

# IMPORTANCIA DEL AZUFRE EN LA PRODUCCION DE LOS CULTIVOS

---

GERARDO LOPEZ JURADO \*

## INTRODUCCION

Hace ya más de 100 años que se conoce acerca de la esencialidad del azufre (S) para el crecimiento de las plantas. El S es un constituyente de los amino ácidos cisteina, cistina y metionina. El S también es un constituyente del glutatión. S-adenosil metionina, tiamina, biotina, ácido lipoico, coenzima A, sistema enzimático de la nitrógenasa y la nitrato reductasa, así como constituyente de otras proteínas que se requieren para las reacciones bioquímicas por las bacterias que fijan nitrógeno (N).

Las plantas normalmente sintetizan todos los compuestos orgánicos azufrados a partir del sulfato inorgánico absorbido por las raíces (19).

### EL AZUFRE DEL SUELO

El origen normal del S para el crecimiento de las plantas es el suelo. El S ocurre en el suelo en dos formas: orgánica e inorgánica. Las proporciones relativas de las diferentes formas de S en el suelo pueden variar dependiendo de las propiedades físicas y químicas del suelo, de las condiciones estacionales, de la vegetación y de la aplicación que se haya hecho de fertilizantes azufrados.

Solamente el 7% del S total localizado en los primeros 25 cm del suelo es aprovechable para las plantas en cualquier momento en muchos de los suelos bien drenados que se usan con propósitos agrícolas. Aproximadamente del 60 al 70% del S total es inaprovechable permanentemente; el resto está asociado principalmente con la materia orgánica del suelo (9).

---

\* Profesor Asociado. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Mariño. Apartado Aéreo 1176. Pasto - Colombia.

Los compuestos orgánicos azufrados en el suelo son aprovechables para las plantas sólo después de que han sido mineralizados por microorganismos (3, 9).

El S inorgánico del suelo está presente principalmente como sulfato. Las plantas absorben el S del suelo principalmente en la forma de sulfato, y la absorción es un proceso activo que se incrementa cuando el pH del suelo se reduce (10, 15). La absorción del sulfato se lleva a cabo por una serie de transportadores proteínicos localizados en la membrana plasmática (3).

Parte del sulfato es reducido en las células radicales, pero una gran cantidad es transportada en forma acrópeta por el xilema hacia las hojas donde entra a los cloroplastos; la capacidad de las plantas superiores para mover S en forma basípeta es relativamente pobre (10).

Después de que el sulfato entra a los cloroplastos reacciona con el ATP en la presencia de ATP-sulfurilasa para formar adenosina 5 - fosfosulfato (AFS) y pirofosfato. El AFS formado es entonces reducido a sulfito (o tiosulfito) y sulfuro, en una serie compleja de reacciones en la cual la ferredoxina, generada por las reacciones lumínicas, sirve como reductor. Finalmente el sulfito se incorpora en O-acetil serina para formar cisteína. La cisteína, a su turno, es el punto de partida para la síntesis de muchos otros compuestos que contienen S (3, 15).

Las plantas pueden utilizar el  $SO_2$  atmosférico como parte para suministro de S. Una vez que el  $SO_2$  es absorbido a través de los estomas, se distribuye a través de la planta entera, y ha sido detectado en varias fracciones como proteínas-S, amino ácidos-S, y sulfato-S (10).

El  $SO_2$  absorbido por el suelo puede ser fácilmente oxidado a  $SO_4$  por organismos quimioautotróficos que hacen aprovechable el S para las plantas (3).

#### DEFICIENCIA Y TOXICIDAD DE AZUFRE

El S ha sido denominado el "elemento olvidado" y se ha prestado poca atención a la deficiencia de S, comparada con las deficiencias producidas por otros nutrimentos. Como resultado de esto, los síntomas de deficiencia de S no son muy comúnmente reconocidos (8).

La similitud de los síntomas de deficiencia producidos por S y nitrógeno (N) complican aún más la identificación. Según Hanley (8), cuando una planta crece bajo condiciones de un suministro continuo pobre en S ó N, la apariencia de la planta no es un medio adecuado para hacer la diferenciación entre las deficiencias de los dos elementos.

En plantas deficientes en S, los niveles de sulfato son muy bajos, mientras que hay acumulación de amida y nitrato. Esto contrasta marcadamente con la deficiencia de N donde los niveles de N soluble son bajos y los niveles de sulfato son normales (10). Según Dijkshoorn y van Wijk (4) la deficiencia de S resulta en la acumulación de nitrato y amino ácido libres.

