

Respuesta del cultivo de soja al azufre en argiudoles típicos del sudoeste de Uruguay

García Lamothe Adriana¹, Quincke J. Andrés¹, Sawchik Jorge¹

¹INIA La Estanzuela. Ruta 50 km 11, 70000, Colonia, Uruguay. Correo electrónico: agarcia@inia.org.uy

Recibido: 2015-03-13 Aceptado: 2017-08-15

Resumen

El azufre (S) es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La intensificación agrícola que ocurrió en Uruguay en particular en la última década, ha incrementado el riesgo de ocurrencia de deficiencias nutricionales. El objetivo fue estudiar la respuesta al agregado de S en soja y evaluar la concentración de sulfato en el suelo y el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) como indicadores de disponibilidad de S. Se realizaron experimentos parcelarios en 13 sitios durante seis estaciones de crecimiento en la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia, Uruguay) en Argiudoles típicos de la zona. El S fue aplicado en forma de yeso (sulfato de calcio) a dosis de 0, 15, 30 y 45 kg de S ha⁻¹, en tratamientos dispuestos en bloques al azar con cuatro repeticiones. Las variaciones en cantidad y distribución de las lluvias afectaron el rendimiento en grano y la respuesta a la fertilización. Solamente en dos sitios se observó un incremento significativo en grano, el cual fue cercano a 15%. Para los suelos estudiados, la probabilidad de encontrar respuesta positiva al S resultó alta cuando la concentración de sulfatos fue menor a 5 mg kg⁻¹ al momento de la siembra. En ese caso los incrementos oscilaron entre 204 y 467 kg ha⁻¹. Cuando el nivel de sulfatos es mayor a dicho valor, sería poco probable obtener incrementos por el agregado de yeso, con la posibilidad de observar incluso respuestas negativas. No se encontró relación entre el PMN y la respuesta en rendimiento.

Palabras clave: yeso, sulfato, potencial de mineralización de nitrógeno

Soybean Response to Sulfur in Typic Arguidolls of Southwestern Uruguay

Summary

Sulfur (S) is an essential nutrient, necessary to maintain crop productivity. Agriculture intensification in Uruguay has increased the risk of nutrient deficiencies in soils. The goal of this study was to explore soybean response to S application and the feasibility of using soil sulfate concentration, and potentially mineralizable nitrogen (PMN) as indicators of S-availability. Thirteen field trials were conducted during six growing seasons (2007 to 2012) at the Experimental Station La Estanzuela, Colonia, on typical Arguidolls of the area. Sulfur as gypsum was applied at rates of 0, 15, 30 and 45 kg S ha⁻¹, with treatments allocated in four complete randomized blocks. Variation in precipitation amount and distribution affected soybean grain yield across the years and thereby fertilization response. Only in two trials yield responses were statistically significant, with increases that amounted about 15%. For the soils studied, positive responses to S would be likely when soil sulfate concentration is less than 5 mg kg⁻¹ at planting. In such cases yield increases ranged between 204 and 467 kg ha⁻¹. When soil sulfate test is higher, odds for yield increases from applied S are low, with chances of observing negative responses, too. No relation between PMN and yield response could be found.

Keywords: gypsum, sulfate, potentially mineralizable nitrogen

Introducción

El azufre (S) es un nutriente esencial para las plantas por lo que su deficiencia tiene efecto negativo en la productividad de los cultivos (Marschner, 1995). El S es componente de proteínas y enzimas que regulan la fotosíntesis e interviene en la fijación biológica de nitrógeno (FBN), entre otras funciones. Participa en la estructura proteica a través de puentes S-S, lo que está aparentemente relacionado con la tolerancia a la falta de agua y al daño por heladas (Levitt, 1980). Es constitutivo del glutatión, un potente antioxidante a nivel celular. En las membranas celulares de las raíces forma parte de los sulfolípidos, sustancias que se han relacionado con la tolerancia a la salinidad (Marschner, 1995).

Históricamente, la deficiencia de S no se advirtió como problema para la productividad de los cultivos del Uruguay, cuando los sistemas de producción presentaban dominancia de cereales y estaban sustentados en rotaciones de cultivos y pasturas. No obstante, en un relevamiento de la principal cuenca lechera del país, bajo sistemas de producción más extractivos (corte para fardos, ensilaje, etc.), Morón y Baethgen (1996) observaron que el 30 % de los cultivos de maíz muestreados presentaba niveles de S en planta por debajo del límite inferior del rango óptimo ($1,3 \text{ g S kg}^{-1}$ de materia seca) y un 30 % adicional se situó por encima pero muy próximo a dicho límite. Posteriormente, investigando la respuesta al S en trigo con laboreo convencional y siembra directa, se encontró que en un 20 % de los casos ocurrieron incrementos en rendimiento en respuesta al agregado de S (García Lamothe, 2002). Para el cultivo de soja, una red de experimentos conducida durante dos zafra consecutivas en el litoral oeste arrojó escaso efecto debido al S sobre el rendimiento, y una eficiencia promedio de tan solo 11 kg de grano por kg de S-SO_4^{2-} aplicado (Morón, 2005). La respuesta al S en el cultivo de soja es mencionada en suelos de la región pampeana, sobre todo en los más erosionados, con niveles bajos de materia orgánica (MOS) y/o con historia de varios años de monocultivo o de trigo-soja (Cordone y Martínez, 2002; Salvagiotti et al., 2004; Tysko y Rodríguez, 2006). En esa región las recomendaciones de fertilización con S se hacen con base a la historia agrícola y al manejo, pues la concentración de SO_4^{2-} no se ha mostrado como un buen indicador de disponibilidad de S (Díaz Zorita, García y Melgar, 2002). Para el caso de Uruguay, se supone que la expansión del cultivo de soja y la intensificación agrícola llevarían a una menor capacidad de aporte de S del suelo (García Lamothe y Quincke, 2011).

