

## 1. EL AZUFRE EN LA AGRICULTURA

Ings. Agrs. Graciela Cordone y Fernando Martínez  
INTA Casilda

### Importancia del Azufre en el sistema productivo agrícola del sur de Santa Fe

En la región Centro Sur de Santa Fe existen lotes con 50-70 años de agricultura continúa. La generalización de la soja a partir de 1974 como cultivo de segunda (soja 11), y la de soja de primera (soja 1) desde 1980, ambas con el modelo tecnológico tradicional, produjo un nuevo escalón en el descenso de la fertilidad de los suelos.

Además, la soja es el cultivo predominante en la región. Existen diversas fuentes de información que determinan que este cultivo, en sus variantes de primera y segunda siembra, ocupa aproximadamente un 80% de la superficie total, presentando leves variaciones según el área considerada. En un trabajo de análisis de datos (Cordone et al., 1998) provenientes de los grupos del Programa Cambio Rural del sur de la provincia de Santa Fe, realizado sobre empresas ubicadas en suelos de áreas degradadas que dedican el 80% o más de su superficie a cultivos agrícolas, se determinó que la soja ocupaba el 79.7% de la superficie total. Por otro lado, un relevamiento realizado por AFA-INTA Casilda (Proyecto Fortalecer, 1998) abarcando 17416.5 has de los departamentos Caseros y San Lorenzo, mostró que en la campaña 1996/97 la soja 1 ocupaba el 52% y la soja 11 el 31 % de la superficie cultivada, totalizando un 83% del área total. Mientras que un sondeo llevado a cabo por INTA Casilda para la misma campaña en un área más reducida, arrojó una superficie sembrada con soja del 76% (43.6% y 32.3% para soja 1 y soja 11, respectivamente).

**Tabla 1: Requerimiento y exportación de Azufre(1997/98).**

CULTIVO	S EN GRANO (%)*	RTO (t/ha)**	SUPERFICIE (%)**	EXPORTACIÓN (kg/ha S)	EXPORT/HA PONDERADA (kg S grano)	REQUERIMIENTO TOTAL (kg de S)	REQUER/HA PONDERADO (kg de S)
Maíz	0.17	7.34	12.8	12.5	1.6	21.5	2.75
Trigo	0.17	2.22	17.0	3.8	0.65	9.6	1.63
Soja 1	0.32	3.07	60.8	9.8	6	17.4	10.57
Soja II	0.32	2.59	19.8	8.30	1.6	14.7	2.91
Cebada	0.18	2.76	2.30	5.0	0.12	11.9	0.27
Sorgo	0.15	6.91	4.2	10.4	0.44	31.8	1.34
<b>Total</b>					<b>10.40</b>		<b>19.47</b>

\*Según (Deloch) en Mengel and Kirby (1987), excepto sorgo; \*\* Según estimación de la Dirección de Economía Agraria-Estimaciones Agrícolas (SAGPyA) para los departamentos Caseros, Constitución, San Lorenzo y Rosario.

La delegación Casilda de la Dirección de Estimaciones Agrícolas (SAGPyA) estimó, para la campaña 1997/98 y para el área centro-sur de la provincia de Santa Fe (departamentos Caseros, San Lorenzo, Rosario y Constitución), que la superficie ocupada por el cultivo de soja fue del 60.8% para la primera siembra y del 19.8% para la segunda siembra, o sea un 81.6% del área total. Tomando la distribución de superficie por cultivo y los rendimientos informados por esta fuente para el área y campaña agrícola mencionada, se elaboró la Tabla 1 que ilustra el requerimiento y exportación de Azufre (S) de la región para la secuencia promedio de cultivos. La soja es un cultivo exigente en S, requiriendo aproximadamente 6.5 kg de S por tonelada de grano. En la Tabla 1 se observa que la soja fue responsable del 73.1% del S total que salió del campo con los granos, y también requirió el 69.2 % de la cantidad total de S/ha necesaria para la producción de los cultivos en esa campaña.

