



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**AZUFRE, NITRATOS, NUTRICIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS Y FERTILIDAD
DE UN SUELO SALINO-SÓDICO**

SERGIO LÒPEZ BLANCAS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2009

La presente tesis, titulada: **AZUFRE, NITRATOS, NUTRICIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS Y FERTILIDAD DE UN SUELO SALINO-SÓDICO**, realizada por el alumno: **Sergio López Blancas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: _____
Dr. Francisco Gavi Reyes

ASESOR: _____
Dr. Arturo Galvis Spinola

ASESOR: _____
Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza

Montecillo, Texcoco, México, octubre de 2009

AZUFRE, NITRATOS, NUTRICIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS Y FERTILIDAD DE UN SUELO SALINO-SÓDICO

Sergio López Blancas, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2009

En la recuperación de suelos salino-sódicos con aplicación de S y establecimiento de cultivos tolerantes, los nitratos pueden lixiviarse en el perfil del suelo o acumularse en el tejido vegetal. Esto podría reducirse mediante la promoción de la oxidación del S aplicado, ya que con ello se favorece la desnitrificación y la absorción de sulfatos por los cultivos, limitando la acumulación de nitratos en el suelo y en las plantas, respectivamente. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto del S en: la lixiviación de nitratos en el perfil del suelo, la concentración de S, nitratos y micronutrientes del tejido vegetal, la fertilidad del suelo y el rendimiento de especies forrajeras en un suelo salino-sódico. Se establecieron parcelas con alfalfa, avena, maíz y pasto con y sin S (2 t ha^{-1}) incorporado en los primeros 20 cm del suelo. El monitoreo de nitratos y sulfatos del suelo (a 30 y 60 cm de profundidad), así como de los nitratos y S en planta se hizo cada diez días. Las concentraciones de Fe, Mn, Cu y Zn en tejido vegetal se determinaron a la cosecha. La fertilidad del suelo (pH, CE, MO, Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn) se determinó al establecimiento y cosecha de los cultivos. El S aumentó la concentración de nitratos en la solución del suelo en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), de acuerdo a los siguientes intervalos: 51-96 a 102-176 mg L^{-1} , independientemente de la profundidad. Éste mismo efecto, independientemente del cultivo, sólo se observó a 30 cm de profundidad. Asimismo aumentó la concentración de sulfatos en la solución del suelo en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha = 0.06$), de acuerdo a los siguientes intervalos: de 2583-3842 a 3242-4826 mg L^{-1} , independientemente de la profundidad. El S disminuyó la concentración de nitratos en el tejido vegetal en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), excepto en alfalfa, de acuerdo a los siguientes intervalos: de 2927-4762 a 2249-3550 mg kg^{-1} . En contraste la aplicación de azufre al suelo aumentó la concentración de S en el tejido vegetal en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), de acuerdo a los siguientes intervalos: 0.19-0.41 a 0.24-0.50 %. El S afectó únicamente la concentración de Cu en el tejido vegetal, significando una disminución en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), excepto en avena, de acuerdo a los siguientes intervalos: 3.72-6.76 a 2.17-3.78 mg kg^{-1} . La aplicación de S al suelo no afectó la fertilidad del suelo, pero si incrementó el rendimiento de materia seca de las especies forrajeras.

Palabras clave: *Lixiviación, sulfatos y recuperación de suelos.*

SULFUR, NITRATES, NUTRITION OF CULTIVATED GRASSES AND FERTILIZATION OF A SODIUM RICH GROUND

Sergio López Blancas, M.C.
College of Postgraduados, 2009

During the improvement of saline-sodic soils through the application of S (Sulfur) and cropping with tolerant crops, nitrates can either leach within the soil profile or accumulate in plant tissue. The leaching problem could be reduced by promoting the oxidation of S applied into the soil. The process of oxidation favors denitrification and S absorption by crops, and prevents the accumulation of nitrates in soils and plants. The objective of this research was to determine the effect of S on: a) the leaching of nitrates within the soil profile, b) the concentration of S, nitrates and micronutrients in plant tissue, and c) the soil fertility and the yield of feed crops in a saline-sodic soil. Plots of alfalfa, oat, corn and grass with and without S (2 t ha^{-1}) were established. The S was mixed into the first 20 cm of the soil surface. Nitrate and sulfur concentration in soil was monitored every ten days at 30 and 60 cm depth. The concentration in plant of Fe, Mn, Cu, and Zn was determined at harvest. Soil fertility (pH, CE, MO, Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn) was analyzed at the beginning of the seeding and harvesting times of feed crops. The application of sulfur increased the concentration of nitrates in soil solution at different levels depending on the type of feed crop ($\alpha < 0.05$) according to the following concentration intervals 51-96 to 102-176 mg L^{-1} regardless soil depth. The same effect occurred, regardless the feed crop, only at 30 cm depth. Sulfur application also increased sulfate concentration in soil solution and varied according to the feed crop ($\alpha = 0.06$) with the following intervals 2583-3842 to 3242-4826 mg L^{-1} regardless soil depth. Application of sulfur decreased plant nitrate concentration at different levels depending on the feed crop ($\alpha < 0.05$), except in alfalfa, according to the intervals 2927-4762 to 2249-3550 mg kg^{-1} . The application of sulfur increased itself in plant and its concentration depended on the feed crop ($\alpha < 0.05$) showing the following intervals 0.19-0.41 to 0.24-0.50 %. Sulfur application decreased only the concentration of Cu in plant depending on the feed crop ($\alpha < 0.05$), except in oat, its concentration was within 3.72-6.76 to 2.17-3.78 mg kg^{-1} . No changes in soil fertility were detected through the application of S to soil, but S increased dry matter yield in all feed crops.

Keywords: *Leaching, sulfates and soil recovery.*

Agradecimientos

Manifiesto mi gratitud al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico y al Colegio de Postgraduados por facilitarme sus instalaciones y recursos humanos.

A mi esposa María Berenice Hernández Sandoval a quien le agradezco su compañía y comprensión que me ha brindado durante la estancia en el Colegio de Postgrados y por haberme hecho padre de Queren Regina López Hernández.

A mis padres, Sr. Gabriel López Montes y Sra. María Elena Blancas Enríquez, por ser un ejemplo a seguir y por brindarme su motivación y apoyo incondicional en mi formación profesional. A mis hermanos Rosa Margarita, María Gerónima, Gabriel, Horacio y José Ramón, con los que he compartido de los buenos y malos momentos de la vida.

Expreso mi más sincera gratitud al Dr. Francisco Gavi Reyes por comprenderme y apoyarme en los momentos difíciles que se me presentaron en la culminación de esta tesis y por brindarme sugerencias y comentarios acertados que hicieron de este documento un mejor escrito.

A la Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza, por su apoyo incondicional y por el tiempo dedicado para la mejora de esta tesis.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola por apoyarme incondicionalmente en la revisión de este documento y por sus comentarios que hicieron que esta tesis tuviera una mejor redacción.

Al Dr. Humberto Vaquera Huerta por brindarme amablemente su apoyo en el análisis estadístico de los datos.

Me es grato reconocer el apoyo del Dr. Rubén Bugarin Montoya por haberme ayudarme desinteresadamente en el ingreso al Colegio de Postgraduados. También al Ing. Juan Martin Manrique Vallejo por permitirme laborar en su despacho de forma parcial hasta la culminación de esta tesis.

Contar con apoyos de infraestructura, económicos e intelectuales es muy importante para llegar a concluir de manera satisfactoria nuestros objetivos de vida, pero también es importante contar con apoyo emocional de amigos y compañeros que de manera directa e indirecta participan en la formación profesional. Por ello a todos les agradezco su tiempo y comentarios que me fueron de gran ayuda.

CONTENIDO

	Página
Lista de figuras.....	x
Lista de cuadros.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Efecto del azufre en la recuperación de suelos salino-sódicos.....	3
2.2. Efecto del azufre sobre la fertilidad del suelo macro y micro nutrimentos.....	4
2.3. Dinámica del azufre en el suelo.....	5
2.4. Desnitrificación y lixiviación de nitratos en suelos salino-sódicos.....	6
2.5. Absorción de nitratos y sulfatos en las plantas.....	8
2.6. Efecto del azufre en el rendimiento y calidad del forraje.....	8
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	11
Objetivos:.....	11
Hipótesis:.....	11
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
4.1. Ubicación y descripción del sitio experimental	13
4.2. Tratamientos.....	14
4.3. Diseño experimental y tamaño de unidad experimental.....	14
4.4. Preparación del terreno.....	15
4.5. Incorporación de azufre y fertilizante.....	15
4.5.1 Siembra.....	15
4.6. Instalación y extracción de solución del suelo con las sondas de succión.....	16
4.7. Muestreo de plantas.....	16
4.8. Muestreo de suelo.....	17
4.9. Análisis estadístico.....	19

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
5.1. Efecto del azufre en la lixiviación de nitratos y sulfatos en el perfil del suelo.....	20
5.1.1. Efecto del cultivo en la lixiviación de nitratos en el suelo.....	20
5.1.2. Contenido de nitratos en la solución del suelo por efecto del azufre.....	21
5.1.3. Efecto del azufre en la distribución de nitratos a diferentes profundidades...	22
5.1.4. Efecto del cultivo en la lixiviación de sulfatos en el suelo.....	23
5.1.5. Contenido de sulfatos en la solución del suelo por efecto del azufre.....	24
5.2. Nitratos, azufre y micronutrientos en plantas forrajeras.....	25
5.2.1. Concentración de nitratos en el tejido de los cultivos por efecto del azufre...	25
5.2.2. Concentración de nitratos en el tejido vegetal a través del tiempo.....	26
5.2.3. Porcentaje de azufre en el tejido de los cultivos por efecto del azufre.....	27
5.2.4. Porcentaje de azufre en el tejido vegetal a través del tiempo.....	28
5.2.5. Contenido de micronutrientos en el tejido de los cultivos.....	29
5.3. Efecto del azufre en la fertilidad de un suelo salino-sódico y en el rendimiento de especies forrajeras.....	31
5.3.1. pH, C.E., M.O. y C.I.C. en el suelo.....	31
5.3.2. Contenido de nitratos de los muestreos al inicio y final del experimento.....	32
5.3.3. Contenido de cationes en el suelo.....	32
5.3.4. Contenido de micronutrientos en el suelo.....	33
5.3.5. Rendimiento de materia seca.....	34
VI. CONCLUSIONES	36
VII. LITERATURA CITADA	38
ANEXOS	44

Lista de figuras

	Página
Figura 1. Concentración de NO_3^- en la solución del suelo en los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, a las profundidades de 30 y 60 cm.....	19
Figura 2. Concentración de NO_3^- en la solución del suelo en los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental.....	20
Figura 3. Concentración de NO_3^- en la solución del suelo a las profundidades de 30 y 60 cm, en las unidades experimentales establecidas con y sin azufre elemental.....	21
Figura 4. Concentración de SO_4^{2-} en la solución del suelo de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, a las profundidades de 30 y 60 cm.....	22
Figura 5. Concentración de SO_4^{2-} en la solución del suelo de los cultivos avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental.....	23
Figura 6. Concentración de NO_3^- en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental.....	24
Figura 7. Concentración de NO_3^- monitoreados a través del tiempo en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto.....	25
Figura 8. Promedios del % S en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental.....	26

Figura 9.	Promedio del % de S total monitoreado a través del tiempo en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto.....	27
Figura 10.	Contenido de Cu en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental.....	29
Figura 11.	Rendimiento de materia seca de los cultivos avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental.....	34

Lista de cuadros

	Página
Cuadro 1. Lista de tratamientos	13
Cuadro 2. Métodos analíticos y determinaciones realizadas en las variables de suelo.....	17
Cuadro 3. Métodos analíticos y determinaciones realizadas en las variables de planta.....	18
Cuadro 4. Medias del contenido de micronutrientos en planta.....	28
Cuadro 5. Medias de pH, C.E, M.O. y C.I.C. determinadas de las muestras tomadas al inicio y final del experimento.....	30
Cuadro 6. Contenido de cationes en el suelo de acuerdo al cultivo y aplicación de azufre.....	32
Cuadro 7. Valores de Cobre, Hierro, Manganeso y Zinc determinados en suelo para cada cultivo al inicio y final del experimento.....	32

I. INTRODUCCIÓN

El uso de suelos marginales para actividades agrícolas es cada día más importante, debido a la presión para producir alimentos, ante la creciente demanda de ellos originada por el incremento de la población a nivel regional y mundial.

Entre los suelos marginales se encuentran los salino-sódicos, que se caracterizan por tener pH elevado y alta concentración de sodio, el cual provoca que las partículas del suelo floculen e impidan la infiltración de agua, creando así condiciones inadecuadas para el establecimiento de cultivos, por lo que se han usado diversos métodos de recuperación físicos, químicos, hidrotécnicos, eléctricos y biológicos.

Durante la rehabilitación de dichos suelos si existe una alta concentración de nitratos, se pueden lixiviar a los cuerpos de agua o ser absorbidos por los cultivos y acumularse en el tejido vegetal, incrementando el riesgo de los daños de los nitratos en la salud de los consumidores.

Diversos estudios como el de Korom (1992), señalan que la adición de azufre puede disminuir la lixiviación de nitratos, debido a que durante la oxidación del azufre se pueden generar condiciones para la desnitrificación. Por otra parte los sulfatos producidos por la oxidación del azufre son absorbidos por las plantas limitando la acumulación de nitratos en el tejido de los cultivos.