La forma más importante de S para la nutrición de las plantas es el anión sulfato (SO_4^{2-}) que es absorbido por las raíces. Distintos procesos pueden afectar la dinámica del sulfato durante la estación de crecimiento, de modo que la acumulación de S y su disponibilidad a lo largo del ciclo del cultivo no dependen únicamente de la concentración de sulfatos al momento de la siembra. Por ejemplo, si los restos de cultivos anteriores superan cierta concentración de azufre (cerca a 0,15 %, según Barrow, 1960) puede ocurrir liberación neta de sulfato debido a la mineralización. De lo contrario, la descomposición microbiana de los restos vegetales puede remover sulfato de la solución de suelo por el proceso de inmovilización. También el sulfato puede perderse hacia capas más profundas del suelo por lavado o lixiviación, similar al lavado de nitrato. Como en el caso del nitrógeno (N), la mayoría del S en el suelo está en forma orgánica, y por tanto no disponible. La transformación del S a formas inorgánicas está estrechamente relacionada con la mineralización de la MOS. Los suelos arenosos son más propensos a tener deficiencia de S que los suelos de texturas más finas, por un lado porque tienen contenido de MOS más bajo, y por otro porque es más probable que el SO_4^{2-} se pierda por lavado como ocurre con el nitrato. Que haya liberación de S desde la MOS, como en el caso del N, depende de la concentración de S de los residuos en descomposición, de la temperatura, la humedad y el O_2 en el suelo, entre otros factores que controlan el proceso de descomposición (Tisdale et al., 1993).

En los últimos años en Uruguay y la región el potencial de mineralización de N del suelo (PMN) se ha comenzado a utilizar como indicador de la calidad del suelo (Morón y Sawchik, 2002). El PMN refiere a un *pool*o compartimento de N orgánico del suelo que es pasible de ser mineralizado cuando se dan las condiciones óptimas, y por tanto se considera una fracción lábil (Keeney y Bremner, 1966). Es un estimador de la fracción activa del N orgánico del suelo que controla mayoritariamente la liberación de N a través de la actividad microbiana (Keeney, 1982). Por ello el PMN está relacionado con la capacidad de aporte de N al cultivo subsiguiente de trigo (García Lamothe, Morón y Quincke, 2010), y ha sido propuesto como una herramienta complementaria para ajustar las recomendaciones de fertilización nitrogenada (Reussi Calvo et al., 2013). Como compartimento de la MOS, el PMN puede contener otros nutrientes que se encuentran en el suelo en formas orgánicas, como por ejemplo el fósforo o el azufre. Por lo tanto, es posible suponer que cuando ocurre ataque microbiano sobre el PMN, no sólo habrá liberación de N mineral (NH_4^+ , NO_3^-) sino

también de azufre inorgánico. En tal sentido, Wyngaard y Cabrera (2015) encontraron una alta correlación entre el PMN y el potencial de mineralización de S en estudios de laboratorio.

El presente trabajo se realizó con dos objetivos: 1) generar información acerca de la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con S en diferentes sistemas de producción, y 2) evaluar la concentración de sulfatos ($S-SO_4^{=}$) y el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) como indicadores de disponibilidad del S, para ser usados en el pronóstico de la respuesta al nutriente.

Materiales y métodos

Este trabajo se condujo durante seis ciclos de cultivo (2006-07 a 2011-12) dentro de la Estación Experimental La Estanzuela del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA-Uruguay (latitud: 34° 29' S; longitud: 57° 44' W; altitud 81 m s.n.m.). Según el relevamiento semidetallado de suelos de esta estación experimental (Victora, Piñeyrúa y Puentes, 1985), los suelos son Brunosoles éútricos típicos (Argiudoles típicos) desarrollados sobre sedimentos arcillo-limosos de la formación Libertad. Hay una amplia coincidencia entre los suelos del presente estudio y el perfil descripto como dominante de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas (EP-LB) de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 (Ministerio de Agricultura y Pesca, 1979). Presentan un horizonte C cálcico por debajo de los 80-90 cm de profundidad. Son suelos de pendiente suave, drenaje moderado, con profundidad del horizonte A no mayor a 30 cm. A diferencia del suelo dominante de EP-LB, la textura del horizonte A de los Argiudoles del presente estudio es franco arcillo limosa. Además es común la expresión de características vérticas de estos suelos, dado por la presencia de «lenguas» de material negro o pardo muy oscuro del horizonte A, que penetran en los horizontes subsuperficiales (Victora, Piñeyrúa y Puentes, 1985).

