El N aportado en los tratamientos con SA fue descontado de la fertilización de base en las unidades experimentales correspondientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características y ubicación de sitios experimentales

Se condujeron ocho experimentos durante dos años consecutivos, en lotes de producción de trigo, cinco en la campaña 1999-2000 y tres durante la campaña 2000-2001. Los mismos se ubicaron en establecimientos agropecuarios situados en la Pampa Ondulada y la Pampa Plana. La latitud y longitud de los sitios experimentales cubrió el área desde 32° 25' S, 60° 52' O a 36° 25' S, 61 52' O. En la Tabla 1 se resume la información de manejo agronómico en cada sitio experimental. El tipo de suelo varió según el sitio considerado: Argiudoles típicos en Urquiza y Pergamino; Argiudoles vérticos en Arequito y Hapludoles típicos en Alberti y Bragado. Esta región presenta clima templado, precipitaciones anuales cercanas a 1.000 mm y temperaturas medias en el rango de 14-18 °C.

Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques completos al azar (DBCA) con cuatro repeticiones en el primer año y seis repeticiones en el segundo año. Se aplicó un arreglo factorial de tratamientos. El factor 1 fue el tipo de fuente y el factor 2 correspondió a la dosis de S. El factor 1 tuvo dos niveles: AE y sulfato de amonio (SA). Además, se dispuso de un tratamiento testigo (sin agregado de S). El AE (95% S) provisto por Sulferworks®, es el producto

Determinaciones en suelo y planta

Previo al inicio de los experimentos, se realizó un muestreo compuesto de suelos en la profundidad de 0-20 cm, para determinar las principales características de fertilidad de los sitios experimentales (Tabla 2). Para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables se utilizó acetato de amonio neutro 1 N y la cuantificación se realizó por espectroscopia de absorción atómica (Thomas, 1982). El nivel de P fue determinado por extracción con Bray 1 utilizando una relación suelo-solución de 1:7 con un minuto de agitación y cuantificación colorimétrica (Bray & Kutz, 1945). El C orgánico total se determinó según la metodología propuesta por Nelson & Sommers (1996). El pH se evaluó en forma potenciométrica en una suspensión suelo-agua 1:2,5 (Peech, 1965). Para la extracción de S-SO_4^{2-} se utilizó KH_2PO_4 1M, con relación suelo-solución de 1:5 luego de una hora de agitación. El S se determinó por turbidimetría utilizando carbón activado y cuantificación espectrofotométrica a una longitud de onda de 450 nm (Lisle *et al.*, 1994).

En madurez fisiológica se determinó biomasa de grano. La cosecha fue manual, tomando 2 m^2 por parcela. Las plantas fueron secadas en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante y posteriormente trilladas con máquina experimental estacionaria. La biomasa de grano se expresó en Mg ha^{-1} en humedad comercial (140 g kg^{-1}).

Tabla 1. Principales características de manejo y ubicación geográfica de sitios experimentales.

Table 1. Main agronomic and management information of studied sites.

Sitio	Localidad	Ubicación geográfica	Cultivo antecesor	Variedad	Fecha de siembra
Año 1					
1	Urquiza	33°55' S, 60°22' W	Soja 1ra	Klein Cacique	29/6
2	Arequito	33°09' S, 61°29' W	Soja 1ra	Klein Cacique	18/6
3	Bolivar	36°13' S, 61°07' W	Girasol	Klein Brujo	17/6
4	Alberti	35°01' S, 60°16' W	Soja 2da	Klein D. Enrique	5/7
5	Pergamino	36°25' S, 61°24' W	Girasol	Triguero 230	21/7
Año 2					
6	Alberti	35°01' S, 60°16' W	Soja 1ra	Klein D. Enrique	21/7
7	Arequito	33°09' S, 61°29' W	Soja 1ra	Klein D. Enrique	10/7
8	Bragado	35°07' S, 60°30' W	Soja 1ra	Klein D. Enrique	15/7

Tabla 2. Principales características de suelo (0-20 cm) de sitios experimentales.

Table 2. Main topsoil properties (0-20 cm) of the studied sites.

Sitio	pH	MO g kg ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	K cmol kg ⁻¹	Mg cmol kg ⁻¹	S-SO ₄ ²⁻ mg kg ⁻¹	P Bray 1 mg kg ⁻¹
1 Urquiza	6,0	27	11,7	333	167	6,8	11
2 Arequito	5,8	29	15,1	266	266	7,2	18
3 Bolivar	6,0	27	8,6	155	155	4,5	35
4 Alberti	5,9	29	13,2	272	272	7,2	12
5 Pergamino	6,4	41	17,1	614	614	3,7	21
6 Alberti	6,0	37	12,8	244	244	3,4	11
7 Arequito	6,0	41	17,2	310	310	10,7	55
8 Bragado	5,9	37	17,9	248	248	2,4	22

La duración aproximada del período de macollaje del trigo en cada sitio-año, se estimó con el software «CRONOTRIGO» (Abeledo *et al.*, 2005).

Registro de información climática

La información de temperaturas y precipitaciones para los diferentes sitios experimentales fue provista por estaciones experimentales y agencias de extensión de INTA. Las series históricas de precipitación y temperatura en el área de estudio fueron obtenidas del Atlas Agroclimático de la Argentina (Murphy *et al.*, 2008).

