

## INDICADORES DE RESIDUALIDAD DEL AZUFRE EN EL SUELO EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADE

Biassoni, M.M.<sup>1,\*</sup>, H. Vivas<sup>2</sup>, D.A. Carreira<sup>3</sup>, F.H. Gutiérrez Boem<sup>4</sup>, F. Salvagiotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo Manejo de Cultivos, Suelo y Agua- EEA INTA Oliveros;

<sup>2</sup> Asesor privado;

<sup>3</sup> Instituto de Suelos- EEA Castelar; <sup>4</sup> Facultad de Agronomía-UBA

\* Ruta Nacional 11, km 353, (2206) Oliveros, Prov. de Santa Fe, [biassoni.micaela@inta.gob.ar](mailto:biassoni.micaela@inta.gob.ar)

### RESUMEN

La aplicación de fertilizantes azufrados genera residualidad que es aprovechada por los cultivos siguientes. Los objetivos de este trabajo fueron: i) determinar cambios en fracciones asociadas al S del suelo en respuesta a aplicaciones continuas de S, y ii) evaluar la biodisponibilidad de estas fracciones en el suelo. Al finalizar un ensayo de larga duración (2000-2010) sobre una rotación trigo/soja - maíz temprano - soja donde los tratamientos consistieron en la combinación factorial de tres dosis de P (0, 20 y 40 kg de P ha<sup>-1</sup>) y cuatro dosis de S (0, 12, 24 y 36 kg de S ha<sup>-1</sup>) aplicados a gramíneas, se tomaron muestras de suelo y se realizó un fraccionamiento químico de S: S total (St), S inorgánico total (Si), S orgánico de ésteres (S-O-C), S orgánico ligado al carbono (S-C) y fraccionamiento físico: S de la materia orgánica particulada (S-MOP). En 2010, se sembró un cultivo prueba de maíz que recibió solo fertilización nitrogenada y se usó para estudiar la biodisponibilidad de S. Las fracciones Si, S-O-C y S-MOP aumentaron hasta un 286%, 83%, 61% respectivamente, para los tratamientos fertilizados, con respecto al testigo sin fertilizar. Esto significó un aumento de 2,8 mg kg<sup>-1</sup>, 24,8 mg kg<sup>-1</sup> y 4,6 mg kg<sup>-1</sup> de estas fracciones por cada 100 kg de S aplicado. La capacidad del suelo de proveer S aumentó entre 86 y 131% para las dosis entre 12 y 36 kg S ha<sup>-1</sup> con respecto al testigo y estuvo relacionada a las mismas fracciones, absorbiendo 1,7 kg S ha<sup>-1</sup>, 0,18 kg S ha<sup>-1</sup> y 0,28 kg S ha<sup>-1</sup> por cada aumento en mg kg<sup>-1</sup> de estas fracciones. Estos resultados indicarían que el destino de los fertilizantes azufrados está en las fracciones de Si, S de ésteres (S-O-C) y S-MOP, quedando biodisponibles para los cultivos siguientes.

**Palabras clave:** fertilización prolongada, residualidad de azufre, fraccionamiento

### INTRODUCCION

El azufre (S) es un macronutriente esencial para la producción de cultivos, afectando las funciones metabólicas y estructurales del crecimiento de las plantas y siendo considerado el cuarto elemento más importante en la agricultura (Havlin et al., 2005). En suelos de la región pampeana, a finales del siglo pasado se han observado deficiencias de S (Martínez y Cordone, 1998; Vivas et al., 2001) y la respuesta a la fertilización con S se ha cuantificado en los principales cultivos de la región como soja (Salvagiotti et al., 2012; Divito et al., 2015), maíz (Pagani et al., 2012) y trigo (Salvagiotti et al., 2009). Asimismo, debido al aumento en el uso de fertilizantes azufrados en los últimos años, se han observado, en suelos molisoles de la región pampeana, efectos residuales de la fertilización con S en el rendimiento de los cultivos siguientes en una secuencia (Salvagiotti et al., 2004).

