

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA



EFFECTO DEL AZUFRE SOBRE EL NITROGENO
FERTILIZANTE EN SUELOS CALCAREOS
DE MARIN, N. L.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO FITOTECNISTA
PRESENTA

JUAN FERNANDO ALBALATE Y DE ALBA

MARIN, N. L.

ABRIL DE 1992

T

S639

A4

G.1



1080060692

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA



EFFECTO DEL AZUFRE SOBRE EL NITROGENO
FERTILIZANTE EN SUELOS CALCAREOS
DE MARIN, N. L.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO FITOTECNISTA
PRESENTA

JUAN FERNANDO ALBALATE Y DE ALBA

MARIN, N. L.

ABRIL DE 1992

10974^m

T
5639
A4



040.631

FA3

1992

C.5

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA



EFFECTO DEL AZUFRE SOBRE EL NITROGENO FERTILIZANTE

EN SUELOS CALCAREOS DE MARIN, N.L.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO AGRONOMO FITOTECNISTA

PRESENTA

JUAN FERNANDO ALBALATE Y DE ALBA

MARIN, N.L.

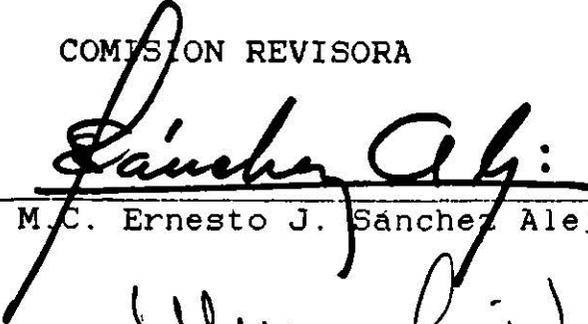
ABRIL DE 1992

EFFECTO DEL AZUFRE SOBRE EL NITROGENO
FERTILIZANTE EN SUELOS CALCAREOS DE MARIN, N.L.

ESTA TESIS FUE REALIZADA EN EL PROYECTO DE REGIONALIZACION DE
LA INVESTIGACION (SEP), AREA FORRAJES, EN LA LINEA: FERTILI-
ZACION ORGANICA E INORGANICA, Y ACEPTADA COMO REQUISITO PAR-
CIAL PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO AGRONOMO
FITOTECNISTA.

COMISION REVISORA

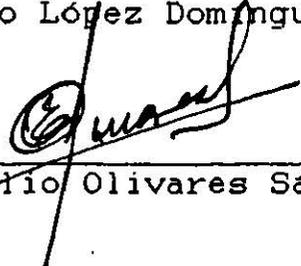
PRESIDENTE:


M.C. Ernesto J. Sánchez Alejo.

SECRETARIO:


D.C. Ulrico López Domínguez.

VOCAL:


Ph. D. Emilio Olivares Sáenz.

Señor Jesús: Gracias por haberme dado la familia que tengo y la educación que me dieron, por permitirme llegar al final de este camino y empezar otro lleno de compromisos, trabajo y superación.

DEDICATORIAS

A mis padres: Helios Albalate Olaria y Rosángela de Alba de Albalate.
Por su amor, comprensión, prudencia y apoyo en todo momento, no sólo en la elaboración de este trabajo sino en todos los días de mi vida y en todas las cosas que hago.

A mis hermanos: Patricio Eugenio y Pedro Alonso.
Por darme esa amistad y apoyo que sólo un hermano puede dar.

A mis abuelos: Pedro Albalate Edo y María Olaria de Albalate.
Por su enorme cariño para conmigo.

A mis amigos: Luis Antonio Ordoñez Pérez, Pablo César González Canales, Antonio Costilla V. Gilberto Ordoñez Pérez, Andrés V. Santos Aguirre, Daniel Tello Sánchez, Gerardo de Jesús Arreola Alcalá, Miguel Castro.

CONTENIDO

PAGINA

Indice de Cuadros y Figuras.....	i
INDICE del Apéndice.....	111
LISTA de Abreviaturas.....	v
RESUMEN.....	vi
SUMMARY.....	ix
1. INTRODUCCION.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1. Factores que determinan la disponibilidad de los elementos nutritivos en suelos calcáreos..	4
2.1.1. Textura.....	4
2.1.2. pH.....	4
2.1.3. Actividad Microbiana.....	4
2.1.4. Materia Orgánica.....	5
2.1.5. Temperatura y Humedad.....	5
2.1.6. Potencial Oxido-Reducción.....	6
2.1.7. Contenido de Carbonato de Calcio.....	6
2.2. Los fertilizantes nitrogenados de uso comun. sus características físicas y químicas.....	7
2.2.1. Nitrato de Amonio.....	7
2.2.2. Sulfato de Amonio.....	8
2.2.3. Urea.....	8
2.2.4. Propiedades fundamentales del nitrato de amonio, sulfato de amonio y urea....	9
2.3. Dinámica de los fertilizantes nitrogenados en suelos calcáreos.....	9
2.3.1. Hidrólisis de la urea.....	10
2.3.2. Actividad de la ureasa.....	12
2.3.3. Nitrificación de la urea.....	13
2.3.4. Dinámica del sulfato de amonio y nitrato de amonio.....	15
2.4. El azufre, sus características físicas y químicas.....	18
2.4.1. Usos del azufre.....	19
2.4.2. Oxidación del azufre.....	19
2.5. Efectos de la oxidación del azufre en suelos calcáreos.....	22
2.6. Efectos de la acidificación del azufre sobre el nitrógeno fertilizante y el rendimiento de los cultivos.....	25
2.7. El sorgo forrajero; su respuesta a la fertilización nitrogenada en suelos calcáreos.....	26
3. MATERIALES Y METODOS.....	30
3.1. Descripción de la zona de estudio.....	30
3.1.1. Localización geográfica.....	30
3.1.2. Clima.....	30
3.1.3. Suelos.....	31
3.2. Muestreo de los suelos.....	31
3.3. Experimento de laboratorio.....	32
3.4. Experimento de invernadero.....	33
3.4.1. Aplicación de azufre.....	34

3.4.2. Siembra.....	35
3.4.3. Aplicación de nitrógeno.....	35
3.4.4. Cosecha.....	36
3.5. Determinación de proteína.....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	37
4.1. Experimento de laboratorio.....	37
4.1.1. pH del suelo.....	37
4.1.2. Conductividad Eléctrica.....	44
4.2. Experimento de invernadero.....	49
4.2.1. Rendimiento.....	49
4.2.1.1. Planta completa.....	49
4.2.1.2. Hojas.....	53
4.2.1.3. Tallo.....	57
4.3. Nitrógeno total y proteína.....	59
5. CONCLUSIONES.....	62
6. RECOMENDACIONES.....	64
7. BIBLIOGRAFIA.....	65
8. APENDICE.....	70

Indice de Cuadros y Figuras

CUADRO		PAGINA
1	Propiedades físicas del azufre.....	18
2	Tratamientos probados en el experimento de invernadero.....	34
3	Efecto promedio de las dosis de azufre y el tiempo de incubación sobre el pH del suelo....	39
4	Comparación de medias del efecto del tiempo de incubación del azufre sobre el pH del suelo...	43
5	Comparación de medias de las dosis de azufre con un tiempo de incubación de cuatro semanas.	44
6	Comparación de medias de las dosis de azufre sobre la conductividad eléctrica del suelo....	47
7	Comparación de medias del tiempo de incubación del azufre sobre la conductividad eléctrica del suelo.....	48

8	Valores promedio de materia verde y materia seca de planta completa, hojas y tallo de sorgo.....	50
9	Comparación de medias de rendimiento de materia verde en hojas con la aplicación de azufre.....	54
10	Valores promedio de las fuentes nitrogenadas sobre el rendimiento promedio de materia verde en hojas.....	56
11	Comparación de medias de las fuentes nitrogenadas sobre el rendimiento de materia verde en tallo.....	57

FIGURA

1	Efecto de las dosis de azufre y del tiempo de incubación sobre el pH del suelo.....	38
2	Cambios en los valores de conductividad eléctrica a través del tiempo de incubación y de cuatro diferentes dosis de azufre.....	45

Indice del Apéndice

CUADRO	PAGINA
1A	Análisis de varianza del efecto de la dosis y el tiempo de incubación del azufre sobre el pH del suelo.....70
2A	Comparación de medias del efecto de las dosis de azufre sobre el pH del suelo..... 70
3A	Comparación de medias de las dosis de azufre en un tiempo de incubación de una semana.....71
4A	Comparación de medias de las dosis de azufre con un tiempo de incubación de dos semanas.....71
5A	Análisis de varianza del efecto de la dosis y el tiempo de incubación del azufre sobre la conductividad eléctrica del suelo.....72
6A	Análisis de varianza del efecto de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia verde en planta completa.73
7A	Análisis de varianza del efecto de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en planta completa..74

8A	Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia verde en hojas.....	75
9A	Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en hojas.....	76
10A	Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia verde en tallo.....	77
11A	Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en tallo.....	78
12A	Resultados promedio de rendimiento de materia seca. pH, CE, N total y Proteína.....	79

Lista de Abreviaturas.

Cal.....	Calorías
cc.....	Centímetros cúbicos
DMS.....	Diferencia mínima significa- tiva.
meq.....	miliequivalen- te
msnm.....	metros sobre el nivel del mar
ppm.....	Partes por millón
>.....	Mayor que

RESUMEN.

El alto contenido de carbonato de calcio presente en los suelos de Marín, N.L. y el pH alcalino consecuente del mismo, provoca una baja disponibilidad de elementos nutrientes para las plantas. Por otro lado, se ha observado que las pérdidas del nitrógeno fertilizante en estos suelos son muy considerables lo cual se atribuye a las características mismas del suelo.

Una de las formas de solucionar este problema es mediante la aplicación de azufre al suelo, para lograrlo se planteó el objetivo de estudiar el efecto de la oxidación del azufre en los suelos calcáreos de Marín, N.L. y evaluar el efecto aditivo de la acidificación del azufre sobre los fertilizantes nitrogenados.

El experimento se realizó con un suelo proveniente de la Estación Agrícola Experimental de la Facultad de Agronomía de la U.A.N.L. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de Suelos, Aguas y Plantas, Laboratorio de Bromatología e Invernadero de la misma Institución.

El efecto de la oxidación del azufre se estudió bajo condiciones de laboratorio durante un tiempo de 1, 2 y 4 semanas, después de aplicar las dosis de 0, 20, 160 y 320 meq S 100 g^{-1} de suelo. Al término de este tiempo de incubación, se midió el pH y la conductividad eléctrica

del suelo. En el laboratorio, durante el desarrollo del experimento, el suelo se mantuvo al 80 por ciento de la capacidad de campo para su incubación y a temperatura ambiente.

Se encontró que la aplicación de azufre reduce significativamente el pH del suelo, siendo más notable este efecto con la aplicación de $320 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$, sin embargo, por motivos prácticos, es más aceptable la dosis de $20 \text{ meq S } 100\text{g}^{-1}$, la cual reduce el pH del suelo hasta la neutralidad después de dos semanas de incubación.

Del mismo modo, se encontró que al incrementar la dosis de azufre, se incrementó la conductividad eléctrica del suelo, debido al aumento en la cantidad de sales solubles.

Por otro lado, el efecto de la acidificación del azufre sobre los fertilizantes nitrogenados, se evaluó en invernadero en el cual se probaron cuatro fuentes nitrogenadas (sin N, urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio) en una dosis equivalente a 0 y 150 Kg/Ha; además de la aplicación de 0 y 20 meq S 100 g^{-1} sobre el rendimiento del sorgo forrajero.

La cosecha se realizó a los 95 días después de la siembra midiéndose el rendimiento en fresco y seco de la planta completa, hojas y tallo por separado. Además, se

analizó el contenido de proteína de cada uno de los tratamientos.

El mayor rendimiento de materia seca de sorgo en planta completa y el mayor contenido de proteína, se logró con la aplicación de urea, independientemente de si se aplico azufre o no. El mayor rendimiento de materia verde se obtuvo con la aplicación de nitrato de amonio con azufre. Por otro lado, se observó que la aplicación de sulfato de amonio con o sin azufre, afectó el rendimiento del cultivo lo cual probablemente se debió a la alta concentración de sales formadas por esta combinación fertilizante.

SUMMARY.

Soils in Marín, N.L. have a high concentration of CaCO_3 and are alkaline. These factors reduce nutrient availability and promote losses from nitrogen fertilizers.

One way to solve this problem is by the application of sulfur to the soil. Four sulfur doses were applied in three incubation times. The results of this experiment showed that pH decreased as the doses of sulfur increased.

In another experiment, four nitrogen sources (without N, urea, ammonium sulfate and ammonium nitrate) were compared at two sulfur levels (0 and 20 meq S 100 g^{-1}). The best results in production of fresh matter were obtained with ammonium nitrate plus sulfur. The highest yields of dry matter were obtained with urea (with or without sulfur).