En el Cuadro 1 se resumen las condiciones de manejo del cultivo para los trece sitios del estudio. En diez casos fueron cultivos de primera época, sembrados entre octubre y mediados de noviembre. Los tres sitios con soja de segunda se sembraron entre mediados de diciembre y la primera semana de enero. En cuatro casos de cultivos de primera, la cama de siembra se preparó con laboreo reducido (LR), que consistió de una pasada de disquera o vibrocultivador. A partir del ciclo 2009-10 los experimentos se

instalaron en suelos que estaban en sistemas de agricultura continua con siembra directa desde 1994. La población objetivo fue 300 mil plantas de soja ha^{-1} , con un espaciamiento entre hileras de 0,38 m, excepto en el 2012 que fue de 0,19 m. El manejo de agroquímicos fue con herbicidas, insecticidas y fungicidas siguiendo las recomendaciones vigentes. Se sembraron variedades comerciales de soja (RR, grupos V y VI).

Se tomaron muestras de suelo (0-15 cm) al momento de la siembra para determinar propiedades químicas (Cuadro 1). El método empleado para el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) consistió en someter una muestra del suelo a una incubación anaeróbica durante siete días a 40 °C (Keeney y Bremner, 1966) con posterior determinación del amonio liberado. Las muestras fueron tamizadas en húmedo para homogeneizar el suelo previo a la incubación. La determinación de $S-SO_4^{=}$ en el suelo se realizó con extracción con fosfato monocálcico según Cantarella y Prochnow (2001) y lectura por turbidimetría (con $BaCl_2$, en la banda de 420 nm). El pH del suelo en agua se determinó en una relación agua:suelo de 2:1 y lectura de electrodo en sobrenadante (Gavlak et al., 2003), y el carbono orgánico del suelo con combustión seca a 900 °C con equipo Leco. Se utilizó el método Bray-1 (Bray y Kurtz, 1945) para estimar el P disponible, y el potasio (K) intercambiable se determinó por emisión luego de la extracción con acetato de amonio 1 M. En ningún caso se consideró al P o al K como limitantes de la productividad.

Los tratamientos consistieron de los siguientes niveles de S: 15, 30 y 45 kg de S ha^{-1} , y un control sin S. La aplicación fue al voleo en superficie luego de la siembra y usando como fuente sulfato de calcio ($CaSO_4$). Se usó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, siendo las parcelas de seis hileras de ancho (ocho cuando la distancia entre hileras se redujo) y 6 m de largo. Los datos obtenidos de la cosecha mecánica de 8 m² por parcela fueron utilizados para calcular el rendimiento (que se corrigió a 13 % de humedad). Para el análisis estadístico se utilizó el procedimiento de modelos lineales generales de SAS, versión 5, y las medias de los tratamientos fueron separadas por mínima diferencia significativa (MDS, al 5 % de significación). Como medida del error experimental de cada sitio se usó el cuadrado medio del error. El rendimiento relativo se calculó como el cociente entre el rendimiento promedio de tratamientos con $CaSO_4$ y el rendimiento del control sin fertilizar. Se realizaron correlaciones entre los indicadores de disponibilidad de S y el rendimiento relativo.

Cuadro 1. Condiciones de manejo del cultivo y propiedades químicas del suelo en los 13 experimentos del presente estudio.

	Experimentos												
	2006-2007		2007-2008		2008-2009		2009-2010		2010-2011		2011-2012		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Preparación del suelo*	LR	LR	LR	SD	LR	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Cultivo de «primera» o «segunda»	1 ^a	1 ^a	1 ^a	2 ^a	1 ^a	2 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	2 ^a	1 ^a
Cultivo anterior**	bar-becho	bar-becho	bar-becho	trigo	bar-becho	trigo	maíz	maíz	bar-becho	CC raigrás	CC	trigo	bar-becho
pH (en H ₂ O)	5,5	5,7	5,4	5,6	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,3
C org (%)	2,0	2,1	1,8	2,2	1,7	1,8	1,9	1,8	2,0	1,8	2,0	2,1	2,0
P-Bray (mg kg ⁻¹)	30	20	15	17	28	20	20	18	45	35	25	38	39
S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)	4	3	6	8	9	7	8	2	8	15	4	5	4
PMN (mg N-NH ₄ kg ⁻¹)	26	27	17	22	12	26	35	30	40	44	39	37	35

* LR significa laboreo reducido, SD significa siembra directa.

** barbecho significa que no hubieron cultivos desde la anterior zafra de verano; CC significa cultivo de cobertura.

Resultados y discusión

Condiciones climáticas

En el Cuadro 2 se resumen las precipitaciones acumuladas mensuales durante la estación de crecimiento para cada una de las zafas estudiadas. En la zafra 2006-07 la disponibilidad de agua no fue un factor limitante importante para los cultivos de verano en el litoral SW. La estación de crecimiento se caracterizó por un comienzo con altas precipitaciones que volvieron a ocurrir en el mes de marzo del 2007, causando cierto retraso en la cosecha que pudo tener un leve efecto negativo en el rendimiento final de la soja. En las dos zafas siguientes (2007-08 y 2008-09) hubo estrés hídrico severo desde el comienzo de la estación de crecimiento hasta enero y/o febrero. En estos años, la soja de segunda se implantó con mejores condiciones climáticas y su performance fue superior a la de la soja de primera. En 2009-10 el agua no fue limitante en estadios tempranos y las altas precipitaciones durante el período de llenado de vainas repusieron el agua en el perfil como para que esta no limitara el tamaño de los granos. La zafra 2010-11 se caracterizó por un severo déficit hídrico, con precipitaciones por debajo de los promedios históricos en etapas tempranas y fue muy lento el desarrollo del cultivo hasta que las precipitaciones de enero y febrero permitieron que se recuperara. También en 2011-12 el calor y la falta de humedad hasta enero afectaron a la soja, aunque con la ocurrencia de lluvias en febrero el cultivo pudo reponerse y concretarse un buen rendimiento.