El azufre se encuentra en el suelo tanto en forma orgánica (95-97%) como inorgánica (1-5%) (Eriksen et al., 2009). A diferencia de lo que sucede con el fosfato, el sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) está sujeto a la lixiviación y puede permanecer en el sistema de producción sin ser afectado por procesos de pérdidas cuando el S está en forma



orgánica. Este S orgánico puede caracterizarse a través de: (i) el fraccionamiento químico: el S directamente unido al C (S-C) y como ésteres de sulfato (S-O-C) (Tabatabai, 1982; Freney et al., 1970), donde el primero está asociado al S de aminoácidos como metionina y cisteína, mientras que la segunda se considera que está mayormente compuesta por S de ésteres y disponible para los cultivos o (ii) la cuantificación del S presente ligado a las fracciones más gruesas de materia orgánica (Materia orgánica Particulada (S-MOP), el cual se cuantifica por métodos de separación física.

En este contexto, conocer el destino del S aplicado como fertilizante es importante para el manejo de la fertilización con S en el largo plazo, para lo cual es relevante contar con indicadores que sirvan para evaluar el grado de residualidad de los fertilizantes.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) determinar los cambios en fracciones asociadas al S del suelo por separación química y física, y ii) evaluar la biodisponibilidad de estas fracciones de S en el suelo en respuesta a aplicaciones de distintas dosis de S luego de diez años en un suelo Argiudol típico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un experimento de 10 años de duración cuyo objetivo fue estudiar la respuesta a la aplicación de diferentes dosis de fertilizante con P y S en el largo plazo. El experimento se inició en el año 2000 y finalizó en 2010, siguiendo una rotación agrícola trigo/soja- maíz temprano - soja en el centro-sur de Santa Fe (32°10'01"S 61°09'20"O) sobre un suelo serie Clason (Argiudol típico, arcilloso fino, illítico, térmico) con más de 50 años de agricultura continua. Los tratamientos consistieron en la combinación factorial de tres dosis de P (0, 20 y 40 kg de P ha<sup>-1</sup>) y cuatro dosis de S (0, 12, 24 y 36 kg de S ha<sup>-1</sup>) aplicados en las gramíneas. Los tratamientos se arreglaron en un diseño factorial con cuatro repeticiones.

En 2010, al finalizar el experimento, se extrajeron muestras de suelo a 20 cm de profundidad y se cuantificó el S presente en distintas fracciones químicas (Figura 1) y físicas. Para el fraccionamiento químico, se determinó el S total (St) por combustión seca con analizador LECO y el S inorgánico total (Si) fue extraído con Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> y destilado por el método de azul de metileno (Johnson & Nishita, 1952). El contenido de S orgánico total (Sorg) se calculó con la diferencia entre el St y el Si. Las formas de compuestos que contienen S en la materia orgánica: el i) S orgánico que no está directamente ligado al C y es reducido a H<sub>2</sub>S mediante ácido yodhídrico (S-O-C) y ii) S orgánico que está directamente ligado al C (S-C) se determinó mediante digestión-destilación (Johnson & Nishita, 1952). El método consiste en una reducción de las formas de azufre mediante una mezcla fuertemente reductora con IH, ácido fórmico y ácido hipofosforoso. El H<sub>2</sub>S liberado, es capturado por una solución absorbente con Zn(OAc)<sub>2</sub> y NaOAc y posteriormente tratado con un indicador (p-aminodimetilanilina) y una solución férrica para desarrollo de color azul de metileno. La intensidad del azul de metileno es determinada colorimétricamente a 670 nm. Así, la diferencia entre el S reducible en IH y el Si constituye el S-O-C. Por último, la diferencia entre el Sorg y el S-O-C, determina el S-C (Figura 1). Para el fraccionamiento físico, se determinó el contenido de S en la Materia Orgánica Particulada (S-MOP) siguiendo una versión modificada de Cambardella & Elliot (1992), donde se separó la fracción gruesa mediante tamiz de 50 µ y posteriormente se determinó el S en esta fracción.