Ammonium sulfate plus sulfur combination and ammonium sulfate had a toxic effects to the crop.

The highest protein percent were obtained with urea.

1. INTRODUCCION.

Los suelos de Marín, N.L. son del tipo calcáreo, esto significa que contienen cantidades apreciables de carbonatos de calcio y magnesio. La acumulación de estos carbonatos, en especial los de calcio, se da a medida que el clima se vuelve árido (Fitzpatrick, 1985). Esta acumulación trae consigo un incremento en el pH del suelo.

El pH alcalino del suelo causado por la acumulación de carbonatos de calcio, ocasiona pérdidas del nitrógeno fertilizante en forma de amoníaco en su proceso de descomposición en el suelo. además de limitar la disponibilidad de algunos elementos tales como fósforo, fierro, manganeso y zinc.

Este proceso en los suelos calcáreos, provoca que la fertilización nitrogenada no sea eficiente para incrementar el rendimiento de los cultivos. Esto se debe a que los fertilizantes nitrogenados más comúnmente empleados (urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio) en su proceso de descomposición en el suelo, elevan en principio el pH por la acumulación del amonio, y lo reducen después por efecto de la nitrificación del mismo. Este aumento inicial del pH no es favorable para los cultivos debido a que inhibe la nitrificación, reduciendo así la cantidad de nitrógeno aprovechable para las plantas.

El azufre elemental se utiliza como fertilizante para las plantas. pero también en el acondicionamiento de tierras alcalinas por su efecto acidificante en el suelo. Cuando se aplica azufre elemental al suelo, este se oxida por microorganismos pertenecientes al género Thiobacillus spp. y en condiciones ideales de humedad (cercanas a la capacidad de campo), se transforma en ácido sulfúrico reduciendo el pH del suelo (Sánchez et al., 1991).

Este efecto acidificante del azufre es favorable ya que puede amortiguar el efecto alcalinizante del amonio después de la fertilización, incrementa la permanencia del amonio en el suelo y consecuentemente favorece la nitrificación de los fertilizantes, además de la solubilización de nutrimentos que no se encontraban disponibles para las plantas.

El sorgo forrajero es de los principales cultivos utilizados para la alimentación del ganado. Es un cultivo resistente a las altas temperaturas y a la salinidad, de abundante área foliar y demanda grandes cantidades de nitrógeno fertilizante por lo que es de suma importancia conocer su respuesta a la aplicación de azufre al suelo y su efecto sobre el nitrógeno fertilizante en suelos calcáreos.

Los objetivos de este trabajo fueron los siguientes:

- 1.- Estudiar el efecto de la oxidación del azufre en los suelos calcareos de Marín. N.L.
- 2.- Evaluar el efecto aditivo de la acidificación del azufre sobre los fertilizantes nitrogenados en suelos calcáreos.
- 3.- Evaluar el efecto acidificante del azufre sobre los fertilizantes nitrogenados a través del rendimiento del sorgo forrajero.

Las hipótesis que se plantearon en este trabajo son las siguientes:

- Ho1) El azufre agrícola no se oxida en los suelos calcareos de Marín. N.L.
- Ho2) No existe efecto aditivo de la acidificación causada por el azufre sobre los fertilizantes nitrogenados.
- Ho3) Es indiferente el efecto de la adición de azufre en los fertilizantes nitrogenados sobre el rendimiento del sorgo forrajero.

2. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1. Factores que determinan la disponibilidad de los elementos nutritivos en suelos calcáreos.

2.1.1. Textura.- Los suelos calcáreos de Marín, N.L. presentan una textura de tipo arcillosa (50 % de arcilla), este tipo de suelos tienen la capacidad de retener agua y nutrientes disponibles para las plantas sobre las superficies de las arcillas (Foth, 1985), afectando así la absorción de estos y el rendimiento de los cultivos.

2.1.2. pH.- La absorción de algunos elementos nutrientes está afectada por el pH del suelo. Al aumentar el pH hacia valores alcalinos la disponibilidad de microelementos tales como fierro, manganeso y zinc se reduce, además del fósforo; por el contrario la disponibilidad del calcio y del magnesio se incrementan (Buckman, 1977). La población bacteriana se ve influenciada por el pH del suelo. A valores altamente ácidos o alcalinos se inhiben las bacterias más comunes del suelo, ya que para la mayoría de las especies el óptimo está cercano a la neutralidad (Alexander, 1981)

2.1.3. Actividad microbiana.- Los suelos de Marín, N.L. son calcáreos, compactos y con bajo contenido de materia orgánica, estas condiciones son desfavorables para el desarrollo apropiado de los microorganismos del suelo. No obstante, el riego y la labranza del suelo favorecen el

incremento de la población y actividad bacterianas (Alexander, 1980).

2.1.4. Materia orgánica.- Los suelos de la región presentan menos del 2% de materia orgánica, lo cual los clasifica como pobres (Aguirre, 1982). Es por esta razón que estos suelos presentan un bajo contenido de nitrógeno y fósforo, ya que estos elementos son constituyentes importantes de la materia orgánica. La población bacteriana también se ve reducida y por lo tanto la mineralización de los elementos nutritivos, ya que tienen que competir estos microbios con las plantas superiores por el nitrógeno y fósforo provenientes de la materia orgánica (Foth, 1985).

2.1.5. Temperatura y humedad.- Los procesos químicos y las actividades de los microorganismos que transforman los nutrientes de las plantas en formas aprovechables son influidos por la temperatura (Foth, 1985).

La mayoría de las bacterias del suelo son del tipo mesófilo, lo cual significa que proliferan a una temperatura cercana a los 25 y 30 grados centígrados (Alexander, 1980). En cuanto a la humedad, este es un factor esencial que afecta el número y las actividades de los microorganismos del suelo.

La cantidad óptima de agua para la mayoría de los microorganismos del suelo fluctúa entre el 50 y el 80 por ciento de la capacidad de campo, ya que la mayoría de los microbios no toleran suelos saturados (Foth, 1985).

2.1.6 Potencial Oxido-Reducción.- El potencial óxido-reductor de los suelos está relacionado con la disponibilidad de ciertos elementos nutritivos (Fassbender, 1984). La oxidación de elementos tales como el fierro y manganeso, el paso de sulfuros a sulfatos, y la nitrificación requieren de oxígeno. El caso contrario es la reducción, la cual se presenta bajo condiciones anaeróbicas.

2.1.7. Contenido de Carbonato de Calcio.- Los carbonatos de calcio se acumulan a medida que el clima se vuelve árido. Su presencia domina el curso del desarrollo del suelo ya que con un uno por ciento de éste compuesto es suficiente para elevar el pH por encima de la neutralidad y sostener un alto nivel de actividad biológica (Fitzpatrick, 1985).

Los CaCO_3 se disuelven con relativa facilidad y son distribuidos en el suelo con rapidez:



Los iones de calcio resultantes reemplazan al H^+ y Al^{3+} del complejo de intercambio, resultando los cambios en el pH y las otras características del suelo (Fassbender, 1984).

2.2. Los fertilizantes nitrogenados de uso común, sus características físicas y químicas.

La urea, el sulfato de amonio, y el nitrato de amonio, son los tres fertilizantes nitrogenados más comunmente empleados como fuente de abastecimiento de nitrógeno para las plantas; son tres fertilizantes que difieren en su concentración y en sus propiedades físicas y químicas. Es importante conocer estas propiedades para saber la reacción que presentarán en los suelos donde sean aplicados.

2.2.1. Nitrato de Amonio.- El nitrato de amonio se obtiene por cuatro procesos diferentes: (a) Granulación a rocío, (b) Proceso Stegel, (c) Cristalización y (d) Graneo.

En el proceso de granulación, el ácido nítrico reacciona con el amoníaco dentro de una corriente que circula. La reacción es la siguiente:



De esta forma se obtiene una solución de nitrato de amonio al 83% y conteniendo menos del 5% de agua, la cual se bombea a la parte superior de una torre de granulación y se rocía hacia abajo dentro de la torre. Las gotitas de nitrato de amonio se transforman en gránulos durante la caída. Estos gránulos se secan y se almacenan en sacos cubiertos con un agente arcilloso que los protege de la humedad y los mantiene separados. El producto terminado se vende garantizando un contenido de nitrógeno del 33.5% (Sauchelli, 1966).

2.2.2. Sulfato de Amonio.— Este fertilizante, es producto de la reacción del ácido sulfúrico con el amoníaco El amoníaco gaseoso es introducido en el reactor que contiene H_2SO_4 en una concentración de 30 a 50%. La reacción es la siguiente:



La solución de sulfato de amonio fluye del reactor a un cristalizador, de donde se extraen los cristales, se centrifugan y se secan para venderlos a granel o en costales (Sauchelli, 1966).

2.2.3. Urea.— La obtención de la urea consiste en hacer reaccionar el CO_2 con el NH_3 en fase líquida a temperatura y presión elevadas. La reacción es la siguiente:



El carbamato de amonio que se forma primero como producto intermedio, se descompone posteriormente en urea y agua.

La urea se presenta en forma de gránulos blancos con diámetro de 3 a 4 mm y contiene el porcentaje más alto (46%) de nitrógeno, de entre cualquier material sólido comúnmente empleado como fertilizante (Sauchelli, 1966).

2.2.4. Propiedades fundamentales del nitrato de amonio, sulfato de amonio y urea (Tisdale, 1982):

Fertilizante	NA	SA	U
Fórmula	NH_4NO_3	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
Color	Blanco cristalino (varía)	Blanco ó café cristalino	Blanco cristalino
Cont. de N(%)	33.5	20.5	46.0
Punto de fusión (°C)	170.4	513.0	132.7
Densidad (g/cc)	1.725	1.77	1.335
Solubilidad (g/100ml a 100°C)	843.0	103.8	733.0
Punto higroscópico a 30°C (%)	59.4	80.4	72.0
Contenido de azufre	0	24.0	0
Indice de acidez	120.6	110.0	84.0

2.3. Dinámica de los fertilizantes nitrogenados en suelos calcáreos.

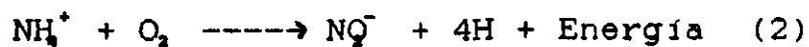
Algunos de los factores que determinan la transformación del nitrógeno hacia formas aprovechables para las plantas son: la hidrólisis de la urea, la nitrificación de los fertilizantes, la volatilización del amoníaco y la fijación ó retención de iones por el suelo. Estos procesos se ven afectados en diferente grado por las propiedades del suelo, dentro de las cuales el pH ocupa un lugar importante en la transformación de este elemento (Sánchez, 1989).

La hidrólisis de la urea y la nitrificación son procesos que influyen en la eficiencia, de la urea en su caso o del nitrato de amonio y sulfato de amonio, en los suelos calcáreos del estado de Nuevo León (Sánchez, 1989). A continuación se discuten estas transformaciones químicas y biológicas que determinan el aprovechamiento de los fertilizantes nitrogenados por las plantas cultivadas en los suelos calcáreos.

2.3.1. Hidrólisis de la Urea.- La urea se hidroliza en el suelo, esta hidrólisis es catalizada por la enzima ureasa formando como producto final el carbamato de amonio:



Bajo condiciones de alcalinidad, la hidrólisis ocasiona la acumulación de amonio en la zona de aplicación lo que lleva a un incremento mayor del pH (Sánchez, 1989). La acumulación de amonio y el incremento del pH en el suelo, inhibe la cantidad de bacterias pertenecientes al género Nitrosomonas spp. ocasionando que el NH_4^+ no sea transformado totalmente a NO_3^- , quedando parcialmente oxidado como NO_2^- ; una reacción que se presenta en forma colateral es la descomposición del NH_4^+ en NH_3 según lo muestra la reacción (3):



La volatilización del amoníaco puede resultar muy significativa si el pH del sitio de aplicación del fertilizante es mayor de 7.0. Esto sucede principalmente en los suelos calcáreos o en donde la reacción de los fertilizantes es suficientemente alcalina para llevar el pH del suelo hacia la alcalinidad extrema. La aplicación del amoníaco anhidro o de fertilizantes que contienen urea pueden favorecer esta condición (Fenn y Kissel, 1976; Kissel et al; 1985; Sánchez, 1989).

El amoníaco aplicado en presencia de humedad cambia a hidróxido de amonio, en donde el amonio es adsorbido por la fracción coloidal del suelo y luego nitrificado (Ortiz,

1977):



2.3.2. Actividad de la urerasa.— La capacidad que tiene un suelo para hidrolizar urea se conoce como la actividad de la ureasa (Beri et al; 1978) y es una actividad sensible al pH, encontrando los valores óptimos entre 7.0 y 8.5 aunque varía con la fuente de ureasa.