Las variaciones en el régimen hídrico, cantidad y distribución de las lluvias son típicas del clima uruguayo. Según Molfino y Califra (2001) el agua potencialmente disponible

neto para suelos de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas como los de este trabajo es de 137 mm, similar al de otras unidades típicamente agrícolas del país como Cuchilla del Corralito (120 mm), Bequeló (138 mm), Young (145 mm) y Cañada Nieto (146 mm). La estimación de los requerimientos de agua del cultivo de soja para el departamento de Colonia oscilan entre 510 y 730 mm (Giménez y García Petillo, 2011) y en consecuencia el rendimiento del cultivo es altamente dependiente de las lluvias durante la estación de crecimiento. En términos generales esto quedó en evidencia en el presente estudio, dado que los mayores rendimientos fueron registrados en las zafas con mayores precipitaciones (2006-07 y 2009-10), mientras que los rendimientos más bajos coincidieron con las zafas que acumularon las menores precipitaciones (2007-08 y 2010-11).

Respuesta en rendimiento en grano a la aplicación de azufre

En dos de los trece sitios instalados se encontró respuesta significativa a la aplicación de CaSO_4 ($P < 0,05$). Uno de los casos con respuesta a S fue el experimento 2 (Cuadro 3), con soja de primera y LR de la zafra 2006-07, donde el agua no fue un factor limitante para el cultivo. Tras un período de barbecho de al menos tres meses y una cantidad relativamente escasa de residuos frescos en el suelo, es probable que el S proveniente de la mineralización no haya sido suficiente. Además es posible suponer que hayan ocurrido pérdidas de sulfato por lavado durante los meses de otoño e invierno. El otro caso con respuesta a S fue el experimento 11 de la zafra 2010-11, que también fue una soja de primera pero sobre un cultivo de cobertura de raigrás en un sistema con SD. Dicho raigrás había sido

Cuadro 2. Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) durante la estación de crecimiento para cada uno de los años del estudio (registros de la estación meteorológica de INIA La Estanzuela).

	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012
Octubre	171	186	47	80	43	61
Noviembre	50	36	20	126	25	66
Diciembre	200	42	124	107	24	60
Enero	65	111	28	92	76	38
Febrero	111	40	240	298	81	180
Marzo	427	88	150	53	37	133
Abril	148	11	23	80	81	53
Suma	1141	512	607	836	368	591

Cuadro 3. Resultados del análisis estadístico para el efecto de la dosis de S sobre el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en cada experimento del estudio.

	2007			2008			2009			2010			2011			2012		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII					
R ²	0,64	0,92	0,17	0,75	0,26	0,63	0,39	0,46	0,42	0,61	0,62	0,52	0,31					
CV	12,2	6,5	11,7	11,5	9,7	9,2	5,4	7,1	10,7	13,3	7,7	4,8	10,3					
CME	397	247	206	298	184	247	205	263	267	295	214	137	328					
Rendimiento medio (kg ha ⁻¹)	3270	3764	1761	2570	1893	2682	3776	3702	2491	2213	2772	2828	3183					
Pt>F	0,48	0,05	0,81	0,75	0,53	0,28	0,26	0,23	0,20	0,28	0,03	0,25	0,68					
MDS 5% (kg ha ⁻¹)	636	389	329	476	318	428	329	420	383	481	294	219	525					
Rendimiento en grano (kg ha⁻¹)																		
0 kg S ha ⁻¹	3032	3414	1800	2445	1945	2828	3728	3472	2656	2420	2487	2762	3030					
15 kg S ha ⁻¹	3204	3853	1782	2551	1804	2697	3872	3888	2543	2282	2821	2756	3150					
30 kg S ha ⁻¹	3424	3859	1674	2643	1928	2521	3615	3703	2301	2205	2946	2850	3283					
45 kg S ha ⁻¹	3421	3932	1787	2642	-	-	3889	3747	2425	1946	2834	2944	3270					
Rendimiento relativo	1,10	1,14	0,97	1,07	0,96	0,92	1,02	1,09	0,91	0,89	1,15	1,03	1,07					

(-) tratamiento no aplicado.
 CV es el coeficiente de variación.
 CME es el cuadrado medio del error.
 MDS es la mínima diferencia significativa.

desecado 40 días antes de la siembra, donde la escasa humedad en el suelo pudo haber aumentado la resistencia a la penetración en el perfil (Whalley y Bengough, 2013), no permitiendo que el cultivo tuviese acceso al S presente en capas más profundas (García Lamothe y Quincke, 2011). No se puede descartar la ocurrencia de cierta inmovilización de S propiciada por la calidad de los residuos que dejó el raigrás (Chapman, 1997). En estos dos casos de respuesta significativa, el rendimiento en grano incrementó 14 y 15 % respectivamente (Cuadro 3).