Análisis estadístico

Los efectos de la fertilización en cada sitio y año, se evaluó a través del Análisis de la Variancia (ANVA). Para determinar los efectos de fuente, dosis e interacción fuente x dosis, se realizó un ANVA factorial, utilizando solo los tratamientos que recibieron fertilización, sin el testigo. En los sitios donde se observó efecto significativo de la fertilización, se realizaron contrastes ortogonales para evaluar las diferencias en rendimiento entre fuentes (SA-AE) y entre las dosis (Dosis 2-Dosis 1). En los sitios sin interacción significativa fuente x dosis, los contrastes se realizaron utilizando las medias de cada fuente (promediando las dos dosis de S). Por el contrario, en los sitios donde se determinó interacción significativa fuente x dosis ($p < 0,05$) los contrastes se realizaron para cada nivel de dosis, por separado. Los efectos estadísticos de fuente indican desde el punto de vista agronómico, las diferencias en efectividad agronómica entre las fuentes azufradas comparadas.

La asociación entre las respuestas y las variables edafoclimáticas se analizó a través del análisis de correlación lineal (coeficientes de correlación de Pearson) y regresión lineal simple. Para comparar la diferencia en eficiencia agronómica del S aplicado (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) entre las fuentes azufradas, se realizó una prueba T, bilateral, analizando en forma conjunta todos los sitios. Se utilizó el programa Info Stat (Profesional, versión 1.1) y para los análisis estadísticos en gráficos se utilizó el programa Prism® (Graph Pad versión 4.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características climáticas de los años evaluados

En la Figura 1 se presenta la temperatura media mensual registrada durante el ciclo del trigo y los valores históricos en el área de estudio. En la Figura 2 se muestran las precipitaciones medias mensuales en los sitios experimentales y los registros históricos medios en el área de estudio. La precipitación media anual del primer año, fue de 730 mm y la del segundo año 1.377 mm. En el primer año, la mayoría de los sitios presentaron una pluviometría anual inferior a la media regional: -59, -21, -29, -21% en Arequito, Bolivar, Urquiza y Pergamino, respectivamente. En Alberti, la media de precipitaciones fue de 995 mm, similar a la media del área de estudio. En el segundo año de ensayos, las precipitaciones superaron la media regional en todos los sitios: +48, +27 y +45% en Arequito, Alberti y Bragado, respectivamente.

La temperatura media mensual de los dos años de experimentos fue similar a los registros climáticos históricos en el área de estudio (Murphy *et al.*, 2008). En la Figura 2 se muestra las temperaturas medias de los sitios experimentales y la comparación con los registros históricos para el área de estudio. El rango de temperatura media durante el período de macollaje del cultivo (período junio-septiembre) fue de 8 a 14 °C para el primer año y de 6 a 12 °C para el segundo año, similar a la serie climática histórica (período 1971-2000), en la cual el rango térmico fue de 9 a 13 °C. La temperatura media correspondiente al período de macollaje se mantuvo por encima del valor crítico de 4 °C, debajo del cual la velocidad de oxidación del AE se hace prácticamente nula (Blair *et al.*, 1993).

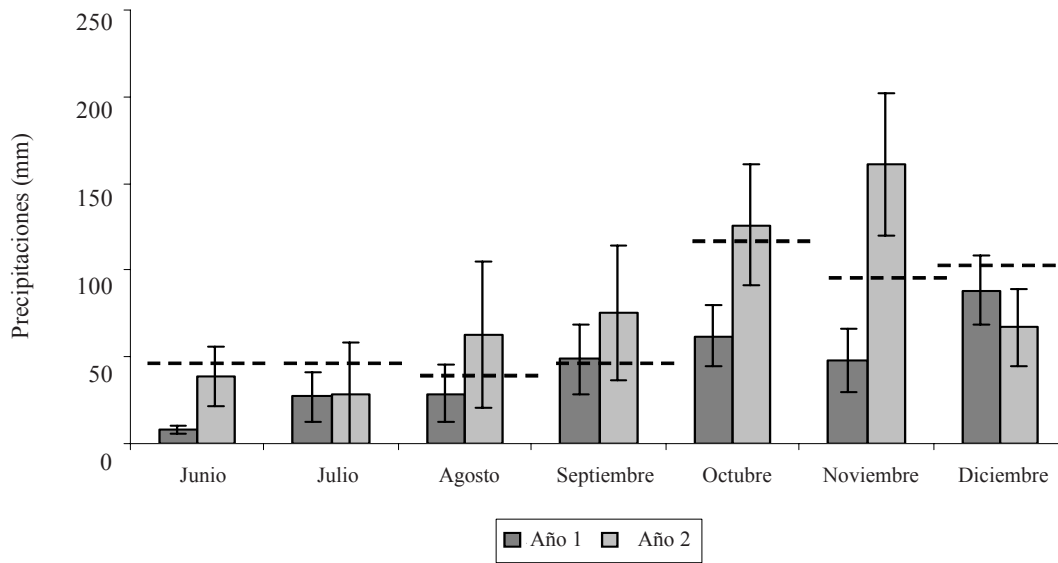


Figura 1. Precipitación media mensual durante los años de experimentos (año 1 n=5, año 2, n=3). Las barras indican el desvío estándar de la media. La línea punteada indica la precipitación media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

Figure 1. Mean monthly rain-fall for two years of experiments (year 1, n=5, year 2, n=3). Standard deviation of the means is indicated by bars. Lines indicate historical rain-fall (1971-2000).

