



DEFICIENCIA DE AZUFRE EN SUELOS CULTIVABLES Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD

SULFUR DEFICIENCY IN CULTURAL SOIL AND ITS EFFECT ON THE PRODUCTIVITY

Corrales-Maldonado CG*, Vargas-Arispuro I, Vallejo-Cohén S y Martínez-Téllez MA

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Carretera a la Victoria Km. 0.6. Hermosillo, Sonora.

RESUMEN

En décadas pasadas el azufre fue considerado como un elemento contaminante del ambiente, esto generó que se crearan legislaciones para reducir las emisiones del elemento a la atmósfera, lo cual ocasionó un desbalance en el ciclo global de azufre, llegando a ser insuficiente en suelos donde se practica la agricultura intensiva. China fue el primer país en reconocer el problema y creó un programa de fertilización con azufre. El resultado fue un incremento en la productividad agrícola. La deficiencia de azufre en suelos está relacionada a baja productividad, mayor susceptibilidad a plagas, menor resistencia a sequía, frío y salinidad. Es necesario que cada región agrícola determine los niveles de azufre en suelos de cultivo, donde las medidas correctivas mejorarían la productividad. Según datos de la FAO se necesita incrementar la producción de alimentos en un 60% en las próximas 4 décadas; la fertilización con azufre podría ser un factor a considerar para lograrlo. La tecnología de fertilizantes ha generado una variedad de productos azufrados cuya selección estará en función de las condiciones edafoclimáticas, entre otros factores. Para los suelos deficientes de azufre, es necesario tomar medidas correctivas, dado que la demanda de alimentos es cada vez más grande.

Palabras clave: Azufre, fertilización, productividad agrícola, micronutrientes del suelo, deficiencia.

ABSTRACT

In previous decades sulfur was considered as a pollutant to the environment, this led to create legislation to reduce emissions of the element to the atmosphere, which caused an imbalance in the global sulfur cycle, becoming insufficient in soils where intensive agriculture is practiced. China was the first country to recognize the problem and created a sulfur fertilization program. The result was an increase in agricultural productivity. Sulfur deficiency in soils is related to low productivity, increased susceptibility to pests, reduced resistance to drought, cold, salinity. So it is necessary that each agricultural region determine the sulfur levels in agricultural soils, where corrective measures would enhance productivity. According to FAO data is necessary to increase food production by 60 % in the next four decades, sulfur fertilization could be one factor to consider to achieve it, considering that fertilizer technology has generated a variety of sulfur products whose selection will depend of edaphoclimatic conditions, among other factors. For sulfur

deficient soils, it is necessary to take corrective actions, as the demand for food is growing larger.

Keywords: Sulfur, fertilization, agricultural productivity, soil micronutrients, deficiency.

INTRODUCCIÓN

El excesivo uso de productos del petróleo en la producción industrial, la explosión demográfica a nivel mundial y la intensidad de las prácticas agronómicas, tanto en cultivo de plantas como en cría de ganado (Till, 2010), son algunos factores que tuvieron un impacto negativo en la composición química y la calidad de la atmósfera a nivel mundial, ocasionando el efecto invernadero, lo cual ha sido determinante en el cambio climático global (De Kok y Tausz, 2002). En respuesta a los efectos adversos que este cambio ha ocasionado en los ecosistemas, se crearon legislaciones que hasta ahora regulan las emisiones de gases hacia la atmósfera. Uno de los elementos químicos que se consideró muy contaminante fue el azufre (S), al cual se le aplicó una rigurosa regulación de uso que condujo a que en los últimos 25 años, se redujeran significativamente las deposiciones de azufre provenientes de la atmósfera (Messick *et al.*, 2005). Aunado a lo anterior, se empezaron a utilizar fertilizantes libres de azufre, situación que a través de los años, generó una deficiencia de este nutriente en los suelos cultivables, en consecuencia el azufre se colocó en el cuarto lugar en función de su necesidad de adición en suelos donde se practica la agricultura intensiva, después del nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), (Amâncio *et al.*, 2009; Fageria, 2009). El objetivo del presente trabajo fue revisar el impacto de la deficiencia de azufre y su relación con la productividad agrícola en regiones donde se ha reportado la deficiencia del azufre en los suelos; algunas de estas regiones son: China (Fan y Messick, 2005), Canadá (Janzen y Bettany, 1987), Estados Unidos (Fageria, 2009) y Argentina (Martínez y Cordone, 2000). Las medidas correctivas que han implementado estos países ante esta problemática, no han sido muy difundidas. En nuestro país, sigue siendo una tarea pendiente los estudios que relacionen la productividad de los suelos (con agricultura intensiva) con la disponibilidad de azufre y la materia orgánica.

AZUFRE COMO ELEMENTO ESENCIAL EN SUELOS

El azufre es uno de los elementos esenciales en plantas superiores, quienes lo obtienen principalmente del suelo en forma de sulfato, aunque también son capaces de captarlo