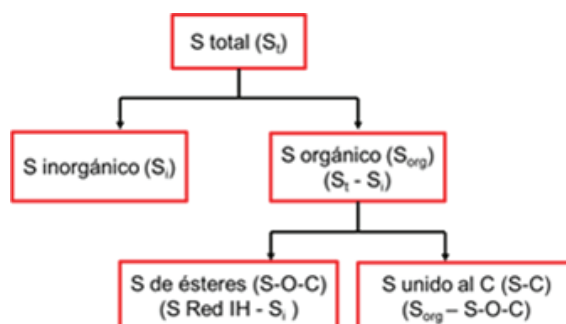


Figura 1: Esquema del fraccionamiento químico de azufre en el suelo.

En 2011, se sembró un cultivo de maíz (como cultivo prueba), que recibió solo fertilización nitrogenada. Éste se usó para estudiar la biodisponibilidad de S, la cual fue estimada a partir de la absorción del S en la biomasa aérea en madurez fisiológica. Para ello, se realizó un muestreo de 1 m<sup>2</sup> de cada unidad experimental, separando granos del resto de las estructuras vegetativas, las cuales fueron llevadas a estufa durante 72 hs a 70 °C. Luego las muestras fueron molidas y se determinó el contenido de S en ambas estructuras por espectrometría de plasma inducido. A madurez de cosecha, se determinó el rendimiento del cultivo de maíz en una superficie de 10 m<sup>2</sup>.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante ANOVA, y las medias de los tratamientos fueron comparadas mediante la prueba LSD ( $\alpha=0,05$ ). Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Se realizaron regresiones entre las relaciones entre las distintas fracciones del suelo y las dosis de S acumuladas y el S absorbido por el cultivo.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Fraccionamiento químico

Luego de diez años de experimento, las dosis de fertilizante de S acumuladas aplicadas sumaron 0, 72, 144 y 216 kg S ha<sup>-1</sup>. El rendimiento del maíz utilizado como cultivo prueba no mostró interacción P x S ni diferencias significativas entre los distintos niveles de P ( $p>0,05$ ). Sin embargo, se incrementó en un 64% en respuesta a la fertilización azufrada ( $p<0,05$ ) (Biaassoni et al., 2018). Además, la capacidad del suelo de proveer S (evaluado con el S absorbido por el cultivo prueba) mostró diferencias significativas ( $p<0,05$ ) entre tratamientos. El testigo absorbió 10 kg S ha<sup>-1</sup>, mientras que las dosis acumuladas de 72, 144 y 216 kg S ha<sup>-1</sup> absorbieron un 86%, 103% y 131% más de S respecto al testigo, respectivamente, a una tasa de 0,35 kg de S absorbido por kg de S aplicado (Figura 2).

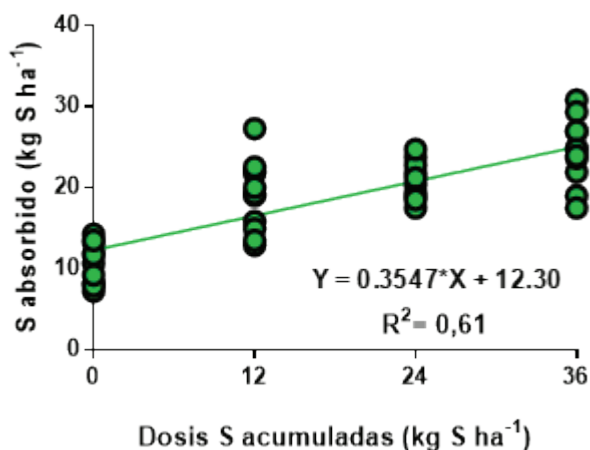


Figura 2. S absorbido por el cultivo prueba después de 10 años de fertilización continua con S.