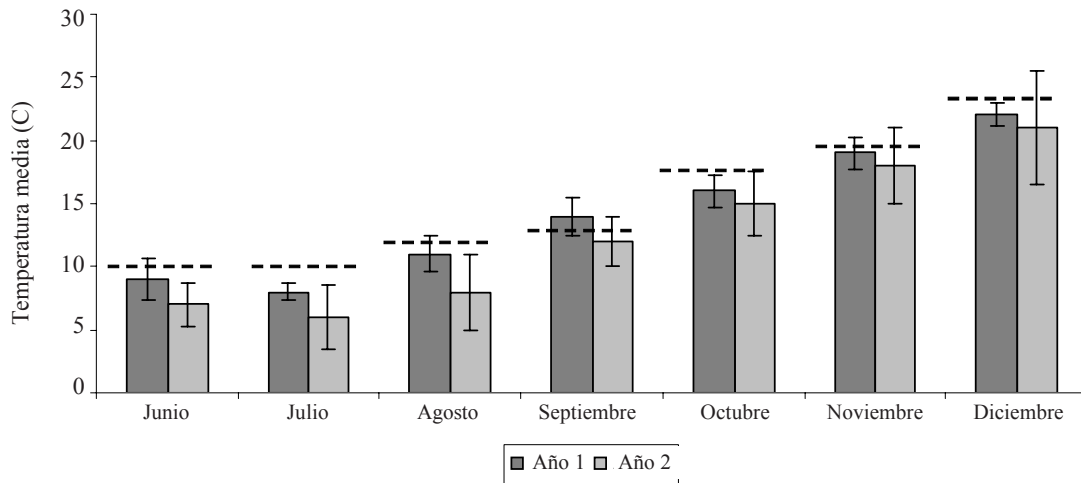


Figura 2. Temperatura media mensual para los dos años de experimentos (año 1, n=5, año 2, n=3). Las barras indican el desvío estándar de la media. La línea punteada indica la temperatura media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

Figure 2. Mean monthly temperature for two years of experiments (year 1, n=5, year 2, n=3). Standard deviation of the means is indicated by bars. Lines indicate historical temperatures values (1971-2000).

Efectos de fuentes y dosis

En la mayoría de los sitios-años no se observó efecto significativo de la fuente azufrada ni de la dosis aplicada o de la interacción fuente x dosis ($p > 0,05$) (Tabla 3). Desde una perspectiva agronómica, el AE y el SA generaron similar respuesta a la fertilización azufrada. En cuanto al efecto de dosis, el primer nivel de S aplicado en los experimentos (10 kg ha^{-1} de S en el primer año y 15 kg ha^{-1} en el segundo año) resultaron suficientes para cubrir las necesidades de S del cultivo.

De los sitios donde se obtuvieron efectos significativos de tratamiento ($p < 0,05$, Tabla 5) solo en dos de ellos (Pergamino y Urquiza), se observaron diferencias en respuesta entre fuentes azufradas. En Pergamino, el contraste entre medias de fuentes indicó que el rendimiento obtenido con el SA fue mayor que con AE (*i.e.* mayor efectividad agronómica), con una diferencia de casi 300 kg ha^{-1} , pero solo con la dosis más alta. En Urquiza, se observó una tendencia ($p = 0,057$) con mayor respuesta con SA comparado al AE, en ambas dosis aplicadas (Tabla 4).

Tabla 3. Medias de rendimiento en grano (kg ha^{-1} , $n=5$ año 1; $n=3$ año 2) según tratamiento de fertilización y detalle del análisis estadístico (valores p). Efecto de tratamiento indicado como valor p del ANOVA. D=efecto de dosis, F= efecto de fuente. FxD=interacción fuente x dosis. Niveles de dosis de S se indican como 1 y 2.

Table 3. Yield grain means (kg ha^{-1} , $n=4$ year 1; $n=6$ year 2) for different treatments and a summary of statistical analysis (p values). Global treatment effect is presented as p ANOVA. D=rate effect, F= source effect. FxD=source x rate interaction. Levels of S rates are indicated as 1 and 2.

Sitio	Tes.	Año 1								Valor p
		SA ₁	SA ₂	AE ₁	AE ₂	LSD	F	D	FxD	
($\alpha=0,05$)										
1 Urquiza	3.515	3.959	3.935	4.641	3.635	607	0,04	0,24	0,40	<0,029
2 Arequito	3.245	3.777	3.712	3.926	3.759	233	0,23	0,15	0,52	<0,001
3 Bolivar	3.367	3.822	4.117	4.208	4.201	782	0,10	0,30	0,28	0,0020
4 Alberti	4.186	4.459	4.489	4.353	4.368	-	-	-	-	0,51
5 Pergamino	3.867	4.959	5.323	4.443	3.973	-	<0,001	0,46	0,02	0,0030
Año 2										
6 Alberti	2.777	3.257	3.686	3.560	3.686	798	0,21	0,19	0,90	0,0418
7 Arequito	3.686	4.368	4.406	4.381	4.406	430	0,94	0,86	0,86	0,0126
8 Bragado	2.146	4.141	4.620	3.863	4.014	848	0,14	0,27	0,97	0,0004

Nota: los efectos de fuente y dosis, por tratarse de un diseño factorial, no incluye la consideración del tratamiento testigo.