de la atmósfera, como dióxido de azufre (SO_2) (Till, 2010). Sin embargo, las plantas son incapaces de usarlo en la forma iónica (sulfato) en la que es absorbido del suelo, de donde es transportado hasta las hojas y reducido a sulfito. En las hojas las plantas tienen un sistema de transporte y reducción de azufre muy eficiente, específicamente en los cloroplastos, donde se realiza la reducción del sulfito a la forma de sulfuro, para posteriormente ser metabolizado al aminoácido cisteína (Buchner *et al.*, 2004), a partir del cual se forma otro importante aminoácido, la metionina. Estos dos aminoácidos forman parte estructural y funcional de proteínas y enzimas, los dos aminoácidos son de vital importancia para los organismos vivos, y en el suelo tienen una función importante en la contribución de azufre, ya que juntos aportan del 11 al 31 % del azufre orgánico total del suelo (Till, 2010; Fageria, 2009). Los animales son incapaces de metabolizar el azufre como lo hacen las plantas, es por ello que lo adquieren de la dieta al consumir plantas (Fageria, 2009; Amâncio *et al.*, 2009). La cisteína es precursor de una serie de compuestos azufrados que se encuentran presentes en todos los seres vivos, uno de estos compuestos importantes es el glutatión, que protege a los seres vivos del estrés oxidativo, metales pesados y xenobióticos; el glutatión y el ácido ascórbico junto con las proteínas tioredoxina y glutaredoxina son los principales reguladores del sistema redox, encargándose de mantener el equilibrio ácido-básico en los organismos (De Kok *et al.*, 2005, Amâncio *et al.*, 2009). Existen otros compuestos azufrados como los sulfolípidos y compuestos del metabolismo secundario de las plantas, como la allina que se encuentra presente en las plantas del género *Allium* y los glucosinolatos que son compuestos presentes en la familia *Brassicaceae* (De Kok, *et al.*, 2005). La falta de azufre en las plantas, ocasiona un desequilibrio a nivel fisiológico, que se ve reflejado a

nivel agronómico (Malhi, *et al.*, 2005; Soaud, *et al.*, 2011). La suficiencia de azufre en la planta mantiene la productividad de ésta, al coadyuvar en el uso eficiente de otros nutrientes esenciales como lo son el N, P y K (Amâncio *et al.*, 2009; Messick *et al.*, 2005), también mejora la defensa contra el ataque de patógenos (Kruse *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2002) e incluso es importante para mantener la calidad de los cultivos (Till, 2010; Malhi *et al.*, 2005). Un caso bien estudiado, es la deficiencia de azufre en el trigo, que disminuye la producción y la capacidad de panificación de los granos de éste, lo cual fue demostrado en un estudio realizado en el 2009 en Alemania, en el Instituto de Nutrición de Plantas y Ciencias del Suelo, encontrando que la fertilización del suelo con azufre mejoró la calidad de las proteínas del gluten y la panificación (Zörb *et al.*, 2009).

DEFICIENCIA DE AZUFRE EN SUELOS AGRÍCOLAS

El azufre es un elemento ubicuo y abundante en la tierra, sin embargo, su disponibilidad no es suficiente para satisfacer el crecimiento de las plantas. Las principales fuentes de azufre terrestre son los volcanes y algunas rocas; los reservorios marinos son los sedimentos oceánicos y el agua de mar (Haneklaus *et al.*, 2003). La proporción de azufre que se utiliza en la agricultura es minúscula en relación a la cantidad existente en las fuentes naturales y el generado por la actividad humana (combustibles fósiles y gases industriales). Un aporte importante de azufre a los suelos cultivables, fue la deposición de este elemento a través de las lluvias ácidas, que se generaban por la acumulación de gases azufrados en la atmósfera. La reducción en las emisiones de gases azufrados ha disminuido las lluvias ácidas, creando un desbalance en el ciclo del azufre y en la captación del elemento en el suelo (Figura 1), este déficit, aunado a la continua práctica de la agricultura intensiva, en la cual, son escasas las aplicaciones de materia orgánica, inevitablemente conduce a la deficiencia de azufre en los suelos agrícolas (Messick *et al.*, 2005). Actualmente varios países han reportado la deficiencia de azufre en suelos agrícolas asociándola a la baja producción en diferentes cultivos, tal es el caso del arroz, para el cual se ha detectado la carencia de azufre en suelos de países del continente Asiático: Indonesia, India, Bangladesh y Tailandia, y en el continente Americano en países como Estados Unidos y Brasil (Fageria, 2009). En Alberta, Canadá se detectó la insuficiencia de azufre en alrededor de 3 millones de hectáreas de suelo donde se cultiva canola (Hall, 2001). Jamal *et al.* (2010) reportaron esta deficiencia en cultivos de 22 países de África, Asia y Europa. En Sudamérica, únicamente Brasil y Argentina han indicado deficiencia de este elemento en suelos agrícolas, en este último se detectó el desbalance en cultivos de soya, trigo y maíz (Rodríguez, 2008; Martínez y Cordone, 2000).

En China en 1997 se cuantificó que el 30 % del suelo agrícola de ese país (alrededor de 40 millones de hectáreas) era deficiente en azufre, calculando el déficit en 1,2 millones de toneladas por año, y se proyectó que para el 2013 el requerimiento ascendería a 2,4 millones de toneladas por año.

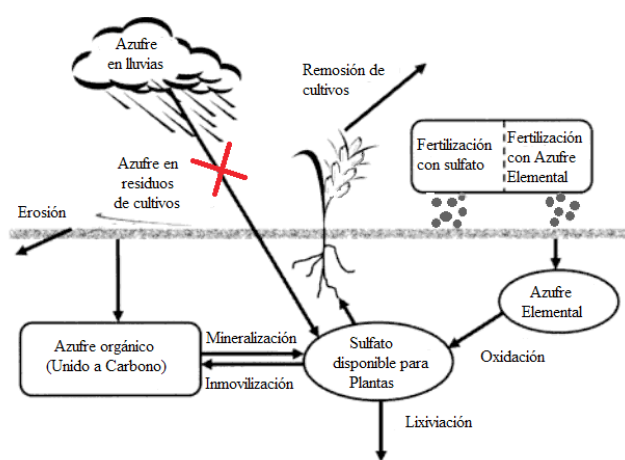


Figura 1. Ciclo del Azufre mostrando fuentes importantes y procesos de transformación del azufre. Fuente: (Schoenau y Malhi, 2008; Messick *et al.*, 2005), modificado con la indicación de la falta de azufre proveniente de las lluvias ácidas.