El St varió de 190 a 230 mg kg<sup>-1</sup>, con diferencias significativas entre dosis de S aplicadas ( $p<0,05$ ), incrementándose hasta 21% en la dosis acumulada de 216 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 1). El Sorg representó entre 96-99% del St, mientras que el Si representó entre 1-4% (Tabla 1), similar a lo observado por Mizuno et al., (1990) para suelos Molisoles de la provincia de Buenos Aires. El fraccionamiento químico mostró que el S-O-C y S-C, representaron entre el 35-53% y 43-65%, con respecto al St, respectivamente, dentro del rango reportados por Mizuno et al., (1990); Wang et al., (2006) y Zang et al., (2007). En las fracciones más lábiles i.e., Si y S de ésteres (S-O-C), se incrementó hasta 286% y 83%, respectivamente, en respuesta a las dosis de S aplicadas ( $p<0,05$ ) (Tabla 1). Por otro lado, no se observaron diferencias entre dosis de S al analizar la fracción más recalcitrante i.e., S unido al C ( $p>0,05$ ), promediando 110 mg kg<sup>-1</sup>. Asimismo, No se observó interacción P\*S, ni diferencias entre las dosis de P aplicadas ( $p>0,05$ ) para ninguna de las fracciones de S analizadas.

Tabla 1. Contenido medio y análisis de la varianza en distintas fracciones químicas: S total (St), S inorgánico (Si), S orgánico de ésteres (S-O-C) y S orgánico unido al C (S-C), y físicas: S en la Materia Orgánica Particulada (S-MOP) en el suelo según dosis de S aplicadas durante diez años en un suelo Molisol.

Dosis de S acumuladas (kg S ha <sup>-1</sup> )	Fraccionamiento químico				Fraccionamiento físico
	S total	S inorgánico	S orgánico		S - MOP
	(S <sub>t</sub> )	(S <sub>i</sub> )	(S-O-C)	(S-C)	
	(mg kg <sup>-1</sup> )				
0	190 a	2,22 a	66 a	122	18 a
72	206 a	3,96 b	87 b	115	24 ab
144	212 ab	5,71 c	99 c	107	25 ab
216	230 b	8,57 d	121 d	99	29 b
	p-value				
P	0,33	0,32	0,13	0,54	0,71
S	<0,05	<0,01	<0,01	0,39	<0,05
P*S	0,07	0,22	0,66	0,25	0,71

Se encontraron relaciones estadísticamente significativas entre la dosis de S acumuladas en diez años y las fracciones de Si ( $r^2=0,89$ ), S de ésteres (S-O-C) ( $r^2= 0,75$ ) y S-MOP ( $r^2= 0,18$ ). Esto significó un aumento de 2,8 mg kg<sup>-1</sup>, 24,8 mg kg<sup>-1</sup> y 4,6 mg kg<sup>-1</sup> en cada una de estas fracciones por cada 100 kg de S aplicado acumulado en diez años (Figura 3). En línea con estas observaciones, la capacidad del suelo de proveer S al cultivo también estuvo relacionada a las mismas fracciones ( $p<0,05$ ), la fracción de Si ( $r^2=0,55$ ), S de ésteres (S-O-C ( $r^2= 0,42$ ) y S-MOP ( $r^2= 0,18$ ), indicando que el cultivo absorbió 1,7 kg S ha<sup>-1</sup>, 0,18 kg S ha<sup>-1</sup> y 0,28 kg S ha<sup>-1</sup> por cada aumento en mg kg<sup>-1</sup> de estas fracciones (Figura 4), demostrando estar involucradas en el efecto residual de la fertilización con S. En contraste con los datos de nuestro estudio, Divito et al., (2013) reportaron luego de la aplicación de 15 kg S ha<sup>-1</sup> luego de 8 años que la fertilización continua con S no afectó la disponibilidad de S para los cultivos siguientes. Es importante destacar en base a lo observado, que el contenido de materia orgánica juega un rol fundamental como fuente de S para el cultivo. Nuestro estudio fue realizado en un suelo con 2,6% de materia orgánica que contrasta con el estudio de Divito et al, (2013), quienes realizaron las mediciones en suelos con 4,4% de materia orgánica. En línea con lo que se observó en el presente estudio, evidencias previas también muestran que aun cuando los sulfatos del suelo (Si) son una fuente directa de S para las plantas, los S de ésteres (S-O-C) juegan un papel importante en la liberación de sulfato a corto plazo, contribuyendo al aporte de S a las plantas por medio de la mineralización (Freney, 1986; Scherer, 2001; Goh & Pamidi, 2003).