Tabla 4. Contrastes ortogonales entre medias de fuentes (SA-AE) expresados en kg ha^{-1} para los diferentes sitios experimentales.

Table 4. Contrast between means of sources (SA-AE) expressed in kg ha^{-1} in different experimental sites.

Año 1		
Sitio	Contraste	Valor p
Urquiza	205	0,057
Arequito	-31	0,24
Bolivar	-235	0,11
Pergamino*	318 (SA ₁ -AE ₁)	0,33
	349 (SA ₂ -AE ₂)	0,012
Año 2		
Arequito	-339	0,21
Alberti	-9	0,94
Bragado	434	0,14

*Los subíndices consignados a continuación de cada fuente (SA o AE), indica el nivel de dosis aplicada (1=primer nivel de dosis, 2=segundo nivel de dosis).

Tabla 5. Rendimientos medios (kg ha^{-1}) de tratamientos sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S (año 1, $n=4$; año 2, $n=6$). La respuesta se calculó a través del contraste ortogonal entre las medias de tratamientos fertilizados con S y la media de tratamientos sin agregado de S.

Table 5. Yield grain mean (kg ha^{-1}) for control (without S application) and fertilized treatments (year 1, $n=4$; year 2, $n=6$). Responses to S were calculated as orthogonal contrast between means of fertilized treatments and control.

Sitio	Testigo	Fertilizado	Respuesta	Valor p
Año 1				
1 Urquiza	3.513	3.835	322	<0,01
2 Arequito	3.287	3.793	506	0,0001
3 Bolivar	3.367	4.087	720	0,0002
4 Alberti	4.186	4.417	231	0,097
5 Pergamino	3.867	4.724	857	0,0011
Año 2				
6 Alberti	2.777	3.641	864	0,011
7 Arequito	3.686	4.389	703	0,0007
8 Bragado	2.116	4.135	2.019	0,0055

En Pergamino, si bien no se midió la variación de pH en el suelo luego de la aplicación del fertilizante, la ocurrencia de fitotoxicidad causado por el fertilizante parecería al menos poco probable, ya que la misma se evidencia con dosis más elevadas, como las utilizadas en corrección de suelos. Tampoco las condiciones termo-hídricas resultaron restrictivas en este sitio. Por lo tanto, las posibles causas de la menor respuesta obtenida con AE en ese sitio se pueden deber a la acumulación de productos tóxicos o ácidos alrededor de las partículas del mineral (limitando la normal oxidación) o una reducida accesibilidad microbiana a los gránulos de fertilizante (Chien *et al.*, 1988; Deng & Dick, 1999).

En Urquiza, el menor rendimiento obtenido con el AE en relación al SA se pudo deber a una reducción en la capacidad del AE para proveer sulfatos en este ambiente edáfico, teniendo en cuenta que las respuestas fueron más bajas con AE, para los dos niveles de S aplicados. Teniendo en cuenta que las temperaturas durante macollaje fueron similares entre los sitios experimentales, la menor respuesta con AE puede ser relacionada con variables hídricas (*e.g.* distribución de lluvias y su efecto en la disgregación del AE) y/o edáficas. En Urquiza, al igual que en Arequito, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron menores a 300 mm. En el resto de los sitios-año, las lluvias fueron mayores (datos no mostrados). De los sitios mencionados con menor precipitación (Urquiza y Arequito), solamente en Urquiza se observó diferencias en efectividad entre las fuentes azufradas. En este sitio, la menor oferta hídrica mencionada y un bajo contenido de MO,

podieron limitar la oxidación del AE, reduciendo la respuesta relativa al SA. Así, es posible que se haya generado una interacción combinada de menor disponibilidad hídrica superficial (*i.e.* menor disgregación del AE) y el bajo contenido de MO. El contenido de MO en este sitio se lo puede considerar pobre, ya que se encuentra levemente por encima de 25 g kg^{-1} , umbral por debajo del cual se considera un suelo poco provisto en MO en la Pampa Ondulada (Pilatti *et al.*, 2005). Estudios de incubación de suelos efectuados por Horowitz & Meurer (2007) indicaron una clara relación inversa y significativa entre la tasa de oxidación del AE y el contenido de C orgánico del suelo. Otras variables evaluada por estos autores (*e.g.* pH, P disponible, cationes, etc.), no se relacionaron con la oxidación del AE.