En otros cuatro sitios (1, 4, 8 y 13) también se observó una tendencia a incrementar el rendimiento con la aplicación de S entre 7 y 10 % respecto al testigo, pero sin significación estadística. Considerando los tratamientos con el máximo rendimiento en cada caso, el incremento de rendimiento de estos sitios alcanzó un promedio de 315 kg ha⁻¹. Sin embargo el error experimental de estos sitios (medido como el cuadrado medio del error) fue relativamente alto (263 a 397 kg ha⁻¹), por lo que se reportan como sitios con una tendencia de respuesta positiva. Considerando estos cuatro sitios, más los dos sitios mencionados primero (con respuesta estadísticamente significativa), la dosis de 30 kg de S ha⁻¹ tuvo el mayor incremento promedio (330 kg ha⁻¹). Para la dosis de 15 kg de S ha⁻¹ el incremento en rendimiento alcanzó un promedio de 265 kg ha⁻¹ con respecto a los testigos. Los incrementos observados en el presente estudio están dentro del rango de respuesta a la fertilización azufrada encontrados en Argentina (160 a 500 kg ha⁻¹; Gutiérrez Boem, Prystupa y Ferraris, 2007).

Por otro lado se observaron tres sitios (6, 9 y 10) donde los tratamientos fertilizados con S mostraron pérdidas de rendimiento que oscilaron entre 7 y 11 % respecto al testigo. Si bien en estos sitios el efecto de la fertilización tampoco fue significativo, esa tendencia negativa pudo deberse a una deficiencia inducida de molibdeno (Mo) debido al exceso de sulfato (Singh y Kumar, 1979; Macleod, Gupta y Stanfield, 1997). El Mo tiene una función particularmente importante para las leguminosas ya que interviene en procesos bioquímicos de la fijación biológica de nitrógeno. También se podría considerar que una mayor disponibilidad de calcio (Ca) proveniente del fertilizante hubiera restringido la absorción de magnesio pues existe una interacción competitiva entre ambos iones (Malavolta, Vitti y de Oliveira, 1989). Sin embargo, considerando que los suelos representados por el presente estudio tienen niveles de Ca intercambiable relativamente altos (15 a 25 cmolkg⁻¹), el aporte de Ca por la fertilización (56 kg ha⁻¹ en la dosis más alta) representa una proporción casi despreciable en relación

con la cantidad de Ca que contienen estos suelos. Por ello no sería esperable que el Ca aplicado hubiera generado deficiencias de Mg. De todos modos, no es posible en este trabajo establecer las causas del efecto negativo de la aplicación de yeso. Estas observaciones indican la importancia de una nutrición equilibrada (Till, 2010), así como la importancia de definir correctamente la dosis a aplicar, considerando el riesgo de perder potencial de rendimiento por exceso de fertilizante azufrado y en consecuencia reducir la eficiencia de los insumos.

Es necesario mencionar que con este estudio no es posible demostrar que el efecto positivo encontrado se debió al S agregado. No se dispone de datos de análisis de S en planta, que permitirían verificar una mayor absorción de S en respuesta a los tratamientos con yeso. Además, los análisis de S en el tejido vegetal permitirían mejorar la interpretación de los resultados al poder cotejarlos con valores críticos que se reportan como adecuados para el cultivo de soja [por ejemplo 0,20 - 0,40 % según Mills y Jones (1996)].

Resulta pertinente discutir los resultados desde el punto de vista de la eficiencia agronómica (EA), entendida como la respuesta en rendimiento por unidad de nutriente agregado con el fertilizante. Por ejemplo, considerando nuevamente los seis sitios que mostraron respuesta positiva, con la dosis de 30 kg S ha⁻¹ se obtuvo una EA promedio de 11 kg grano kg⁻¹ de S aplicado, mientras que para la dosis de 15 kg S ha⁻¹ la EA promedio ascendió a 18 kg grano kg⁻¹ de S aplicado. Estos valores de eficiencia son comparables a los encontrados por Morón (2005) en estudios realizados en suelos similares, y a los resultados publicados por Steinbach y Álvarez (2014) en Argentina, donde la respuesta promedio a la fertilización en soja tuvo una eficiencia de 17,4 kg grano kg⁻¹ de S para dosis que rondaron los 20 kg S ha⁻¹.

La concentración de sulfato y el PMN como indicadores de la disponibilidad de S

Concentración de sulfato

En la Figura 1 se muestra la relación entre el contenido de sulfato al momento de la siembra y el rendimiento relativo de los tratamientos fertilizados respecto al control sin S. Se observó una relación negativa y significativa ($P < 0,05$) entre la concentración de sulfato en el suelo ($S-SO_4^-$) y el rendimiento relativo de la soja. Es decir, a mayor concentración de $S-SO_4^-$ en el suelo, la respuesta a la fertilización fue menor. Diversos autores han estudiado la concentración de sulfatos como indicador de disponibilidad de S en el