La ureasa es liberada durante la mineralización de los residuos de cosecha, acelerando la hidrólisis de la urea y la volatilización del amoníaco (Voss, 1984). Dicha actividad aumenta con el contenido de carbón orgánico, la capacidad de intercambio catiónico, o el contenido de arcilla en el suelo; contrariamente disminuye con el contenido de arena.

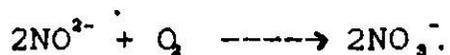
La temperatura del suelo afecta la actividad de la ureasa, cuando la temperatura aumenta de 10 a 70°C la actividad se incrementa y disminuye cuando alcanza 80°C (Sánchez, 1989).

Sánchez (1989), ha señalado que la hidrólisis de la urea alcanza su valor máximo 48 horas después de la aplicación del producto en suelos calcáreos de Marín, N.L. Del mismo modo, la volatilización del amoníaco fué mayor en la primer semana después de la aplicación de los fertilizantes al suelo y tendió a reducirse con el paso del tiempo.

Por otra parte, Monreal et al., (1986) y Savant et al (1987), mencionan que la tasa de urea hidrolizada se puede reducir con un método de aplicación adecuado. Estos autores indican que la tasa se reduce cuando se aplica urea en bandas, al contrario de la urea mezclada con el suelo, la cual se hidrolizó y oxidó en 8 días debido a la gran área de contacto expuesta del fertilizante a los microorganismos del suelo. También, las aplicaciones de azufre provocan una disminución en el pH del suelo, favoreciendo así la permanencia de amonio y retardando la hidrólisis de la urea (Díaz, 1991).

2.3.3. Nitrificación de la Urea.- Una vez hidrolizada la urea, el amonio acumulado es transformado a nitrato a través de la nitrificación. Este proceso es realizado por bacterias autótrofas pertenecientes a los géneros Nitrosomonas spp. y Nitrobacter spp. En el caso de las bacterias nitrosomonas, la reacción en el suelo es:

$2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$, y en el caso de nitrobacter es:



Estas bacterias dependen del suministro de amonio y nitratos para su desarrollo, es decir, la cantidad de substrato determina el número de microorganismos y consecuentemente el grado de oxidación (Boswell et al. 1985). Así mismo, este proceso de nitrificación señala tres

consideraciones importantes: (a) es un proceso biológico, por lo cual se ve afectado por las condiciones ambientales; (b) requiere oxígeno, y (c) es un proceso acidificante.

La nitrificación realizada por bacterias autotróficas es más rápida en suelos de pH neutro a ligeramente alcalino (pH de 7.0 a 8.0). Díaz (1991), reporta que la producción de nitratos en suelos calcáreos comienza desde los primeros cuatro días y que esta tiende a ser constante a través del tiempo de incubación (8 y 16 días). Por otro lado, en suelos ácidos con valores cercanos a pH 5.0 la nitrificación puede ocurrir, pero es realizada por organismos heterótrofos (Morril y Dawson, 1967; citados por Kissel et al. 1985).

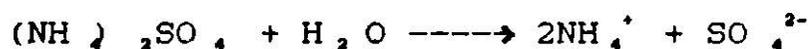
La temperatura también afecta el proceso de nitrificación, según Boswell et al. (1985), la tasa máxima se presenta entre los 30 y 35°C, sin embargo, ésta puede variar con el suelo.

La humedad es otro factor que afecta grandemente a la nitrificación. Nelson y Tisdale (1982), señalan que cuando el contenido de humedad aumenta por arriba de la capacidad de campo la nitrificación se reduce rápidamente, y cesa bajo condiciones de inundación. Abajo de la capacidad de campo la nitrificación continúa por un amplio intervalo de humedad del suelo, e incluso se extiende hasta las cercanías del punto de marchitez permanente, logrando el óptimo entre 70 y el 100% a la capacidad de campo.

El método de aplicación también determinante en el proceso de nitrificación Monreal et aln. (1986), indican que cuando la urea se aplica en bandas la nitrificación se inhibe debido a la alta concentración de amoníaco presente en la zona inmediata al fertilizante, o posiblemente a la dilución de inhibidores orgánicos.

2.3.4. Dinámica del sulfato de amonio y nitrato de amonio.-

Una vez aplicado al suelo y en presencia de humedad, el sulfato de amonio se disuelve rápidamente tomando lugar las siguientes reacciones:



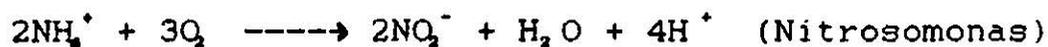
En el caso del nitrato de amonio, al aplicarlo al suelo proporciona las dos fuentes nitrogenadas para la nutrición de las plantas, el NH_4^+ y el NO_3^- .

El nitrógeno en forma amoniacal puede asumir diferentes estados o transformarse así:

a) NH_4^+ en la solución del suelo.

b) NH_4^+ intercambiable. En este estado, el amonio es almacenado en forma disponible para la planta sin que se encuentre expuesto a pérdidas significativas por lixiviación.

c) Nitrificación.- La transformación del NH_4^+ a NO_2^- y NO_3^- toma lugar mediante procesos bioquímicos de oxidación enzimática, con la intervención de bacterias nitrificantes según se describe en la siguiente reacción:



El NO_3^- resultante de la nitrificación puede ser: absorbido por la planta, inmovilizado por microorganismos, lixiviado, perdido como gas N_2 , ó almacenado por el complejo coloidal (Ortiz, 1977).

Díaz (1991), reporta que la nitrificación del sulfato y nitrato de amonio se inicia desde los primeros cuatro días, alcanzando su valor máximo a los 16.

d) Volatilización.- El amonio se descompone en amoníaco y puede perderse como gas, tal como se muestra en las reacciones (2) y (3) del punto 2.3.1. Se ha encontrado que las pérdidas por volatilización a partir del sulfato y nitrato de amonio son menores que en el caso de la urea (Kissel, 1985).

e) Fijación por las arcillas.- El ión NH_4^+ se puede fijar dentro de la estructura cristalina de las arcillas

expandibles 2:1, tales como vermiculita e illita, ya que éste tiene el tamaño justo (2.8\AA) para penetrar la abertura hexagonal presente en los átomos de oxígeno de la lámina de silicio en las arcillas (Boswell et al., 1985). Si la estructura cristalina se contrae, el NH_4^+ se fija y no tiene fácil acceso a las reacciones de intercambio iónico. Sánchez (1989), encontró que el contenido de NH_4^+ fijado en los suelos de Marín, N.L. fué de 343.0 ppm; para este experimento se evaluaron dos métodos, uno directo y otro indirecto. El método directo mostró que la cantidad de amonio fué de 31.65 ppm correspondientes al 12.77% del nitrógeno aplicado; el método indirecto reportó 48.96 ppm correspondientes al 20.68% del nitrógeno aplicado. Además, se observó que la cantidad de amonio fijado aumentó conforme el porcentaje de arcilla en el suelo se incrementó.

f) NH_4^+ en la planta.- Dependiendo de la especie cultivada y de diferentes factores del suelo, el nitrógeno en forma de NH_4^+ puede ser absorbido por las plantas en mayor o menor proporción. No obstante, el NO_3^- es la forma más abundante de nitrógeno utilizable y la más importante para ellas. En suelos donde el amonio es abundante, este puede ser tóxico para las plantas ya que su absorción impone un esfuerzo severo al metabolismo de los carbohidratos que proveen las cadenas de carbono para desintoxicarse. Por otra parte, las plántulas y las plantas muy jóvenes tienden a absorber amonio en forma diferente, en tanto que las maduras absorben

nitratos. Esto puede estar relacionado con la mayor abundancia de carbohidratos y poder reductor en las plantas maduras con activa fotosíntesis (Bidwell, 1983).

2.4. El azufre, sus características físicas y químicas.

El azufre es un elemento perteneciente a la familia VI-A de la Tabla Periódica. Su número atómico es 16. su masa atómica es 32.064 y como todos los miembros de esa familia tiene sus seis electrones en su nivel de energía fundamental más externo, por lo que reacciona como agente oxidante adquiriendo un estado de oxidación de -2 (Wood, 1974).

Las principales propiedades físicas del azufre son las siguientes:

Cuadro 1. Propiedades físicas del azufre (Wood, 1974).

Aspecto a temperatura ambiente	Sólido, frágil, amarillo.
Fórmula molecular	S ₂ , S ₄ , S ₆ , S ₈ .
Punto de fusión (°C)	119.0
Punto de ebullición (°C)	444.6
Energía de ionización, eV	10.36 (236 Kcal)
Radio del átomo (Å)	1.04
Radio del ión (E ²⁻), Å	1.84
Estructura electrónica	2, 8, 6.
Electronegatividad	2.5

El azufre es conocido desde hace miles de años en su estado elemental, habiendo sido los depósitos de azufre volcánico localizados en Sicilia los primeros explotados a nivel industrial.

En el mundo existen numerosos depósitos de azufre, ya sea en estado elemental o en forma de compuestos como son las piritas; también se encuentra asociado a los grandes yacimientos de hidrocarburos. Todos estos recursos son fuentes potenciales de obtención de azufre, siendo los más importantes debido a que destacan por su explotación: (a) recuperación del azufre de los crudos y gases amargos, (b) domos azufreros (Castillo, 1986).

2.4.1. Usos del azufre.— El azufre obtenido a nivel mundial es empleado mayormente en la producción de fertilizantes, ya sea como materia prima en dicha industria o aplicado directamente a los suelos, con la finalidad de cubrir deficiencias de este elemento. También se emplea en la recuperación de suelos salinos y alcalinos aumentando la disponibilidad de fósforo y de ciertos nutrientes en estos suelos (Reynoso, 1978).

2.4.2. Oxidación del azufre.— La mineralización de la materia orgánica tiene una gran importancia en la transformación del azufre en el suelo. El azufre se encuentra en el suelo en forma orgánica no asimilable directamente por la planta, y en

forma inorgánica como sulfato y S elemental (Reynoso, 1978).

El azufre que se encuentra en forma reducida y que es liberado en la mineralización de la materia orgánica, es oxidado de S elemental a SQ^{2-} por las bacterias pertenecientes a los géneros Beggiatoa spp, Thiotrix spp, Thiobacillus spp y Thioplaca spp, bajo condiciones aeróbicas (Fassbender, 1975; Tisdale y Nelson, 1982).

De forma similar a las nitrificantes, las bacterias obtienen su energía por la oxidación de un material inorgánico, en este caso el azufre, y su carbono del CO_2 proveniente de la atmósfera del suelo. Una multitud de organismos toma parte en la oxidación del azufre, algunos de los cuales realizan el proceso sólomente en una o dos etapas y la reacción da como resultado principalmente la producción de ácido sulfúrico. Esta reacción requiere oxígeno molecular y produce ácido sulfúrico:



La producción de ácido sulfúrico por medio de esta reacción provoca una disminución en el pH del suelo (Tisdale,

1982).

Los factores que afectan la oxidación del S en los suelos son: población bacteriana del suelo, la temperatura, la humedad, el pH y el grado de finura del S aplicado (Tisdale, 1982).

A mayor temperatura, mayor proporción de oxidación del S en el suelo. El máximo de oxidación según Tisdale y Nelson (1982) ocurre entre 27 y 35°C.

La humedad recomendada es próxima a la que corresponde a la capacidad de campo. La oxidación del azufre se ve impedida cuando los suelos están excesivamente húmedos o excesivamente secos.

En cuanto al pH del suelo, Thiobacillus thiooxidans es capaz de sobrevivir a valores de pH extremadamente bajos. Otros organismos que oxidan el azufre parecen tener distintos requerimientos de pH, pero en general, la oxidación del S añadido procede con mayor rapidez cuanto más ácidos son los suelos (Tisdale, 1982).

La distribución del tamaño de partículas del S aplicado tiene un impacto tremendo sobre la proporción con la que es convertido a sulfatos, como consecuencia de la superficie expuesta al ataque de los microorganismos. Cuanto más fino

sea el tamaño de la partícula, mayor será la superficie específica y mayor la conversión a sulfatos (Tisdale, 1982).

2.5. Efectos de la adición de azufre en suelos calcáreos.

Casi siempre es deseable un aumento en la acidez del suelo en zonas áridas. En estas regiones, los tratamientos se hacen para reducir el alto pH de los suelos que no permiten el desarrollo de los cultivos.

Buckman (1977), reporta que bajo condiciones favorables el azufre es cuatro o cinco veces más eficaz peso por peso, en desarrollar acidez que el sulfato ferroso, y recomienda realizar diversas determinaciones de pH después de un tiempo de incubación antes de hacer una recomendación sobre la cantidad de azufre a aplicar.