Resultados similares a los observados en el presente trabajo fueron reportados por Tysko & Rodríguez (2006) quienes detectaron respuestas significativas a la aplicación de una fuente de AE reactiva en tres de cinco sitios experimentales. El rango de respuestas fue de $400\text{-}550 \text{ kg ha}^{-1}$ utilizando dosis de 24 y 40 kg ha^{-1} de S. En cambio, Girma *et al.* (2005) reportaron menor efectividad agronómica del AE en comparación al yeso en trigo, evaluando dosis elevadas de aplicación de S (56 , 112 y 224 kg ha^{-1} de S). En términos generales, observaron mayores respuestas con yeso que con AE. Sólo en pocos sitios, donde se registraron lluvias intensas, el yeso mostró menor performance que el AE, posiblemente debido a pérdidas por lixiviación de SO_4^{2-} . La menor efectividad agronómica del AE fue atribuida a la menor liberación de SO_4^{2-} (requerimiento

de oxidación) o a un posible efecto negativo de la acidificación del AE sobre el rendimiento del trigo.

La efectividad agronómica similar del AE respecto del SA indica que las condiciones requeridas para la oxidación del primero han sido adecuadas, pudiendo sincronizarse la demanda del cultivo y la biodisponibilidad del S proveniente del AE.

Eficiencia agronómica de las fuentes azufradas

El análisis conjunto de los sitios donde se observó efecto significativo de la fertilización ($P < 0,05$ en el ANVA), indicó que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P > 0,05$) en eficiencia agronómica (kg de grano kg de S aplicado) entre el SA y el AE (Fig. 3).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Friesen (1991), quien reportó la misma eficiencia entre el AE (e.g. polvo y granulado) y fuentes sulfatadas como yeso y superfosfato simple de calcio, en experimentos conducidos en climas semiáridos y subhúmedos de África, aplicando dosis similares a las evaluadas en estos experimentos. En el mismo sentido, Boswell & Friesen (1993), evaluando la aptitud agronómica de diferentes fuentes de AE para distintas regiones agroclimáticas de Nueva Zelanda, de-

terminaron que la mayor eficiencia de uso del S aplicado se obtiene con granulometrías menores a 150 y 250 μm , para condiciones climáticas templadas y frías, respectivamente, y pluviometrías similares o mayores a las de la Región Pampeana. En nuestros experimentos, la granulometría del AE (200 μm) se encontraba dentro de ese rango, considerado adecuado para que el fertilizante presente mayor velocidad de oxidación en el suelo y capacidad de proveer sulfatos.

A diferencia de los resultados obtenidos en este trabajo, Franzen & Grant (2008) indican que, para las condiciones de las llanuras del medio oeste de EE.UU., los resultados de la fertilización azufrada son generalmente maximizados cuando se aplican fuentes sulfatadas solubles, como SA, tiosulfato de amonio o yeso, en comparación con el AE, sin caracterizar o diferenciar granulometrías u otras propiedades.

Rendimientos y respuesta a la fertilización

El rendimiento medio del primer año fue de 3.907 kg ha^{-1} (mínimo=3.287 kg ha^{-1} , máximo 4.724 kg ha^{-1}) y en el segundo año 3.457 kg ha^{-1} (mínimo=2.116 kg ha^{-1} , máximo 4.389 kg ha^{-1}).

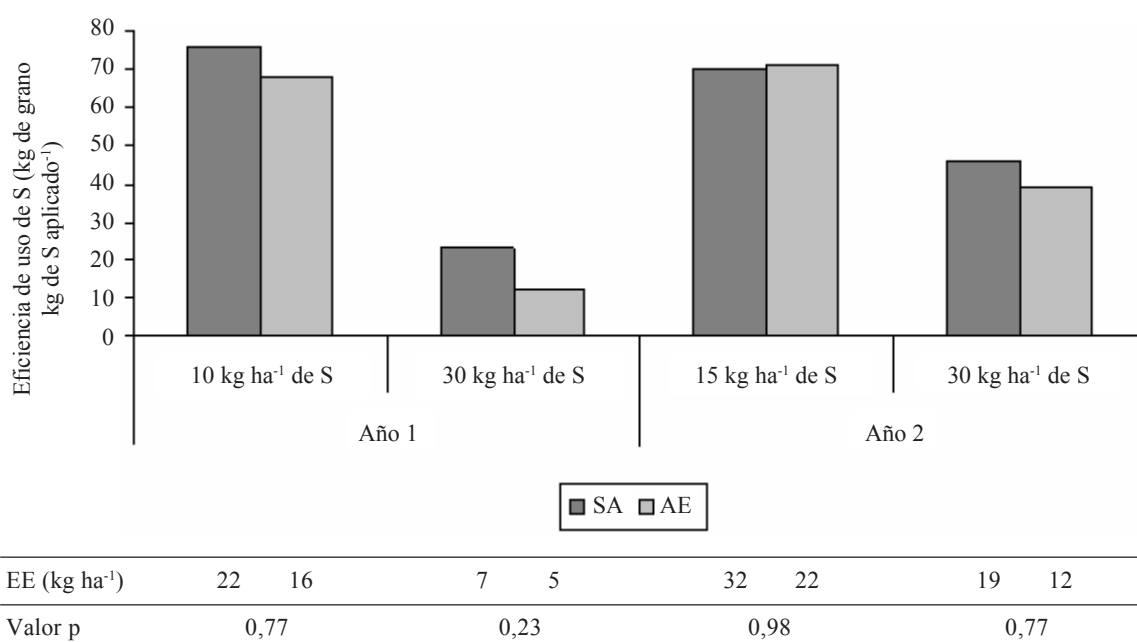


Figura 3. Eficiencia de uso de S (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) para las fuentes azufradas evaluadas (SA: sulfato de amonio, AE: azufre elemental), para cada dosis de S aplicada y año. Se indican los valores p de las pruebas de T (comparación de media bilateral) entre las eficiencias de fuentes (SA vs. AE) y el error estándar de las eficiencias para cada fuente y dosis.