Figure 1. Sulfur Cycle showing important sources and sulfur transformation processes. Source: (Schoenau and Malhi, 2008, Messick *et al.*, 2005), modified with an indication of the lack of sulfur from acid rain.

Para resolver esta deficiencia se implementó un programa con el Instituto del Azufre, donde en un período de 6 años (de 1997 al 2003) se adicionó azufre a los suelos deficientes, mediante fertilizaciones, con esta acción la producción se incrementó desde 7 hasta 30 % entre los diferentes cultivos que se evaluaron (Fan y Messick, 2005). Los resultados de este programa en China, dieron evidencia sólida de que la fertilización con azufre es muy importante para la sustentabilidad agrícola (Fan y Messick, 2005). Derivado de estos resultados de investigación, se creó un foro de expertos que se reunieron en China en el 2004 con el tema de la nutrición con azufre en las plantas, en ese foro se concluyó que las regiones más deficientes eran Asia y América, calculando que para el 2012 la deficiencia en el mundo sería de alrededor de 11 millones de toneladas por año (Messick *et al.*, 2005) (Figura 2).

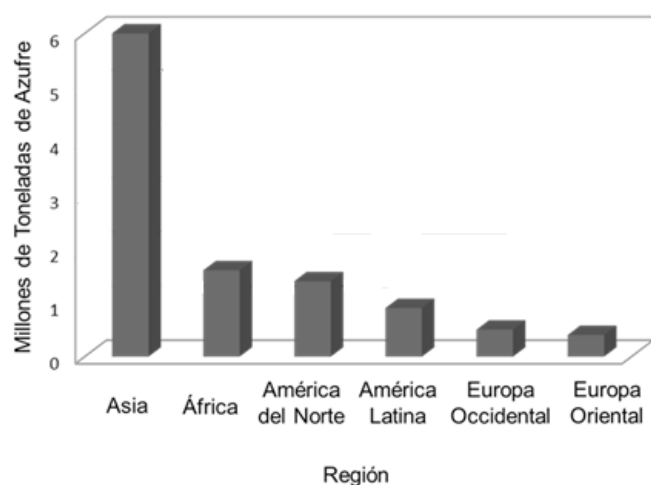


Figura 2. Proyección de la deficiencia de azufre para el año 2012 en varias zonas del mundo (Messick *et al.*, 2005).

Figure 2. Sulfur deficiency projection for 2012 in several areas of the world (Messick *et al.*, 2005).

SITUACION DEL AZUFRE EN LATINOAMERICA

En los países latinoamericanos, son muchos factores los que inciden en la baja producción de alimentos año tras año, entre los que podemos mencionar, el retraso en las tecnologías agropecuarias, bajos apoyos gubernamentales, escasez de asesoramiento científico en diversas técnicas de producción, incluyendo la calidad de los suelos, en donde encontramos la deficiencia de azufre y otros minerales, como lo demostró un estudio realizado por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), apoyado por el Instituto del Azufre. En esta evaluación realizada a suelos cultivados con maíz en diversos países de Centro América, determinaron deficiencia de azufre en 57 sitios de muestreo, la aplicación de 30 kg/ha de azufre, utilizando sulfato de calcio como fuente, incrementó en alrededor de 130 kg/ha el rendimiento de grano, logrando alcanzar rendimientos promedio de 400 kg/ha, después de la fertilización con azufre (Raun y Ascencio, 2013).

Se hizo un análisis comparativo de datos de productividad de seis cultivos seleccionados al azar, en tres regiones del mundo; que fueron colectados en el período comprendido entre el 2000 y el 2010 por el Statistical databases of Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT, 2012). Para este análisis se seleccionó a China como país que implementó un programa de fertilización con azufre, América Central y América del Sur, como regiones que nos interesa conocer su nivel de productividad agrícola (Figura 3). En esta figura se puede observar la tendencia hacia el incremento en productividad en China para los seis cultivos seleccionados, mientras que en América Central, la producción en algunos de los cultivos se observa errática, sin marcadas pérdidas, aunque comparando cuantitativamente la productividad de esta zona del mundo con China la producción es menor. En América del Sur podemos observar que se han mantenido los valores de producción más o menos constantes en los cultivos señalados en la última década. Es importante señalar que, en esta región, Brasil y Argentina, han suplementado sus suelos con azufre y sus territorios sumados forman el 65 % de la zona de Sudamericana. En Argentina, en la década comprendida entre el 2000 al 2010 se triplicó el consumo de azufre como fertilizante, observándose incrementos en la productividad de los principales cultivos (Torres Duggan *et al.*, 2012). En cambio, en Chile, Bolivia, Paraguay y Uruguay no se ha generalizado la práctica de fertilización con azufre (Blair *et al.*, 1980; Martínez y Cordone, 2000, Torres Duggan *et al.*, 2012), pudiendo ser esta la razón por la que el promedio en la productividad de esta zona del mundo se mantuvo sin cambios.