suelo (Ajwa y Tabatabai, 1993; Galarza, Gudelj y Vallone, 2002). Para el caso del cultivo de soja, se ha determinado un nivel crítico de 10 mg kg^{-1} o un rango entre 5 y 10 mg kg^{-1} de S-SO_4^- (Hoeft, Walsh y Keeney, 1973; Steinbach y Álvarez, 2014) por encima del cual sería baja la magnitud y/o la probabilidad de respuesta a la fertilización azufrada. En el presente trabajo hubo cinco sitios con un contenido de sulfatos menor o igual a 4 mg kg^{-1} al momento de la siembra, los cuales presentaron incrementos de rendimiento en respuesta al fertilizante azufrado. Hubo un sitio con respuesta positiva (sitio 4) que tuvo al momento de la siembra un tenor de sulfatos de $7,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Los otros siete sitios del estudio, con valores de sulfatos entre 5,1 y $14,9 \text{ mg kg}^{-1}$, no mostraron incrementos debido a la fertilización (Cuadro 1, Figura 1). Estos resultados indican que la probabilidad de encontrar respuesta positiva al S es alta cuando la concentración de sulfatos es menor a 5 mg kg^{-1} al momento de la siembra. Según este estudio el incremento en rendimiento puede alcanzar un 15 %. En el caso de suelos donde el contenido de sulfatos a la siembra es mayor a 5 mg kg^{-1} , la probabilidad de una respuesta positiva es baja. Además es posible que ocurran respuestas negativas, con pérdidas que pueden alcanzar el 10 % (90 % del rendimiento respecto al testigo sin fertilización), y cuyas causas más probables fueron comentadas en párrafos anteriores.

De acuerdo con el análisis de regresión de la Figura 1, el 64 % de la variabilidad observada en rendimiento se explica por la concentración de sulfato en el suelo, que es la

principal forma de S para la absorción por parte de las plantas. Esto se relaciona con que la disponibilidad de sulfatos a lo largo del ciclo no depende únicamente de su concentración al momento de la siembra. Además, con el muestreo de suelos en el estrato 0-15 cm solamente, no es posible considerar el aporte de estratos más profundos cuando las plantas alcanzan cierto desarrollo radicular. Por ejemplo, en horizontes sub-superficiales arcillosos con presencia de hidróxidos de hierro y aluminio, el sulfato retenido por adsorción (McBride, 1994) también constituye una forma potencialmente disponible para las plantas. Esto podría ser el caso de los suelos del presente trabajo que presentan un horizonte B textural hasta una profundidad de 60 cm o más. Por lo tanto un suelo con una concentración media o baja de sulfato a la siembra (por ejemplo 5 a 10 mg kg^{-1}) puede no mostrar respuesta a la fertilización azufrada. Esto dependería de la existencia de una capa subyacente relativamente rica en sulfato y de las condiciones para que el crecimiento radicular alcance la profundidad necesaria.

El potencial de mineralización de nitrógeno

Los resultados de este estudio no indican una relación entre el PMN y la respuesta a S (Figura 2). Esta observación no sustenta la hipótesis que el PMN podría ser un indicador de la capacidad de aporte de S en el ciclo del cultivo de soja. Estos resultados se oponen a los resultados de Carciochi et al. (2016), que encontraron una correlación significativa entre la respuesta a S en maíz y el PMN.

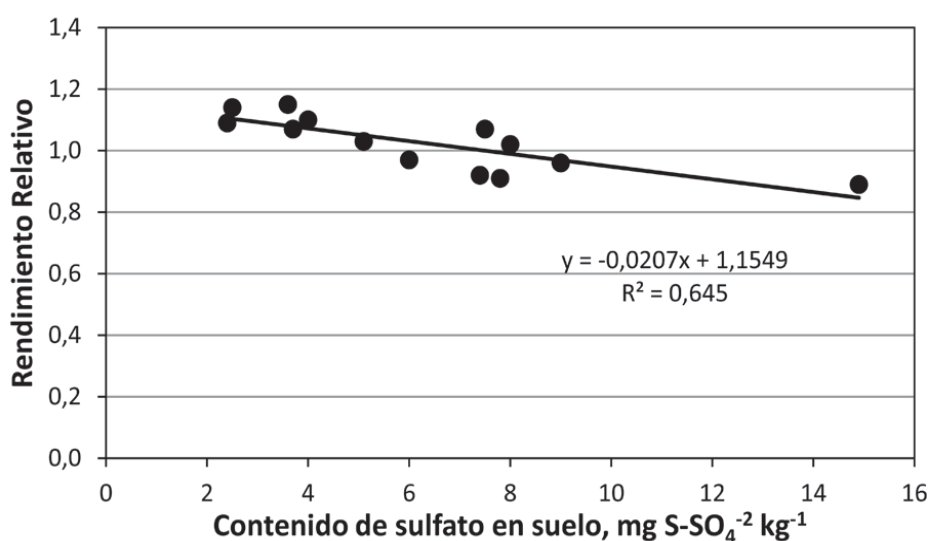


Figura 1. Relación entre la concentración de sulfato en suelo (S-SO_4^-) y el rendimiento relativo de soja (rendimiento relativo fue calculado como: promedio del rendimiento en grano de parcelas tratadas / control sin S).

