



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

BIOMONITOREO DEL DIOXIDO DE AZUFRE Y
ESTUDIO DE SU EFECTO EN LA ALFALFA

TESIS DE LICENCIATURA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

B I O L O G O

P R E S E N T A

FRANCISCO HERNANDEZ ORTEGA



MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DE 1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCION.....	3
MARCO TEORICO.....	5
I. Antecedentes.....	5
II. Absorción de SO ₂ por las plantas.....	6
III. Efecto del SO ₂ sobre las plantas.....	9
IV. El SO ₂ y la nutrición vegetal.....	14
V. Planteamiento del problema.....	19
VI. Descripción del área de estudio.....	21
HIPOTESIS.....	24
OBJETIVOS.....	24
MATERIALES Y METODOS.....	25
A. Material biológico.....	25
B. Diseño experimental.....	25
C. Método de campo.....	26
D. Métodos de laboratorio.....	28
C. Actividades complementarias.....	28
ANALISIS DE RESULTADOS.....	30
Dióxido de azufre atmosférico.....	30
SO ₂ y concentración de S total en la alfalfa.....	35
SO ₂ y concentración de S total y Ca en la alfalfa.....	39
SO ₂ y concentración de S total y Mg en la alfalfa.....	44
SO ₂ y concentración de S total y K en la alfalfa.....	49
CONCLUSIONES.....	54
SUGERENCIAS.....	56

LITERATURA CITADA.....	59
APENDICES.....	65
Apéndice I. Prueba de Tukey por estación y por mes.....	66
Apéndice II. Prueba de Tukey para la interacción estación * mes.....	67
Apéndice III. Gráficas de SO ₂ con concentraciones promedio por día.....	70

RESUMEN

La contaminación atmosférica en las zonas urbanas tiene un impacto negativo creciente sobre el ambiente, pues la emisión constante al aire de contaminantes, como el SO_2 , y su escasa dispersión pueden ocasionar que se registren concentraciones fitotóxicas que tienen repercusiones sobre el desarrollo de la vegetación, el cual se ve alterado por el efecto de los aeropoluantes.

Actualmente la presencia de los aerocontaminantes es comunmente registrada en el aire mediante el uso de equipo automático. Sin embargo, la detección de éstos también puede realizarse utilizando plantas indicadoras (como la alfalfa) que permiten además apreciar los efectos del aeropoluante sobre la vegetación, enriqueciendo con ello la información que se obtiene con monitoreo automático.

En la Ciudad de México, de los contaminantes atmosféricos sin duda el ozono es actualmente el de mayor importancia. No obstante el SO_2 , considerado uno de los contaminantes mas destructivos del ambiente, ha presentado en los últimos años (hasta 1990 por lo menos) una tendencia a incrementar sus concentraciones atmosféricas. Por ello se planteó la necesidad de realizar el monitoreo de SO_2 y relacionar las concentraciones atmosféricas de éste con la concentración de azufre total en la alfalfa, evaluando con ello la absorción del SO_2 por esta especie y a su vez su eficiencia como bioindicadora. Asimismo, con el fin de profundizar en el estudio del efecto que puede tener el SO_2

como aeropoluante sobre el mencionado cultivo, se relacionaron las concentraciones atmosféricas de éste con las concentraciones de S total, Ca, Mg y K en el tejido de dicha leguminosa. El registro cuantitativo del SO_2 se realizó con monitoreo automático en el Norte (Tlalnepantla), Centro (Merced) y Sur (Pedregal) de la Ciudad de México, de Enero a Mayo de 1992. Exponiendo durante 28 días plantas de alfalfa y evaluando antes y después de su exposición sus concentraciones de S total, Ca, Mg y K.

El SO_2 presentó las mayores concentraciones atmosféricas en Tlalnepantla, las cuales fueron ligeramente menores en Merced, siendo Pedregal el sitio con las mas bajas concentraciones. Este contaminante se incrementó en el aire principalmente en Enero y Febrero, descendiendo hacia Mayo.

Se observó una eficiencia aceptable de la alfalfa como bioindicador de SO_2 . Encontrándose que existe una relación positiva ascendente entre el S total en la alfalfa y el SO_2 atmosférico, con lo cual se verificó la absorción de este aeropoluante por las plantas expuestas al mismo. También fue observada una relación similar a la descrita anteriormente entre el Mg con el S total, siendo menos apreciable una relación SO_2 -Mg. La concentración de Ca en la leguminosa utilizada mostró una relación lineal descendente con respecto al SO_2 y el S total, mientras que la concentración de K no se relacionó con ninguno de éstos últimos parámetros.