En plantas deficientes en S la intensidad del crecimiento de la planta se reduce. Generalmente el crecimiento de los tallos se ve más afectado que el crecimiento de las raíces. Frecuentemente las plantas son rígidas y quebradizas y los tallos permanecen delgados. En contraste con la deficiencia de N, los síntomas cloróticos ocurren primero en las hojas más jóvenes, las hojas más recientemente formadas. Se conoce que la deficiencia de S retarda la síntesis de las proteínas, y como consecuencia afecta adversamente la nodulación y la fijación del N por las leguminosas (1, 16).

Spencer (17) manifiesta que una deficiencia severa de S reduce la intensidad de la síntesis de proteínas más que la intensidad de la fijación de N. Una deficiencia moderada de S limita la síntesis de proteínas y el suministro de N del nódulo en forma más o menos igual. Se ha reportado así mismo, que la deficiencia de S reduce significativamente el rendimiento de la proteína vegetal sin reducir el crecimiento de la planta (17).

El número y el peso de los nódulos se reduce en plantas deficientes en S (16); sin embargo, Spencer (17) reportó que cuando ocurre una reducción en el número de los nódulos o en el tamaño, probablemente es una consecuencia de una nutrición pobre en N y el crecimiento de la planta hospedera.

Las plantas son comparativamente insensitivas a altas concentraciones de sulfato en el medio nutritivo. Solamente

en casos donde las concentraciones de sulfato se aproximan a los 50 mM, lo cual puede ocurrir en algunos suelos salinos, el crecimiento de la planta se ve adversamente afectado (10).

En zonas donde la actividad industrial es muy baja o nula la concentración de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera es de 0,001 a 0,003 ppm (1-3  $\mu\text{g SO}_2\text{-S/m}^3$ ) (3). Las concentraciones críticas de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera, encima de las cuales se observan efectos tóxicos en las plantas se han observado en el rango de 0,5 a 0,7 ppm (500 - 700  $\mu\text{g SO}_2\text{-S/m}^3$ ). Concentraciones elevadas de  $\text{SO}_2$  producen síntomas necróticos en las hojas (10).

#### RESPUESTA EN RENDIMIENTO Y CALIDAD A LA APLICACION DE AZUFRE

La aplicación de S a las leguminosas es importante no solamente porque incrementa los rendimientos, sino porque incrementa la calidad del producto (8, 20). En general, las plantas forman compuestos azufrados reducidos a partir de sulfato y los animales forman sulfatos a partir de compuestos azufrados reducidos. Dentro del animal los compuestos de azufre reducidos realizan muchas funciones esenciales antes de su oxidación y excreción como sulfatos.

Las plantas que crecen con concentraciones adecuadas de S generalmente contienen más amino ácidos azufrados y son presumiblemente de mejor calidad nutricional que las plantas deficientes en S. Por lo tanto, cuando el rendimiento en forraje se incrementa como consecuencia de la fertilización con S, así mismo se consigue un incremento en su calidad nutricional para los rumiantes (20).

Pumphrey y Moore (13) mostraron que incrementos significativos en rendimientos en alfalfa ocurrieron cuando el contenido de S de la planta fue menor de 0,22% (2,2 mg S/g), y que la fertilización con S incrementó significativamente el rendimiento de forraje de alfalfa.

#### EFFECTOS DEL AZUFRE SOBRE LA FIJACION SIMBIOTICA DE NITROGENO

El incremento en el contenido de N de varias leguminosas

ha resultado del uso de fertilizantes con S en suelos deficientes en S (2).

En 1919 Miller, citado por Spencer (17), sugirió que el incremento en el contenido de N de las leguminosas se debía a los sulfatos que estimulaban la acción de las bacterias fijadoras de N. Pitz (12) demostró que el sulfato de calcio tenía un efecto estimulativo sobre las bacterias formadoras de nódulos en las raíces del trébol rojo. Las bacterias fueron de 2 a 3 veces más numerosas en los medios de cultivo que tenían sulfato de calcio comparados con el testigo.

Duley (6) mostró que el S y el sulfato de calcio incrementaron el número de nódulos en las raíces del trébol rojo; además, observó que en algunos suelos los nódulos de las raíces de la alfalfa de los tratamientos fertilizantes con S eran más numerosos que aquellos tratamientos no fertilizados.