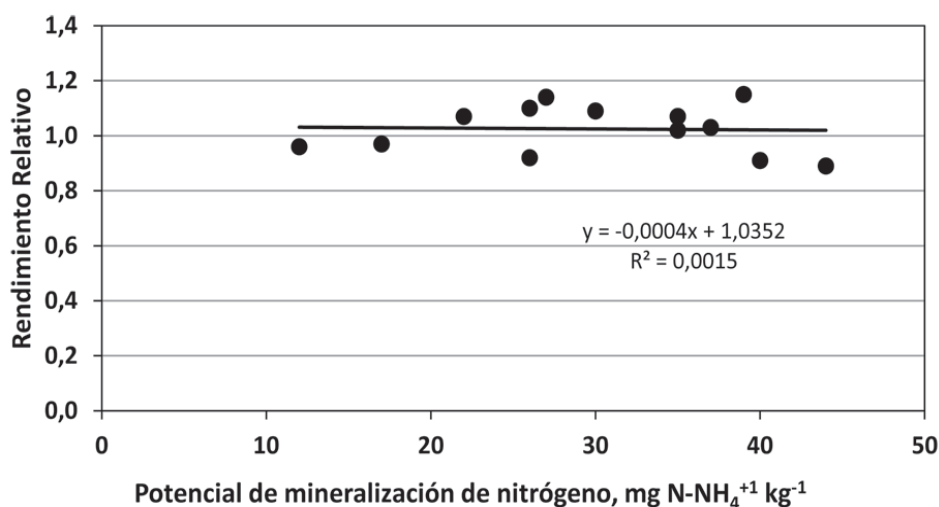


Figura 2. Relación entre el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) y el rendimiento relativo de soja (rendimiento relativo fue calculado como: promedio del rendimiento en grano de parcelas tratadas/control sin S).

Dicho estudio estableció un umbral de 54 mg N kg⁻¹ por encima del cual el aporte de S desde el suelo sería suficiente para el cultivo de maíz.

La ocurrencia simultánea de dos procesos de mineralización de S según el modelo conceptual de reciclaje de nutrientes de McGill y Cole (1981) permitiría explicar estos resultados. Por un lado, la mineralización biológica libera sulfato debido a la acción de microorganismos que requieren C como fuente de energía atacando al C ligado directamente al S (C-S). Es decir que requiere un sustrato orgánico pasible de ataque microbiano. Suponiendo que el PMN es un buen indicador de este *pool* activo, se debería esperar una relación positiva entre el PMN y el azufre mineralizado biológicamente, de acuerdo a la hipótesis inicial del trabajo. Por el otro lado puede ocurrir mineralización bioquímica por hidrólisis enzimática de sulfatasas actuando sobre ésteres de S (C-O-S) en el suelo (Churka Blum et al., 2013). Este proceso requiere la liberación de sulfatasas por parte de hongos y bacterias del suelo (Eriksen, 2009), y estaría regulado por la disponibilidad de sulfato: cuando este no alcanza a completar la demanda microbiana de S se incrementaría la actividad de las sulfatasas, mientras que niveles altos de sulfatos inhibirían la actividad de estas enzimas. Es decir que a diferencia de la mineralización biológica, la mineralización bioquímica no depende de un *pool* activo de carbono orgánico. Esto explicaría los resultados del presente trabajo de que la respuesta al agregado de S no está relacionada con el PMN del suelo.

Conclusiones

Con base a los resultados de este trabajo se puede concluir que el rendimiento de soja puede estar limitado por la baja disponibilidad del S en las condiciones de suelo estudiadas. La probabilidad de ocurrencia de déficit de S será mayor en suelos con bajo contenido de sulfatos al momento de la siembra (menor de 5 mg kg⁻¹). Si bien la mineralización de S libera sulfatos a la solución del suelo, el PMN no sería un buen estimador de la fracción orgánica de S que contribuye a la disponibilidad de sulfatos en el ciclo de un cultivo de soja.

Bibliografía

- Ajwa, H. A. y Tabatabai, M. A. (1993). Comparison of some methods for determination of sulphate in soils. *Communications on Soil Science and Plant Analysis*, 24, 1817-1832.
- Barrow, N. J. (1960). A comparison of the mineralization of nitrogen and of sulfur from decomposing organic materials. *Australian Journal of Agricultural Research*, 11, 960-969.
- Bray, R. H. y Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Cantarella, H. y Prochnow, L. I. (2001). Determinação de sulfato em solos. En: B. van Raij, J. C. Andrade, H. Cantarella y J. A. Quaggio (Eds.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais* (pp. 225-230). Campinas: Instituto Agronômico de Campinas.
- Carciochi, W., Wyngaard, N., Divito, G. A., Reussi Calvo, N. I., Cabrera, M. L. y Echeverría, H. E. (2016). Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 52, 917-926.