INTRODUCCION

El consumo energético y de materiales por el hombre es una de las principales causas de la contaminación química de la biósfera. Este proceso lleva a la introducción de cambios que perturban el equilibrio de los ecosistemas y, provocan una degradación del ambiente natural. De los contaminantes vertidos a la atmósfera se considera que el SO_2 , los compuestos oxidantes (O_3 , NO_2 y Peroxiacetilnitratos), los hidrocarburos y los oligoelementos son los más importantes desde un punto de vista ecológico y sanitario (Kabata, 1979).

Los óxidos de azufre son producidos por la combustión de diesel (con 3.5 % de azufre) y combustibles (con 0.4 % de azufre) utilizados por la industria y camiones pesados (Bravo, 1990-A). Respecto a las fuentes de emisión, en 1980 la Secretaría de desarrollo social estimó que en la Ciudad de México el 95 % del SO_2 emitido provino de fuentes fijas; vertiéndose 503 toneladas de SO_2 al aire, de las cuales el 40 % lo generó la refinería "18 de Marzo", el 39 % las 2 termoeléctricas y el 21 % la industria en general (Riveros, 1990). Estos factores provocaron un incremento en las concentraciones atmosféricas del SO_2 en la Ciudad de México, lo cual no sólo se mantuvo hasta 1989, sino que tendió a incrementarse (Bravo, 1990-B). Esta situación debe atraer fuertemente nuestra atención, ya que los óxidos de azufre son los contaminantes atmosféricos más destructivos -directa o indirectamente - tanto del suelo y la vegetación como de algunos monumentos históricos (Kabata, 1979).

El efecto del SO_2 sobre la vegetación se ha estudiado desde diferentes aspectos: económico, estético y ecológico; y desde diferentes niveles de organización; ecosistema, población, individuo, de órgano, de tejido y de célula. La información generada por tales investigaciones es complementaria, ya que en conjunto proporcionan una visión holística de las alteraciones que provoca este contaminante en las plantas. Entre las técnicas para evaluar esto último se puede mencionar al monitoreo con plantas (Biomonitoreo). El cual consiste en realizar una medición continua de alguna (s) característica (s) propia (s) del vegetal utilizado como biomonitor. Con lo cual se obtiene información que puede servir para conocer la calidad del aire en relación con las plantas (Posthumus, 1980) y el efecto de este aeropoluante sobre el estado nutricional de las mismas (Jacobson, 1989). Aspectos que son objetivos de el presente estudio, evaluando además la utilidad de la alfalfa como material biomonitor de SO_2 , y asimismo; se estudió el efecto que tiene el SO_2 sobre el contenido de K, Ca y Mg en el desarrollo de la alfalfa. Realizándose la investigación mediante monitoreo automático y biomonitoreo en tres estaciones (Tlalnepantla, Merced y Pedregal) de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

MARCO TEORICO

I. Antecedentes.

El SO_2 se encuentra entre los contaminantes más estudiados debido a los efectos que tiene tanto en los sistemas acuáticos, como sobre construcciones, suelo y desde luego sobre la vegetación. Los trabajos para el estudio de este aerocontaminante y su efecto sobre la vegetación abarcan desde musgos, líquenes, gimnospermas hasta angiospermas. Generándose gran cantidad de información que suele ser tanto muy rica como diversa, por ejemplo, en el caso de los musgos se ha observado que el SO_2 puede llegar a bloquear el ciclo reproductivo de algunas especies (Nash, 1974). También, en organismos como los líquenes, que es la porción algal de éstos la parte más susceptible a concentraciones 0.154 ppm de SO_2 ; llegándose inclusive a relacionar la concentración de azufre en estos vegetales con los niveles de SO_2 a que son expuestos (Le Blanc, 1973). Además se ha visto que el SO_2 puede ocasionar un decremento en el crecimiento y la síntesis de almidón en plántulas de pino (Scherzer, 1989). En cuanto a las angiospermas, entre las dicotiledóneas herbáceas más utilizadas para investigaciones del SO_2 se citan al frijol, el tabaco y la alfalfa (Halbwaks, 1984). Esta última ha sido usada con dicho fin desde los primeros trabajos, llegando ha ser considerada como una de las plantas más sensibles a SO_2 (USEPA, 1976). Asimismo, tanto en alfalfa como en otras especies se han apreciado altas concentraciones de azufre en follaje dañado por previa

exposición a SO₂ (Linzon, 1973). Relacionándose tal acumulación de azufre con la distancia a la cual se encuentra ubicada la fuente emisora de SO₂ (Taylor, 1978).