En suelos calcáreos la deficiencia de microelementos es frecuentemente el resultado de su baja solubilidad y no una ausencia completa del elemento en el suelo. Sánchez et al; (1991), reporta incrementos significativos en la disponibilidad de microelementos tales como manganeso y zinc, bajo aplicaciones de azufre. Con aplicaciones de 20, 160 y 320 meq de azufre 100 g^{-1} de suelo se incrementó la solubilidad del manganeso en 66.3, 136.6 y 153.6 ppm respectivamente, después de dos semanas de incubación del azufre. Del mismo modo, la dosis de azufre incrementó la

solubilidad del zinc, presentándose la máxima a las dos semanas de incubación. Por otra parte, al evaluar el contenido de cobre no se detectó en ningún tratamiento. En síntesis, los resultados muestran que con la aplicación de 20 meq de azufre 100 g^{-1} de suelo, dos semanas después, el pH del suelo llega hasta la neutralidad (7.1); además, se incrementa significativamente la solubilidad de manganeso y zinc.

Otras investigaciones se han realizado en cuanto a la corrección de suelos alcalinos. Aburto (1987), señala que las más comunes han sido las aplicaciones de fertilizantes inorgánicos tanto al suelo como al follaje. Estos intentos por lo general fallan, especialmente cuando los fertilizantes se aplican al suelo. Los niveles de solubilidad de los nutrientes se incrementan temporalmente (desde unos días hasta algunas semanas) como resultado de la fertilización, pero estos niveles pronto retornan a sus valores bajos característicos de estos suelos. Por otra parte, otro intento es la aplicación de micronutrientes en forma de compuestos solubles (quelatos), pero el alto costo de los quelatos ha restringido su uso. En cambio, el empleo de un material acidificante como el azufre, es una práctica muy promisoría para corregir deficiencias nutrimentales. Dentro de los materiales acidificantes los más comúnmente empleados son: H_2SO_4 , S, FeSO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeS_2 (Aburto, 1987). Sin embargo, el S elemental y el ácido sulfúrico son los

materiales acidificantes mayormente empleados, aunque peso por peso, el S elemental es el más eficaz (Tisdale, 1982).

En cuanto al uso del ácido sulfúrico se tienen varios factores limitantes. El H_2SO_4 , es un material de empleo delicado aún cuando provee al suelo de una liberación de nutrientes en forma inmediata, sin embargo, también solubiliza los agregados minerales que forman la arcilla impidiendo con esto la retención de nutrientes y favoreciendo las pérdidas de estos por lixiviación (Tisdale, 1982).

El H_2SO_4 , producto de una oxidación bacteriana del S elemental y otras formas reducidas del mismo también solubiliza nutrientes, siempre y cuando existan ciertas condiciones propicias en el suelo, así como la presencia en el mismo de ciertos microorganismos (Tisdale, 1982).

Lipman, citado por Aburto (1987), menciona que el H_2SO_4 , formado por la oxidación del S solubiliza al P, K, Ca, y compuestos de Mg.

Por otra parte, las condiciones físicas de los suelos se pueden mejorar con aplicaciones de S. En California, (Overstreet, citado por Aburto (1987)), mejoró la permeabilidad del suelo y el crecimiento de las plantas utilizando compuestos de S. Las aplicaciones de H_2SO_4 , produjeron la mayor cantidad de forraje, seguido por el yeso.

La aplicación de S elemental por el contrario produjo el menor incremento en la producción de forraje. El incremento en el crecimiento se atribuyó al mejoramiento de la estructura del suelo y a la permeabilidad del mismo.

2.6. El efecto acidificante del azufre sobre el nitrógeno fertilizante y el rendimiento de los cultivos.

La aplicación de S elemental al suelo trae consigo un proceso de oxidación que termina con la formación de H_2SO_4 , y la disminución del pH (Aburto, 1987). Este proceso ayuda a amortiguar el proceso alcalinizante causado por la acumulación de amonio en el proceso de descomposición de la urea en el suelo, lo que resulta en menores pérdidas de nitrógeno por volatilización (Díaz, 1991). Además, el S ayuda a la correcta biosíntesis de proteínas. Cuando no se dispone de este elemento en cantidades suficientes las plantas no pueden utilizar óptimamente el nitrógeno aplicado, ya que ambos elementos son requeridos para este proceso (Tisdale, 1982). El nitrógeno y el azufre se encuentran íntimamente relacionados con la nutrición vegetal; un suplemento limitado de uno de ellos afecta la eficiencia del otro durante el crecimiento de las plantas.

La relación N-S en tejidos vegetales puede representar un índice de predicción de las necesidades de S en algunos cultivos, siendo las relaciones más aceptadas las de 15:1

para la mayoría de los cultivos, y de 10:1 para cultivos forrajeros.

Existen evidencias experimentales que demuestran que aplicaciones de S junto con fuentes nitrogenadas aumentan el rendimiento de los cultivos, tal es el caso de Jayaram (1978) citado por Troyo (1984), quien aplicó 10 ppm de S a la dosis fertilizante de N-P-K común en la región, causando incrementos en el rendimiento de aquenios y el contenido de N y K en las hojas de girasol. Así mismo disminuyó el de P, pero incrementando el contenido de aceite y la concentración de cistina y metionina. Revenko (1977), también citado por Troyo (1984), agregó S a la combinación N-P aplicado a los 20 días de emergencia, se produjeron incrementos de 3.1 a 6.7% en contenido de aceite del mismo cultivo.

2.7. El sorgo forrajero; su respuesta a la fertilización nitrogenada en suelos calcáreos.

El sorgo forrajero es una planta que presenta un grado de adaptación muy amplio, ya que prospera en diversos tipos de suelos y climas. Es tolerante a concentraciones elevadas de sales y prospera bien en suelos arcillosos siempre que tengan buen drenaje; preferentemente se desarrolla en lugares con temperatura uniformemente alta, sobre todo durante el período de crecimiento (Cantú, 1982).

El sorgo es un cultivo que responde a las fertilizaciones con nitrógeno. Raj y Patel (1988), demostraron que con aplicaciones de N se aumenta el rendimiento, aunque también se elevó la cantidad de ácido cianhídrico al aumentar la dosis de N. La fertilización nitrogenada trae beneficios en la calidad del forraje. Birch y Ash (1989) aumentaron el rendimiento del sorgo forrajero con aplicaciones de N, y mencionan que se redujo la relación hoja:tallo con el incremento de la dosis. Birch y Stewart (1989) aumentaron el rendimiento de materia seca al incrementar la dosis de N. Después del segundo corte los autores observaron un efecto residual de N en el rendimiento de materia seca, donde no hubo aplicación adicional de N.

La época de aplicación de N en el sorgo forrajero es muy importante como lo demuestra Rosolem y Machado (1988); ellos probaron cuatro dosis de N y seis diferentes fechas de aplicación, y obtuvieron las mayores cosechas con las aplicaciones más tempranas. Mencionan que todo el N puede aplicarse al momento de la siembra, lo cual permite una mayor eficiencia en el uso del fertilizante. Aplicaciones en época de floración presentaron poco efecto en el rendimiento.

Por otra parte, se ha observado que el contenido de N en órganos vegetativos del sorgo forrajero comienza a disminuir a partir de los 14 y 21 días después de la antesis en plantas fertilizadas con N y 7 días después en plantas no

fertilizadas (King y Chu, 1988).

El aprovechamiento del N por las plantas varía entre las especies, tal es el caso del sorgo y el maíz. Aplicando 0 y 42 gr de N/m² durante la iniciación de la hoja en ambos cultivos, el sorgo tuvo un mayor desarrollo del área foliar que el maíz. Esto se asocia con el hecho de que el sorgo presenta mayor período de desarrollo vegetativo y mayor densidad de plantas que el maíz, (por el número de hijuelos que presenta) (Muchow, 1989). A través del ciclo vegetativo, el contenido de N en la hoja fué mayor con el contenido de N aplicado, obteniendo el valor más grande el maíz que el sorgo. Durante el llenado de grano, el decremento en el contenido de N foliar fué mayor en maíz que en sorgo, con las dosis menores de N.

En cuanto al contenido de S, se ha estimado que las plantas obtienen aproximadamente un 0.55 de sus necesidades de S de los primeros 20 cms de suelo y el restante de los 0.45 del subsuelo (Hue y Cope, 1988).

Se han realizado experimentos en sorgo combinando S y N, tal es el caso de Vijay y Dwarika (1988), donde se probaron dos dosis de N (0 y 120 Kg/ha) y dos dosis de S (0 y 120 Kg/ha) donde la combinación N+S (120-120) produjo incrementos significativos.

También se ha probado la urea recubierta con azufre (Hamdallah et al., 1988) donde se obtuvieron incrementos significativos en el rendimiento de materia seca sobre otras fuentes (sulfato de amonio y nitrato de amonio) aplicada sólo o dividida.

Por otra parte, se ha demostrado que el sorgo forrajero tiene una capacidad de adaptación a altos niveles de salinidad. Amazallag et al., (1990), lo demuestra con un experimento en el que se expusieron plantas de sorgo por 20 días a 75 y 150 moles de NaCl/m³, y al término de los cuales fueron capaces de crecer en un medio con 300 moles de NaCl/m³. Aquellas plantas que no recibieron el primer tratamiento, o que lo recibieron por un período de tiempo menor de 20 días, murieron. Se sugiere que esta adaptación a la salinidad es más que un ajuste osmótico y que lleva más tiempo desarrollarlo. Con la habilidad de crecer en un medio altamente salino, la adaptación también trae consigo un desarrollo de la capacidad para regular la concentración interna de Na⁺ y Cl⁻ aún cuando la concentración externa sea alta. Se propone que la adaptación del sorgo a la alta salinidad resulta de una modulación en la expresión del genoma durante la exposición a dosis no letales de NaCl.

3. MATERIALES Y METODOS.

3.1. Descripción de la zona de estudio.

3.1.1. Localización geográfica.

El presente estudio, se realizó en de los terrenos pertenecientes a la Estación Agrícola Experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, situada en el municipio de Marín, N.L. la cual se encuentra localizado geográficamente entre los $25^{\circ} 15'$, $25^{\circ} 55'$ L.N. y $100^{\circ} 00'$, $100^{\circ} 05'$ L.O. del meridiano de Greenwich, con una elevación de 375 msnm.

3.1.2. Clima.

El clima predominante de la región es del tipo Bs1, seco y muy extremoso con lluvias escasas durante la mayor parte del año. La máxima precipitación pluvial se presenta durante el mes de septiembre, la cual va de 110 a 120 mm. mientras que en el mes de marzo se registra la mínima precipitación de 10-15 mm. La precipitación promedio varía entre los 300 y 600 mm anuales. La temperatura media anual es superior a los 22°C . mientras que la temperatura media mensual durante el periodo de mayo-agosto es de 33 y 35°C ; siendo para los meses de enero y diciembre de $10-15^{\circ}\text{C}$.

3.1.3. Suelos.

Los suelos de la región son típicos de las regiones semiáridas, ligeramente alcalinos con valores de pH que fluctúan entre 7.5 y 8.5, pobres en su contenido de materia orgánica (1-2%) y elevados contenidos de CaCO_3 (>10%). Su textura es arcillosa y franca, de color negro, gris oscuro de origen aluvial, completamente pesados, los cuales presentan grandes grietas en tiempos de sequía y algunos problemas de salinidad (Sánchez, 1989).

3.2. Muestreo de los suelos.

El muestreo se realizó del lado norte de los terrenos de la Estación Agrícola Experimental de la F A U A N L en un área de 1800 m^2 utilizada para el cultivo de maíz, tomate, chile, y otras hortalizas.

Se realizaron dos colectas, una para el experimento de laboratorio y otro para el de invernadero.

En el experimento de laboratorio se tomaron varias submuestras pequeñas al azar, las cuales se mezclaron y cribaron para obtener una muestra representativa de 500 g de suelo.

En el caso del experimento de invernadero, el muestreo también se realizó al azar dentro del área mencionada, tomando un número indefinido de submuestras las cuales se mezclaron para formar una sola muestra de aproximadamente 1000 Kg de suelo.

3.3. Experimento de Laboratorio.

Este experimento se realizó en el Laboratorio de Suelos, Aguas y Plantas de la F A U A N L; el análisis estadístico utilizado fué mediante arreglo factorial AXB bajo un diseño Completamente al Azar con dos repeticiones, donde el factor A correspondió a las dosis de azufre y el factor B a el tiempo de incubación de éste en el suelo. La unidad experimental fué un frasco de agitación, al cual se le agregaron 10 gramos de suelo. Los tratamientos aplicados fueron los equivalentes a una cantidad de suelo de 100 g: 0, 20, 160 y 320 meq de azufre.

El tiempo de incubación del azufre en el suelo fué de 1. 2 y 4 semanas.

En los tratamientos donde se aplicó azufre, este se mezcló con el suelo. En seguida, a todos los tratamientos se les añadió 2.2 ml de agua destilada para llevar el suelo al 80

por ciento de la Capacidad de Campo; para esto se determinó la textura del suelo por el método del hidrómetro de Bouyoucos, y la capacidad de campo por medio de las ecuaciones de predicción para las constantes hídricas calculadas por Guzmán (1981) para suelos de Marín, N.L. Después, se taparon los frascos con plástico y se realizó un pequeño orificio para permitir el intercambio gaseoso. El contenido de humedad se mantuvo constante durante el desarrollo del experimento.