- Chapman, S. J. (1997). Barley straw decomposition and S immobilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 109–114.
- Churka Blum, S., Lehmann, J., Solomon, D., Fávero Caires, E. y Ferracciú Alleoni, L. R. (2013). Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. *Geoderma*, 200–201, 156–164.
- Cordone, G. y Martínez, F. (2002). Efecto de la aplicación de azufre y distintas dosis de nitrógeno sobre el rendimiento del doble cultivo trigo/soja. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 13, 14–16.
- Díaz Zorita, M., García, F. y Melgar, R. (2002). Fertilización en soja y soja-trigo: Respuesta a la fertilización en la región pampeana: Campañas 2000/01 y 2001/02. Pergamino: INTA. (Boletín Proyecto Fertilizar INTA).
- Eriksen, J. (2009). Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Advances in Agronomy*, 10, 55–89.
- Galarza, C., Gudelj, V. y Vallone, P. (2002). Fertilización del cultivo de soja. Marcos Juárez: INTA Marcos Juárez. (Información para extensión, N°69).
- García Lamothe, A. (2002). Respuesta a la fertilización con azufre en trigo pan. Recuperado de http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s_trigo.pdf
- García Lamothe, A., Morón, A. y Quincke, J. A. (2010). El indicador del Potencial de Mineralización de Nitrógeno (PMN): Posible uso para recomendación de fertilización en trigo por el método del balance. Trabajo presentado en Seminario SUCS-ISTRO. Colonia, Uruguay.
- García Lamothe, A. y Quincke, J. A. (2011). El azufre en cereales de invierno: Resumen de resultados experimentales y repaso de la teoría. En *Aportes de la zafra de cultivos de invierno: Durazno, junio 2011* (pp. 33–36). Montevideo: INIA. (Actividades de difusión, 646).
- Gavlak, R. G., Horneck, D. A., Miller, R. O. y Kotuby-Amacher, J. (2003). Soil pH and Electrical Conductivity. En: *Soil, plant and water reference methods for the western region* (2nd ed., pp. 37–47). Colorado: Colorado State University.
- Giménez, L. y García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia*, 15, 100–108.
- Gutiérrez Boem, F. H., Prystupa, P. y Ferraris, G. (2007). Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30, 93–104.
- Hoefl, R. G., Walsh, L. M. y Keeney, D. R. (1973). Evaluation of various extractants for available soil sulfur. *Soil Science Society of America Proceedings*, 37, 401–404.
- Keeney, D. R. (1982). Nitrogen: Availability indices. En: A. L. Page, R. H. Miller, y D. R. Keeney (Eds). *Methods of soil analysis part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 711–733). Madison: ASA. (Agronomy Monography, 93).
- Keeney, D. R. y Bremner, J. M. (1966). Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agronomy Journal*, 58, 498–503.
- Levitt, J. (1980). *Responses of plants to environmental stresses*. Nueva York: Academic Press.
- Macleod, J. A., Gupta, U. C. y Stanfield, B. (1997). Molybdenum and sulfur relationships in plants. En U. C. Gupta (Ed.). *Molybdenum in Agriculture*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Malavolta, E., Vitti, G. C. y de Oliveira, S. A. (1989). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba: Potafos.
- Marschner, H. E. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). London: Academic Press.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. Oxford: Oxford University Press.
- McGill, W. B. y Cole, C. V. (1981). Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26, 267–286.
- Mills, H. A. y Jones, J. B. (1996). *Plant analysis handbook II: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Atlanta: MicroMacro Publishing.
- Ministerio de Agricultura y Pesca. (1979). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III Descripción de las unidades de suelos*. Montevideo: MAP.
- Molfino, J. y Califra, A. (2001). *Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación*. Montevideo: MGAP.
- Morón, A. (2005). Informe de la red de ensayos de fertilización y fijación biológica de nitrógeno en soja, 2003–2004. En *Jornada técnica de cultivos de verano* (pp. 71–81). Montevideo: INIA. (Serie de actividades de difusión, 417).
- Morón, A. y Baethgen, W. (1996). *Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera*. Montevideo: INIA. (Serie Técnica, 73).
- Morón, A. y Sawchik, J. (2002). *Soil quality indicators in a long-term crop-pasture rotation experiment in Uruguay*. Trabajo presentado en 17th World Congress of Soil Science [CD]. Thailand.
- Reussi Calvo, N. I., Sainz Rozas, H., Echeverría, H. y Berardo, A. (2013). Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agronomy Journal*, 105, 321–328.
- Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigalupo, S., Castellarin, J., Galarza, C., González, N., ... y Vallone, P. (2004). Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo*, 22, 92–101.
- Singh, M. y Kumar, V. S. (1979). Sulfur, phosphorus, and molybdenum interactions on the concentration and uptake of molybdenum in soybean plants. *Soil Science*, 127, 307–312.
- Steinbach, H. S. y Álvarez, R. (2014). *Eficiencia de respuesta de trigo, maíz y soja a la fertilización azufrada en la región pampeana argentina*. Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/FCC0FB00AC3CA14A85257CA000801DEC/\\$FILE/11.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/FCC0FB00AC3CA14A85257CA000801DEC/$FILE/11.pdf)
- Till, A. R. (2010). Sulphur sources. En *Sulphur and sustainable agriculture* (1st ed., pp. 48–55). Paris: IFA.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D. y Havlin, J. L. (1993). Soil and fertilizer sulfur, calcium and magnesium. En *Soil Fertility and Fertilizers* (5th ed., pp. 266–303). New York: Macmillan Publishing.
- Tysko, M. B. y Rodríguez, M. B. (2006). Respuesta del doble cultivo trigo/soja a la fertilización azufrada. *Revista Ciencia del Suelo (Argentina)*, 24, 139–146.
- Victoria, C. D., Piñeyría, J. y Puentes, R. (1985). *Relevamiento semidetallado de suelos de la estación experimental La Estanzuela*. Colonia: MAP.
- Whalley, W. R. y Bengough, A. G. (2013). Soil mechanical resistance and root growth and function. En T. Beeckman (Ed.) *Plant roots the hidden half* (4th ed., pp. 1–15). Boca Ratón: CRC Press.
- Wyngaard, N. y Cabrera, M. L. (2015). Measuring and estimating sulfur mineralization potential in soils amended with poultry litter or inorganic fertilizer. *Biology and Fertility of Soils*, 51, 545–552.