Anderson y Spencer (2) dicen que Wilson en 1915 y 1917 obtuvo resultados que indicaban que los sulfatos, en concentraciones relativamente bajas, inhibían la nodulación. Gaw y Song en 1942, citados por Anderson y Spencer (2), reportaron que la nodulación y el rendimiento en alverja fueron incrementados con la adición de sulfatos de calcio y de hierro; incremento en la nodulación pero no incremento en el rendimiento con sulfatos de sodio y de zinc, y decrecimiento en la nodulación con otros sulfatos, incluyendo el sulfato de potasio.

El sulfato de amonio incrementó el rendimiento pero no la nodulación en plantas de alverja debido posiblemente más al efecto del  $\text{NH}_4^+$  que al  $\text{SO}_4^-$  (2). En las leguminosas el efecto del S es doblemente importante, debido a que es esencial un adecuado suministro de S al sistema de las raíces para la fijación de N, así como para la subsecuente síntesis de proteínas por la planta hospedera (20).

Anderson y Spencer (2) encontraron que el incremento en rendimiento del trébol debido al S estuvo asociado con un incremento tanto en el número como en el tamaño de los nódulos. Una aplicación tardía de sulfato causó un rápido incremento en la fijación de N sin incremento en el número de nódulos. El S también incrementó el porcentaje total de N y mejoró la nodulación en las plantas



de trébol; sin embargo, las plantas de trébol deficientes en S no mostraron deficiencia en N para la formación de proteínas o para el crecimiento de las plantas.

#### RELACION NITROGENO-AZUFRE

La distribución de los contenidos de N y S en las plantas se ha estudiado, debido a la muy estrecha asociación del N y del S en la síntesis de las proteínas. El N puede ocurrir en las plantas en dos formas principales; en proteínas y no proteínas. La forma en la cual el N existe en los tejidos vegetales refleja el metabolismo general de la planta.

El S puede tener profundos efectos sobre la composición de las proteínas, y por lo tanto sobre el metabolismo de las plantas (1). Se ha reportado una gran acumulación de amida en alfalfa, y amino ácidos, amida y nitrato en frijoles, bajo un suministro limitado de S (1).

Las relaciones N-S en la materia orgánica del suelo y en los tejidos vegetales son útiles para predecir cuando una deficiencia de S puede limitar el crecimiento de la planta. Una guía útil discutida por Stewart (18) es que alrededor de una parte de S es liberada de la materia orgánica del suelo por cada diez partes de N. Las deficiencias de S no son posibles si la materia orgánica del suelo es la principal fuente de N. Sin embargo cuando se suministran grandes cantidades de N por las leguminosas o a través de la fertilización con N, el suministro de S de la materia orgánica del suelo no será suficiente, debido a que una amplia variedad de cultivos requieren alrededor de una parte de S por cada quince partes de N para obtener máximos rendimientos y máxima calidad (gramíneas alrededor de 14:1 y leguminosas 17:1); en estas condiciones otras fuentes naturales de S tales como el sulfato contenido en la lluvia, sales inorgánicas en el suelo, subsuelo y el agua de irrigación deben ser evaluadas. Si estas fuentes son mínimas se debe adicionar un fertilizante con S (18).

#### RELACIONES NITROGENO-AZUFRE Y CONCENTRACIONES CRITICAS DE AZUFRE.

El S total, el sulfato y la relación N:S se han usado

como índices del estado del S en las plantas.

El S total ha sido utilizado debido a que el contenido de S en la planta está directamente relacionado con el suministro de S. Debido a la acumulación de sulfato después de que han sido satisfechas las demandas de S para la síntesis de las proteínas, muchos investigadores han propuesto al sulfato como un indicador del estado del S tan bueno como el S total (21).

La relación N:S en la planta es, según Thompson y colaboradores (19) una medida mucho más confiable de la suficiencia de S, que el nivel absoluto de S. Westermann (21) encontró que la relación N:S de una proteína específica es constante, debido a que la secuencia y el número de amino ácidos en la cadena polipeptídica están determinados por información genética. Por lo tanto, la relación N:S del material proteínico de una planta varía solamente cuando ocurren cambios en las proporciones relativas de las proteínas individuales formadas.

Dijkshoorn y van Wijk (4) propusieron que cuando la relación entre N total y S total (N:S) excedía de 16:1 se podía esperar una deficiencia de S y una limitada formación de proteínas. Pumphrey y Moore (13) reportaron que para alfalfa una relación N:S de 11:1 o menor, indicaba un adecuado suministro de S y producía un máximo rendimiento.

Dow (5) sugirió el uso del término "rango crítico de nutrientes" en lugar de "concentración crítica de nutrientes", y lo definió como "el rango de concentraciones encima del cual uno está razonablemente seguro que el cultivo está ampliamente suplido y debajo del cual uno está razonablemente seguro que está deficiente".