Situación en México

A pesar de que existe una proyección realizada por el Instituto del Azufre, donde se determinó que para el 2015 la deficiencia de azufre en el suelo de la región norte del continente americano, sería de 1 millón de toneladas totales. En México no se ha abordado el tema (Randazzo, 2009), al momento de esta revisión sólo se encontró un documento donde hace referencia al problema de deficiencia de azufre en México (Lazcano-Ferrat, 2013). En este documento se estima que en México tres tipos de suelos pueden presentar problemas de fijación de azufre con desbalances en N, P y otros cationes como Mg y Ca, estos son: andisoles, los muy arenosos como entisoles e inceptisoles y los ultisoles, encontrados en los estados de Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Quintana Roo. En la región de Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Sonora, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas, los suelos son calcáreos que son propios de las zonas áridas y semiáridas, en los cuales la falta de humedad impide el lavado de sustancias solubles como sales y carbonatos, especialmente de calcio que se acumula a lo largo de su perfil y forman una capa impermeable e incrementan el pH del suelo (SEMARNAT, 2007). Particularmente en Sonora, y específicamente en la región del Valle del Yaqui y Valle del Mayo, el pH del suelo en promedio es alcalino (8.2), el contenido de materia orgánica

es pobre (1 %) (SAGARPA, 2012), existiendo condiciones muy similares a las de los suelos de los Emiratos Árabes Unidos, donde se detectó deficiencia de azufre, aunado a la deficiencia de otros nutrimentos (Soaud *et al.*, 2011). Estos autores concluyeron que suelos calcáreos, pobres en materia orgánica y alcalinos, presentan poca disponibilidad de nutrientes, entre ellos el azufre, y que las aplicaciones de azufre incrementaron la disponibilidad de los nutrientes al corregir el pH. Lazcano-Ferrat (2013) director del Instituto Mexicano de los Fertilizantes, puntualiza que en México son muy pocos los estudios que se han realizado sobre la disponibilidad de azufre en los suelos de cultivo y que es necesario hacer un esfuerzo a nivel multiempresarial y gubernamental para la actualización del estatus del azufre en los suelos de México.

DISPONIBILIDAD DE AZUFRE EN EL SUELO

La biodisponibilidad del azufre en el suelo va a depender de diferentes procesos químicos, físicos y biológicos (Figura 1), aparte de estos procesos hay factores muy importantes, como el pH y el tipo de suelo, para que se lleven a cabo las transformaciones de formas de azufre no disponibles para las plantas, a sulfato, que es el ión que pueden absorber las plantas. La mineralización es la conversión de azufre proveniente de la materia orgánica residual de los cultivos y de la crianza de ganado, a sulfato disponible para las plantas por acción de la microbiota del suelo; mientras que la inmovilización es el proceso contrario, donde la microbiota transforma el azufre disponible en azufre orgánico no disponible. El proceso de inmovilización también puede darse cuando el suelo es ácido, el cual promueve que el sulfato sea inmovilizado por óxidos de hierro y aluminio, así como también puede unirse a sitios cargados positivamente como las arcillas (Schoenau y Malhi, 2008). Otro proceso muy importante para hacer disponible el azufre en el suelo, es la oxidación, donde el azufre elemental y los sulfuros son transformados a sulfato por la acción de diferentes microorganismos presentes en el suelo como: *Thiobacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Bacillus* y algunos hongos. Otro proceso importante para la disponibilidad del azufre en los cultivos es la adsorción en suelos ácidos con una alta percolación de agua, como los suelos arenosos. La adsorción del sulfato es un mecanismo importante que ayuda a mantener este ión en el perfil del suelo y reducir las pérdidas por lixiviación. El sulfato que está en las superficies de los coloides, entra en un equilibrio químico rápido con el sulfato en solución y puede ser repuesto cuando es agotado por el consumo de las plantas. Una porción significativa del sulfato adsorbido, puede ser considerado como disponible para las plantas. En suelos tropicales la principal reserva de azufre es el que se adsorbe a la materia orgánica (Blair *et al.*, 1980), ya que por las intensas lluvias se presenta el proceso de lixiviación y una manera de contrarrestar este proceso es la adsorción. En suelos con pH alto o neutro donde el sulfato está presente principalmente en solución, puede ser tan móvil como el nitrato, con pérdidas de azufre disponible por una profunda lixiviación por debajo de la zona de las raíces, para evitar esto, se debe establecer una amplia gama de