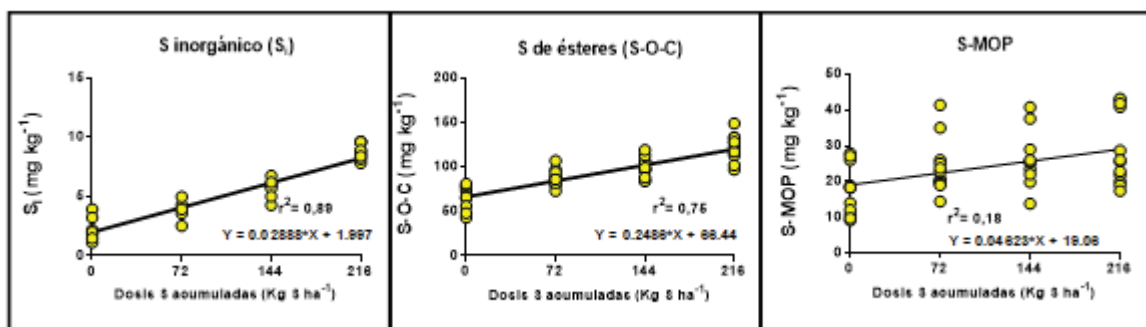


Figura 3. Relación entre las dosis de S acumuladas y el contenido de las fracciones de S inorgánico (Si), S orgánico de ésteres (S-O-C) y S en la Materia Orgánica Particulada (S-MOP) del suelo.

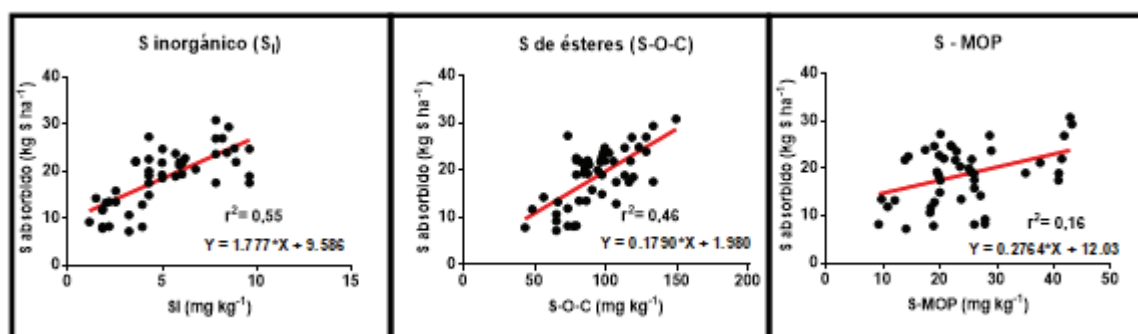


Figura 4. Relación entre el contenido de las fracciones de S inorgánico (Si), S orgánico de ésteres (S-O-C) y S en la Materia Orgánica Particulada (S-MOP) del suelo y el S absorbido ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por el cultivo prueba.

### Fraccionamiento físico

El contenido de S en la MOP promedió  $18 \text{ mg kg}^{-1}$  en el tratamiento que no recibió fertilización azufrada, mientras que se incrementó hasta un 61% en respuesta a la adición de fertilizante azufrado (Tabla 1). Este aumento en la S-MOP podría estar asociado a los incrementos continuos en el aporte de residuos de los distintos cultivos de la secuencia luego de diez años (Vega et al., 2019).