El rango crítico de nutrientes se ha determinado para el S graficando el rendimiento en materia seca contra el porcentaje de S contenido en las partes superiores de la planta, y estimando la concentración de S correspondiente al 90% de máximo rendimiento de materia seca. Este método también ha sido utilizado para establecer las concentraciones críticas de fósforo (P) y Potasio (K) en un gran número de leguminosas. En alfalfa, por ejemplo, las concentraciones críticas de S están entre 2,0 y 2,8 mg

S/g, esto es entre 0,20 y 0,28%.

Los valores del rango crítico para S en alfalfa, sin embargo, dependen del estado de desarrollo (14). Se ha encontrado que para un óptimo crecimiento y desarrollo se necesitan concentraciones típicas de S de 2,0 a 2,2 mgS/g (0,20 a 0,22%), determinadas en las partes apicales de diferentes leguminosas antes de la floración (21).

Por comparación, las concentraciones típicas de otros elementos para deficiencia en las partes superiores de pastos y forrajes de leguminosas antes de la floración son: 0,17-0,25% de P, 0,8-1,5% K, 0,5 ppm de Mo, 10-20 ppm de B, Zn, y Mg, y 2-5 ppm de Cu, en base a peso seco.

#### BIBLIOGRAFIA

1. ADAMS, C. A. y SHEARD, R. W. Alterations in the nitrogen metabolism of Medicago sativa and Dactylis glomerata as influenced by potassium and sulfur nutrition. Can. J. Plant Sci. 46:671-680. 1966.
2. ANDERSON, A. J. y SPENCER, D. Sulphur in nitrogen metabolism of legumes and non-legumes. Aust J. Sci. Res. 3:431-449. 1950.
3. ANDERSON, J. W. Sulfur in biology. Univ. Press, Baltimore. Studies in Biology no. 101. 1978.
4. DIJKSHOORN, W. y van WIJK, A. L. The sulfur requirements of plants as evidenced by the sulfur nitrogen ratio in the organic matter: a review of published data. Plant Soil 26:129-157. 1967.
5. DOW, A. I. Critical nutrient ranges in Northwest crops. Wash. Res. Ext. Proiser 43, 1982. 12 p.
6. DULEY, F. L. The relation of sulfur to soil productivity. J. Amer. Soc. Agron. 8:154-160. 1916.
7. EATON, F. M. Sulfur. pp. 224-275. In H. D. Champan (ed.) Diagnostic criteria for plants and soils. Univ. Cal. 1966.

8. HANLEY, P. K. Sulphur deficiencies: conditions of their occurrence. Ireland and Scandinavia. pp. 328-339. Symp. Int. sur le soufre en agriculture. Institut National de la Recherche Agronomique. Annales Agronomiques. 1972.
9. LUDECKE, T. E. Sulphur nutrition of lucerne. pp 143-149. In R. H. M. Langer (ed.) The lucerne crop. A. H. and A. W. Reed, Wellington, Sidney, 1967.
10. MENGEL, K. y KIRKBY, E. A. Principles of plant nutrition. 3rd ed. Int. Potash Inst., Bern, 1982. pp. 369-386.
11. PAL, U. R., GOSSETT, D. R., SIMS, J. L. y LEGGETT, J. E. Molybdenum and sulfur nutrition effects on nitrate reduction in burley tobacco. Can. J. Bot. 54:2014-2022. 1976.
12. PITZ, W. Effect of elemental sulfur and calcium sulfate on certain of the higher and lower forms of plant life. J. Agron. Res. 16:771-780. 1916.
13. PUMPHREY, F. V. y MOORE, D. P. Sulfur and nitrogen content of alfalfa herbage during growth. Agron. J. 57:237-239. 1965.
14. PUMPHREY, F. V. y MOORE, D. P. Diagnosing sulfur deficiency of alfalfa (Medicago sativa L.) from plant analysis. Agron. J. 57: 364-366. 1965.
15. SCHIFF, J. A. y FRANKHAUSER, R. C. Assimilatory sulfate reduction. pp. 153-168. In H. Bothe and A. Trebst (eds.) Biology of inorganic nitrogen and sulfur. Springer-Verlag, Berlin, 1981.
16. SMITH, F. W. Mineral nutrition of legumes. pp. 155-172. In J. Vicent (ed.) Nitrogen fixation in legumes. Academic Press, Sidney, Australia, 1982.
17. SPENCER, K. Growth and chemical composition of white clover as affected by sulphur supply. Aust. J. Agric. Res. 10:500-509. 1959.