Al término de la incubación del azufre en el suelo, se midió pH y C.E. en una relación suelo:agua de 1:2 y 1:5, respectivamente. Para la medición de pH se empleó un potenciómetro Photovolt, y para C.E. el puente de Wheatstone.

3.4. Experimento de Invernadero.

Este estudio se realizó en el invernadero localizado dentro de los terrenos de la Estación Agrícola Experimental de la F A U A N L, con un arreglo factorial 4X2 bajo un diseño completamente al azar con seis repeticiones.

Los tratamientos fueron ocho, los cuales se aplicaron en bolsas de polietileno color negro con capacidad para 20 Kg de

suelo; se evaluaron a través del rendimiento del cultivo de sorgo forrajero. El número de repeticiones fué de seis.

En el cuadro 2 se muestran los tratamientos probados.

Cuadro 2. Tratamientos probados en el experimento de invernadero:

Tratamiento	Fuente de N.	Dosis de N. (Kg/ha)	Dosis de S. (meq 100 g ⁻¹)
1	-----	0	0
2	-----	0	20
3	Urea	150	0
4	Urea	150	20
5	SA	150	0
6	SA	150	20
7	NA	150	0
8	NA	150	20

SA= sulfato de amonio; NA= nitrato de amonio.

3.4.1. Aplicación del azufre.- El azufre se aplicó después de llenar las bolsas de polietileno con 20 Kg de suelo cada una. La dosis aplicada fué de 20 meq S 100 g⁻¹, los cuales equivalen a 64 g de S 20 Kg⁻¹. El azufre se mezcló con el suelo y luego se regó hasta llevar el suelo a capacidad de

campo.

Todas las macetas se mantuvieron a humedad constante durante dos semanas con el fin de permitir la oxidación del azufre en el suelo. Al término de este tiempo, se realizó la siembra.

3.4.2. Siembra.- La siembra se realizó dos semanas después de la aplicación del azufre al suelo. Se sembró la variedad "Cowhand Three" de sorgo forrajero (de Texas), la cual presentó un 85 por ciento de germinación. Se depositaron ocho semillas por maceta, para luego dejar las mejores cuatro plantas.

Se perforaron las macetas por su parte inferior con el fin de permitir el drenaje del agua y mantener el suelo de las mismas lo más cecano posible a la Capacidad de Campo.

3.4.3. Aplicación de Nitrógeno.- Una vez que se tuvieron cuatro plantas por maceta, se aplicó el nitrógeno. Esta aplicación fué en base al volúmen del suelo y los fertilizantes se aplicaron en solución. La dosis de 150 Kg de $N\ ha^{-1}$ correspondió a 3.75 g de sulfato de amonio, 2.296 g de nitrato de amonio y 1.672 g de urea por maceta.

3.4.4. Cosecha.- La cosecha se realizó a los 95 días después de la siembra; se cortaron las plantas a una distancia de 5 centímetros del suelo y se midieron las siguientes variables: rendimiento de materia verde de tallo y hojas por separado, rendimiento de materia seca de tallo y hojas también por separado, además del contenido de proteína en la planta.

3.5. Determinación de proteína.- Se determinó el porcentaje de proteína contenido en las plantas por el método de Kjeldahl.

4. RESULTADOS Y DISCUSION.

Los resultados encontrados durante el desarrollo de este trabajo se discuten por separado en cada fase experimental.

4.1. Experimento de laboratorio.

4.1.1. pH del suelo.

El efecto de la dosis de azufre y del tiempo de incubación sobre el pH del suelo se muestran en el Cuadro 5.

El descenso del pH del suelo (Figura 1), muestra que el azufre se oxidó en el suelo. En el análisis de varianza (Cuadro 1A) se encontró efecto significativo de las dosis de azufre, el tiempo de incubación ($\alpha = .01$) y la interacción de ambos factores ($\alpha = .05$).

El Cuadro 3 muestra que la aplicación del azufre reduce significativamente el pH del suelo. Estos resultados son similares a los reportados por Aburto (1987), quien obtuvo descensos significativos de pH de un suelo alcalino aplicando azufre, atribuyéndose este efecto a la acumulación de ácido sulfúrico resultado de la oxidación del azufre en el suelo.

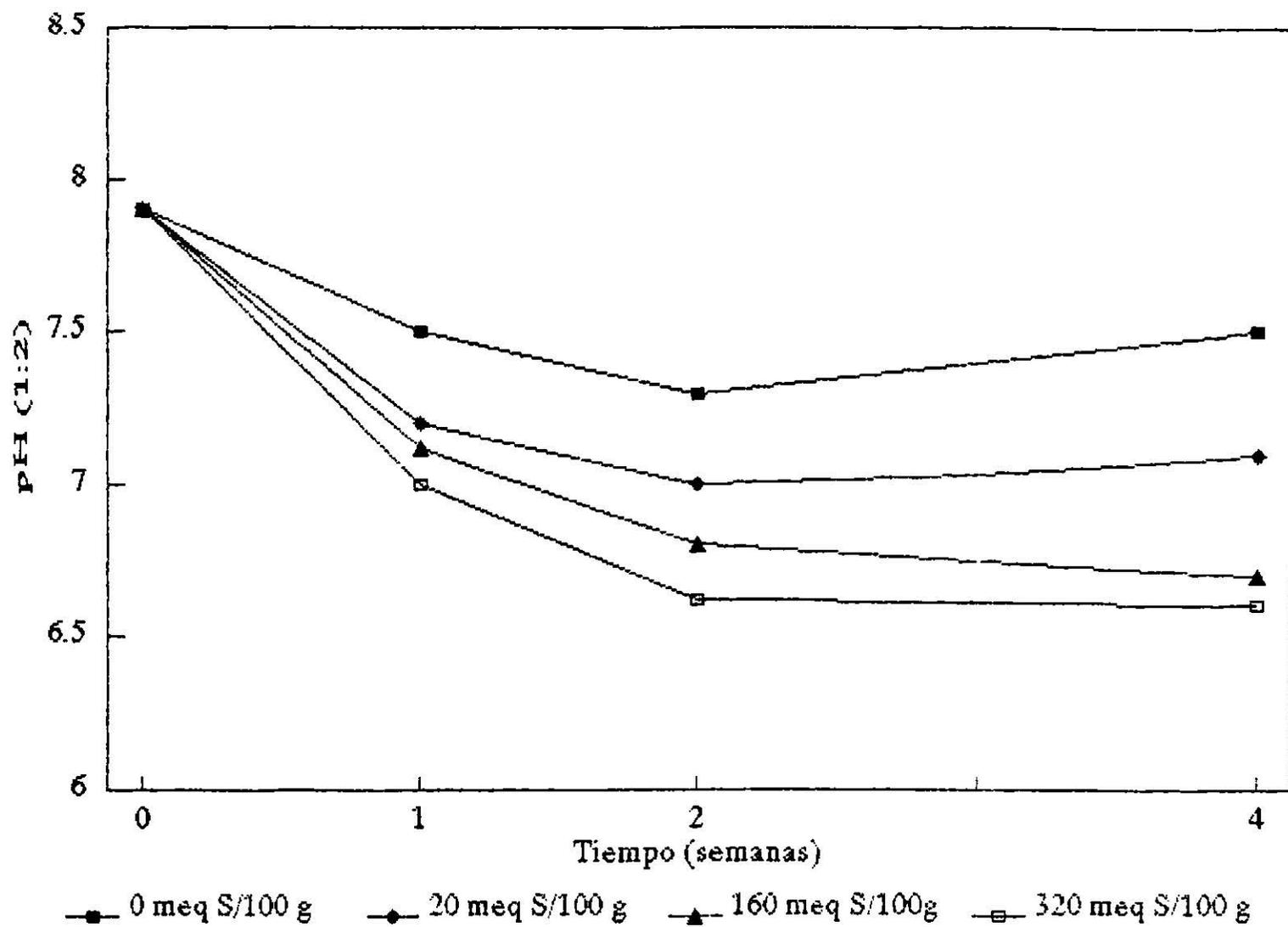


Figura 1. Efecto de las dosis de azufre y del tiempo de incubación sobre el pH del suelo.

Cuadro 3. Efecto promedio de las dosis de azufre y el tiempo de incubacion sobre el pH del suelo.

Dosis (meq S/100g)	Tiempo (semanas)			Media	
	1	2	4		
0	7.58	7.32	7.53	7.47	A
20	7.34	7.00	7.13	7.16	B
160	7.15	6.89	6.77	6.94	C
320	7.09	6.64	6.76	6.83	D
Media	7.29	6.96	7.05	7.10	

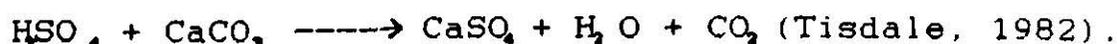
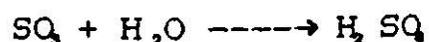
(DMS = 0.0768; α = 0.05)
(Relacion 1:2)

Se observó que en este estudio independientemente de la cantidad de azufre aplicado, la dosis que redujo en mayor grado el pH fue la de 320 meq S 100 g⁻¹ la cual es estadísticamente diferente a la de 160 meq 100 g⁻¹. Estos resultados coinciden con lo reportado por Wainwright (1984); sin embargo, debido a la cantidad de azufre que representan 320 meq S 100 g⁻¹ (199.680 ton/ha) y al alto costo de este producto, es mas aceptable la dosis de 20 meq S 100 g⁻¹ que equivale a la aplicación de 12.480 ton/ha.

Esta dosis fué la menor en cantidad de azufre aplicado

que disminuyó el pH del suelo hasta la neutralidad, después de dos semanas de incubación; este pH neutro es el valor considerado como el más adecuado para el desarrollo de las plantas cultivadas, debido a que incrementa la disponibilidad de microelementos tales como el fierro, manganeso y zinc, además del fósforo (Buckman, 1977), también estimula el incremento de la población bacteriana del suelo, ya que para la mayoría de la flora microbiana el pH óptimo está cercano a la neutralidad (Alexander, 1981).

Es importante considerar la cantidad de CaCO_3 contenida en estos suelos y la cantidad de azufre que se requiere para neutralizarlo, ya que de esto depende la duración del efecto del azufre sobre el pH. Los suelos de Marín, N.L. contienen 11 por ciento de CaCO_3 , el cual para poder ser neutralizado, requiere de una oxidación microbiológica del azufre en el suelo, la cual se representa de la forma siguiente:



El peso de una hectárea es:

$$(100\text{m}) (100\text{m}) (0.3\text{m}) = 3000\text{m}^3$$

multiplicando este valor por la densidad aparente:

$$(3000\text{m}^3) (1.300\text{Kg/m}^3) = 3,900,000 \text{ Kg} = 3,900 \text{ ton.}$$

Si 3,900 ton de suelo ----- 100%

X ----- 11%

$$X = 429 \text{ ton de CaCO}_3$$

La cantidad necesaria de H_2SO_4 para neutralizar 429 ton de CaCO_3 :

$$\frac{\text{H}_2\text{SO}_4}{1\text{mol}(98\text{g})} + \frac{\text{CaCO}_3}{1\text{mol}(100\text{g})} = \frac{X \text{ H}_2\text{SO}_4}{9.8 \times 10^{-5} \text{ ton}} = \frac{429 \text{ ton CaCO}_3}{1 \times 10^{-4} \text{ ton}}$$

$$X \text{ H}_2\text{SO}_4 = \frac{(429 \text{ ton CaCO}_3) (9.8 \times 10^{-5} \text{ ton})}{1 \times 10^{-4} \text{ ton}}$$

$$X = 420.42 \text{ ton de H}_2\text{SO}_4$$

Calculando la concentración de azufre en el ácido sulfúrico:

Si 98 g de H_2SO_4 ----- 100 %

32 g de S ----- X

$$X = 32.65 \%$$

Se encuentra que el 32.65 por ciento del ácido sulfúrico es azufre, entonces, si 100 ton de H_2SO_4 ----- 32.65 ton de S

420.42 ton de H_2SO_4 --- X

$$X = 137.26 \text{ ton S}$$

El cálculo muestra que se requieren 137.26 ton de azufre para neutralizar las 429 ton de carbonato de calcio contenidas en una hectárea. Es claro que de las dosis empleadas en este trabajo (12.48 ton, 99.84 ton y 199.6 ton) sólo la última sobrepasa la cantidad requerida por el suelo. Se debe considerar que durante la oxidación del azufre en el suelo hay liberación de iones hidrógeno los cuales son intercambiados por los iones calcio que se encontraban retenidos sobre las arcillas del suelo (Fassbender, 1984).