Por otro lado, la estimación de la exportación de S para el Departamento Caseros en 100 años comprendidos entre 1880 y 1980 arroja un valor promedio de 5.2 kg de S/ha/año. Durante el período 1980-1990 la soja fue ocupando mayor superficie y también se registró un incremento en los rendimientos de todos los cultivos, esto ha ido llevando a un incremento en la exportación de S. Por lo tanto, es interesante observar que de una media de 5.2 kg se ha llegado al doble (10.4 kg) en la campaña 1997/98. Si se asume que el S afecta la nodulación, y por ende, la nutrición nitrogenada de la soja, y que este cultivo es responsable de más del 70% de la exportación total de S, queda claro el valor estratégico de este nutriente para la producción de soja y para la sostenibilidad del sistema agrícola del sur de Santa Fe. Si bien la producción alcanzada en la última campaña podría estar expresando el nivel factible de producción cuando las precipitaciones no son limitantes, la Tabla 1 y las consideraciones que anteceden muestran *la importancia de estudiar el modo de reponer este nutriente en el principal cultivo del área.*

## Funciones del S en las plantas

El S es requerido para las siguientes funciones en las plantas (Kanwar and Mudahar, 1986):

1. Síntesis de tres aminoácidos esenciales que contienen S (cisteína, cistina y metionina) que son componentes esenciales de las proteínas.
2. Formación de clorofila.
3. Activación de ciertas enzimas proteolíticas tales como las papainasas.
4. Síntesis de ciertas vitaminas (biotina, tiamina y B1), glutatiónina y coenzima A.
5. Formación de glucósidos que son componentes esenciales de los aceites de cebolla, ajo y crucíferas.
6. Formación de ciertas uniones bisulfurosas tales como los sulfidrilos (grupo SH), los cuales además de dar el olor característico a los aceites, también confiere resistencia a la sequía y al frío.

7. Formación de ferredoxina, una proteína vegetal que contiene hierro y actúa como un transportador de electrones en la fotosíntesis y también está involucrada en la fijación de N, ya sea por las bacterias simbióticas o de vida libre.
8. Actividad de la ATP sulforilasa, una enzima que interviene en el metabolismo del S.

*Las plantas absorben S principalmente como ión  $SO_4^-$ , por difusión y flujo de masa. Los síntomas de deficiencia consisten en un amarillamiento similar al producido por la deficiencia de N, pero a diferencia de este, el amarillamiento se presenta en las hojas jóvenes.*

### Formas de S en el suelo

En la mayoría de los suelos arables el azufre se encuentra en la materia orgánica, en la solución del suelo como sulfatos solubles o absorbido en el complejo absorbente del suelo. El S es un componente de las proteínas de las plantas, y cuando estos materiales retornan al suelo una gran fracción del azufre permanece en forma orgánica. En los horizontes superficiales de los suelos de regiones húmedas, la mayoría del azufre se encuentra en forma orgánica. En los suelos de regiones áridas se encuentran sulfatos de calcio, magnesio y potasio que precipitan en grandes cantidades.

La **forma orgánica** representa más del 90% del azufre total en la mayoría de los suelos no calcáreos, aunque esta proporción varía considerablemente de acuerdo al tipo de suelo y a la profundidad del horizonte. Generalmente es menor en el subsuelo que en superficie.

Hay relación entre el C orgánico y el N total y S total del suelo. La relación C: N: S es variable, pero podemos citar como ejemplo la relación encontrada por Tabatabai y Bremner para suelos de Iowa: 110:10:1.5. Andriulo et al. (1996) encontró, para suelos de Pergamino sin laboreo (reserva botánica EEA INTA), relaciones C:N de 10.5:1 y C:S 77:1; y para la misma serie de suelo sin erosión con 80 años de agricultura continua, encontró relaciones C:N 12.5:1 y C:S 92:1, mostrando que esta relación depende del laboreo. Por el contrario, la relación N: S fue 7:1 en ambas situaciones, mostrando que es menos variable que las relaciones con C. La bibliografía internacional señala que la relación N:S de la mayoría de los suelos está en el rango de 6-8: 1.

Aunque gran parte del S orgánico del suelo permanece no caracterizado, existen tres grupos reconocidos: 1) fracción de S reducible (fracción más lábil del S orgánico), no está ligada directamente al C y se cree que la mayor parte está bajo la forma de ésteres; 2) S ligado al C, contenido en aminoácidos, cistina y metionina; y 3) fracción inerte o residual, es una fracción no reducible, es excepcionalmente estable y probablemente es de escasa importancia como fuente potencial de S

para las plantas.

Casi toda la **forma inorgánica** existe como ión  $\text{SO}_4^{=}$  en combinación con cationes tales como calcio, magnesio, potasio, sodio o amonio. Generalmente se encuentra en las siguientes formas: 1) sales solubles en agua; 2) absorbido por los coloides del suelo; y 3) compuestos insolubles.