Desafortunadamente, existe escasa información sobre el comportamiento de los nitratos en los suelos salino-sódicos durante la recuperación con azufre elemental y cultivos forrajeros.

Por lo anterior, es importante evaluar los cambios producidos por el azufre elemental en el mejoramiento de las propiedades químicas de un suelo salino-sódico, el efecto que provoca en la lixiviación de nitratos y como fuente de sulfatos en la solución del suelo,

para diversos cultivos. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto del S en: la lixiviación de nitratos en el perfil del suelo, la concentración de S, nitratos y micronutrientes del tejido vegetal, la fertilidad del suelo y el rendimiento de especies forrajeras en un suelo salino-sódico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Efecto del azufre en la recuperación de suelos salino-sódicos

Los suelos salino-sódicos se forman por la acumulación de sales por diversos procesos. El sodio en particular ocasiona más daño en este tipo de suelos, porque ocupa la mayoría de los espacios de intercambio cationico, propiciando la defloculación de los suelos (Guerrero-Álvarez *et al.*, 2007), con lo cual se reduce la infiltración del agua y los espacios porosos, dificultando el desarrollo de las plantas.

La recuperación de este tipo de suelos, que consiste en eliminar el exceso de sales representa un reto, porque a pesar de que existen diversos métodos de recuperación físicos, químicos, hidrotécnicos, eléctricos y biológicos, sus efectos no son inmediatos. Una forma de acelerar la recuperación de este tipo de suelo es aplicando simultáneamente dos o más métodos de recuperación (Aceves, 1981).

En la mayoría de los trabajos de recuperación de suelos salino-sódicos, se establecen cultivos forrajeros, se aplica S como mejorador y se riega con láminas de agua suficientes para lavar las sales (Santamarina-Cesar *et al.*, 2004). En este proceso el S no sólo es útil como mejorador de suelos sino también una fuente de sulfatos, forma en que los cultivos absorben azufre. En estos tipos de suelo los cultivos forrajeros extraen las sales, son fuente de materia orgánica y promotores de la infiltración (Serrato *et al.*, 2002).

El azufre es utilizado como enmienda, debido a su capacidad para disminuir el pH del suelo y en general propiciar mejores condiciones para la actividad microbiológica y desarrollo de las plantas. En esta forma directa o indirecta el S ayuda a mejorar la fertilidad física, química y biológica de los suelos (Haneklaus *et al.*, 2006).

El efecto positivo del azufre en los suelos salino-sódicos se debe a la oxidación, durante la cual se produce acidez posteriormente a la formación de H_2SO_4 , con lo cual se puede solubilizar el $CaCO_3$ presente en este tipo de suelos, produciendo Ca libre que desplaza al sodio del intercambio iónico del suelo, que puede ser lixiviado con láminas adecuadas de agua. Con ello se logra que la defloculación se revierta y existan mejores condiciones de aireación para el desarrollo de las plantas, ya que éstas para que absorban los nutrimentos, deben tener suficientemente oxígeno en el suelo.

A diferencia de otros iones, la absorción de NO_3^- y Cl^- ocurre independientemente de la concentración salina en la solución del suelo.

2.2. Efecto del azufre sobre la fertilidad del suelo macro y micro nutrimentos

Una de las características de los suelos salino-sódicos es su elevado pH, alcanzando concentraciones de OH^- que producen formas no disponibles de nutrimentos para las plantas. Las deficiencias de Fe, Cu, Mn y Zn son muy marcadas en los cultivos que se establecen en estos suelos y sólo se pueden corregir disminuyendo el pH del suelo y/o agregándolos al follaje y al suelo. La incorporación de azufre elemental ha sido la forma más efectiva y económica para disminuir el pH del suelo y hacer que los nutrimentos se encuentren en formas disponibles para las plantas (Cifuentes and Lindemann, 1993).

Sierra *et al.* (2007) después de incubar durante diferentes periodos en bolsas de plástico suelos calcáreos con distintas dosis de azufre elemental, concluyó que la adición de azufre disminuyó el pH y aumentó la disponibilidad de micronutrimentos sólo en los suelos con bajo contenido de $CaCO_3$ y materia orgánica.

2.3. Dinámica del azufre en el suelo

La mayor parte del S presente en el suelo se encuentra en forma orgánica. Para que dicho nutrimento sea absorbido por las plantas debe pasar por un proceso de mineralización, durante el cual se oxida en presencia de bacterias aeróbicas o anaeróbicas, para producir SO_4^{2-} . Parte del S disponible es utilizado por los cultivos para satisfacer sus necesidades nutrimentales y otra parte se puede perder en forma de gas cuando hay condiciones de anaerobiosis o mediante su lixiviación en forma de sulfatos en suelos arenosos, debido a que este compuesto no es retenido fuertemente en los suelos de pH cercano a la neutralidad (Cajuste, 1977). Adicionalmente el azufre en forma SO_4^{2-} también puede ser inmovilizado por las bacterias que lo utilizan durante la descomposición de la materia orgánica.

La oxidación del azufre orgánico e inorgánico ocurre debido principalmente a la acción de dos grupos de bacterias: el género *Thiobacillus* y los géneros *Beggiatoa*, *Thiotrix*, *Thioplaca*. Los *Thiobacillus* constituyen un grupo de bacterias, que encuentran la energía necesaria para su crecimiento a partir de la oxidación de los compuestos azufrados inorgánicos a SO_4^{2-} . Los más importantes son: *T. novellus* (autótrofo facultativo contrariamente a los demás, que son autótrofos obligados); *T. desnitrificans*, capaz de usar el oxígeno del NO_3^- en medios anaeróbicos; y el *T. ferroxidans*, que satisface sus necesidades energéticas a partir de la oxidación de hierro en su estado ferroso. Generalmente la mayoría de los *Thiobacillus* pueden oxidar el azufre en todos sus estados reducidos.

En la gasificación del S uno de los microorganismos mas importantes es la bacteria *Desulfovibrio desulfuricans*, que actúa en la reducción de los SO_4^{2-} a H_2S en suelos inundados.

2.4. Desnitrificación y lixiviación de nitratos en suelos salino-sódicos

Los nitratos son un producto final de la oxidación del nitrógeno en el suelo, que pueden ser lixiviados porque son aniones que no reaccionan con otros compuestos y su permanencia en las capas superficiales del suelo depende de la percolación del agua el perfil y de su retención en el complejo de intercambio cationico. El establecimiento de cultivos de baja densidad de población y de escasa absorción de nitrógeno del suelo, es otra forma en que los nitratos se pueden perder con facilidad, trabajos como los de Stenberg *et al.* (1999), donde evaluaron la lixiviación de nitratos a 60 y 90 cm de profundidad en los cultivos de cebada, avena, trigo y pasto ryegrass en la temporada de otoño, determinaron que el pasto es el cultivo mas eficiente para disminuir la perdida de nitratos en el suelo.

Los nitratos, por la acción de bacterias, pueden reducirse a compuestos gaseosos que escapan a la atmósfera, o ser asimilados por otros microorganismos, y de esta forma ya no estar disponibles para los cultivos. Trabajos como los de Jang *et al.* (2005), demuestran que la utilización de bacterias en condiciones de anaerobiosis y la adición de compuestos azufrados pueden eliminar hasta un 90% de los nitratos de las aguas residuales. Sengupta y Ergas (2006), utilizaron un biorreactor con bacterias y azufre elemental para eliminar los nitratos por medio de la desnitrificación, logrando eliminar una alta concentración de nitratos a través de este proceso. Cervantes-Carrillo *et al.* (2000), menciona que actualmente la eliminación de nitratos de las aguas residuales a través de la desnitrificación es la forma más sostenible, efectiva y mas económica.

Mann *et al.* (1972), realizaron un trabajo en columnas a las cuales les adicionaron azufre elemental para que sirviera de energía a las bacterias *Thiobacillus desnitrificans* y así poder eliminar los nitratos presentes. De lo cual concluyeron que la adición de azufre a los suelos con escasa energía para las bacterias era un método eficaz para la reducción de nitratos en el suelo.

Los suelos salino-sódicos floculan debido a la alta concentración de sodio, que favorece la deficiencia de oxígeno durante los riegos o en la época de lluvias, con lo cual se promueve la desnitrificación, en mayor grado si existe azufre elemental.

En la actualidad existe la necesidad ambiental y económica de entender el papel y el destino del nitrógeno en los diferentes ecosistemas. En los suelos el nitrógeno está en diferentes formas que suelen ser fácilmente intercambiables; las rutas de transformación que el nitrógeno sigue dentro y fuera del ambiente edáfico son conocidas como el ciclo del nitrógeno. Estas rutas están fuertemente influidas por la actividad biológica y por las condiciones climáticas prevalecientes y las características físico-químicas de los suelos. Por ello, cuando los ecosistemas son alterados, los procesos y las rutas del nitrógeno se aceleran o retardan, provocando en ocasiones la contaminación del ambiente como sucede en los suelos deforestados, ya que la mineralización y nitrificación no se detienen y hay producción de nitratos, que quedan expuestos a perderse por diferentes rutas (Iseman *et al.*, 1999; Perdomo *et al.*, 2001). Por otra parte, la pérdida de N en los suelos con deficiencias de oxígeno y con altas cantidades de materia orgánica crean condiciones favorables para la desnitrificación (Sánchez-Pérez *et al.*, 2003). En dicho proceso en que las bacterias anaeróbicas facultativas utilizan al NO_3^- como aceptor de electrones y la materia orgánica como fuente de energía, se pierde parte del N en forma gaseosa (N_2O y N_2); la deficiencia de O_2 también inhibe la formación de NO_3^- a partir de NH_4^+ .

En los suelos salino-sódicos la elevada salinidad y conductividad eléctrica constituyen una limitante para el buen desarrollo de los procesos biológicos, pero a su vez originan en los organismos que los habitan posibles adaptaciones que les permiten sobrevivir en este ecosistema de condiciones extremas. Luna *et al.* (2002), encontraron en los suelos del ex Lago de Texcoco que la glucosa es promotor de la reducción de los nitratos y que ésta ocurre en las primeras horas después de aplicar el nitrógeno, lo que hace difícil la adaptación de especies vegetales en suelos salino-sódicos.

2.5. Absorción de nitratos y sulfatos en las plantas

Generalmente, el NO_3^- es la forma nitrogenada dominante en la solución del suelo y la que absorbe en mayor medida la planta (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2000). El proceso de nitrificación es rápido, por lo que generalmente hay poco nitrógeno en forma de NH_4^+ en los suelos con buena aireación, humedad y temperatura ($>10^\circ\text{C}$).

La acumulación de nitratos en la planta ocurre cuando ésta absorbe una mayor cantidad de la que le es posible sintetizar y convertirlos en proteína. Las condiciones que favorecen dicha acumulación son: altos niveles de nitratos en suelo debido a altas dosis de estiércol y fertilizante de nitrogenado (Pliego *et al.*, 2003); elevadas tasas de mineralización; cultivos estresados por falta de horas luz, bajas y altas temperaturas (Merino y Ansorena, 1993). Suelos ácidos o deficientes en fósforo, azufre y molibdeno también favorecen dicha acumulación (Alcantar y Trejo, 2007).

Rodríguez-Pérez (2006), menciona que el estrés hídrico y salino en las plantas disminuye la fotosíntesis, la translocación y distribución de los fotoasimilados, los efectos anteriores son provocados por los suelos con problemas de salinidad. Lo que hace que se acumulen los nitratos en los cultivos que se establecen en ese tipo de suelos.

2.6. Efecto del azufre en el rendimiento y calidad del forraje

El S se considera como un elemento secundario para la planta, debido a que ésta, generalmente no requiere una cantidad tan grande como de N, P y K. Muchos cultivos requieren igual cantidad de S y de P para conseguir altos rendimientos. Su importancia en la planta radica en que su presencia se relaciona con la calidad de los cultivos debido a que es componente de los aminoácidos, y su deficiencia se relaciona con la acumulación de nitratos en el tejido vegetal.

La mayor parte del S tomado del suelo por las plantas es absorbido en forma de SO_4^{2-} por difusión y flujo de masa y posteriormente incorporado a los aminoácidos (cisteína, cistina y metionina), mediante un proceso de reducción dependiente de la presencia de luz, que se lleva a cabo en los cloroplastos (Camberato y Pan, 1999).

El S es componente de tres aminoácidos (metionina, cistina y cisteína), por lo que es indispensable para la formación de proteínas en las plantas. Bajo condiciones de deficiencia de S, las plantas producen cantidades reducidas de proteínas y pueden acumular NO_3^- , los cuales son tóxicos para los animales (Castellanos y Peña-Cabriales, 1990; Gageda-Cabrera, 2000).

La composición de la proteína es determinada en gran extensión por la proporción entre el S y el N orgánicos de las plantas. Este cociente de S orgánico y N orgánico se encuentra en el rango de 0.025 (leguminosas) a 0.032 (gramíneas), y es relativamente constante de una especie a otra (Yagodin, 1982), debido a que la absorción y reducción de N y S es promovido por los mismos factores. Como consecuencia de esto, la cantidad de S requerido por una planta es fuertemente dependiente del aporte N de la misma y viceversa.