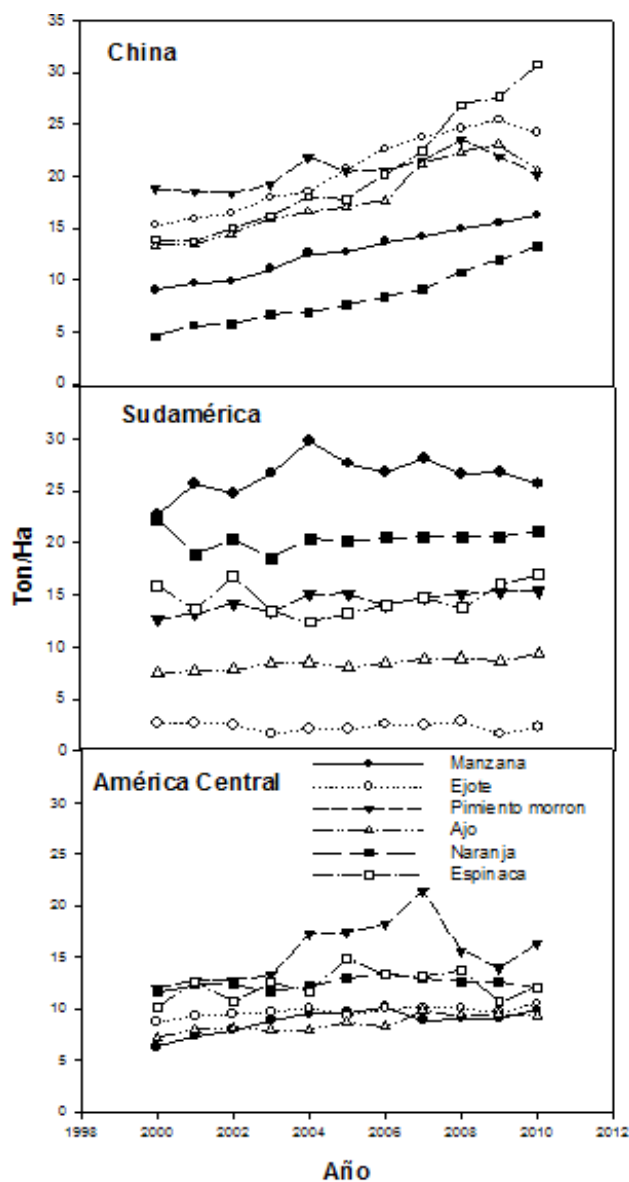


Figura 3. Comparación de la producción de varios cultivos en China, América Central y América del Sur en la última década (FAOSTAT, 2012).

Figure 3. Comparison of production of various crops in China, Central and South America in the last decade (FAOSTAT, 2012).

posibilidades de formas y momentos de aplicación dentro de un programa de fertilización (Schoenau y Malhi, 2008, Torres *et al.*, 2010).

FERTILIZACIÓN CON AZUFRE

Tipos de Fertilizantes Azufrados

En el 2005 los fertilizantes azufrados que existían eran el sulfato de amonio y el súper fosfato simple, los dos productos contienen sulfatos que la planta los puede absorber en el momento en el que son aplicados; sin embargo, se pueden presentar pérdidas por lixiviación, quedando etapas

en el crecimiento de los cultivos que ya no reciben un aporte adecuado de este nutriente (Messick *et al.*, 2005). Con el paso del tiempo se han ido generando conocimientos de los requerimientos de azufre para cada relación suelo-cultivo, planteando la necesidad de contar con un amplio espectro de productos que suplan las necesidades para cada tipo de cultivo y para cada tipo de suelo (Tysko y Rodríguez, 2006). En determinados suelos, como los tropicales, donde hay intensas lluvias, el azufre puede perderse por procesos de lixiviación (Lazcano-Ferrat, 2013) y la planta ya no recibe la cantidad que requiere su metabolismo. Los fertilizantes de liberación controlada resultan más eficientes, debido a que se reducen las pérdidas por lixiviación (Till, 2010), un ejemplo de este tipo de fertilizante es el sulfato de calcio. Los fertilizantes a base de azufre elemental y las formas orgánicas de azufre tienen que ser convertidos a sulfato, es aquí donde la microbiota asociada a la planta juega un papel muy importante para llevar a cabo procesos de mineralización y oxidación (Lawrence y Germida, 1991). El azufre elemental es una partícula insoluble e hidrofóbica que es dependiente de la colonización microbiana de la superficie de cada partícula para que se lleve a cabo la oxidación, es por ello que es muy importante el tamaño de la partícula de azufre elemental para que se lleve a cabo una oxidación eficiente (Schoenau y Malhi, 2008). La oxidación del azufre elemental es lenta en suelos fríos y secos, como el que se presenta en el oeste de Canadá, donde existen muchos reportes de suministros inadecuados de sulfato cuando la fertilización se hace con azufre elemental en sistemas de cultivo anuales (Janzen y Bettany, 1987). Un ejemplo de estos trabajos, es el estudio realizado en tres campos experimentales en el norte de Saskatchewan, Canadá, donde se observó que hubo poca producción de semillas de canola (35 Kg/ha), después de la fertilización con azufre elemental granulado (ES-90 o ES-95), comparado con la producción obtenida con la fertilización con sulfato, en la cual se obtuvieron 1135 kg/ha. En el cultivo control (sin aplicación de azufre), la producción fue de 29 kg/ha (Malhi *et al.*, 2005). En contraste a esto, otro estudio reportó que la producción de semillas de canola, incrementó considerablemente cuando se fertilizó con azufre elemental diseminado e incorporado en el suelo, como polvo finamente molido o como suspensión. La producción de semillas de canola, donde las plantas fueron fertilizadas con la suspensión de azufre elemental o azufre micronizado, fue comparable a la obtenida al fertilizar con sulfato. Con estos trabajos quedó demostrado que cuando el azufre elemental es dispersado en partículas micronizadas se incrementa de 8 a 16 veces la oxidación, comparado con la oxidación de los gránulos intactos (Tysko y Rodríguez, 2006). La manipulación del tamaño de partícula del azufre elemental es la herramienta más poderosa para incrementar la velocidad de oxidación, consecuentemente éste es un factor al que se debe poner mayor atención. Se ha sugerido que para cultivos anuales se debe usar un tamaño de partícula menor a 150 µm, y que combinaciones de azufre elemental con un tamaño de partícula de 82 µm, más lodos de aguas residuales

y cal hidratada, se incrementa la velocidad de oxidación de azufre elemental a sulfato, comparado con aplicaciones de azufre elemental sin algún otro estimulante de la oxidación (Schoenau y Malhi, 2008). En Argentina se han desarrollado fertilizantes azufrados en combinación con otros nutrientes en diferentes presentaciones, diferente grado de solubilidad y cantidad de azufre. Las fuentes de azufre más solubles, son el sulfato de amonio y tiosulfato de amonio, con 24 y 26 % de azufre, respectivamente. Otra fuente utilizada es el yeso agrícola, con 18 % de azufre (Tysko y Rodríguez, 2006). Recientemente, apareció en el mercado argentino una alternativa al azufre elemental, denominada azufre elemental micronizado pretratado (SEP), con un tamaño de partícula de 43 µm. Los estudios preliminares indicaron que este producto genera una mayor velocidad de liberación de azufre al suelo, en comparación con el azufre elemental convencional, se observó que el 70 % de las partículas estuvieron disponibles como sulfato antes de llegar al primer mes después de la aplicación (Tysko y Rodríguez, 2006).