A este efecto, debemos sumarle la cantidad de carbonato de calcio que no haya sido neutralizada por el azufre en las dosis que no completaron la cantidad requerida por el suelo, donde la capacidad de amortiguamiento del suelo (Fassbender, 1984) provoca que el pH regrese a su valor inicial (Figura 1).

En cuanto al tiempo de incubación del azufre sobre el pH del suelo, se observan diferencias entre la primera y segunda semanas, sin embargo, a partir de esta última se comportaron en forma similar (Cuadro 4). Esto concuerda con lo reportado por Aburto (1987) donde se encontraron diferencias significativas entre tratamientos a diferentes períodos de tiempo.

Cuadro 4. Comparacion de medias del efecto del tiempo de incubacion del azufre sobre el pH del suelo.

Tiempo (Semanas)	Media
1	7.29 A
4	7.05 B
2	6.96 B

(DMS = 0.0886; α = 0.05)

El valor de pH más bajo se presentó con un tiempo de incubación de dos semanas. Lo anterior corrobora que la mejor combinación dosis de azufre-tiempo de incubación es la de 20 meq S 100 g⁻¹ - 2 semanas, y que el resultado de dosis mayores es únicamente por el efecto de la mayor cantidad de azufre empleada, ya que las diferencias entre estas dosis en tiempos de incubación mayores no son significativos (Cuadro 2A y 4). Este mínimo efecto lo muestra la comparación de medias de los tratamientos de azufre con un tiempo de cuatro semanas presentada en el cuadro 5.

Cuadro 5. Comparacion de medias de los tratamientos de azufre con un tiempo de incubacion de cuatro semanas.

Dosis (meq S 100 g ⁻¹)	Media	
0	7.53	A
20	7.13	B
160	6.77	C
320	6.76	C

(DMS = 0.0768; α = 0.05)

4.1.2. Conductividad eléctrica (CE).

Los valores obtenidos de CE a través de las dosis de azufre y del tiempo de incubación se muestran en el Cuadro 6. Se observa que existe efecto significativo para las dosis de azufre y el tiempo de incubación (α = .01) (Cuadro 5A), sin embargo, este efecto no se muestra con la interacción de ambos factores.

En general, al incrementar la dosis de azufre se incrementó la CE (Figura 2), ya que al bajar el pH del suelo por efecto de la dosis de azufre se aumentó la cantidad de sales solubles.

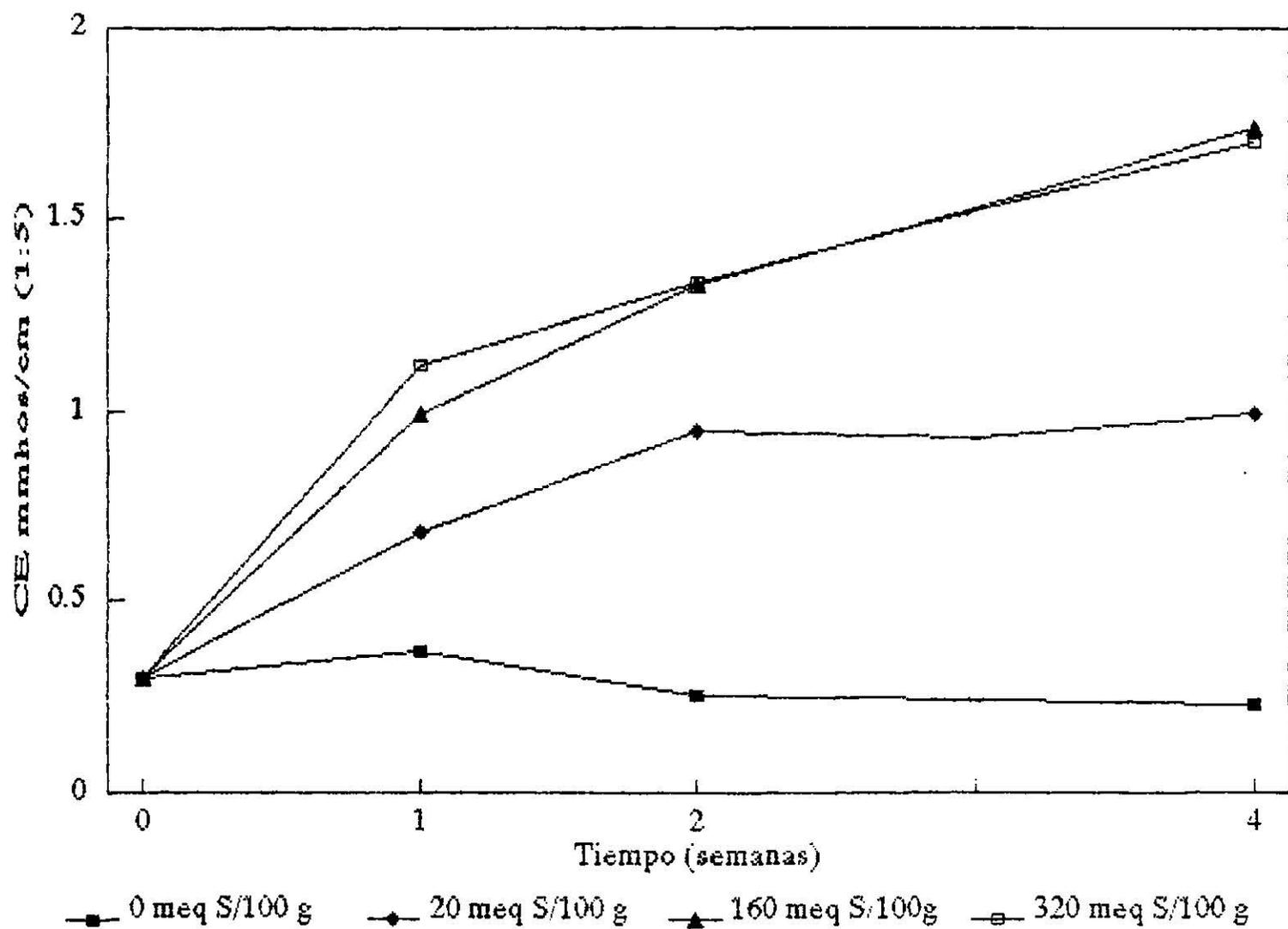


Figura 2. Cambios en los valores de conductividad eléctrica a través del tiempo de incubación y de cuatro diferentes dosis de azufre.

Las sales formadas por la oxidación del azufre en el suelo pueden ser sulfato de calcio (CaSO_4) que al hidratarse forma yeso, el sulfato de magnesio (MgSO_4), y otras que no se encuentran solubles en forma natural como el carbonato de calcio (CaCO_3). Según Ordóñez (1961) estas sales se forman por la presencia de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en la solución del suelo. Así mismo, por la reacción del ácido sulfúrico, producto de la oxidación del azufre con el carbonato de calcio, (Pizarro, 1978), según la reacción siguiente:



La CE más alta se obtuvo con la mayor de las dosis de azufre aplicadas ($320 \text{ meq S } 100 \text{ g}^{-1}$), no obstante, esta dosis no presenta diferencia significativa con respecto a la de $160 \text{ meq S } 100 \text{ g}^{-1}$ (Cuadro 6 y 5A).

Cuadro 6. Comparación de medias de las dosis de azufre sobre la conductividad electrica del suelo.

Dosis (meq S 100 g ⁻¹)	Media	
320	1.39	A
160	1.35	A
20	0.87	B
0	0.28	C

(DMS = 0.1825; α = 0.05)
(Relacion suelo:agua 1:5)

La dosis de 20 meq S 100 g⁻¹ fue estadísticamente diferente a las demás, y es suficiente para aumentar significativamente la cantidad de sales solubles del suelo (Figura 2). Probablemente debido al incremento en la disponibilidad de micronutrientes y fósforo esenciales como lo señala Sánchez. et al. 1991.

El mayor valor de CE se encontró con un tiempo de incubación de cuatro semanas (Cuadro 7), sin embargo, se observa que el incremento en la cantidad de sales solubles se inició desde la primer semana, por la oxidación del azufre en el suelo. Lo anterior se puede demostrar ya que no existe diferencia entre este tiempo de incubación y el de dos

semanas. Del mismo modo, tampoco se encontró diferencia entre el tiempo de dos y cuatro semanas de incubación.

Cuadro 7. Comparacion de medias del tiempo de incubación del azufre sobre la conductividad electrica del suelo.

Tiempo (Semanas)	Media
4	1.16 A
2	0.97 A B
1	0.80 B

(DMS = 0.2107; α = 0.05)
(Relacion suelo:agua 1:5)

Estos resultados son similares a los reportados por Díaz (1991), quien encontró que la aplicación de azufre al suelo incrementa la CE del mismo significativamente y se mantiene constante durante el tiempo de observación del experimento (4,8 y 16 días).

Este hecho explica, que el efecto de la interacción dosis de azufre-tiempo de incubación haya resultado no significativa sobre la CE del suelo, ya que la solubilización de los nutrientes provocada por la aplicación de las diferentes dosis de azufre, se da desde la primer semana

después de la aplicación. y tiende a mantenerse constante durante el desarrollo del experimento.

4.2. Experimento de invernadero.

4.2.1. Rendimiento.

La evaluación del rendimiento de materia verde y materia seca del sorgo forrajero (Sorghum vulgare L.) se dividió en tres partes: planta completa, hojas y tallo; la discusión que a continuación se presenta se hace para cada parte de la planta cosechada.

4.2.1.1. Planta completa.

En el caso del rendimiento de materia verde. no se obtuvo diferencia significativa para las fuentes nitrogenadas. las dosis de azufre ni la interacción de ambos factores (Cuadro 6A). En general se observó que el mayor rendimiento. que corresponde a 54.77 g/maceta se obtuvo con la aplicación equivalente a 150 Kg/Ha de nitrato de amonio (NA) + 20 meq S 100 g^{-1} (Cuadro 8).

Esta fuente nitrogenada. presenta un índice de acidez de 120.6 el cual es el mayor al de las otras dos (urea y

Cuadro 8. Valores promedio de rendimiento de materia verde y materia seca de planta completa, hojas y tallo de sorgo (g/maceta).

Trat.	Materia verde			Materia seca		
	PC	Hoja	Tallo	PC	Hoja	Tallo
Testigo	45.25	10.12	35.12	13.89	3.19	10.38
0 N Con S	44.09	8.96	36.06	14.90	3.80	12.02
Urea Sin S	46.75	7.79	34.33	15.80	4.46	11.20
Urea Con S	44.39	12.42	37.10	15.83	4.29	12.13
SA Sin S	51.97	9.62	40.03	13.79	3.47	11.20
SA Con S	47.35	6.51	40.84	13.42	3.57	9.54
NA Sin S	54.15	9.73	44.41	14.22	3.85	9.76
NA Con S	54.77	9.29	45.47	14.61	2.99	11.62

PC = Planta completa
 SA = Sulfato de Amonio
 NA = Nitrato de Amonio
 S = Azufre

sulfato de amonio) (Tisdale, 1982); esto tiene un efecto acidificante sobre el pH del suelo el cual solubiliza elementos como cobre, manganeso, zinc, fierro y fósforo (Sánchez et al., 1991).

Al comparar el rendimiento de materia verde obtenido con la aplicación de NA y NA mas azufre (S) en planta completa (54.15 y 54.77 g/maceta, respectivamente) se observa un incremento en el rendimiento con la aplicación de azufre. Este aumento en el rendimiento, aunque no es significativo estadísticamente, pudiera ser debido al efecto acidificante que presenta este fertilizante en el suelo, el cual, al combinarlo con azufre, es mayor. Díaz (1991) reporta valores de pH después de 16 días de incubación para el nitrato de amonio de 7.63 y para la combinación NA+S de 7.51. Este efecto aumenta mayormente la disponibilidad de fósforo y microelementos del suelo, lo cual favorece la nutrición vegetal y tiene una repercusión directa en la dieta de los animales que lo consumen.

Por otro lado, esta combinación fertilizante incrementa la conductividad eléctrica del suelo. En un trabajo previo a este experimento se encontró que la aplicación de NA incrementó la CE del suelo (a 4.3 mmhos cm^{-1} a 25 °C) después de un tiempo de incubación de 16 días. Este incremento en la

CE se atribuyó a la formación de sales producto de la oxidación del S en el suelo (Alonso et al. ; 1990).

Según Díaz (1991), el incremento en la CE del suelo producto de la aplicación de S inhibe la nitrificación. El mismo autor reporta valores superiores de producción de nitratos cuando no se aplicó azufre al suelo, que cuando se realizó esta práctica (NA+S = 29.85 ppm; NA = 64.12 ppm). Sin embargo, en este experimento cuando se aplicó NA+S se obtuvo mayor rendimiento que cuando se aplicó únicamente NA (NA+S = 54.77; NA = 54.15 g/maceta) (Cuadro 8). Este valor reportado por Díaz, (1991) representa riesgos por salinidad, ya que su efecto salino en el suelo fue de 4.3 mmhos cm^{-1} para el NA en promedio (Díaz, 1991) y este valor está sobre el límite marcado de salinidad (4.0 mmhos cm^{-1} a 25° C) (Pizarro, 1978).