Figure 3. Sulphur agronomic efficiency (kg of grain yield kg de S applied⁻¹) for sulphur sources (SA: ammonium sulphate, AE: elemental sulphur), for different rates and evaluation years. Standar erros (EE) and p values of two samples T test are showed, for each S source and rate.

Se determinó respuesta significativa ($p < 0,05$) en cuatro de cinco sitios durante el primer año y en todos los sitios en el segundo año (Tabla 5). Las respuestas medias del primer año (600 kg ha^{-1}) fueron similares a las reportadas por Reussi Calvo *et al.* (2006) en ensayos conducidos en el sudeste de Buenos Aires, en suelos con similares contenidos iniciales de S-SO_4^{2-} (0-20 cm) y a las indicadas en una revisión realizada por la FAO (2004) para la Región Pampeana ($200\text{-}500 \text{ kg ha}^{-1}$ con dosis de $5\text{-}20 \text{ kg ha}^{-1}$ de S como SO_4^{2-}). En el segundo año se determinaron respuestas medias más elevadas y con mayor variabilidad siendo la mínima respuesta de 702 kg ha^{-1} (Alberti) y la máxima de 2.119 kg ha^{-1} (Bragado). Las mayores respuestas obtenidas en este último sitio se correspondieron con una severa deficiencia de S, evidenciada por el reducido contenido de sulfatos iniciales ($2,4 \text{ mg kg}^{-1}$ de S-SO_4^{2-} en el estrato de 0-20 cm, Tabla 2). El bajo rendimiento del testigo en este sitio (2.116 kg ha^{-1}) y los importantes incrementos de rendimiento por agregado de S, indicarían una baja disponibilidad de S y condiciones ambientales favorables para la expresión de las respuestas en el período crítico para la definición del rendimiento (20 días antes y 10 días después de floración). En este sentido, Salvagiotti & Miralles (2008) observaron un claro incremento en la biomasa de grano en madurez fisiológica del trigo por agregado de S en experimentos conducidos en Oliveros (Pcia. de Santa Fe), además de detectar interacción entre el N y el S aplicado. Posiblemente, en los experimentos presentados en este trabajo, una adecuada disponibilidad de N (provista por el suelo y por el N de base aplicado en los tratamientos fertilizados con S), habría permitido una mayor expresión del rendimiento en los tratamientos fertilizados. Coincidentemente,

Anderson *et al.* (2006) reportaron elevadas respuestas a la fertilización azufrada (36 al 112% sobre el testigo) aplicando dosis similares de S a las del presente estudio, también con bajos rendimientos de los tratamientos testigo, en suelos arenosos con reducida disponibilidad inicial de S (media de $3,8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ S-SO}_4^{2-}$; 0-20 cm) y menores contenidos de MO (1,8%). Valores más bajos de respuesta a la fertilización azufrada fueron reportados por Salvagiotti *et al.* (2004), quienes condujeron ensayos en la misma área agro-ecológica que el presente estudio, en suelos similares en su contenido de sulfatos iniciales. Dado que la disponibilidad edáfica de S (inicial + mineralizado) habría cubierto los requerimientos de S del cultivo, estos autores atribuyeron las bajas respuestas a problemas fitosanitarios (*Fusarium graminearum*) que generaron bajos rendimientos en grano ($1.734\text{-}2.717 \text{ kg ha}^{-1}$).

Relación entre las respuestas a la fertilización y variables edafo-climáticas

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos entre las respuestas a la fertilización azufrada (Tratamiento fertilizado-testigo) y variables edafo-climáticas. Las variables asociadas positivamente con las respuestas fueron: precipitaciones (macollaje, barbecho y totales del ciclo); contenido de MO y la CIC. La variable asociada negativamente con las respuestas fue el contenido de S-SO_4^{2-} (0-20 cm). En cambio, no se detectó asociación alguna entre las respuestas y la temperatura en macollaje o durante el ciclo. Esto se debería al estrecho rango explorado (poca variabilidad en temperaturas entre sitios y años).

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha^{-1}) al agregado de S y variables edafo-climáticas.

Table 6. Pearson correlation coefficients and statistical significance (p value) between S response (kg ha^{-1}) and soil and climate variables.