Recomendaciones para Fertilizar con Azufre

El Instituto del Azufre, en su documento: "Azufre: ¿Está considerando este nutriente en el régimen de fertilización de su zona?", hace la indicación de que las deficiencias pueden presentarse en cualquier tipo de suelo que está sometido a manejo intensivo. En campos de cultivos donde los residuos son quemados anualmente, pueden mostrar deficiencias notorias de azufre, debido a que esta práctica puede volatilizar hasta el 75 % del elemento. El instituto del Azufre hace la recomendación de estimar la cantidad de azufre que se debe de aplicar a los suelos cultivables en base a la producción de años anteriores, dando el siguiente ejemplo: "un agricultor produce cereales y su rendimiento es de 4000 kg/ha de materia seca (paja+grano) por año, al multiplicar este valor por 0.005, obtendremos que 20 kg de azufre son removidos por esa cosecha. Este número proporciona al agricultor una idea de cuánto fertilizante aplicar. Sin embargo, si el suelo se encuentra en un área de alta precipitación y la zona es baja en su contenido de materia orgánica, las cantidades de azufre necesarias para fertilizar pueden ser mayores". También va a depender del tipo de cultivo, hay cultivos que demandan más azufre que otros, tal es el caso de las leguminosas, que demandan mucho azufre debido a que lo concentran en el grano. La fertilización con azufre debe hacerse en un periodo de pocas semanas, antes o después de la siembra para evitar pérdidas potenciales de lavado de sulfato si es que se está empleando esta forma de azufre (Raun y Ascencio, 2013). Como se mencionó anteriormente en México existen varios estados con suelos calcáreos que presentan pH alcalino y baja materia orgánica, sería recomendable empezar aplicando azufre elemental micronizado, ya que este producto ayuda a reducir el pH del suelo, que a su vez ayuda a mejorar la disponibilidad de otros micronutrientes. En los estados del país donde predominen suelos ácidos, no se recomienda el uso de azufre elemental o sulfato de amonio, ya que estos dos productos acidifican más el suelo. Para los suelos ácidos,

el Instituto del Azufre recomienda usar sulfato de calcio, ya que libera sulfato de forma lenta durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo y no baja el pH del suelo, otro producto que no altera el pH es el sulfato de potasio, se podría usar este producto en suelos donde exista deficiencia de estos dos iones, mientras que el superfosfato simple se puede emplear en suelos deficientes de azufre y fósforo (Raun y Ascencio, 2013). Existe un programa llamado Mejores Prácticas de Manejo (MPM) de nutrientes y fertilizantes, el cual es una herramienta muy útil para definir el manejo sustentable de fertilizantes. Los componentes de las MPM son: dosis, fuente, momento y formas correctas de aplicación, las cuales se basan en principios científicos, provenientes de la investigación local. El marco de las MPM implica que el productor puede definir distintas combinaciones de dosis, fertilizantes, formas y momentos de aplicación para maximizar su rendimiento y minimizar el impacto ambiental de la fertilización. Estas posibles combinaciones variarán de acuerdo con diferencias en las características edáficas, clima, rotaciones y sistemas de labranza, entre otros factores (Torres *et al.*, 2010).

IMPACTO DEL USO ADECUADO DEL AZUFRE EN LOS CULTIVOS

Algunos de los aspectos agronómicos que se mejoran con el uso del azufre como fertilizante son: un incremento en la concentración de proteína, aminoácidos y vitaminas en forrajes, lo cual impacta de forma positiva en la alimentación de los animales destinados a consumo humano (Till, 2010; Malhi *et al.*, 2000). En un estudio realizado en Irán con trigo de tres variedades harineras, encontraron que al fertilizar con azufre se incrementaba la producción de granos, la concentración de proteínas y la calidad panificadora (Shahsavani y Gholami, 2008). En oleaginosas la fertilización con azufre estimula el crecimiento y se mejora la productividad. Evaluaciones en hortalizas, han demostrado que al balancear el azufre con el nitrógeno (Anjum *et al.*, 2012), se tiene mayor calidad y uniformidad de hortalizas, incremento en la resistencia al frío, incremento en la tolerancia a la sequía y a las sales (Nazar *et al.*, 2011), mejor control de patógenos del suelo (Williams *et al.*, 2002), aumento en la tasa de descomposición de los residuos vegetales y abono verde. El adecuado uso del azufre, conlleva a una mejor calidad y cantidad de alimentos, lo cual ayudaría a contrarrestar la inseguridad alimentaria que se prevé para años futuros, derivado de las pérdidas de alimentos por el cambio climático, la explosión demográfica y la escasez de agua (Godfray *et al.*, 2010). Una de las conclusiones que contiene el último informe sobre Perspectivas Agrícolas 2012-2021 de la OECD-FAO, es que la producción agrícola mundial deberá aumentar un 60 % en las próximas cuatro décadas, para poder satisfacer la cada vez mayor demanda alimenticia, un incremento productivo será clave para contener los precios de los alimentos y reducir la inseguridad alimentaria en el planeta (OECD-FAO, 2012). Por todo lo anterior planteado es importante determinar el contenido de azufre de los suelos cultivables y en el caso de haber deficiencia de este elemento, se tomen las acciones

de fertilización necesarias para avanzar hacia la producción suficiente de alimentos.