El requerimiento total de S por los cultivos depende de la especie, de los niveles de rendimiento o de la materia seca producida. Los cultivos con una alta producción de materia seca, tienen una alta demanda de azufre; por cada 14 partes de nitrógeno (N) empleadas en la formación de aminoácidos, se requiere de una parte de S (Nguyen y Goh, 1992). La absorción de S y P también se encuentra íntimamente relacionada, de manera tal que la deficiencia de uno de estos elementos limita la absorción del otro.

La aplicación conjunta de S y N incrementan el rendimiento de los cultivos como lo reporta Alfaro y René (2006), quienes realizaron un estudio en praderas de pasto miel (*Holcus lanatus* L.), chépica (*Agrostis tenuis* Sibth) y bromo (*Bromus catharticus* Vahl) con dosis de 90 kg S ha^{-1} , en forma de sulfato de magnesio, sulfato de calcio y sulfato

doble de potasio y magnesio. Los tratamientos se fertilizaron inicialmente con 90 kg N ha⁻¹ (urea), 44 kg P ha⁻¹ (superfosfato triple de calcio) y 41 kg K ha⁻¹ (muriato de potasio) y 40 días después se aplicaron 30 kg N ha⁻¹ de N (urea). Dichos autores concluyeron que, la fertilización combinada de S y N incrementa el rendimiento de los forrajes. En el cultivo de canola la aplicación de N (urea y sulfato de amonio) y S (sulfato de potasio y sulfato de amonio) no sólo incrementó el rendimiento de materia seca si no que también aumentó el contenido de aceite en la semilla (Jackson, 2000). Weil y Mughogho (2000), realizaron un estudio para evaluar la respuesta en el rendimiento de grano del maíz a la fertilización con diferentes relaciones de S, N y P. Ellos concluyeron que con la relación N (80): S (20) se obtiene el mayor rendimiento.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivos:

- a) Determinar el efecto del azufre elemental en las concentraciones de nitratos y sulfatos a diferentes profundidades del suelo durante el ciclo de cuatro cultivos forrajeros.
- b) Evaluar la concentración de nitratos, azufre, Fe, Mn, Cu y Zn en plantas forrajeras, por efecto de la aplicación de S.
- c) Estudiar el efecto del azufre elemental en la fertilidad de un suelo salino-sódico y en el rendimiento de especies forrajeras.

Hipótesis:

- a) La aplicación de azufre elemental afecta la concentración de nitratos y sulfatos en el suelo.
- b) La concentración de nitratos, azufre, Fe, Mn, Cu y Zn en el tejido vegetal se modifica con la aplicación de azufre elemental en un suelo salino-sódico.

- c) La incorporación de azufre elemental mejora la fertilidad química del suelo salino-sódico y aumenta el rendimiento de los cultivos.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos establecidos en este trabajo, se procedió a realizar una serie de determinaciones analíticas en el suelo y en las plantas de cada unidad experimental, las cuales se establecieron con y sin la incorporación de azufre elemental, con la finalidad de monitorear si éste produjo algún cambio en las variables. Los procedimientos utilizados en campo y laboratorio se describen más adelante en este apartado.

4.1. Ubicación y descripción del sitio experimental

El trabajo se realizó en los terrenos experimentales del Colegio de Posgraduados, el cual se ubica en el kilómetro 36.5 de la carretera Federal México - Texcoco. Los suelos surgieron cuando se secó el Lago de Texcoco a través del tiempo, en el cual se depositaron sedimentos erosionados de las montañas cercanas, lava y cenizas volcánicas.

De acuerdo con Luna *et al.* (2002), en estos suelos el acuífero está cerca de la superficie (80-150 cm), el agua subterránea es altamente salina y son dominantes las sales NaCl y Na₂CO₃. Los suelos son salino-sódicos con un pH entre 8.5 y 10.5 y conductividades electrolíticas en extractos saturados entre 0.04 y 0.70 S m⁻¹ y unos porcentajes de sodio intercambiable elevados (60-80). La textura del suelo es de limoso a arcilloso, su estructura es granular en la superficie y prismática en el subsuelo. El drenaje natural es pobre y a pesar de que los suelos son profundos, las raíces de las plantas están restringidas por una capa de ceniza compacta de 5-20 cm de grosor a profundidades medias (16- 40 cm). La intemperización está avanzada; una evaporación alta (aprox. 2000 mm año⁻¹) y una precipitación pluvial relativamente baja (aprox. 700 mm ⁻¹) incrementan la concentración de sal de la solución del suelo. Además contiene considerables cantidades de carbonato de calcio en diferentes extractos laminares

(Gutiérrez *et al.*, 1998), por lo que la aplicación de azufre elemental es mejor que la de yeso, lo que justifica su aplicación.

4.2. Tratamientos

Los tratamientos se establecieron con la selección de cultivos que pueden germinar, emerger y tolerar las condiciones extremas que se presentan en el terreno, aun cuando estos no lleguen a rendir el cien por ciento de su potencial genético. Los cultivos que se establecieron en parcelas con y sin la incorporación de azufre elemental son: avena, maíz, alfalfa y pasto orchard.

Cuadro 1. Lista de tratamientos

Tratamiento	Azufre kg ha⁻¹	Cultivo
1	2000	Avena
2	2000	Maíz
3	2000	Alfalfa
4	2000	Pasto
5	0	Avena
6	0	Maíz
7	0	Alfalfa
8	0	Pasto

4.3. Diseño experimental y tamaño de unidad experimental

Se utilizó un diseño de bloques al azar con arreglo en franja con ocho tratamientos y tres repeticiones. La unidad experimental midió 15 metros cuadrados y se usó como parcela útil un metro cuadrado en el centro de dicha unidad.

4.4. Preparación del terreno

Se barbechó el terreno para removerlo y se dieron tres pasos de rastra, cada uno en dirección opuesta al anterior para desmoronar los terrones y por último se niveló el terreno.

4.5. Incorporación de azufre y fertilizante

De acuerdo con el diseño de tratamientos se aplicaron manualmente 3 kg de azufre elemental en las unidades experimentales correspondientes y se incorporó al suelo con una rastra de discos. En la fertilización se utilizó urea como fuente de nitrógeno y fosfato monoamoniaco como fuente de fósforo. En los cultivos de avena, trébol y pasto orchard, se aplicaron 400 g de urea, y en alfalfa 500 g. La dosis de urea se aplicó en dos porciones, la primera al momento de la siembra y el resto a los 65 días después de la siembra (dds) cuando se realizó el primer corte de los cultivos, a excepción del maíz que fue cosechado a los 125 dds. El fosfato monoamonico se aplicó en una sola dosis de 400 g durante la siembra en todos los cultivos y se incorporó al suelo junto con la urea y el azufre con la rastra de discos.

4.5.1 Siembra

El efecto ocasionado por las sales sobre la germinación y emergencia de las plantas en los suelos salino-sódicos es muy severo porque disminuye la proliferación de los cultivos. La sodicidad generalmente da como resultado un decremento en la permeabilidad de los suelos, se pierde porosidad en diferentes partes del perfil y frecuentemente los suelos presentan dureza y/o costras en la época de escasas de agua, lo que trae como consecuencia un efecto negativo sobre las poblaciones de las plantas y microorganismos del suelo. Teniendo en cuenta lo anterior la cantidad de semilla destinada a cada unidad experimental de acuerdo al arreglo de los bloques en campo fue: 200 g de avena (*Avena sativa L.*) cv. Cevamex, 100 g alfalfa (*Medicago*

sativa L.) cv. San Miguelito, 80 g de pasto orchard (*Dactylis glomerata* L.) cv anual y 150 g de maíz (*Zea mays* L.) cv. San Miguel. La siembra de los cultivos fue hecha al boleó, a excepción del maíz que se sembró en forma localizada a una distancia de 10 x 10 cm.

4.6. Instalación y extracción de solución del suelo con las sondas de succión

Con la finalidad de disminuir la variación de la concentración de nitratos y sulfatos en el suelo, por efecto de la heterogeneidad del terreno, el monitoreo de dichos iones se realizó con sondas de succión instaladas a 30 y 60 cm de profundidad en el centro de cada unidad experimental, tratando de eliminar la posible interacción de los cultivos y tratamientos cercanos. Una vez instaladas las sondas, se les extrajo el aire de su interior con una jeringa de 50 mL para producir vacío y poder succionar la solución cercana a la capsula porosa.

La solución recolectada en cada muestreo de las sondas de succión se extrajo en su totalidad con una jeringa de 50 mL de la manguera conectada a la cápsula porosa. La solución extraída era depositada en frascos de plástico, los cuales se conservaban a bajas temperaturas antes de su análisis.

4.7. Muestreo de plantas

Para determinar los contenidos de NO_3^- y S en las especies forrajeras establecidas, se muestrearon plantas del centro de cada unidad experimental durante la mañana antes que saliera el sol con el propósito de eliminar la variación que se pudiera dar por la actividad de la enzima nitrato reductasa con la luz solar. Las plantas cosechadas se transportaron al laboratorio donde se lavaron con agua destilada y se secaron en estufa a 70 °C por 72 horas. Una vez seco el tejido se molió antes de su análisis.

La evaluación del rendimiento de los cultivos se realizó a los 125 dds, cuando finalizó el experimento, excepto para la avena cuya cosecha se realizó a los 65 dds. Para cuantificar esta variable en todos los cultivos se cosechó la biomasa aérea de un metro cuadrado del centro de cada unidad experimental y posteriormente se secó durante 72 horas a 70 °C en una estufa de circulación de aire caliente.

4.8. Muestreo de suelo

En el experimento se realizaron dos muestreos, el primero se hizo después de haber terminado la preparación del suelo, para la caracterización de este. El segundo muestreo se hizo a los 125 dds, para determinar si el azufre modificaba algunas variables en el tiempo transcurrido entre los muestreos. Las determinaciones químicas realizadas en suelo se presentan en el Cuadro 2 y las correspondientes a planta en el Cuadro 3.

El monitoreo de los NO_3^- y SO_4^{2-} de la solución del suelo y de los NO_3^- y S en tejido vegetal, se determinaron cada 10 días, iniciando a los 25 dds y terminando a los 125 dds. Los micronutrientes se analizaron en el último muestreo de tejido vegetal, a los 125 dds.

Los muestreos de suelo se realizaron a una profundidad de 30 cm con una barrena cilíndrica, con la que se sacaron tres submuestras para tratar de obtener una muestra representativa de cada unidad experimental. Las muestras colectadas se secaron, molieron y tamizaron antes de trasladarse al laboratorio para realizar las determinaciones analíticas.

Cuadro 2. Métodos analíticos y determinaciones realizadas en las variables de suelo (DOF, 2002).

Determinaciones	Unidades de expresión	Método analítico
Análisis de pH	Concentración H^+	Potenciómetro. Lectura determinada con un potenciómetro, en una relación suelo/agua 1:2. Se analizó del muestreo hecho al inicio y final del experimento.
Conductividad eléctrica	dS m^{-1}	Puente de conductividad. Determinación de conductividad eléctrica del extracto de saturación. Se analizó del muestreo hecho al inicio y final del experimento.
Materia orgánica	%	Walkley y Black. Contenido de materia orgánica del suelo. Determinado en las muestras de suelos obtenidas al inicio y final del experimento.
NO_3^-	mg L^{-1}	Nitratación ácido salicílico. El análisis de NO_3^- monitoreados en la solución del suelo a través del tiempo se realizó a la profundidad de 30 y 60 cm en el bloque 1 y 2, ya que en el 3 sólo fue a los 30 cm. También se analizaron las muestras de suelo hechas al inicio y final del experimento.
SO_4^{2-}	mg L^{-1}	Turbidimetría. El análisis de SO_4^{2-} monitoreados en la solución del suelo a través del tiempo se realizó a la profundidad de 30 y 60 cm en el bloque 1 y 2, ya que en el 3 sólo fue a los 30 cm, y se realizó a los 105 dds. También se analizaron las muestras de suelo al inicio y final del experimento.
Ca y Mg	meq L^{-1}	EDTA. Cuantificación de Ca y Mg soluble. Determinación realizada de los muestreos de suelos hechos al inicio y final de experimento. El extracto se obtuvo del filtrado de la pasta de saturación.
K y Na	meq L^{-1}	Fotometría de flama. Cuantificación de K y Na soluble. Determinación realizada de los muestreos de suelos hechos al inicio y final de experimento. El extracto se obtuvo del filtrado de la pasta de saturación.
C.I.C.	mmol $100\ g^{-1}$	Acetato de amonio 1 N pH 7. Estimación de capacidad de intercambio cationico, realizada con las muestras obtenidas al inicio y al final del experimento.
Fe, Cu, Mn y Zn	mg kg^{-1}	DTPA. Cuantificación de Fe, Cu, Mn y Zn. Se determinaron de las muestras de suelo obtenidas al inicio y al final del experimento.

Cuadro 3. Métodos analíticos y determinaciones realizadas en las variables de planta (Alcantar y Sandoval, 1999).

Determinaciones	Unidades de expresión	Método analítico
NO ₃ ⁻	mg kg ⁻¹	Nitratación ácido salicílico. Análisis de NO ₃ ⁻ monitoreados a través del tiempo.
SO ₄ ⁻²	%	Turbidimetría. Análisis de S total monitoreado a través del tiempo.
Fe, Cu, Mn y Zn	mg kg ⁻¹	ICP. Cuantificación de Fe, Cu, Mn y Zn. Variables analizadas al final del experimento.
Rendimiento	kg ha ⁻¹	Secado en la estufa a 70°. Se analizó a los 125 dds en los cultivos de maíz, alfalfa y pasto; en la avena a los 65 dds.