Variable	Coefficiente correlación (r)	Valor p
MO	0,45	0,01
CIC	0,47	<0,01
S-SO_4^{2-}	-0,43	0,01
Precipitación en macollaje	0,76	<0,01
Precipitación en barbecho	0,54	<0,01
Precipitación total ciclo	0,60	<0,01
Temperatura en macollaje	-0,30	0,08
Temperatura media ciclo	-0,06	0,72

La relación directa observada entre las respuestas a la fertilización azufrada y el contenido de MO o CIC del suelo, posiblemente indiquen gradientes ambientales (*i.e.* variaciones en calidad de sitio) explorados en el conjunto de experimentos. Esto se correspondió con los rendimientos absolutos de los tratamientos fertilizados que fueron más altos en sitios con mayor contenido de MO y/o que tuvieron mayores precipitaciones en macollaje o durante el ciclo de cultivo y viceversa. Es decir, en los sitios donde se presentaron mayores respuestas a la fertilización azufrada, también fueron mayores los rendimientos absolutos de los tratamientos fertilizados, mientras que el rendimiento de los testigos no se asoció con las variaciones en los contenidos de MO o precipitaciones (datos no mostrados).

A diferencia de lo mencionado previamente, el contenido de SO_4^{2-} medido a la siembra del trigo se asoció inversamente con las respuestas, independientemente del contenido de MO o CIC del suelo. Sin embargo, el ajuste obtenido fue muy bajo (r^2 medio=0,18), sin diferencias en pendientes o interceptos entre las fuentes (datos no mostrados). La relación inversa y el bajo ajuste entre las respuestas y el contenido de SO_4^{2-} a la siembra coinciden con lo indicado por Gutiérrez Boem (2006), quien mencionó que las dificultades para encontrar relaciones estables entre las respuestas y el contenido de S-SO_4^{2-} a la siembra de los cultivos se podrían deber a diferentes causas. Entre ellas se destacan la presencia de S-SO_4^{2-} por debajo de la profundidad de muestreo o en el agua de capas freáticas cercanas a la superficie; los errores en la determinación de la concentración de S-SO_4^{2-} en los extractos de suelo; la estimación poco precisa de la mineralización de S-SO_4^{2-} durante el ciclo basado en el contenido de materia orgánica y textura del suelo, etc. En el presente estudio, el gradiente ambiental explorado también contribuyó a que existan otras fuentes de variación que expliquen las respuestas a la fertilización azufrada.

CONCLUSIONES

En las condiciones bajo las cuales se desarrollaron los ensayos y para el conjunto de los experimentos, la eficiencia agronómica del AE fue similar a la del SA, por lo cual se acepta la hipótesis planteada. El AE aplicado en los experimentos se habría oxidado completamente durante el período siembra-macollaje, indicando que constituye una fuente azufrada adecuada para proveer SO_4^{2-} al cultivo. La relación inversa detectada entre las respuestas y el contenido de SO_4^{2-} fue poco robusta como para utilizarla en modelos de diagnóstico de fertilidad y requiere de mayores estudios. Los resultados obtenidos en el presente trabajo solo pueden ser extrapolados a situaciones edafo-

climáticas y de manejo similares y donde la fuente de AE aplicada presente similares propiedades físicas, sobre todo, granulometría.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a la financiación de Honeywell, Ltd, Sulferworks, Ltd (Canadá) and IMC, Inc. Se agradece especialmente al Dr. Graeme Blair por su apoyo y permanente estímulo. Se extiende el agradecimiento al personal de la Estación Experimental INTA Pergamino, quienes colaboraron tanto en el trabajo de campo como de laboratorio. Especialmente al Sr. Luis y al Téc. Agr. Javier Lavandera. Asimismo, agradecemos a Tecnoagro S.R.L por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- Abeledo, GL; I Alzueta; D de Abelleira & DJ Miralles. 2005. Programa CONOTRIGO. Cátedra de Cerealicultura. Facultad de Agronomía (UBA).
- Anderson, GC; IRP Fillery; FH Ripper & BJ Leach. 2006. Sulfur mineralization in coarse-textured soil after different sulfate fertilisation histories, and yield responses of wheat and lupin. *Australian Journal of Soil Research* 44: 165-174.
- Blair, GJ; RDB Lefroy; MDana & GC Anderson. 1993. Modelling of sulphur oxidation from elemental sulfur. *Plant and Soil* 155/156: 379-382.
- Boswell, CC & DK Friesen. 1993. Elemental sulfur fertilizers and their use on crops and pastures. *Fertilizer Research* 35: 127-149.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* (59): 39-45.
- Chien, SH; DK Friesen & BW Hamilton. 1988. Effect of application method on availability of elemental sulfur in cropping sequences. *Soil Sci.* 52: 165-169.
- Deng, S & RP Dick. 1999. Sulfur oxidation and rhodanese activity in soils. *Soil Sci.* 150(2): 552-560.
- FAO. 2004. Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome. 45 pp.
- Franzen, D & CA Grant. 2008. Sulfur response based on crop, source, and landscape position. Chapter 7. *In: Sulfur: A missing link between Soils, Crops, and Nutrition.* Joseph Jez (ed.). Agronomy Monograph N° 50. ASA, CSSA, SSSA. 313 p.
- Friesen, DK. 1991. Fate and efficiency of sulfur fertilizer applied to food crops in West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2(1): 35-44.
- García, FO & F Salvaggiotti. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. *En: Actas del XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.* San José, Costa Rica. 16 al 20 de noviembre de 2009. Simposio «Eficiencia de la Utilización de Nutrientes en Sistemas Agrícolas». 18p.