La cantidad de sulfatos solubles varía mucho entre tipos de suelo y dentro del perfil del suelo. Debido a que es un anión y a la solubilidad de la mayoría de sus sales, los sulfatos pueden ser lixiviados desde la superficie del suelo bajo condiciones de sobresaturación del suelo. Otro factor que influye en la pérdida de sulfatos es la naturaleza de los cationes presentes en la solución del suelo, así la lixiviación de sulfatos es mayor cuando predominan los cationes monovalentes tales como sodio y potasio, y es menor cuando los cationes son bivalentes como calcio y magnesio. Las pérdidas son mayores en suelos ácidos cuando existen apreciables cantidades de hierro y aluminio intercambiable.

La adsorción de sulfatos es un proceso reversible, generalmente aumenta con el incremento del contenido de arcillas. La capacidad de adsorción de las arcillas es diferente: kaolinita > illita > bentonita. Los horizontes subsuperficiales comúnmente tienen mayor capacidad de adsorción de sulfatos debido al mayor contenido de arcillas. En algunos suelos la materia orgánica contribuye a retener sulfatos. La adsorción de sulfatos se considera beneficiosa, ya que ayuda a retener el S nativo del suelo o el agregado como fertilizante, reduciendo las pérdidas por lavado en regiones o en períodos de mucha precipitación.

### Mineralización-Inmovilización del S en el suelo

Además del aporte de S por las lluvias o agua de riego sulfatadas, la liberación de S de la materia orgánica usualmente constituye el mayor aporte de S a la solución del suelo. *La liberación de S, o mineralización, está relacionada a la descomposición de la materia orgánica. El S contenido en la materia orgánica se oxida a sulfato por procesos principalmente microbianos, siendo la especie más común Thiobacillus thiooxidans. La asimilación microbiana de los sulfatos (forma inorgánica) y su incorporación en el tejido microbial (forma orgánica) se conoce como inmovilización, esto disminuye temporariamente la cantidad de S disponible para las plantas. Ambos procesos se producen simultáneamente y la cantidad de sulfatos disponibles para las plantas representa la diferencia entre la magnitud de estos dos procesos. La mineralización de los compuestos orgánicos depende de la relación C: S del sustrato. Así, se menciona que cuando los residuos que llegan al suelo tienen una relación C: S  $\leq$  200:1 se produce liberación de S. Cuando los restos orgánicos que llegan al suelo tienen relaciones C: S  $\geq$  400:1 se produce inmovilización de S.*

## Síntomas de deficiencia de S

El déficit de S compromete el desarrollo y la productividad del cultivo de soja. Los síntomas de deficiencia se caracterizan por un amarillamiento de toda la planta, las hojas son de menor tamaño y los entrenudos son más cortos. También se ha observado que las leguminosas deficientes presentan menor nodulación que las que tienen una adecuada nutrición. A veces los síntomas de deficiencia de S pueden ser confundidos con los de N, pero la deficiencia de S se manifiesta primero en las hojas jóvenes, ya que a diferencia del N, el S no se redistribuye o remobiliza desde las hojas viejas.

Los **métodos de diagnóstico** se basan en observaciones visuales y en el nivel de S en el tejido vegetal y en el suelo. Los *síntomas visuales* sirven para detectar principalmente deficiencias severas de S. Pueden presentarse muy temprano en la vida de la planta. Existe una deficiencia "escondida u oculta" que no manifiesta síntomas, pero disminuye los rendimientos. El análisis de tejido vegetal permite una evaluación directa y segura del estado nutricional, pero frecuentemente los resultados no se reciben siempre a tiempo para hacer una aplicación correctiva. El análisis de suelo permite conocer el nivel del nutriente antes de sembrar el cultivo y hacer recomendaciones de fertilización, pero presenta ciertos problemas.