4.9. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables se analizaron con el programa de SAS System versión 9, utilizando el programa de modelos mixtos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Efecto del azufre en la lixiviación de nitratos y sulfatos en el perfil del suelo

5.1.1. Efecto del cultivo en la lixiviación de nitratos en el suelo

En la Figura 1, se muestra la interacción cultivo por profundidad, la cual fue significativa ($\alpha \leq 0.05$) en el análisis de varianza (Cuadro A.1). La concentración de NO_3^- fue mayor a la profundidad de 30 cm independientemente del cultivo debido a que en la superficie existen mejores condiciones para la mineralización de la materia orgánica, lo cual coincide con otros estudios en los que se encontró que la mayor mineralización de nitratos se realiza en la superficie y con ello su acumulación en los primeros 7.5 cm, y que la adición de fertilizantes aumenta la concentración de nitratos en la superficie del suelo (MacKown *et al.*, 1999).

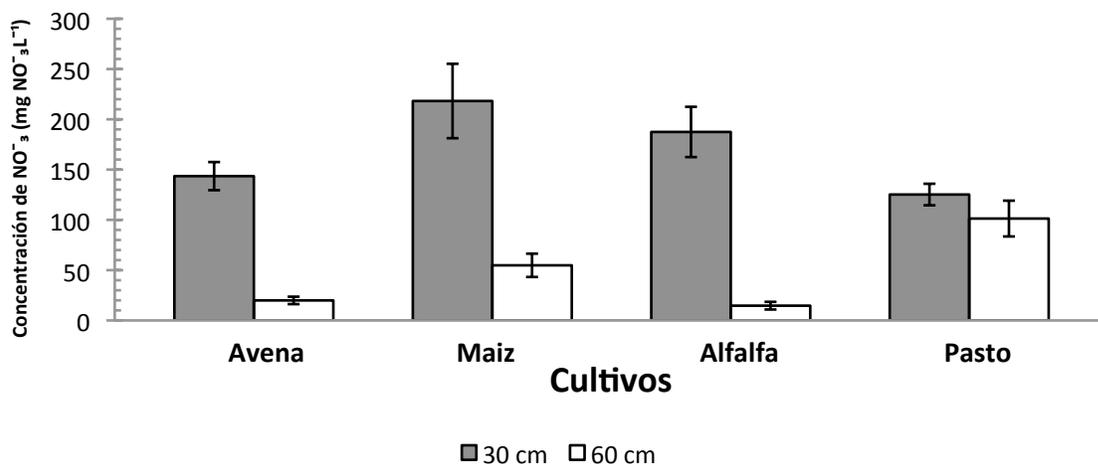


Figura 1. Concentración de NO_3^- en la solución del suelo en los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, a las profundidades de 30 y 60 cm. Las barras indican la desviación estándar.

Las concentraciones de NO_3^- determinadas en este suelo son altas comparadas con otros suelos agrícolas (Castellanos, 2002), lo que puede deberse a su origen y a que se

han empezado a utilizar como praderas, que han sido fertilizadas con altas dosis de estiércol, propiciando un incremento de nitratos por la mineralización de la materia orgánica y la adición de fertilizantes nitrogenados.

5.1.2. Contenido de nitratos en la solución del suelo por efecto del azufre

En la Figura 2, se presenta el efecto de la interacción cultivo por azufre en la lixiviación de nitratos. Dicha interacción resultó significativa a un $\alpha \leq 0.05$ (Cuadro A.1). En los cultivos de avena, maíz y alfalfa. La aplicación de S se relacionó con una mayor concentración de nitratos en la solución del suelo. En otros trabajos se ha observado que la aplicación de azufre al suelo incrementa la producción de ácido húmico y como consecuencia se liberan los nutrientes de la materia orgánica (Hutchison *et al.*, 2001). Entre los productos de la descomposición de la materia orgánica están los nitratos, los cuales pudieron ser liberados por la materia orgánica del suelo donde se estableció el presente estudio, ya que este ha recibido dosis altas de estiércol vacuno en años anteriores. Adicionalmente la fertilización nitrogenada también contribuye a la presencia de nitratos en la solución del suelo (MacKown *et al.*, 1999).

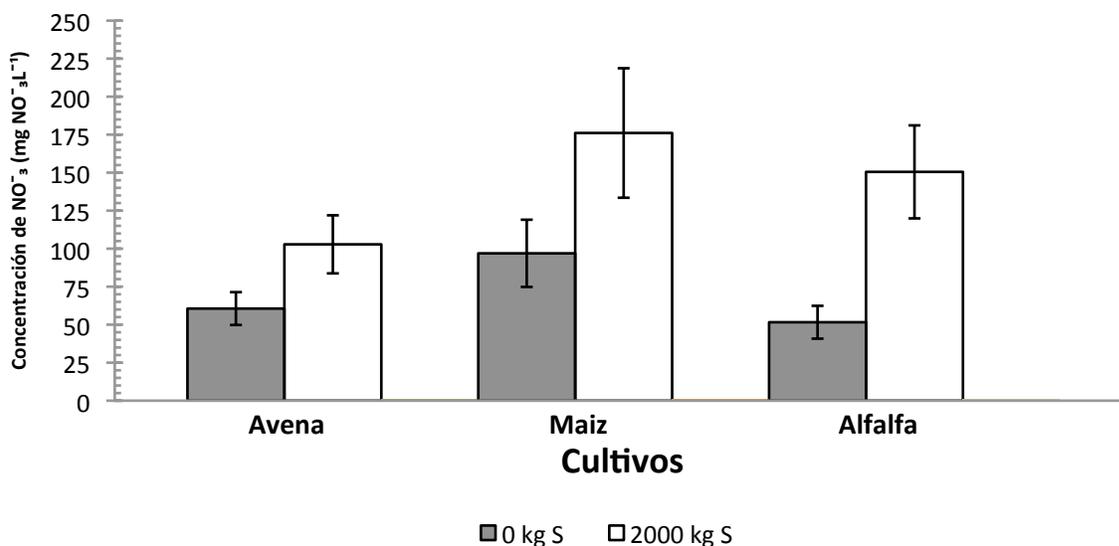


Figura 2. Concentración de NO_3^- en la solución del suelo en los cultivos de avena, maíz y alfalfa, establecidos con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

5.1.3. Efecto del azufre en la distribución de nitratos a diferentes profundidades

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro A.1), la interacción dosis de azufre por profundidad, que se presenta en la Figura 3, fue significativa ($\alpha \leq 0.05$). La incorporación de azufre elemental incrementó la concentración de nitratos en la solución del suelo a la profundidad de 30 cm, posiblemente debido a que la urea aplicada en la superficie mejoró la relación N/S en el suelo acelerando la mineralización de la materia orgánica presente en el suelo, cuyo contenido se considera bueno. A la profundidad de 60 cm, no se observó un decremento importante en la concentración de nitratos debido a la aplicación de azufre, en contraste con la hipótesis de que la aplicación de S al mejorar la infiltración de agua podría promover lixiviación de nitratos a capas más profundas, como lo reporta García-Linares *et al.* (2003).

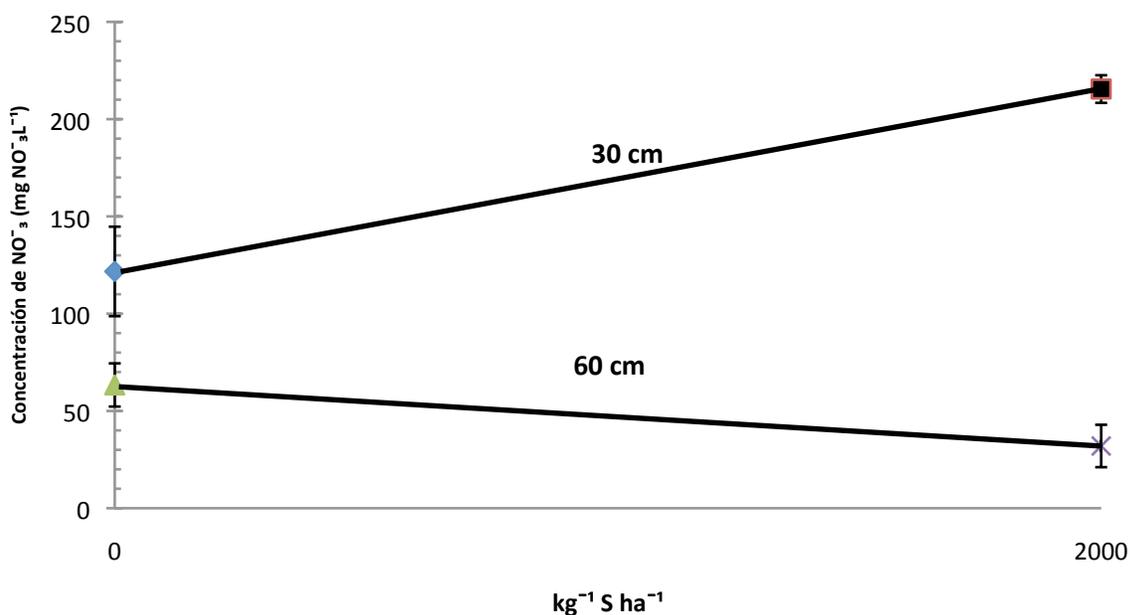


Figura 3. Concentración de NO_3^- en la solución del suelo a las profundidades de 30 y 60 cm, en las unidades experimentales establecidas con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

5.1.4. Efecto del cultivo en la lixiviación de sulfatos en el suelo

Con base en el análisis de varianza (Cuadro A.2), la interacción cultivo por profundidad para la concentración de sulfatos en la solución del suelo fue significativa ($\alpha = 0.06$) (Figura 4). Aun cuando hay diferencias en la concentración de sulfatos entre las profundidades muestreadas y entre los cultivos, en general se encontró que en todos estos hubo una mayor concentración de sulfatos de la solución del suelo a la profundidad de 30 cm. Esto se puede deber a la oxidación del S incorporado en la capa superficial del suelo, y a la liberación de sulfatos por la mineralización de la materia orgánica, ya que dichos procesos se realizan mejor a menor profundidad.

El movimiento de las sales en el perfil del suelo está directamente relacionado con el movimiento del agua en el perfil y por la temperatura, lo que hace que en los suelos salino-sódicos dichas sales tiendan a acumularse en la superficie como sulfato de sodio, magnesio, calcio y potasio durante el periodo de lluvia escasa o sin riego, las cuales tienen el potencial de lavarse en la época de lluvias; sin embargo, esto sólo ocurre en los primeros centímetros de profundidad (Galizzi, 1999; Ibáñez, 2004).

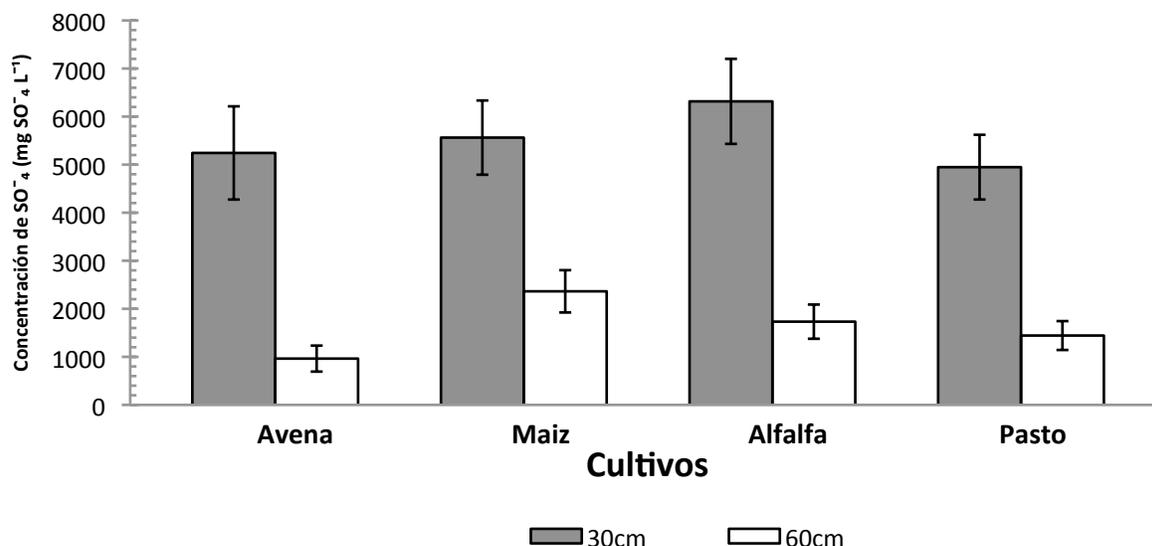


Figura 4. Concentración de SO_4^{2-} en la solución del suelo de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, a las profundidades de 30 y 60 cm. Las barras indican la desviación estándar.