- García, FO & HE Echeverría. 2008. Fertilización del trigo. *En: Fertilización de cultivos y pasturas. Segunda edición ampliada y actualizada.* Melgar y Díaz-Zorita (coordinadores). INTA-Hemisferio Sur. 569 p.
- Germida, JJ & HH Janzen. 1993. Factors affecting the oxidation of elemental sulphur in soils. *Fertilizer Research* 35: 101-114.
- Girma, K; J Mosali; KW Freeman & WR Raun. 2005. Forage and Grain Yield Response to Applied Sulfur in Winter Wheat as Influenced by Source and Rate. 28: 1541-1553.
- Gutiérrez Boem, FH. 2006. Azufre. *En: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos.* R Álvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía 206 pp.
- Gutiérrez Boem, FH; P Prystupa & G Ferraris. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition* 30: 93-104.
- Haneklaus, S; E Bloem & E Schnug. 2000. Sulphur in agroecosystems. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis.* 204. *Agricultura* (81): 17-32.
- Horowitz, N & EJ Meurer. 2007. Relationship between soil attributes and elemental sulfur oxidation in 42 soil samples from Brazil. *R.Bras.Ci.Solo* 31: 455-463.
- InfoStat/Profesional. Universidad Nacional de Córdoba. Estadística y Diseño. FCA. 2002. Versión 1.1.
- Lefroy, RDB; M Dana & G Blair. 1994. A glasshouse evaluation of sulfur fertilizer sources for crops and pastures. III: Soluble and non-soluble sulfur and phosphorus sources for pastures. *Aust. J. Agric. Res.* 45: 1525-537.
- Lisle, L; R Lefroy; G Anderson & G Blair. 1994. Methods for the measurement of sulphur in plant and soils. *Sulphur in Agriculture* 18: 45-54.
- McCaskill, MR & G Blair. 1989. A model for the release of sulfur from elemental S and superphosphate. *Fertilizer Research* 19: 77-84.
- Murphy, GM; RH Hurtado; ME Fernández Long; LA Serio; PA Faroni; S Maio; LB Spescha & IE Barnatán. 2008. Atlas Agroclimático de la Argentina. Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 130 pp.
- Nelson, DE & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, organic matter. 961-1010 p. *In: JM Bigham (eds.). Methods of Soil Analysis (part 3).* ASA and SSA, Madison. WI. USA.
- Peech, M. 1965. Method for soil pH in water. Hydrogenion activity. *In: Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Ed. Black, CA. 915-926.
- Pernoni Castro, LN. 2005. Argentina. *En: Otros minerales. Capítulo VII. L Castro y R Melgar (coordinadores). Minerales para la agricultura en Latinoamérica.* Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (eds.). CyTED.UNSAM-OLAMI. 574 pp.
- Pilatti, MA; S Imhoff; P Ghiberto & RP Marano. 2005. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Prism Graph Pad. 2003. Versión 4.
- Reussi Calvo, N; HE Echeverría & H Saiz Rozas. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24(1): 0-0.
- Randazzo, C. 2008. Sulphur Trends. *In: China Phosphate Fertilizer Industry Association. Phosphate Fertilizer Fair and Exhibition.* Weifang, Shandong, China. October, 25.
- Salvagiotti, F & DJ Miralles. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulphur fertilization in wheat. 2008. *Europ. J. Agronomy* 28: 282-290.
- Salvagiotti, F; G Gerster; S Bacigalupo; J Castellarin; C Galarza; N González; V Gudelj; O Novello; H Pedrol & 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.
- Statistix 7. Copyright 1985. Analytical Software. Versión 7.0.
- Tabatabai, MA. 2005. Chemistry of sulfur in soils. *In: Chemical Processes in Soils.* MA Tabatabai and DL Sparks (Coeditors). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Thomas, GW. 1982. Exchangeable cations. *In: AL Page et al., eds.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* 2nd ed. Agron. 9. ASA and SSSA. Madison. Wisconsin. 1559-165 p.
- Torres Duggan, M; S Gambaudo & O Quaino. 2006. Evaluación de fuentes azufradas en trigo en un suelo Argiudol Típico de Santa Fe-Argentina. CD Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo-Salta. Argentina.
- Torres Duggan, M. 2008. Fertilizantes químicos y minerales. *En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Segunda Edición. Hemisferio Sur-INTA.* R Melgar y M Díaz Zorita. Coordinadores. 569 p.
- Torres Duggan, M & MB Rodríguez. 2009. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados: propiedades de las fuentes y eficiencia agronómica. *En: Simposio de Fertilidad 2009.* IPNI Cono Sur. García FO; Ciampitti, IA (eds.). ISBN: 978-987-24977-1-2. 224-233 p.
- Tysko MB & M Rodríguez. 2006. Respuesta de trigo-soja en el doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. *Ciencia del Suelo* 24(2): 139-146.
- Wen, G; JJ Schoenau; S Parick Mooleki; S Inanaga; T Yamamoto & K Hamamura. 2003. Effectiveness of elemental sulphur fertilizer in an oilseed-cereal-legume rotation on the Canadian prairies. *J. Plant Nutr. Soil. Sci.* 166: 54-60.