Tal parece que la combinación NA+S tiene un efecto favorable sobre el rendimiento del cultivo. Es probable que esto se deba al efecto acidificante que presenta esta combinación sobre el suelo, al solubilizar elementos esenciales para la nutrición de las plantas, y el efecto negativo de la concentración de sales formadas por esta combinación fertilizante no fue limitante en el peso de la planta completa.

En cuanto a materia seca se refiere, tampoco se obtuvo significancia estadística para las fuentes nitrogenadas, dosis de azufre y la interacción de ambos (Cuadro 7A); no obstante, en este caso se observó que el mayor rendimiento se logro con la aplicación de urea (Cuadro 8).

Este incremento en el rendimiento logrado por la aplicación de urea, aunque no fué estadísticamente significativo pudiere atribuírse a la reducción del pH del suelo por efecto de la adición de azufre, el cual favorece la nitrificación del amonio proveniente de la hidrólisis de la urea. La aplicación de azufre al suelo reduce las pérdidas de nitrógeno por volatilización del amoníaco, al acidificar el suelo y amortiguar el efecto alcalinizante del amonio producido durante la hidrólisis de la urea (Kissel et al. : 1985) y por consecuencia favorecer las condiciones en el suelo para la nitrificación.

Es por esto que al aplicar azufre al suelo se eficientizó el uso de la urea, la cual, de las fuentes nitrogenadas evaluadas es la de mayor concentración (46%N).

4.2.1.2. Hojas.

En el rendimiento de materia verde en hojas, se observó

una diferencia altamente significativa (Cuadro 8A) para las dosis de azufre. Sin embargo, este efecto fue negativo, es decir, la aplicación de azufre redujo significativamente el rendimiento en hojas (Cuadro 9) aparentemente debido a la alta concentración de sales formadas por la oxidación del azufre en el suelo (Alonso *et al.*, 1990).

Cuadro 9. Comparación de medias de rendimiento de materia verde en hojas con la aplicación de azufre.

Tratamiento	Media (g/planta)
Con S	8.15 A
Sin S	10.15 B

(DMS = 1.6477; α = .05)

Las sales formadas por la oxidación del azufre en el suelo pueden ser sulfato de calcio (CaSO_4) que al hidratarse forma yeso, sulfato de magnesio (MgSO_4); además, el azufre participa en la solubilización de sales que no se encuentran solubles en el suelo como el carbonato de calcio (CaCO_3) según Ordóñez (1961).

Díaz (1991), reporta que la aplicación de 20 meq S 100 g^{-1} incrementó la conductividad eléctrica del suelo, y que al

cabo de 16 días de incubación tiende a ser del mismo valor ($CE = 9.0 \text{ mmhos cm}^{-1}$) con las tres fuentes nitrogenadas (urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio).

A esto se atribuye que aunque no hubo diferencia estadística entre las fuentes nitrogenadas, los valores más bajos en cuanto al rendimiento de materia verde en hojas se hayan obtenido con sulfato de amonio más $20 \text{ meq S } 100 \text{ g}^{-1}$ (6.51 g/maceta en promedio) (Cuadro 8). ya que este fertilizante es el de mayor índice de salinidad (3,253) (Tisdale, 1982) de los tres evaluados. Díaz (1991), reporta que cuando se agregaron $20 \text{ meq S } 100 \text{ g}^{-1}$ al fertilizante, la CE del suelo se elevó a 4.95 (en promedio) lo cual redujo el rendimiento del cultivo. Además, el sulfato de amonio fue el que incrementó la CE del suelo desde los primeros días después de su aplicación (4 días). La urea y el nitrato de amonio mostraron valores menores que el sulfato de amonio; sin embargo al término del estudio (16 días) éstos tenían el mismo valor ($9.0 \text{ mmhos cm}^{-1}$).

La absorción de nitrógeno en condiciones salinas puede disminuir debido a la reducción de la permeabilidad de las raíces (Frota y Toker, 1978). Parece ser que además de la absorción irregular de nitrógeno bajo condiciones salinas, el N absorbido por las plantas es incorporado con menos

eficiencia en las proteínas que en condiciones normales (Langdale et al., 1973).

En este trabajo, el mayor rendimiento en hojas se logró con la aplicación de urea + azufre. Este rendimiento, comparado con el de otras fuentes de nitrógeno no fué significativo (Cuadros 8A y 10) aunque se puede atribuir a la reducción de la velocidad de la hidrólisis de este fertilizante causada por la aplicación de azufre al suelo.

Cuadro 10. Valores promedio de las fuentes nitrogenadas sobre el rendimiento de materia verde hojas.

Fuente	Media
SA	7.75
NA	9.51
Sin N	9.54
Urea	10.31

En el rendimiento de materia seca de hojas no se encontró significancia estadística para las fuentes nitrogenadas, la dosis de azufre y la interacción de ambos (Cuadro 9A). Sin embargo, el mayor rendimiento se logro con la aplicación de

urea, lo cual es congruente con los resultados de materia verde.

4.2.1.3. Tallo.

Las fuentes nitrogenadas presentaron diferencia significativa sobre el peso seco de los tallos (Cuadro 10A). De las tres fuentes nitrogenadas probadas la que obtuvo el mayor rendimiento de materia verde fue el nitrato de amonio (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación de medias de las fuentes nitrogenadas sobre el rendimiento de materia verde en tallo.

Tratamiento	Media (g/maceta)
Urea	35.59 A
Sin N	35.59 A
SA	40.52 A B
NA	44.94 B

(DMS = 5.2407; α = .05)

Los valores promedio en g/maceta para el nitrato de amonio con y sin azufre fueron los siguientes: NA= 44.1 g/maceta;

NA+S= 45.47 g/maceta (Cuadro 8). Esta diferencia no es estadísticamente significativa. Se observa que el azufre tuvo efecto positivo en el rendimiento del tallo, lo cual se debe al efecto acidificante causado por esta combinación fertilizante.

Díaz (1991), reporta que en forma general el pH del suelo siempre fue menor cuando se aplicó SA y NA+S, siendo más marcado el descenso del pH con la combinación NA+S durante un tiempo de incubación de 4, 8 y 16 días (SA= 7.29, 7.61 y 7.52; NA= 7.27, 7.57 y 7.51 respectivamente), atribuyendo este resultado al doble efecto acidificante causado por el índice de acidez del NA y el efecto acidificante de la oxidación del S en el suelo.

Este efecto acidificante trae consigo la solubilización de nutrientes del suelo. Además, el nitrato de esta fuente fertilizante es absorbido directamente por las plantas mientras que el amonio es nitrificado en el suelo (Bidwell, 1983).

Por otra parte, aunque las fuentes nitrogenadas no tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento de materia seca (Cuadro 11A), el mayor valor se obtuvo con la aplicación de urea más azufre (Cuadro 8), lo cual es congruente con el

rendimiento de hojas y planta completa.

El tratamiento con sulfato de amonio mas azufre, produjo el menor rendimiento de materia seca del tallo al igual que en el rendimiento de materia seca en la planta completa, lo cual se debe probablemente al índice de salinidad que presenta este fertilizante y a los efectos negativos que trae consigo la CE para la absorción e incorporación del nitrógeno fertilizante (Langdale et al., 1973).

4.3. Nitrógeno total y proteína.

En general, el porcentaje de N en la planta disminuyó con la aplicación de S al suelo aunque no existe prueba estadística que lo corrobore (Cuadro 12A). Esto se atribuye a que la adición de S retardó la absorción de N al favorecer la permanencia del amonio en el suelo (Díaz,1991). Además, como ha señalado Frota y Toker (1978) la aplicación de S trae consigo un incremento en la concentración de sales del suelo, lo que provoca problemas para la absorción del N fertilizante al reducir la permeabilidad de las raíces.

Del mismo modo, el contenido porcentual de proteína en la planta disminuyó con la aplicación de S, como consecuencia del decremento en el contenido de N en la misma (Tisdale,

1982) y la ineficiente incorporación del N en las proteínas (Langdale et al., 1973).

Por otro lado, los resultados muestran (Cuadro 12A) que el azufre incrementó el rendimiento del sorgo cuando no se aplicó N. Esto se debe aparentemente, como lo ha sugerido Sánchez et al., 1991, a que la aplicación de S al suelo provoca una solubilización de otros nutrientes tales como fósforo, fierro, manganeso y zinc con lo cual se favorece el desarrollo del cultivo.

Al aplicar urea mas azufre, el contenido de N en la planta disminuyó probablemente por la mayor permanencia del amonio en el suelo. Esto es consecuencia del efecto acidificante del S sobre la velocidad de la hidrólisis de este fertilizante (Díaz, 1991); así, el rendimiento se incrementó por la solubilización de nutrientes, ocasionada por el mismo efecto acidificante del S en el suelo y no por la absorción de N.

Al aplicar nitrato de amonio con azufre, los resultados obtenidos fueron similares a los obtenidos con urea mas azufre. La aplicación de S propició un decremento en el contenido de N y proteína dentro de la planta como consecuencia de la permanencia del amonio en el suelo, ocasionada por el efecto acidificante del azufre y del

nitrate de amonio.

En forma contraria, al aplicar sulfato de amonio con azufre se incrementó el contenido de N y proteína en la planta pero se redujo el rendimiento. Esto puede deberse al incremento en la concentración de sales en el suelo, provocada por el alto índice de salinidad que presenta el SA aunado a las sales que formó el S en el suelo, lo cual provocó deficiencias tanto en la absorción (Frota y Toker, 1978) como en la incorporación del N en las proteínas (Langdale et al., 1973).

Por otra parte, es importante mencionar que las dosis de azufre empleadas en este trabajo y los resultados obtenidos a partir de ellas, son un paso adelante en la solución del problema de los suelos calcáreos de la región. Es claro, que económicamente sería muy difícil aplicar 12 toneladas de azufre/Ha, pero no deja de ser importante conocer las posibilidades que existen en la solución de este problema.

5. CONCLUSIONES.

- 1.- La aplicación de azufre disminuyó significativamente ($\alpha = .01$) el pH de los suelos calcáreos de Marín, N.L.
- 2.- Todas las dosis de azufre evaluadas redujeron el pH del suelo y son estadísticamente diferentes entre ellas ($\alpha = .05$).
- 3.- La aplicación de 20 meq S 100 g⁻¹ redujo el pH del suelo hasta la neutralidad al cabo de dos semanas de incubación.
- 4.- Con un tiempo de incubación de dos semanas, el decremento del pH del suelo por efecto de las dosis se acentuó, no obstante que estadísticamente es igual al de cuatro semanas de incubación.
- 5.- La aplicación de azufre al suelo elevó significativamente ($\alpha = .01$) la conductividad eléctrica de los suelos de Marín, N.L.
- 6.- Todas las dosis de azufre evaluadas incrementaron significativamente ($\alpha = .05$) la conductividad eléctrica del suelo, siendo la de mayor efecto la de 320 meq 100 g⁻¹ aunque estadísticamente es igual a la de 160 meq S 100 g⁻¹.

- 7.- El mayor incremento en la conductividad eléctrica del suelo se presentó desde la primer semana de incubación del azufre y alcanzó su máximo valor a la cuarta semana ($\alpha = .05$).
- 8.- La aplicación de azufre en forma conjunta con las fuentes nitrogenadas no presentó efecto significativo.
- 9.- De las cuatro fuentes nitrogenadas evaluadas, la urea con o sin azufre fué la mejor en cuanto al rendimiento de materia seca de sorgo, aunque este efecto no es significativo.
- 10.- La aplicación de nitrato de amonio con azufre presentó efecto positivo sin diferencia significativa sobre el rendimiento de materia verde de sorgo.
- 11.- Se observó la tendencia de que la alta concentración de sales formadas por la aplicación de sulfato de amonio y sulfato de amonio con azufre afectó la absorción de nitrógeno y su incorporación en la síntesis de proteínas, afectando el rendimiento del cultivo.

6. RECOMENDACIONES.

Para futuros experimentos de laboratorio e invernadero en los cuales se trabaje con azufre, se recomienda aplicar 20 meq S 100 g^{-1} y con un tiempo de incubación de 2 semanas.

En caso de que se trabaje con fuentes nitrogenadas, aplicar los tratamientos después de 2 semanas de incubación del azufre en el suelo para mejor aprovechamiento del nitrógeno fertilizante.