5.1.5. Contenido de sulfatos en la solución del suelo por efecto del azufre

En la Figura 5, se presenta la interacción azufre por cultivo ($\alpha \leq 0.06$) para el contenido de sulfatos en la solución del suelo, cuyo análisis de varianza se presenta en el Cuadro A.2. En todos los cultivos donde se aplicó azufre elemental se observó una mayor concentración de sulfatos en la solución del suelo, aunque la diferencia es sólo significativa en el caso de la alfalfa. Lo anterior coincide con López (1994), quien reporta que a mayor cantidad de azufre agregado mayor es la concentración de sulfatos en la solución. Kishchuk y Brockley (2002), mencionan que el incremento de los SO_4^{2-} en la solución del suelo se relaciona directamente con el S orgánico presente en el suelo. En este caso el azufre elemental que se aplicó en el suelo contribuyó junto con la adición de estiércol en años anteriores al establecimiento del estudio, a la formación de SO_4^{2-} . La mayor concentración de SO_4^{2-} que existe en el cultivo de alfalfa, se debe principalmente a la adición de S ya que existieron condiciones necesarias para la oxidación de azufre elemental. Aunado a ello, aparentemente la disminución del pH del suelo que se produce en la cercanía de las raíces de la alfalfa (Vélez *et al.*, 2006) también favoreció la concentración de sulfatos. Un fenómeno similar fue observado en

bosques donde la acidez producida por la nitrificación se relacionó con una mayor concentración de sulfatos en el agua subterránea (Kim *et al.*, 2003).

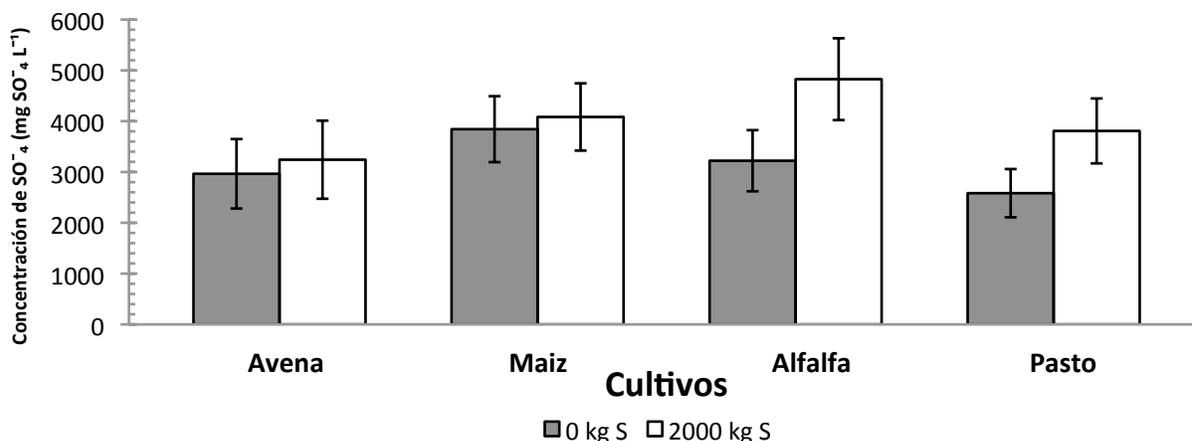


Figura 5. Concentración de SO_4^{2-} en la solución del suelo de los cultivos avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

5.2. Nitratos, azufre y micronutrientes en plantas forrajeras

5.2.1. Concentración de nitratos en el tejido de los cultivos por efecto del azufre

En la Figura 6, se presenta el efecto significativo ($\alpha \leq 0.05$) de la interacción cultivo por azufre en la concentración de NO_3^- en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, el análisis de varianza se presenta el cuadro A.3. En general se observa un efecto de dilución de los sulfatos, independientemente del cultivo, debido al mayor rendimiento de materia seca obtenido en los tratamientos que fueron adicionados de azufre. En la bibliografía se ha reportado que el sulfato puede utilizarse en los suelos salinos o sobre fertilizados para reducir la concentración de cloruros y nitratos en el tejido de la planta (Castellanos, 2000). Las concentraciones de nitratos observadas en el cultivo de alfalfa no pueden interpretarse debido a que durante la emergencia de las plántulas las condiciones de salinidad del suelo impidieron su establecimiento con una densidad normal, lo cual se reflejó en el rendimiento de biomasa, que fue mucho menor a la de los otros cultivos, como se puede ver en el apartado correspondiente de este capítulo de la tesis.

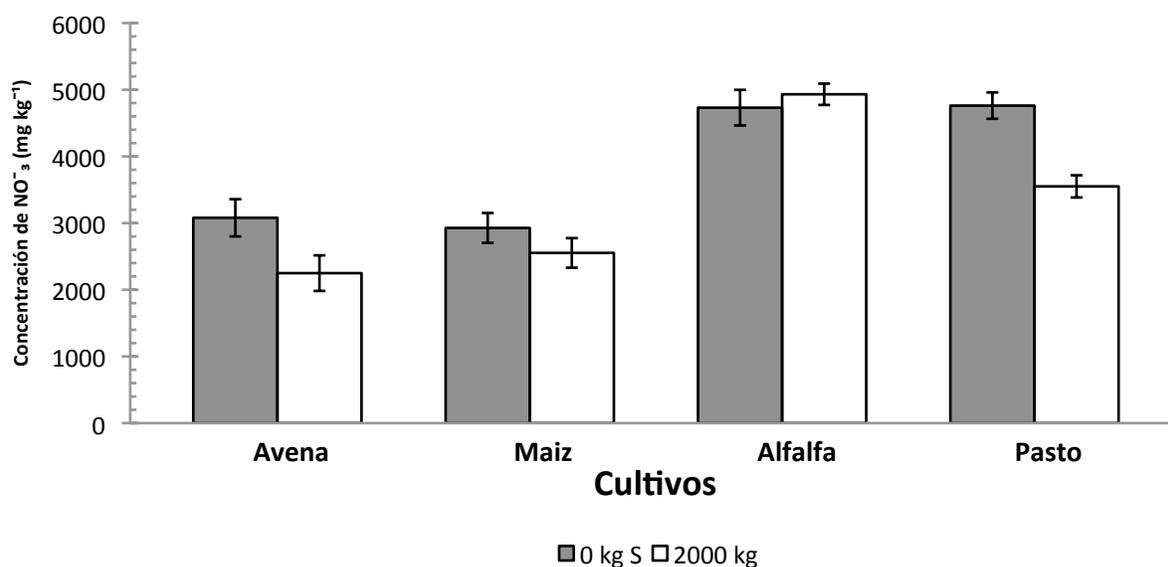


Figura 6. Concentración de NO_3^- en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

5.2.2. Concentración de nitratos en el tejido vegetal a través del tiempo

En la Figura 7, se observa que fue significativa ($\alpha \leq 0.05$) la interacción cultivo por tiempo en la concentración de nitratos en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto. El análisis de varianza se presenta el cuadro A.3. La tendencia a disminuir la concentración de los NO_3^- en todos los cultivos fue similar. La reducción en la concentración de nitratos conforme avanza la madurez se explica por el efecto de dilución por la producción de biomasa conforme avanza el desarrollo de las plantas (Uribe *et al.*, 1995; Barbazan *et al.*, 2002; Estrada *et al.*, 2004). El incremento de la concentración de NO_3^- en los cultivos de alfalfa y pasto a los 75 dds, se debe a la aplicación de fertilizante después del corte, el cual se realizó 10 días previos a la medición de nitratos en el tejido. En el cultivo de maíz y avena la disminución de los nitratos fue constante hasta la cosecha, ya que en ellos no hubo cortes y rebrotes antes de la cosecha, lo cual coincide con lo encontrado por Duru (2004).

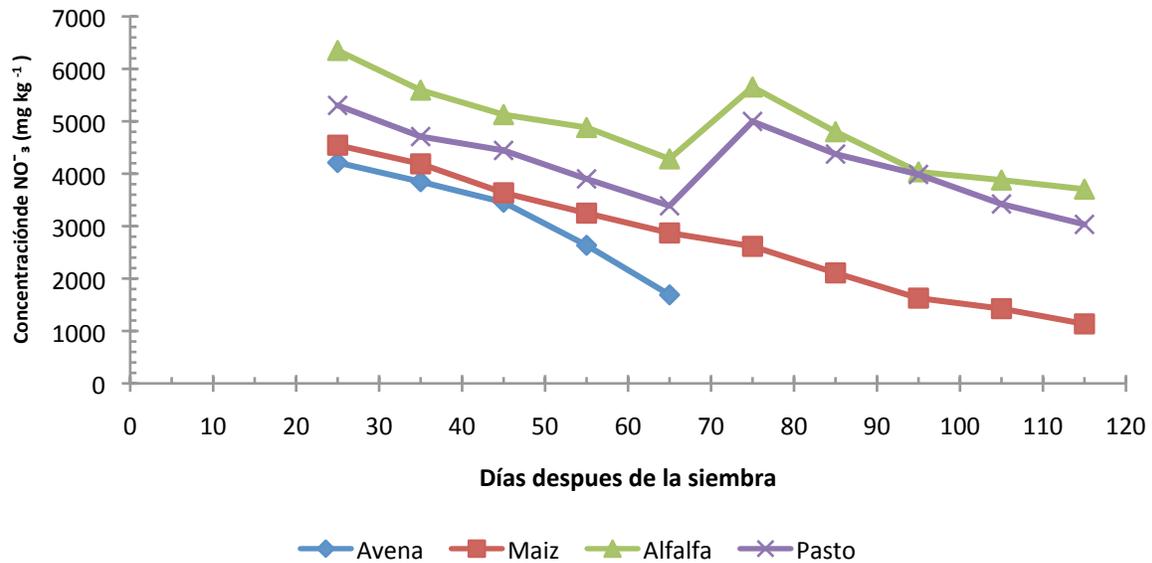


Figura 7. Concentración de NO_3^- monitoreados a través del tiempo en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto. En el cuadro A.23 se presenta la desviación estándar de la concentración de nitratos a través del tiempo en los cultivos.

5.2.3. Porcentaje de azufre en el tejido de los cultivos por efecto del azufre

El efecto significativo ($\alpha \leq 0.05$) detectado en el análisis de varianza Cuadro A.4, entre los cultivos y la dosis de azufre, para el porcentaje de S en el tejido vegetal, se muestran en la Figura 8. La mayor concentración de azufre en el tejido vegetal se presentó en los tratamientos que llevaron azufre elemental. Esto sugiere que existieron condiciones que provocaron la oxidación y disponibilidad del azufre en los suelos. La mayor concentración de S en la avena y la alfalfa se explican por el mayor requerimiento de dicho elemento en comparación con los requerimientos de los otros dos cultivos estudiados (Haneklaus *et al.*, 2006).

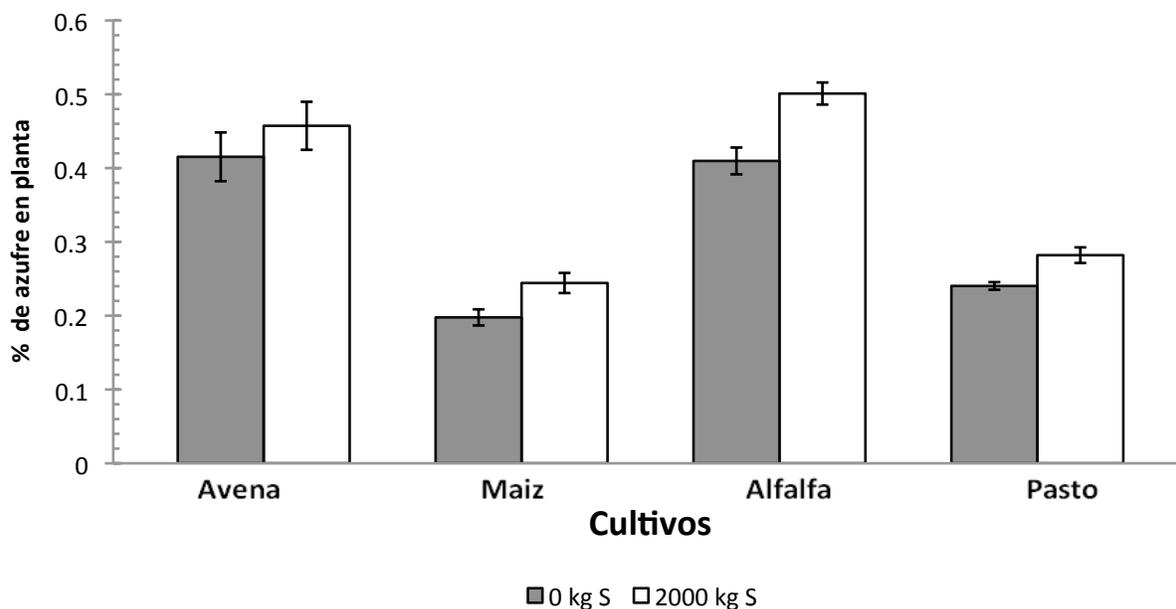


Figura 8. Promedios del % S en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

5.2.4. Porcentaje de azufre en el tejido vegetal a través del tiempo

En la Figura 9, se observa la tendencia de la concentración de S en el tejido vegetal a través del tiempo en los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto. El análisis de varianza presentado en el Cuadro A.4, muestra que las interacción cultivo por tiempo es significativa ($\alpha \leq 0.05$); lo cual se debe a que los cultivos demandan distintas cantidades de azufre (Haneklaus *et al.*, 2006) ya que la absorción y acumulación en cada cultivo depende de la demanda y velocidad de metabolismo de cada cultivo. La concentración de S en el tejido vegetal a los 75 días dds presentó un incremento similar a la concentración de nitratos.