Los *valores críticos en el tejido vegetal* existentes son el resultado de los análisis de plantas que han sido correlacionados con los niveles de rendimiento. Los valores críticos dependen estrictamente de la especie, de la parte de la planta, del estado de desarrollo, del nivel de rendimiento y de la tracción de S (S total o  $\text{SO}_4^-$ ). Además, estos valores son válidos cuando no hay otro factor limitante. El muestreo se debería hacer en el momento de máxima demanda de S (desde alargamiento de tallo hasta comienzo de floración). Como el  $\text{SO}_4^-$  tiene baja movilidad en la planta, las hojas jóvenes serían las más adecuadas para predecir el estado nutricional de los cultivos. Sin embargo, las hojas tienen que estar completamente desarrolladas para evitar efectos de dilución. Se menciona que la determinación de  $\text{SO}_4^-$  en los tejidos vegetales es problemática cuando la deficiencia de S se combina con deficiencia de N o Molibdeno. En la Tabla 2 se presentan los rangos de valores de nutrientes en hojas considerados adecuados.

**Tabla 2: Tenores adecuados de N y S en hojas.**

CULTIVO	% SOBRE MATERIA SECA	
	N	S
Soja	4.5/5.5	0.25
Maíz	2.7/3.3	0.15/0.2
Trigo	3/3.3	0.4
Sorgo	1.3/1.5	0.08/0.2
Girasol	3.3/3.5	0.5/0.7

La proporción N: S ha sido utilizada por varios autores (mencionados por Kanwar and Mudahar, 1986, p.34-39) como una herramienta para diagnosticar la deficiencia de S, algunos proponen 17:1 para las leguminosas y 14: 1 para las gramíneas, otros mencionan 16: 1 para rye grass y 18: 1 para trébol blanco como valores críticos.

*La concentración de S en el suelo* varía ampliamente dependiendo del contenido de materia orgánica del suelo, porque más del 90% del S total del suelo está ligado a la materia orgánica. La concentración de  $\text{SO}_4^{=}$  y de S orgánico soluble en los suelos muestra una variación espacial y estacional, dependiendo del régimen de agua edáfica, de la actividad microbiana, de la deposición atmosférica, de la absorción por las plantas, del agregado de fertilizantes, de la profundidad, etc. En el/los horizontes superficiales se observan grandes variaciones estacionales y entre años en el nivel de  $\text{SO}_4^{=}$  solubles, pero también se han detectado a mayores profundidades. Estas variaciones son causadas por la interacción de factores ambientales sobre la mineralización del S orgánico, por el movimiento de las sales de S en el suelo y por la absorción por los cultivos. El movimiento de  $\text{SO}_4^{=}$  es mayor en los suelos de textura gruesa y bajo condiciones de lluvias abundantes. Los  $\text{SO}_4^{=}$  son retenidos por ciertas arcillas y óxidos de hierro y aluminio usualmente en el horizonte B o C de algunos suelos de las regiones húmedas (Tisdale et al., 1985).

En Nueva Zelanda (Edmeades et al., 1994) combinan el test de  $\text{SO}_4^{=}$  extractable y el de S orgánico extractable para diagnosticar la disponibilidad de S del suelo. Ambos tests han sido calibrados con datos agronómicos. El valor de S orgánico lo usan como una estimación de la disponibilidad en el largo plazo y el nivel de  $\text{SO}_4^{=}$  es utilizado como un estimador de la disponibilidad a corto plazo.

El S orgánico del suelo no ligado al C, constituye la fracción de los ésteres, estos son considerados la fracción más lábil del S orgánico y, por lo tanto, pueden contribuir a la oferta de S disponible. O sea, parte del S orgánico unido en compuestos moleculares más grandes permanece soluble y es fácilmente oxidable. Los métodos para determinar el S disponible para las plantas determinan el  $\text{SO}_4^{=}$  inorgánico o el  $\text{SO}_4^{=}$  inorgánico más la fracción móvil del S orgánico. Aproximadamente un 50% del S orgánico se presenta en la forma de ésteres, pero puede variar entre 27 y 59%; para el subsuelo de Iowa se han encontrado valores tan altos como el 94.5% (Tisdale et al., 1985). Otros autores han determinado en 6 suelos brasileros que los ésteres constituían entre el 20 y 65% del S total y en un amplio rango de suelos de zonas templadas se encontró que esta fracción podía variar entre el 30 y 70% del S total (Kanwar and Mudahar, 1986). Generalmente, esta fracción no está disponible para las plantas, pero el S se libera después de romper la unión éster, cosa que ocurre al secar el suelo y esto puede tener efectos dramáticos sobre los resultados de los análisis.