### CONCLUSIONES

Luego de 10 años de aplicación acumulada de fertilizantes azufrados, el S proveniente de los fertilizantes y que no fue absorbido por los cultivos se acumuló en las fracciones de S inorgánico (Si), S de ésteres (S-O-C) y S en la materia orgánica particulada (S-MOP). Asimismo, estas mismas fracciones estuvieron disponibles para el cultivo siguiente, siendo responsables de la residualidad de la fertilización azufrada en ensayos de larga duración.

### BIBLIOGRAFIA

- Biaassoni, M. Micaela; Flavio H. Gutierrez Boem; H. Vivas; Fernando Salvagiotti. "Indicadores de la residualidad de la fertilización con fósforo (P) y azufre (S) en una secuencia agrícola". XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, ISBN 978-987-46870-0-5. San Miguel de Tucumán, 2018.
- Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783.
- Divito, G. A., Echeverría, H. E., Andrade, F. H., & Sadras, V. O. (2015). Diagnosis of S deficiency in soybean crops: Performance of S and N: S determinations in leaf, shoot and seed. *Field Crops Research*, 180, 167-175.
- Eriksen, J. (2009). Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Advances in Agronomy*, 102, 55-89.
- Freney, J. R. (1986). Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. *Sulfur in agriculture*, 27, 207-232.
- Goh, K. M., & Pamidi, J. (2003). Plant uptake of sulphur as related to changes in the HI-reducible and total sulphur fractions in soil. *Plant and Soil*, 250(1), 1-13.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2005). Sulfur, calcium, and magnesium. *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Prentice Hall. New Jersey, 219-243.
- Martínez F. and G. Cordone. 1998. Fertilización azufrada en soja. *Jornadas de Azufre*. UEEA INTA Casilda, septiembre 1998. Casilda, Santa Fe, Argentina
- Mizuno, J., de Lafaille, B., & de Lopez Camelo, L. G. (1990). Caracterización del azufre en algunos molisoles de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*, 8(2), 111-117.
- Pagani, A., Echeverría, H. E., Andrade, F. H., & Sainz Rozas, H. R. (2012). Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *Journal of Plant Nutrition*, 35(7), 1080-1097.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J. M., Miralles, D. J., & Pedrol, H. M. (2009). Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by



- increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research*, 113(2), 170-177.
- Salvagiotti, F., Ferraris, G., Quiroga, A., Barraco, M., Vivas, H., Prystupa, P., ... & Boem, F. H. G. (2012). Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N: S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research*, 135, 107-115.
- Salvagiotti, F., G. Gerster, S. Basigaluppo, J. Castellarin, C. Galarza, N. Gonzalez, Gudelj V., Novello O., H. Pedrol, and P. Vallone. 2004. Efectos Residuales y Directos de Fósforo y Azufre en el Rendimiento de Soja de Segunda. *Ciencia del Suelo* 22:92-101
- Stevenson, F. J. (1986). The sulfur cycle. *Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*, 285-320.
- Vega Jara, L., Gutierrez Boem, F., Garcia, F., & Rubio, G. (2020). Long-term fertilization does not affect soil carbon/nitrogen/sulfur ratios or the proportion between labile and nonlabile fractions in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 798-810.
- Vivas, H. S.; H. Fontanetto; R. Albrecht; M. A. Vega y J. L. Hotián. 2001. Fertilización con P y S en el doble cultivo trigo-soja. Residualidad en soja. Respuesta física y económica. Información Técnica de Cultivos de Verano. Campaña 2001. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 95. Anuario 2001 de la EEA Rafaela.
- Wang, J., Solomon, D., Lehmann, J., Zhang, X., & Amelung, W. (2006). Soil organic sulfur forms and dynamics in the Great Plains of North America as influenced by long-term cultivation and climate. *Geoderma*, 133(3-4), 160-172.
- Yang, Z., Singh, B. R., Hansen, S., Hu, Z., & Riley, H. (2007). Aggregate associated sulfur fractions in long-term (> 80 years) fertilized soils. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 163-170.