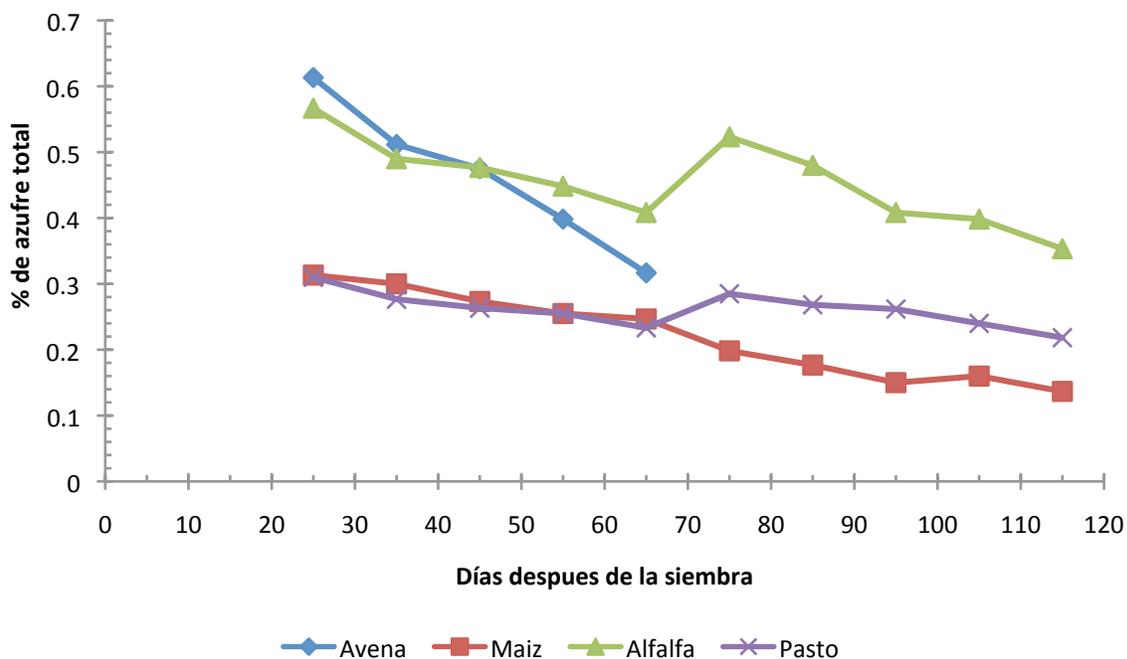


Figura 9. Promedio del % de S total monitoreado a través del tiempo en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto. En el cuadro A.24 se presenta la desviación estándar del % de S a través del tiempo en los cultivos.

5.2.5. Contenido de micronutrientes en el tejido de los cultivos

En el Cuadro 4, se presentan los valores de las medias de los micronutrientes: Fe, Cu, Mn y Zn, en el tejido de avena, maíz, alfalfa y pasto. Las concentraciones de Fe y Mn, únicamente entre cultivos fueron diferentes ($\alpha \leq 0.05$) de acuerdo a los análisis de varianza (Cuadro A.5 hasta A.8). El Cu y el Zn posiblemente no se vieron afectados, ya que sus niveles de disponibilidad son bajos en el suelo bajo estudio y que su disponibilidad es mayor a $\text{pH} < 5.0$.

Cuadro 4. Medias del contenido de micronutrientes en planta.

Cultivo	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----			
Avena	3.54	338.21	36.68	24.37

Maíz	3.22	573.46	23.91	21.62
Alfalfa	3.90	295.52	15.98	35.88
Pasto	5.28	504.20	31.71	24.09
$\alpha \leq 0.05$	n.s.	*	*	n.s.

n.s, no significativo. * significativo

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro A.5), sólo la interacción entre azufre y cultivo afectó la concentración de Cu en la planta ($\alpha \leq 0.05$). Dicha interacción se presenta en la Figura 10. Excepto en el cultivo de avena, la concentración de Cu en el tejido vegetal fue menor en los tratamientos con azufre. Es importante indicar que la avena fue cosechada a una etapa fisiológica más avanzada, respecto a otros cultivos, ya que pudo influir en el resultado encontrado (Alcantar y Trejo, 2007). En general se observó que los niveles de suficiencia para Cu fue deficiente, excepto para el tratamiento sin azufre en pasto, en donde alcanzó el nivel suficiente (Castellanos *et al.*, 2000).

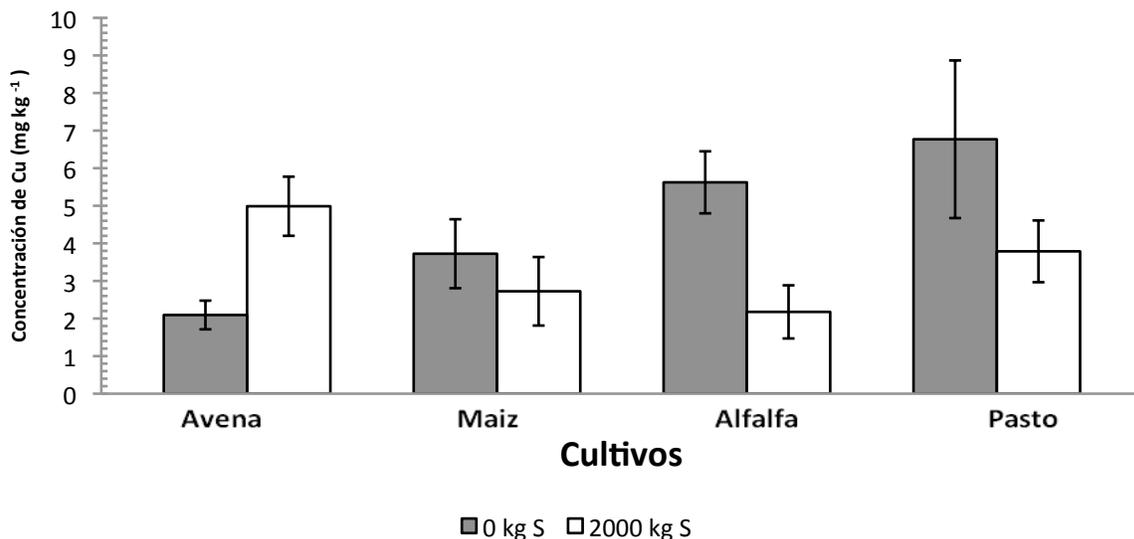


Figura 10. Contenido de Cu en el tejido vegetal de los cultivos de avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

5.3. Efecto del azufre en la fertilidad de un suelo salino-sódico y en el rendimiento de especies forrajeras

5.3.1. pH, C.E., M.O. y C.I.C. en el suelo

Con base en el análisis de varianza (Cuadros A 9 hasta el A 12), la C.E. únicamente se modificó por la interacción cultivo por dosis de azufre, y por el tiempo; en contraste al pH, la M.O. y la C.I.C. (muestreada sólo al final del estudio), características que no resultaron afectados por ningún factor en forma simple o combinada ($\alpha \leq 0.05$). En el Cuadro 5, se presentan los promedios de las características antes referidas por cultivo, sin y con azufre, al inicio y al final del estudio.

En dicho Cuadro 5, se observan decrementos en la C.E. en las parcelas sin azufre cultivada con avena y pasto, la cual pasó de 9 a 4.3 dS.m⁻¹ y de 13.2 a 8.6 dS m⁻¹, respectivamente. En el caso de la avena la disminución de la C.E. no es suficiente para eliminar el problema de salinidad, y en el caso del pasto los valores de C.E. al inició y al final, están en un nivel en el que sólo los cultivos tolerantes a la salinidad pueden tener rendimientos aceptables (Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos, 1994), en el caso de los pastos a dicho nivel de salinidad pueden reducir su rendimiento en un 50% (Porta y López Acevedo, 2005).

Los valores de pH del suelo están en un rango en que los nutrimentos tiene poca disponibilidad para las plantas (Castellanos, *et al.*, 2000), y de acuerdo a este autor el suelo se clasificaría como alcalino afectando mayormente la disponibilidad de los micronutrimentos. El porcentaje de materia orgánica determinado en el suelo estudiado se considera como moderadamente alto en relación a la textura presente en el suelo estudiado, limo arcilloso (Luna *et al.*, 2002). Los valores de la capacidad de intercambio cationico se consideran altos (Castellanos, *et al.*, 2000).

Cuadro 5. Medias de pH, C.E., M.O. y C.I.C. determinados de las muestras tomadas al inicio y al final del experimento.

Cultivo	Azufre 2000 Kg ha ⁻¹	pH		C.E., dS.m ⁻¹		M.O., %		C.I.C., 100g ⁻¹
		Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final	Final
Avena	Sin	8.58	8.40	9.03	4.27	3.40	3.64	69.77
	Con	8.43	8.22	10.27	9.25	3.51	3.33	66.44
Maíz	Sin	8.45	8.40	10.49	9.64	2.63	3.01	64.47
	Con	8.41	8.03	10.11	6.90	2.88	3.83	69.98
Alfalfa	Sin	8.44	8.31	11.06	8.98	2.58	3.11	68.71
	Con	8.42	8.17	10.13	7.72	2.90	3.38	64.17
Pasto	Sin	8.33	8.28	13.21	8.57	3.15	3.10	69.02
	Con	8.41	8.26	12.43	8.42	2.90	2.99	65.83
Promedio		8.43	8.26	10.84	7.97	2.99	3.30	67.29

5.3.2. Contenido de nitratos de los muestreos al inicio y final del experimento

Las concentraciones de nitratos en el suelo disminuyeron en el tiempo ($\alpha \leq 0.05$) en promedio de 203.33 a 11.41 mg kg⁻¹ de acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro A.13). Los otros factores estudiados no afectaron esta variable.

Dicha disminución de nitratos en el tiempo coincide con lo reportado en otros de estudios de dinámica del nitrógeno en suelos cultivados (Estrada *et al.*, 2004).

5.3.3. Contenido de cationes en el suelo

Para cada cultivo con y sin la aplicación de azufre elemental se observaron decrementos ($\alpha \leq 0.05$) en la concentración inicial de sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca)

y magnesio (Mg) en el suelo, de acuerdo con el análisis de varianza del (Cuadros A.14 hasta el A.17), cuyos valores promedio se presentan en el Cuadro 6. La diferencia se puede atribuir en parte a la absorción de dichos cationes por los cultivos, como fue reportado por Ruiz *et al.* (2007), para tres variedades de zacate (sudan, ryegrass y bermuda) en un suelo salino. La lixiviación de cationes es otra posible razón de la disminución en la concentración cationica encontrada.

López (1994), menciona que la disminución del contenido de los cationes de los suelos salino-sódicos tratados con azufre elemental, disminuyen su concentración debido a que se desabsorben del complejo de intercambio cationico quedando expuestos a lixivarse a capas más profundas y sólo los cationes de mayor valencia logran encontrarse en mayor proporción en los primeros centímetros de profundidad. En el Cuadro 6, se aprecia que los cationes monovalentes como el Na⁺ y K⁺ disminuyeron en mayor proporción su contenido en relación al muestreo realizado al inicio y al final del experimento mientras que los cationes divalentes como el Ca²⁺ y Mg²⁺ disminuyeron su contenido en menor proporción.

Cuadro 6. Contenido de cationes † en el suelo de acuerdo al cultivo y aplicación de azufre.

Cultivo	Azufre 2000 Kg ha ⁻¹	Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺	
		Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
		-----Meq L ⁻¹ -----							
Avena	Sin	76.60	33.00	26.30	7.61	22.56	7.33	25.13	26.33
	Con	80.47	22.56	25.97	15.60	26.11	18.07	31.58	29.36
Maíz	Sin	80.87	49.36	21.57	15.02	24.26	14.41	35.36	16.80
	Con	76.52	24.06	22.78	13.75	21.23	16.23	33.71	23.76
Alfalfa	Sin	85.97	47.03	22.93	14.69	24.22	13.88	36.11	21.70
	Con	78.80	52.73	21.75	15.03	24.84	16.66	30.08	20.53
Pasto	Sin	93.07	48.76	36.43	14.17	26.75	16.43	40.83	21.50
	Con	83.30	45.66	27.59	13.67	22.24	16.85	34.06	20.23

† Con base en los análisis de varianza, la variable tiempo fue significativa ($\alpha \leq 0.05$)

5.3.4. Contenido de micronutrientos en el suelo

El efecto de la interacción cultivo por azufre por tiempo sobre el contenido de cobre, fierro, manganeso y zinc del suelo no fue significativa ($\alpha \leq 0.05$), pero si hubo variaciones en el tiempo en los últimos tres micronutrientes (Cuadros A.18 hasta el A. 21). Los promedios respectivos se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Contenido de Cobre, Fierro, Manganeso y Zinc determinados en suelos para cada cultivo al inicio y al final del estudio.

Cu		Fe		Mn		Zn	
Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
----- mg kg ⁻¹ -----							
1.32	1.25	6.42	4.86	6.65	3.58	5.04	1.54

De acuerdo con Sierra *et al.* (2007), en los suelos calcáreos la disponibilidad de los micronutrientes no aumenta considerablemente al aplicar azufre debido a que el CaCO₃ y la materia orgánica incrementan la capacidad amortiguadora del suelo al reaccionar con el H₂SO₄ que se libera de la oxidación del azufre. Esto aunado a la absorción de micronutrientes por los cultivos puede explicar la disminución en la concentración de Fe, Mn y Zn del suelo, tal y como lo reportan Longoria *et al.* (1975), quienes en suelos calcáreos lograron un control mas efectivo de la clorosis férrica con preinundación (ya que esta reduce el Fe a forma asimilable) que con la adición de hierro quelatado.