Por otro lado, Barrow, 1961 (citado por Kanwar and Mudahar, 1986) observó "flushes" de S, como los de N, que resultan de la mineralización cuando los suelos

previamente secos, se humedecen. Sin embargo el destino del S mineralizado puede ser distinto al de los nitratos, porque muchos suelos tienen mayor capacidad de absorber sulfatos que nitratos.

Los principales métodos de análisis de S del suelo se resumen en la Tabla 3. Los investigadores han usado muchas técnicas de extracción y también un amplio rango de métodos para medir la concentración de S que ha pasado a la solución extractante. Si un método de análisis de suelo es adecuado o apropiado para predecir las deficiencias, depende de su correlación con el rendimiento. Debido a que la concentración de  $SO_4^{2-}$  en el suelo es espacial y estacionalmente variable, no existe un estado de desarrollo específico del cultivo más indicado para tomar las muestras que garantice la repetitividad de un método. Otro aspecto relacionado al nivel de S disponible cuando se ha agregado S como fertilizante es que, en algunos suelos, puede producirse inmovilización del S aplicado debido a su conversión a formas orgánicas. Esto puede ocurrir en suelos que tienen gran cantidad de carbono y nitrógeno, pero que tienen limitadas cantidades de S. Esta situación puede darse en los lotes con altos rendimientos de los cultivos y fertilización nitrogenada, en los cuales retornan al suelo muchos residuos vegetales (maíz, sorgo y trigo, por ejemplo) y en siembra directa que disminuye la tasa de mineralización del C del rastrojo.

**Tabla 3: Métodos de análisis**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Técnicas de extracción</b></li> <li>- S inorgánico: agua, sales: CaCl<sub>2</sub>, LiCl, MgCl<sub>2</sub> y NH<sub>4</sub>OAc Soluc: Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> Soluc. Ácidas: NH<sub>4</sub>Ac+ac. Acét.</li> <li>- S inorg. + Frac. S org: KCl a 40C° Soluc. Alcalinas a pH=8.5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Procedimiento para medir la concentración de S en la solución extractante</b></li> <li>- Método turbidimétrico</li> <li>- Método de reducción</li> <li>- Equipos de plasma-espectrometría de absorción atómica.</li> <li>- Cromatografía de intercambio aniónico.</li> </ul>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Fuentes de fertilizantes que contienen S

Las fuentes más comunes de fertilizantes azufrados disponibles en la zona y su concentración de nutrientes se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4: Fertilizantes azufrados y concentración de nutrientes.**

NOMBRE	AZUFRE (%)	OTROS NUTRIENTES (%)	TIPO DE FORMULACIÓN
Sulfonitrato de amonio	14	26 N	granulado
Sulfato de amonio	24	21 N	granulado
Kieserita (Sulfato de magnesio hidratado)	20	150 Mg	granulado
SulPoMag	22	22 K <sub>2</sub> O + 11Mg	granulado y cristales

Thio-Sul (Tiosulfato de amonio)	26	12 N	líquido
Azufre elemental	85 - 100	-	polvo
Yeso agrícola (Sulfato de calcio hidratado)	18.6	23.0 Ca	polvo
Superfosfato simple	13.9	20 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	granulado
Sulfato de potasio	17.6	50 K <sub>2</sub> O	granulado

## Bibliografía consultada

- Anderson G., R. Lefroy, N. Chinoin and G. Blair. 1992. Soil Sulphur Testing. Sulphur in Agriculture, Vol. 16:6-14.
- Andriulo A., J. Galantini y F. Abrego. 1996. Exportación y balance edafico de nutrientes después de 80 años de agricultura continua. Carpeta de Producción Vegetal. INTA Pergamino. Tomo XIV. Serie Generalidades. Inf. N° 147.
- Cordone G., A. Gargicevich, G. Gerster y C. González (ex-aequo). 1998. Análisis de la Productividad Física de Empresas Agrícolas de Cambio Rural en Areas de Suelos Degradados al Sur de Santa Fe. *In* I Congreso Nacional de Profesionales Cambio Rural. Resúmenes de trabajos y comunicaciones. p. 17.
- Edmeades et al., 1994. Some Recent Developments in Sulphur Research in New Zealand Agriculture. Sulphur in Agriculture, Vol. 18:3-8
- Kanwar and Mudahar. 1986. Fertilizer Sulphur and Food Production. Mengel and Kirby. 1987. Principles of Plant Nutrition.
- Tisdale S., W. Nelson and J. Beaton. 1985. Soil Fertility and Fertilizers. 4ta Edición USA.