CONCLUSIÓN

La deficiencia de azufre en suelos cultivables no permite mantener una productividad agrícola sostenible, son pocos los países que han dedicado esfuerzos al análisis y evaluación de las concentraciones de este elemento en los suelos agrícolas, para que, en relación con el clima y las precipitaciones, desarrollen un programa de fertilización adecuado a sus requerimientos. Es importante que la deficiencia de azufre en suelos agrícolas se maneje de una forma global, donde intervengan productores, gobierno e instituciones de investigación científica.

REFERENCIAS

- Amâncio, S., Tavares, S., Fernández, J. y Sousa, C. 2009. Grapevine & Sulfur: Old Partners, New Achievements. Capítulo 02. En: Grapevine Molecular Physiology & Biotechnology. A. R. Kalliopei (ed). Segunda edición. Springer. Greece. pp: 31-52.
- Anjum, N. A., Gill, S., Umar, S., Ahmad, I., Duarte, A. y Pereira, E. 2012. Improving growth and productivity of oleiferous Brassicas under changing environment: Significance of nitrogen and Sulphur nutrition, and underlying mechanisms. The Scientific World Journal. Vol. 2012, Artículo ID 657808, 12 páginas. DOI:10.1100/2012/657808.
- Blair, G.J., Mamaril, C.P. e Ismunadji, M. 1980. Sulfur deficiency in soils in the tropic as a constraints to food production. En: Priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics. International rice research institute y New York State College of Agriculture and life Science, Cornell University. Manila, Filipinas.
- Buchner P., Stuiiver, E., Westerman, S., Wirtz, M., Hell, R., Hawskerford, M. y De Kok, L. 2004. Regulation of sulfate uptake and expression of sulfate transporter genes in *Brassica oleracea* as affected by atmospheric H₂S and pedospheric sulfate nutrition. Plant Physiology. 136: 3396-3408.
- De Kok, L., Castro, A., Durenkamp, M., Koralewska, A., Posthumus, F., Stuiiver, E., Yang, L. Stuten, I. 2005. Pathways of plant sulfur uptake and metabolism. An overview. Número especial. 283. En: Proceedings of the First Sino-German workshop on aspect of sulfur nutrition of plants. L. De Kok y E. Schnug (eds). 23-27 May, Shenyang, China. pp: 5-13.
- De Kok, L. y Tausz, M. 2002. The role of glutathione in plant reaction and adaptation to air pollutants. Capítulo 8. En: Significance of glutathione to plant adaptation to the environment. L. De Kok e I. Stulen (eds). Serie: Plant Ecophysiology. Vol. 2, pp. 185-205. Springer. DOI: 10. 1007/0-306-47644-4-8.
- Fageria, N. K. 2009. Sulfur. Capítulo 7. En: The use of nutrient in crop plants. CRC press. Taylor & Francis Group. Boca Raton Florida, EUA.
- Fan, M. X. y Messick, D. 2005. Advances in sulfur fertilizer requirement and research for chinese agriculture: Summary of field trial data from TSI's china project from 1997-2003. Número especial. 283. En: Proceedings of the first Sino-German workshop on aspect of sulfur nutrition of plants. L. De Kok y E. Schnug (eds). 23-27 May Shenyang, China.
- FAOSTAT. (2012). Statistical databases of Food and Agriculture Organization of the United Nations <http://faostat.fao.org/>