De acuerdo con Castellanos *et al.* (2000), y para fines de clasificación de la fertilidad del suelo, los contenidos de micronutrientes encontrados en el presente estudio son: medio, moderadamente bajo, moderadamente bueno y de alto a moderadamente bueno para Cu, Fe, Mn y Zn, respectivamente.

5.3.5. Rendimiento de materia seca

El análisis de varianza de esta variable (Cuadro A.22), indica que la interacción cultivo por azufre fue significativa ($\alpha \leq 0.05$), la cual se presenta en la Figura 11. En ésta se observa que en cada uno de los cultivos la aplicación de S se relacionó con un mayor rendimiento, lo cual es congruente con los incrementos de sulfatos y nitratos encontrados en la solución del suelo por la aplicación de S, como se presentó en secciones previas y también con lo reportado en otros estudios (Weil y Mughogho, 2000; Galantini *et al.*, 2003), en los cuales se hicieron aplicaciones conjuntas de S y N. También se ha reportado que la adición de S para la recuperación de suelos salino-sódicos mejora algunas propiedades físicas y químicas (Desiderio y Rodríguez, 1998). En el presente estudio las propiedades físicas del suelo no fueron evaluadas; sin embargo, se observó una mayor concentración de azufre en la planta y una mayor disponibilidad de nitratos en la solución el suelo a los 30 cm de profundidad, debido a la aplicación de S, lo cual puede explicar en parte los mejores rendimientos en las parcelas enmendadas con S elemental.

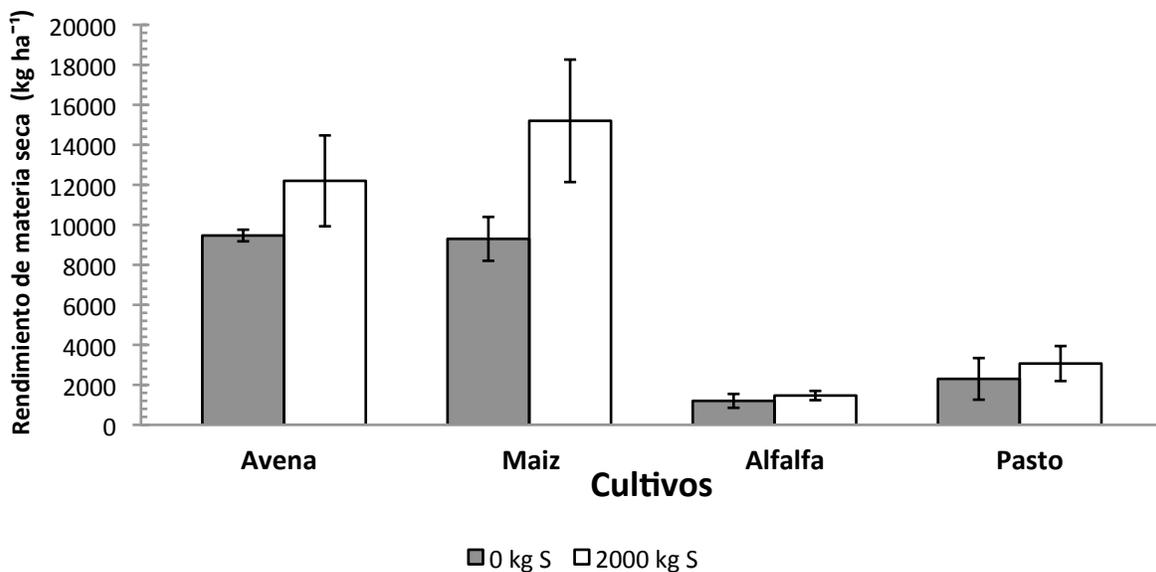


Figura 11. Rendimiento de materia seca de los cultivos avena, maíz, alfalfa y pasto, establecidos con y sin azufre elemental. Las barras indican la desviación estándar.

VI. CONCLUSIONES

La adición de 2 t S ha⁻¹ al suelo aumentó la concentración de nitratos en la solución edáfica en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), de acuerdo a los siguientes intervalos: 51-96 a 102-176 mg L⁻¹, independientemente de la profundidad. Éste mismo efecto, independientemente del cultivo, sólo se observó en la profundidad de 30 cm. Independientemente de la dosis de S, el intervalo de la concentración de dichos iones en la solución del suelo, dependiente de la especie cultivada, fue de 121-215 y de 63-31 mg L⁻¹ a la profundidad de 30 y 60 cm, respectivamente.

La adición de 2 t S ha⁻¹ al suelo aumentó la concentración de sulfatos en la solución edáfica en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha = 0.06$), de acuerdo a los siguientes intervalos: de 2583-3842 a 3242-4826 mg L⁻¹, independientemente de la profundidad. Sin considerar la dosis de S, el intervalo de la concentración (mg L⁻¹) de dichos iones en la solución del suelo dependiente de la especie cultivada ($\alpha = 0.06$), fue mayor a los 30 cm (4947-6316), respecto a los 60 cm (963-2363) de profundidad.

La adición de 2 t S ha⁻¹ al suelo disminuyó la concentración de nitratos en el tejido vegetal en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), excepto en alfalfa, de acuerdo a los siguientes intervalos: de 2927-4762 a 2249-3550 mg kg⁻¹. En contraste dicha aplicación de azufre aumentó la concentración de S en el tejido vegetal en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), de acuerdo a los siguientes intervalos: de 0.19-0.41 a 0.24-0.50 %.

La adición de 2 t S ha⁻¹ al suelo afectó únicamente la concentración de Cu en el tejido vegetal, significando una disminución en forma diferencial debido a la especie cultivada ($\alpha \leq 0.05$), excepto en avena, de acuerdo a los siguientes intervalos: de 3.72-6.76 a 2.17-3.78 mg kg⁻¹. En avena la concentración aumentó de 2.09 a 4.98 mg kg⁻¹.

La aplicación de S al suelo no afectó la fertilidad química de éste (pH, CE, MO, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn), pero si incrementó el rendimiento de materia seca de los cultivos forrajeros ($\alpha \leq 0.05$).

VII. LITERATURA CITADA

Aceves, N. L.A. 1981. Los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de suelos, México. 244 p.

Alcantar G., G., y L.I. Trejo-Téllez. 2007. Nutrición de cultivos. Mundi-Prensa México. 438 p.

Alcantar G., G., y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 141 p.

Alfaro M., B., y S. René I. 2006. Efecto de fuentes de azufre sobre el rendimiento y calidad de trigo y pradera en dos Andisoles. *Agricultura Técnica* 66: 283-294.

Barbazan, M., M. Ferrando y J.P. Zamalvide. 2002. Acumulación de materia seca y nitrógeno en gramíneas anuales invernales usadas como cobertera vegetal en viñeros. *Agrociencia* 6: 10-19.

Cajuste, L.J. 1977. Química de suelos con un enfoque Agrícola. Talleres Gráficos de la Nación. México, D.F. 278 p.

Camberato, J.J., and W.L. Pan. 1999. Calcium, magnesium and sulfur. p. d53-d69. *In Handbook of soil science.* (ed.) M.E. Sumner, CRC Press, Boca Raton, FL.

Castellanos J., Z., J.X. Uvalle B., y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAP. Segunda edición. San Miguel Allende, Guanajuato, México. 226 p.

Castellanos Z., J., y J. J. Peña-Cabrales. 1990. Los nitratos provenientes de la agricultura: Una fuente de contaminación de los acuíferos. *Terra* 10: 113-126.

Cervantes-Carrillo, F., J. Pérez y J. Gómez. 2000. Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42: 73-82.

Cifuentes, F.R., and W. Lindemann. 1993. Organic matter stimulation of elemental sulfur oxidation in a calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 57: 727-731.

Desiderio, F., y O. Rodríguez. 1998. Efectos del azufre, fosfoyeso y ácido polimaleico sobre las propiedades físicas de un suelo salino sódico y la bulbificación en cebolla (*Allium cepa* L.). *Revista Suelos Ecuatoriales* 28: 171-179.

DOF. 2002. Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Distrito Federal, México. 31 de diciembre de 2002. 85 p.

Duru, M. 2004. Simplified nitrogen assessment of orchardgrass swards. *Agronomy Journal* 96: 1598-2605.

Estrada Botello M., A., I. Nikolskii G., J.D. Etchevers B., F. Gavi R., O.L. Palacios V., J.D. Palma L. y J.D. Mendoza P. 2004. Influencia del tipo de drenaje en el aprovechamiento de nitrógeno por la caña de azúcar. *Terra* 22: 81-89.

Galantini, J.A., M.R. Landriscini., R. Fernández., G. Minoldo., J. Cacchiarelli. y J.O Iglesias.

[http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/2623CC5DCC8A4B6203257130006A6D5F/\\$file/Galantini+-+Fert+Trigo+FINAL.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/2623CC5DCC8A4B6203257130006A6D5F/$file/Galantini+-+Fert+Trigo+FINAL.pdf) (consultado el 17 de noviembre de 2008).

Galizzi F., A., C. Angueira., D. Prieto.1999. Suelos de la planta piloto de drenaje del INTA Santiago del Estero. *Revista de Ciencias Forestales Quebracho* 7: 52-60.

Gallegos-Vázquez, C., E. Olivares-Sáenz., R. Vázquez-Alvarado y F. Zavala-García. 2000. Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía. *Terra* 18: 133-139.

García-Linares C., M. Martínez., J.M. Sánchez-Pérez e I. Antigüedad. 2003. Aplicación del modelo STICS para la determinación de la lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha azucarera en la zona no saturada del suelo. Estudios de la Zona no Saturada del Suelo 6: 289-297.

Grageda-Cabreda O.,A., A. Vermoesen O., Van Cleemput y J.J. Peña-Cabriales. 2000. Efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno en las emisiones de N₂ y N₂O. Terra 18: 1-9.

Guerrero-Álvarez J.,P., I. Pla-Sentis, R.G. Camacho, A. Valera y J. Ferrer. 2007. Génesis de un suelo salino-sódico de Tucupido, estado Guárico-Venezuela. Agronomía Tropical 57: 171-188.

Gutiérrez C., Ma. del C., G. Stoops G., y C.A Ortiz S. 1998. Carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. Terra 16: 11-19.

Haneklaus, S., E. Bloem and E. Schnug. 2006. Sulfur. Enciclopedia of soil science 2da edition. 1534 p.

Hutchison, K.L., D. Hesterberg and J.F. Chou. 2001. Stability of reduced organic sulfur in humic acid as affected by aeration and pH. Soil Sci. Soc. Am. 65: 704-709.

Ibañez, C., S. Palomeque y F. Fontúrbel. 2004. Elementos principales del suelo, geodinámica y dinámica de los principales componentes del suelo. En: Fontúrbel, F., C. Ibañez & G. Abruzzese (eds.) El Recurso Suelo: Bases Edafológicas, Problemática, Administración Y Contaminación. CD-ROM interactivo, Ed. Publicaciones Integrales, La Paz.

Iseman, T.M., D.R Zak, W.E Holmes and A.G Merrill.1999. Revegetation and nitrate leaching from lake states northern hardwood forests following harvest. Soil Sci. Soc. Am. J 63: 1424-1429.

Jackson, G.D. 2000. Effects of nitrogen and sulfur on canola yield and nutrient uptake. Agronomy Journal 92: 644-649.

Jang, A.,M., M. Bum, S. Kim, Y. Ahn, I.S. Kim and P.L. Bishop. 2005. Assessment of characteristics of biofilm formed on autotrophic denitrification. *J. Microbiol. Biotechnol.* 15: 455-460.

Kim, J.S., N. Ohte., M. Kawasaki., M. Katsuyama., N. Tokuchi and S. Hobara. 2003. interactive responses of dissolved sulfate and nitrate to disturbance associate wilt disease in a temperate forest. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49: 539-550.

Kishchuk, B.E. and R.P Brockley. 2002.Sulfur availability on lodgepole pine sites. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1325-1333.

Korom, S.F. 1992. Natural denitrification in the saturated zone: A review. *Water Resources Research* 28: 1657-1668.

Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. 1994. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salino sódicos. Editorial LIMUSA.

Longoria G., G. A., S. Alcalde B. y R. García L. 1975. Prevención de la clorosis férrica en suelos calcáreos mediante la liberación de Fe^{++} por tratamientos de preinundación. *Agrociencia* 19: 145-158.

López, A. J.G. 1994. El efecto de la aplicación de azufre elemental sobre la biomasa y propiedades físico-químico de un suelo salino-sódico. Tesis de doctorado. Universidad de Colima, Tecomán, Colima. 200 p.

Luna G.,M.L., C. Vega J., M.O Franco H., S. Vásquez M., N. Trujillo T., E. Ramírez F. y L. Dendooven. 2002. Actividad microbiana en los suelos. XXX Aniversario de biotecnología y bioingeniería. 328-332.

MacKown, C.T., S.J. Crafts-Brandner and T.G. Sutton. 1999. Relationships among soil nitrate, leaf nitrate, and leaf yield of burley tobacco: effects of nitrogen management. *Agronomy Journal* 91: 613-621.

Mann, L.D., D.D. Focht, H.A. Joseph and L.H. Stolzy. 1972. Increased Denitrification in Soils by Additions of Sulfur as an Energy Source. Published in J. Environ. Qual. 1: 329-332

Merino D. y J. Ansorena. 1993. Nitratos en hortalizas ¿un peligro para nuestra salud y la economía de los agricultores? *Sustrai* 31: 31-35.
http://www.fraisoro.net/articulos/31_31_35.pdf (consultado el 10 de mayo de 2009)

Nguyen, M.L., and K.M. Goh. 1992. Nutrient cycling and losses based on a mass-balance model in grazed pastures receiving long-term superphosphate applications in New Zealand. 2. Sulphur *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 119:107-122.