7. BIBLIOGRAFIA.

- Aburto, J.J. 1987. Oxidation of Agricultural Sulfur by two species of Thiobacillus. Thesis of Master of Science in Agronomy. New Mexico State University. Las Cruces, New Mexico. 71 p.
- Aguirre, C. J. 1982. Prácticas de campo y laboratorio para análisis de suelos. FAUANL. p. 46.
- Alexander, M. 1980. Introducción a la Microbiología del Suelo. AGT Editor. México. 491 p.
- Alonso, G.P; C.M. Rafael, G.A. José y O.C. Eloisa. 1990. Química, Ed. Mcgraw-Hill. Madrid, España. pp. 196-203.
- Amzallag, G.N; H. R. Lerner; A. Poljakoff-Mayber. 1990. Induction of increased salt tolerance in Sorghum bicolor by NaCl pretreatment. Journal of Experimental Botany 41 (222) 29-34.
- Beri, V: K.P.Goswani and S.S. Brar. 1978. Urease activity and its Michaelis constant for soil systems. Plant and Soil 49: 105-115.
- Bidwell, R.G.S. 1983. Fisiología Vegetal. AGT Editor. pp. 214-218.
- Birch, C. J. Ash, J.D. 1989. The response of forage sorghum to nitrogen fertilizer applied at planting and after cutting. Brisbane. Queensland, Australia. Australian Institute of Agricultural Science. 34-40.
- Birch, C.J; A.D. Stewart. 1989. The effect of nitrogen fertilizer rate and timing on the yield of hibrid forage sorghum from serial harvests. Brisbane, Queensland, Australia. Australian Institute of Agricultural Science. 2: 41-48.
- Boswell, F.C; J.J. Melisinger and N.L. Case. 1985. Nitrogen fertilizers. IN: Fertilizer technology and use. Engelstad, O.P. ed. SSSA. Madison.

Wisconsin. U.S.A. pp.254-271.

Buckman, O.H. y N.C. Brady. 1977. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. Montaner y Simón. S.A. Barcelona. pp. 374-394.

Cantú, V.J. 1972. Prueba de adaptación y rendimiento de 12 sorgos forrajeros (regados con aguas negras) en ciclo tardío, en General Escobedo. N.L. Tesis Profesional. FAUANL. 76p.

Castillo, C.F. 1986. Azufre, insumo básico para la producción de fertilizantes. Congreso Internacional sobre la Industria de los Fertilizantes. Memorias. Caracas, Venezuela. ADIFAL. pp. 26-36.

Díaz, H.R. 1991. Efecto del azufre sobre la nitrificación de los fertilizantes nitrogenados en suelos de Marín. N.L. Tesis Profesional. FAUANL. 87 p.

Fassbender, H.W. 1984. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. San José Costa Rica. Instituto de Cooperación para la Agricultura. p. 251.

Fenn, L.B. and D.E. Kissel. 1976. The influence of cation exchange and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils. Soil. Sci. Soc. Am. J. 40: 394-397.

Fitzpatrick, E.A. 1985. Suelos, su formación, clasificación y distribución. CECSA. México. p. 149.

Foth, H.D. 1985. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Tercera edición. CECSA. México. pp. 37, 134, 207-224.

- Frota, J.N.E. and T.C.Tuker. 1978. Absorption rates of ammonium and nitrate by kidney beans under salt and water stress. Soil. Sci. Am. J. 42: 753-756.
- Guzmán, C.I. 1981. Ecuaciones de predicción para las constantes hídricas (CC y PMP) a partir de la textura de la capa arable de los suelos del Edo. de Nuevo León. Tesis Profesional. FAUANL. Mexico. 53 p.
- Hamdallah, G.M; J, Devi Prasad; A.A. Al- Hendi. 1988. Crop response to sulfur-coated urea (SCU) and other N-carriers in sandy soils of Saudi Arabia. Fertilizer Research 15 (1) 47-54.
- Hue, N.V; and J.T. Cope. Jr. 1987. Use of soil-profile sulfate data for predicting crop response to sulfur. Soil. Sci. Am. J. 51 (3) 658-664.
- King, W.W; and T.M. Chu. 1988. Nitrogen metabolism in sorghum. I. Nitrogen fertility effects on accumulation and remobilization of N in the plant. Journal of the Agricultural Association of China. No. 144. 1-12.
- Kissel, D.E; D.H. Sander and R. Ellis. 1977. Fertilizer-Plant Interactions in Alkaline Soils. IN: Fertilizer Technology and Use. ed. Engelstad, O.P. SSSA. Madison, Wisconsin. U.S.A.
- Langdale, G.W; J.R. Thomas and T.G. Littleton. 1973. Nitrogen metabolism of stargrass as affected by nitrogen and soil salinity. Agronomy Journal 65: 468-470.
- Monreal, C; W.B. Mc Gill and M. Nyborg. 1986. Spatial Heterogeneity of Substrates: effects on hydrolysis immobilization and nitrification of urea-N. Can. J. Soil. Sci. 66: 499-511.

- Muchow, R.C. 1989. Influence of nitrogen supply on biomass and grain yield in sorghum. Proceedings of the Australian sorghum workshop. Toowoomba, Queensland. 28. February-1 March.
- Ordóñez, A. J. 1961. Aplicación de azufre inoculado y flor de azufre e 6 diferentes niveles respectivamente, para establecer su comportamiento como acidificantes y sus relaciones en la aprovechabilidad del N y P en suelos no lixiviados. Tesis Profesional. Escuela Superior de Agricultura Antonio Narro. Universidad de Coahuila. Buena Vista, Saltillo, Coah. Mexico. 29 p.
- Ortíz, V.B. 1977. Fertilidad de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Mexico. Ed. Patena. pp. 61-62.
- Pizarro, F. 1978. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Ed. Agrícola Española, S.A. Madrid, España. pp. 69-78.
- Raj, M.F. and B.K. Patel. 1988. Influence of nitrogen on quality of forage sorghum (Sorghum bicolor L.) hybrids. Gujarat Agricultural University Research Journal. 14 (1) 61-63.
- Reynoso, R. 1978. Respuesta de la cebada (Hordeum vulgare L.) a aplicaciones de azufre y sulfato con deficiencias nutrimentales. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 105 p.
- Rosolem, C.A. and J.R. Machado. 1985. Efficiency of nitrogen fertilization in sweet sorghum. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 51 (3) 658-664.
- Sánchez, A.E. 1989. Dinámica de urea y sulfato de amonio en suelos calcáreos de N.L. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 155 p.

- Sánchez, A.E; H.R. Fuentes y J.F. Albalate. 1991. La oxidación del azufre en suelos calcáreos de Marín. N.L. Ciencia Agropecuaria. FAUANL. 4 (1) p. 21.
- Sauchelli, V. 1966. Química y Tecnología de los Fertilizantes. UTEHA. Mexico. p. 25.
- Savant, N.K; A.G. James and G.H. Mc Clellan. 1987. Effect of amounts and sequence of additions of urea and water hydrolysis of surface- applied granular urea in unsaturated soil. Fertilizer Research 11: 231- 243.
- Troyo, D.E. 1984. Efecto de la fertilización nitrogenada con y sin aportaciones de azufre sobre la producción de girasol (Helianthus annuus L.) Var Tecmon-2 bajo condiciones de riego en Apodaca. N.L. Tesis de Maestro en Ciencias. ITESM. Division de Ciencias Agropecuarias y Maritimas. Monterrey. N.L. Mexico. 103 p.
- Voss, R.D. 1984. Potential for use of urease inhibitors. IN: Nitrogen in crop production. Madison. Wisconsin. U.S.A. pp. 571- 577.
- Wainwright, M. 1984. Sulfur oxidation in soils. Advances in Agronomy 37: 349-396.
- Wood, H.S; C.W. Keenan y W.E. Bull. 1974. Química General. University of Tennessee. Harper and Row Latinoamericana. pp. 385- 400.

8. APENDICE.

Cuadro 1A. Análisis de varianza del efecto de la dosis y el tiempo de incubación del azufre sobre el pH del suelo.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Dosis	3	1.46	0.48	98.05**	3.49-5.95
Tiempo	2	0.46	0.23	46.43**	3.88-6.93
Interacción	6	0.09	0.01	3.20*	3.00-4.82
Error	12	0.05	0.00		
Total	23	2.07			

* Diferencia significativa

** Diferencia altamente significativa.

Cuadro 2A. Comparación de medias del efecto de las dosis de azufre sobre el pH del suelo.

Tratamiento (meq S 100g ⁻¹)	Media
0	7.47 A
20	7.16 B
160	6.94 C
320	6.83 D

(DMS = 0.0768; α = 0.05)

Cuadro 3A. Comparación de medias de las dosis de azufre
en un tiempo de incubación de una semana.

Tratamiento (meq S 100 g ⁻¹)	Media
0	7.58 A
20	7.34 B
160	7.15 C
320	7.09 C

(DMS = 0.0768; α = 0.05)

Cuadro 4A. Comparación de medias de las dosis de azufre
con un tiempo de incubación de dos semanas.

Tratamiento (meq S 100 g ⁻¹)	Media
0	7.32 A
20	7.00 B
160	6.89 C
320	6.64 D

(DMS = 0.0768; α = 0.05)

Cuadro 5A. Análisis de varianza del efecto de la dosis y el tiempo de incubación del azufre sobre la conductividad eléctrica del suelo.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Dosis	3	4.85	1.61	57.63**	3.49-5.95
Tiempo	2	0.54	0.27	9.64**	3.88-6.93
Interacción	6	0.47	0.07	2.8NS	3.00-8.82
Error	12	0.33	0.02		
Total	23	6.20			

** Diferencia altamente significativa

NS No significativo.

Cuadro 6A. Análisis de varianza del efecto de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia verde en planta completa.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Fuente N	3	701.83	233.94	2.77NS	2.86-4.38
Azufre	1	32.80	32.80	0.39NS	4.11-7.39
Interacción	3	38.64	12.88	0.15NS	2.86-4.38
Error	37	3118.02	84.27		
Total	44	3884.24			

NS No significativo

Cuadro 7A. Análisis de varianza del efecto de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en planta completa.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Fuente N	3	19.31	6.43	0.54NS	2.86-4.38
Azufre	1	6.63	6.63	0.52NS	4.11-7.39
Interacción	3	7.72	2.57	0.21NS	2.86-4.38
Error	37	436.87	11.80		
Total	44	468.55			

NS No significativo

Cuadro 8A. Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia verde en hojas.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Fuente N	3	27.56	9.18	1.26NS	2.86-4.38
Azufre	1	55.81	55.81	7.69**	4.11-7.39
Interacción	3	30.53	10.17	1.40NS	2.86-4.38
Error	37	268.49	7.25		
Total	44	391.37			

** Diferencia altamente significativa

NS No significativo

Cuadro 9A. Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en hojas.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Fuente N	3	2.07	0.69	0.29NS	2.89-4.38
Azufre	1	0.11	0.11	0.04NS	4.11-7.39
Interacción	3	8.00	2.66	1.13NS	2.86-4.38
Error	37	86.92	2.34		
Total	44	97.20			

NS No significativo

Cuadro 10A. Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en tallo.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Fuente N	3	702.97	234.32	3.19*	2.86-4.38
Azufre	1	21.74	21.74	0.29NS	4.11-7.39
Interacción	3	6.95	2.31	0.03NS	2.86-4.38
Error	37	2716.33	73.41		
Total	44	3457.32			

* Diferencia significativa

NS No significativo

Cuadro 11A. Análisis de varianza de las fuentes nitrogenadas y la aplicación de azufre sobre el rendimiento de materia seca en tallo.

FV	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Fuente N	3	13.79	4.59	0.58NS	2.86-4.38
Azufre	1	7.34	7.34	0.93NS	4.11-7.39
Interacción	3	20.08	6.69	0.85NS	2.86-4.38
Error	37	289.74	7.83		
Total	44	329.26			

NS No significativo

Cuadro 23A. Resultados promedio de rendimiento de materia seca, pH, CE, N total y Proteína.

Tratamiento	%N	%P	Rend	pH (20 meq S 100 g ⁻¹)	** CE (g ⁻¹)
Sin N Sin S	1.15	7.21	13.89	7.53	0.23
Sin N Con S	0.81	5.12	15.83	7.13	0.99
Urea Sin S	2.43	15.19	14.90	7.64*	0.89*
Urea Con S	1.43	8.96	15.80	7.50*	1.80*
SA Sin S	0.94	5.89	13.79	7.62*	1.05*
SA Con S	1.14	7.17	13.42	7.52*	1.80*
NA Sin S	0.99	6.23	14.22	7.63*	0.92*
NA Con S	0.86	5.37	14.61	7.51*	1.80*

* Datos tomados de Díaz, (1991).

** Relación suelo:agua de 1:5

FE DE ERRATAS

PAGINA	DICE	DEBE DECIR
10	Carbamato	Carbonato
13	2 NO ²⁻	2 NO ₂ ⁻
15	<u>et aln</u>	<u>et al</u>
37	Cuadro 5	Cuadro 3
79	Cuadro 23A	Cuadro 12A

"SERPAC"
 ENCUADERNACIONES
 TAPIA 148 OTE.
 MONTEBELLO, C. L. 74-70-44