- Godfray, H. C., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M. y Toulmin, C. 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. Review. Science. Vol. 327. No. 5967. pp. 812-818. DOI: 10.1126/science.1185383
- Hall, M. R. 2001. Sulfur fertilizer application in crop production. Alberta Agriculture, Food and rural development. Government of Alberta, Canada. [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex3526](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex3526)
- Haneklaus, S., Bloem, E. y Schnug, E. 2003. The global sulphur cycle and its link to plant environment. En: Sulphur in plants. Y. Abrol, y A. Ahmad (eds). Kluwer Academic Publishers. Los Países Bajos. pp.1.
- Jamal, A., Moon, Y. y Abdin, M. 2010. Sulphur- a general overview and interaction with nitrogen. Australian Journal of Crop Science. 4(7):523-529.
- Janzen, H. H. y Bettany, J. R. 1987. Oxidation of elemental Sulfur under field conditions in central Saskatchewan. Canadian Journal of Soil Science. 67:609-618.
- Kruse, C., Jost, R., Hillebrand, H. y Hell, R. 2005. Sulfur rich proteins and their agrobiotechnological potential for resistance to plant pathogens. Número especial. 283. En: Proceedings of the first Sino-German workshop on aspect of sulfur nutrition of plants. L. De Kok y E. Schnug (eds). 23-27 Mayo 2004, Shenyang, China.
- Lawrence, J. R., y Germida, J. J. 1991. Enumeration of sulfur oxidizing populations in Saskatchewan agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science. 71:127-136.
- Lazcano-Ferrat, I. 2013. El papel del azufre y el potasio en la producción de hortalizas de alta calidad en México. Documento publicado por: El Instituto Internacional de Nutrición de Plantas. [http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/\\$webindex/CE4605B3701F2B5506256AE80063C02C/\\$file/El+Papel.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/$webindex/CE4605B3701F2B5506256AE80063C02C/$file/El+Papel.pdf) Revisado el: 15 de Agosto del 2013.
- Malhi, S.S., Heier, K. y Solberg, E. 2000. Effectiveness of elemental S fertilizers on forage grass. Canadian Journal of Soil Science. 80:105-112.
- Malhi, S. S., Schoenau, J. J. y Grant, C. A. 2005. A review of sulphur fertilizer management for optimum yield and quality of canola in the Canadian Great Plains. Canadian Journal of Plant Science. 85. 297-307.
- Martínez, F, Cordone, G. 2000. Avances en el manejo del azufre. Novedades en respuesta y diagnostico en trigo, soja y maíz. Jornada de actualización técnica para profesionales. "Fertilidad 2000", UEEA INTA Casilda, Santa Fe. Potash & Phosphate Institute (PPI), Rosario. Argentina. [http://www.ipni.net/ppiweb/Itams.nsf/\\$webindex/95D6A04A242910210325700D0055ED92](http://www.ipni.net/ppiweb/Itams.nsf/$webindex/95D6A04A242910210325700D0055ED92)
- Messick, D. L., Fan, M. X. y Brey, C. 2005. Global sulfur requirement and sulfur fertilizer. Número especial. 283. En: Proceedings of the first Sino-German workshop on aspect of sulfur nutrition of plants. L. De Kok y E. Schnug (eds). 23-27 Mayo 2004, Shenyang, China. pp. 97-104.
- Nazar, R., Iqbal, N., Masood, A., Syeed, S. y Khan, N. A. 2011. Understanding the significance of sulfur in improving salinity tolerance in plants. Review. Environmental and Experimental Botany. Vol. 70(2):80-87.
- OECD-FAO. 2012. OECD-FAO Agricultural Outlook 2012-2021. OECD Publishing and FAO, http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2012-en ISBN: 978-92-64-17307
- Randazzo, C. A. 2009. Sulfur-Essential to the fertilizer industry as a raw material, plant nutrient and soil amendment. The Sulfur Institute. En: 15th AFA International Annual Fertilizer Forum and Exhibition. Cairo, Egipto, del 10-12 de Febrero del 2009.
- Raun, W.R. y Ascencio, E.N. 2013. Azufre: Esta considerado éste nutriente en el régimen de fertilización de su zona? Por: Instituto del Azufre. <http://www.sulphurinstitute.org/pub/A03C8F23-A00F-8226-6BF9-C8C92C6AE0B> Revisado el: 15 de Agosto del 2013.
- Rodríguez, M. B. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. En: La fertilización de cultivos y pasturas. R. Melgar y M. Díaz (ed). Segunda Edición. Buenos Aires: Hemisferio sur. P. 588. ISBN: 978-950-504-597-6.
- SAGARPA, 2012. http://www.gob.mx/agronegocios/Documents/potencialproductivo_especificos/recomendaciones-generales.pdf Revisado el: 15/Agosto/2013
- Schoenau, J. J. y Malhi, S. S. 2008. Sulfur forms and cycling processes in soil and their relationship to sulfur fertility. En: Sulfur: A missing link between Soils, crops and nutrition. J. Jez (ed). Agronomy Monograph No. 50. ISBN978-0-89118-168-2. pp. 1-10. ASA, CSSA, SSA. Madison, WI. E.U.A.
- SEMARNAT. 2007. http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/cap_3_suelos.pdf Revisado el: 14/Agosto del 2013.
- Shahsavani S y Gholami, A. 2008. Effect of sulphur fertilization on breadmaking quality of three winter wheat varieties. Pakistan Journal of Biological Science. 11:2134-8.
- Soaud, A.A.; Al Darwish, F.H.; Saleh, M.E.; El-Tarabily, K.A.; Arizum, M.S. y Rahman, M.M. 2011. Effects of elemental sulfur, phosphorous micronutrients and *Paraccocus versutus* on nutrient availability of calcareous soils. Australian Journal of Crop Science. 5(5):554-561.
- Till, A. R. 2010. Sulphur and sustainable agriculture. Intenational Fertilizer Industry Association. Primera edición. Paris, Francia. ISBN: 978-2-9523139-6-4.
- Torres, D. M., Rodríguez, M. B., Lavado, R. S. y Melgar, R. 2010. Tecnología de la fertilización azufrada en la región pampeana estado actual y tendencias. En: Informaciones agronómicas. No. 48. pp. 19-26. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/69315916995163B385257984005754F3/\\$FILE/19.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/69315916995163B385257984005754F3/$FILE/19.pdf)
- Torres Duggan, M.; Melgar, R.; Rodríguez, M.B.; Lavado, R.S. y Ciampitti, I.A. 2012. Sulfur fertilization technology in the Argentine Pampas region: A review. Rev. Agronomía & Ambiente. 32(1-2): 61-73, Buenos Aires, Argentina.
- Tysko, M. B. y Rodríguez, M. B. 2006. Respuesta de trigo-soja en doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. Ciencia del Suelo. 24(2):139-146.
- Williams, J. S., Hall, S. A., Hawkesford, M. J., Beale, M. H. y Cooper, R. M. 2002. Elemental Sulfur and Thiol Accumulation in Tomato and Defense against a Fungal Vascular Pathogen. Plant Physiology. 128:150-159.
- Zörb, C., Steinfurth, D., Seling, S., Langenkämper, G., Koehler, P., Wieser, H., Lindhauer, M. y Mühling, K.H. 2009. Quantitative protein composition and baking quality of winter wheat as affected by late sulfur fertilization. Journal of Agriculture and Food Chemistry. 57:3877-3885.