Perdomo, C.H., O.N. Casanova., V.S. Ciganda. 2001. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia* 5: 10-22.

Pliego L., A. Ocaña y C. Lluch. 2003. Crecimiento, fijación de nitrógeno, acumulación y asimilación de nitratos con dosis de nitrógeno en frijol. *Terra* 21: 213-223.

Porta, C.J. y M. López-Acevedo R. 2005. *Agenda de campo de suelos*. Mundi-Prensa Libros, Sexta Edición. 541 p.

Rodríguez-Pérez, L. 2006. Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en las plantas. *Agronomía Colombiana* 24: 28-37.

Ruiz C. E., R.A. Aldaco N., J.A. Montemayor T., M. Fortis H., J. Olague R., y J.C. Villagomez G. 2007. Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Tec. Pecu. Mex.* 45: 19-24.

Sánchez-Pérez, J.,M., A. Iribar, M. Martínez, C. García-Linares e I. Antigüedad. 2003. Eliminación de nitratos por desnitrificación en la zona no saturada del suelo en un humedal del cinturón peri-urbano de vitoria-gasteiz. *Estudios de la zona no saturada del suelo* 4: 385-390.

Santamarina-Cesar, J., U. Figueroa-Viramontes y Ma. del C. Medina-Morales. 2004. Productividad de la alfalfa en condiciones de salinidad en el distrito de riego 017, Comarca Lagunera. *Terra* 22: 343-349.

Sengupta, S. S., J. Ergas. 2006. Autotrophic Biological Denitrification with Elemental Sulfur or Hydrogen for Complete Removal of Nitrate-Nitrogen from a Septic System Wastewater. <http://ciceet.unh.edu/news/releases/springReports/pdf/sengupta.pdf> (consultado el 10 de agosto de 2009).

Serrato S., R., A. Ortiz A., J. Dimas L. y S. Berumen P. 2002. Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la comarca lagunera, México. *Terra* 20: 329-336.

Sierra B, A., A. Lancellotti M. y I. Vidal P. 2007. Azufre elemental como corrector del pH y la fertilidad de algunos suelos de la III y IV región de Chile. *Agricultura Técnica* 67: 173-181.

Stenberg, M., H. Aronsson, B. Linden, T. Rydberg and A. Gustafson. 1999. Soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses in soil tillage systems combined with a catch crop. *Soil Tillage Research* 50: 115-125.

Uribe M., H. R., G. Alcantar G., J.L. Tirado T., A. Aguilar S. y M. Sandoval V. 1995. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de compuestos nitrogenados y producción de materia seca en cebolla. *Terra* 13: 49-59.

Vélez J., L., G. Arteaga M., J. Castillo R. y J.C. Menjivar F. 2006. Variaciones en el pH de la rizosfera y en el porcentaje de materia seca de *Vicia sativa* al aplicar dos fuentes fosfatadas de baja solubilidad en un Andisol del departamento de Nariño, Colombia. – 23 55 (2) http://www.inta.gov.ar/sanpedro/info/bol/2006/161_bb.htm#4 (consultado el 10 de febrero de 2008).

Weil, R.R. and S.K. Mughogho. 2000. Sulfur nutrition of maize in four regions of Malawi. *Agronomy Journal* 92: 649-656.

Yagodin, B., P. Smirnov and A. Peterburgski. 1982. Agroquímica I. Traducción al español por Rincon. Z.R y F. Vargas Salazar. 1986. Editorial Mir Moscú. 416 p.

ANEXOS

Cuadro A.1. Análisis de varianza para NO_3^- en la solución de suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	208	1.7	0.1845
C	3	208	1.94	0.124
CM	1	208	33.67	<.0001
A	1	208	3.39	0.0669
D	9	208	0.67	0.7348
C*CM	3	208	3.57	0.015
C*A	3	208	6.04	0.0006
C*D	24	208	0.27	0.9998
CM*A	1	208	10.23	0.0016
CM*D	9	208	0.34	0.9615
A*D	9	208	0.21	0.9926
C*CM*A	3	208	1.07	0.3629
C*CM*D	23	208	0.2	1
CM*A*D	9	208	0.05	1
C*CM*A*D	47	208	0.26	1

- BLO, Bloque; C, cultivo; CM, Profundidad; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.2. Análisis de varianza para SO_4^{2-} en la solución de suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	180	19.71	<.0001
C	3	180	5.03	0.0023
CM	1	180	265.77	<.0001
A	1	180	16.27	<.0001
D	8	180	1.72	0.096
C*CM	3	180	2.46	0.0646
C*A	3	180	2.46	0.0645
C*D	20	180	0.67	0.8533
CM*A	1	180	0.01	0.9294
CM*D	8	180	0.93	0.4909
A*D	8	180	0.39	0.9237
C*CM*A	3	180	1.26	0.2888
C*CM*D	20	180	0.6	0.9118
CM*A*D	8	180	0.85	0.556
C*CM*A*D	39	180	0.68	0.9221

- BLO, Bloque; C, cultivo; CM, Profundidad; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.3. Análisis de varianza para NO_3^- en tejido vegetal.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	138	14.36	<.0001
C	3	138	110.86	<.0001
A	1	138	27.78	<.0001
D	9	0	0	.
C*A	3	138	10.24	<.0001
C*D	22	138	1.99	0.0088
A*D	9	138	0.27	0.9808
C*A*D	22	138	0.3	0.999

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.4. Análisis de varianza para % S en tejido vegetal.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	138	13.2	<.0001
C	3	138	252.89	<.0001
A	1	138	50.14	<.0001
D	9	138	0	1
C*A	3	138	2.82	0.0413
C*D	22	138	3.58	<.0001
A*D	9	138	0.43	0.9166
C*A*D	22	138	0.53	0.9562

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.5. Análisis de varianza para Cu en tejido vegetal.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	5.64995085	1.19	0.3342
C	3	13.9173003	1.96	0.1698
A	1	7.19832992	3.04	0.1047
C*A	3	37.4975398	5.28	0.0133

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre.

Cuadro A.6. Análisis de varianza para Fe en tejido vegetal.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	16952.4819	0.3	0.743
C	3	285528.788	3.41	0.0499
A	1	3950.0209	0.14	0.7127
C*A	3	126511.201	1.51	0.2579

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre.

Cuadro A.7. Análisis de varianza para Mn en tejido vegetal.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	86.449988	0.3	0.7458
C	3	1466.70668	3.39	0.0506
A	1	79.8765	0.55	0.4697
C*A	3	320.029949	0.74	0.5466

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre.

Cuadro A.8. Análisis de varianza para Zn en tejido vegetal.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	256.812134	0.4	0.6783
C	3	699.362744	0.73	0.5543
A	1	268.658617	0.84	0.3769
C*A	3	596.176904	0.62	0.6149

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre.

Cuadro A.9. Análisis de varianza para pH del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	1	0.3788
C	3	30	1	0.407
A	1	30	0.99	0.3269
D	1	30	0.99	0.3273
C*A	3	30	1	0.4073
C*D	3	30	1	0.4069
A*D	1	30	1	0.3261

C*A*D	3	30	1	0.4073
-------	---	----	---	--------

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.10. Análisis de varianza para CE del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	5.44	0.0096
C	3	30	1.24	0.314
A	1	30	0.1	0.7583
D	1	30	14.29	0.0007
C*A	3	30	3.41	0.0301
C*D	3	30	0.59	0.6275
A*D	1	30	0.36	0.5557
C*A*D	3	30	0.27	0.8495

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.11. Análisis de varianza para MO del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	16.1	<.0001
C	3	30	1.11	0.3597
A	1	30	0.81	0.3753
D	1	30	1.37	0.2511
C*A	3	30	1.05	0.3862
C*D	3	30	0.32	0.8114
A*D	1	30	0.02	0.8964
C*A*D	3	30	0.29	0.8331

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.12. Análisis de varianza para CIC del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	206.830633	5.69	0.0156
C	3	8.4496833	0.15	0.9248
A	1	11.5370667	0.63	0.4391
C*A	3	96.6991667	1.77	0.1985

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre.

Cuadro A.13. Análisis de varianza para NO₃⁻ del suelo al inicio y final.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	0.17	0.8406
C	3	30	0.53	0.6675
A	1	30	1.05	0.3135
D	1	30	49.45	<.0001
C*A	3	30	0.98	0.4138
C*D	3	30	0.47	0.7042
A*D	1	30	0.98	0.3294
C*A*D	3	30	0.85	0.4766

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.14. Análisis de varianza para Na del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	6.91	0.0034
C	3	30	0.77	0.5213
A	1	30	1.81	0.1892
D	1	30	38.67	<.0001
C*A	3	30	0.31	0.819
C*D	3	30	0.62	0.6094
A*D	1	30	0	0.9745
C*A*D	3	30	0.66	0.5802

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.15. Análisis de varianza para K del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	3.8	0.0338
C	3	30	0.3	0.823
A	1	30	0.52	0.4771
D	1	30	28.42	<.0001
C*A	3	30	1.79	0.1701
C*D	3	30	0.85	0.4785
A*D	1	30	2.33	0.137
C*A*D	3	30	1.19	0.3285

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.16. Análisis de varianza para Ca del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	3.58	0.0404
C	3	30	0.13	0.9413
A	1	30	0.03	0.8586
D	1	30	17.5	0.0002
C*A	3	30	1.21	0.3235
C*D	3	30	0.79	0.5076
A*D	1	30	3	0.0935
C*A*D	3	30	0.21	0.8861

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.17. Análisis de varianza para Mg del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	30	2.14	0.1348
C	3	30	0.24	0.8672
A	1	30	0.09	0.765
D	1	30	7.95	0.0084
C*A	3	30	1.1	0.3628
C*D	3	30	0.43	0.7355
A*D	1	30	0.71	0.4051
C*A*D	3	30	0.57	0.6382

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.18. Análisis de varianza para Cu del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	131.099054	0.73	0.4919
C	3	308.183771	1.14	0.3493
A	1	80.9900521	0.9	0.3509
D	1	157.26728	1.74	0.1967
C*A	3	255.647658	0.94	0.4314
C*D	3	278.101385	1.03	0.3944
A*D	1	89.1620083	0.99	0.3281
C*A*D	3	272.741531	1.01	0.4029

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.19. Análisis de varianza para Fe del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	35.3734429	5.12	0.0122
C	3	12.6219187	1.22	0.3204
A	1	0.4179467	0.12	0.7305
D	1	276.005004	79.86	<.0001
C*A	3	3.2844186	0.32	0.8131
C*D	3	9.5676097	0.92	0.4417
A*D	1	0.523963	0.15	0.6998
C*A*D	3	5.7440646	0.55	0.6494

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.20. Análisis de varianza para Mn del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	52.3692943	5.94	0.0067
C	3	12.1748704	0.92	0.4427
A	1	0.0039042	0	0.9765
D	1	357.634922	81.14	<.0001
C*A	3	16.3171416	1.23	0.3146
C*D	3	7.5235448	0.57	0.6397
A*D	1	3.1451648	0.71	0.4049
C*A*D	3	6.525628	0.49	0.6895

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.21. Análisis de varianza para Zn del suelo.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr>F
BLO	2	20.7561447	7.08	0.003
C	3	3.8835099	0.88	0.4609
A	1	0.4475672	0.31	0.5846
D	1	245.621533	167.6	<.0001
C*A	3	3.6531956	0.83	0.4874
C*D	3	3.7059462	0.84	0.4812
A*D	1	1.7089427	1.17	0.2888
C*A*D	3	3.9256591	0.89	0.4561

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre; D, Tiempo.

Cuadro A.22. Análisis de varianza para rendimiento de materia seca.

F.V	G.L	C.M	Fc	Pr > F
BLO	2	14	0.3	0.7424
C	3	14	21.91	<.0001
A	1	14	8.29	0.0121
C*A	3	14	4.24	0.0251

- BLO, Bloque; C, cultivo; A, azufre.

Cuadro A.23. Desviación estándar de la variable nitratos en el tejido vegetal a través del tiempo.

Cultivos	Desviación Estándar									
	10 dds	20 dds	30 dds	40 dds	50 dds	60 dds	70 dds	80 dds	90 dds	100 dds
Avena	353.92	199.2 1	277.2 2	310.6 2	239.3 2					
Maíz	288.08	233.6 6	250.5 1	236.0 8	270.3 8	250.0 6	208.5 5	161.5 3	74.02	134.6 7
Alfalfa	404.46	376.3 9	347.9 0	359.7 6	332.2 9	379.8 4	436.3 5	373.9 6	455.3 0	358.9 7
Pasto	312.53	314.8 4	283.7 7	386.4 9	223.4 4	478.7 8	546.2 0	614.8 3	427.0 5	342.2 3

- dds, días después de la siembra

Cuadro A.24. Desviación estándar de la variable % de S en el tejido vegetal a través del tiempo.

Cultivos	Desviación Estándar									
	10 dds	20 dds	30 dds	40 dds	50 dds	60 dds	70 dds	80 dds	90 dds	100 dds
Avena	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02					
Maíz	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Alfalfa	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04
Pasto	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00

- dds, días después de la siembra