También se ha apreciado que la presencia de sulfatos en la depositación húmeda puede elevar la concentración de azufre en las hojas y decrementar el contenido de Ca, Mg y K en las mismas (Jacobson, 1989). De estos tres elementos, al parecer, es el K el que presenta una mayor disminución en su concentración foliar por esta causa (Turner, 1990). Al respecto en estudios con Picea, Abies y Larix, se ha observado que junto con la acumulación de azufre se presenta una variación en la concentración foliar de Ca y Mg (Zech, 1985). Lihnell (Citado en Manning, 1980) logró mapear los efectos por SO₂ sobre Abedul, Manzano y Picea mediante la cuantificación de azufre; encontrando relación entre la cantidad de azufre total foliar y la reducción en el crecimiento del Abedul. La alfalfa por su parte, también ha presentado inhibición de su crecimiento y una pérdida del área foliar funcional como resultado de su exposición al SO₂, lo cual se ha correlacionado con pérdidas en su productividad (Tingey et al., 1979).

II. Absorción del SO₂ por las plantas.

En la absorción del SO₂ por parte de las plantas influyen factores ambientales como la humedad relativa, intensidad de viento, temperatura e intensidad de luz; ya que estos intervienen directamente en la abertura estomática. Siendo esta la vía

principal de entrada para el SO_2 al tejido vegetal, aunque no la única, pues este gas puede penetrar por su absorción a partir de las superficies cuticulares húmedas (Malhotra y Khan, 1984). Al respecto, se ha encontrado que las plantas son normalmente más sensibles al SO_2 cuando la humedad ambiental aumenta. Una respuesta posiblemente debido a la gran influencia que tiene en la abertura de los estomas (Barret y Benedict, 1970). También se ha apreciado una mayor absorción de SO_2 cuando las hojas están húmedas, debido a la elevada solubilidad del SO_2 en agua (Smith, 1981).

Otros factores que influyen en la respuesta de las plantas al SO_2 son la etapa de crecimiento y la constitución genética. Barret y Benedict, 1970) señalan que las hojas en pleno crecimiento suelen ser las más sensibles al SO_2 , seguidas por las hojas ya maduras. Por su parte, la constitución genética controla las diferencias intra e interespecíficas de susceptibilidad a SO_2 . Así, especies relacionadas o variedades de una misma especie pueden mostrar considerable variación en sus respuestas, que inclusive llegan a diferir entre miembros de una sola variedad (Krupa, 1977).

Uno de los factores determinantes en la respuesta de las plantas a la absorción de SO_2 , es el estado nutricional de las mismas. Cabe señalar que el azufre es un elemento indispensable para la nutrición vegetal, aunque anteriormente se pensó que las plantas podían satisfacer sus requerimientos de tal nutrimento solamente por absorción radical en un sustrato, hoy en día ha

sido observado que la incorporación de S a la planta en forma de SO_2 por difusión a través de los estomas también ayuda a satisfacer parte de las necesidades de este nutrimento para su desarrollo (Linzon et al., 1979).

Un último factor de consideración en la respuesta de las plantas al SO_2 es la presencia de otros gases fitotóxicos en el ambiente además de el SO_2 . Ya que el posible daño que provoquen tales aeropoluentes sobre la vegetación puede llegar a ser no sólo diferente al que ocasionen por sí solos sino, aun mayor, proceso que es comunmente denominado como sinergismo (Manning, 1980). Ejemplos de lo anterior son los siguientes: Krupa (1977) señala a Menser y Heggstad como los primeros en reportar que la exposición de tabaco Bel W-3 a mezclas de SO_2 y O_3 le ocasionaba un mayor daño que cuando se exponía a cada uno por separado; Mond y Reitner (Citados en Taylor, 1978) demostraron que el daño resultante del sinergismo entre el SO_2 y el HF es mayor que la suma de los daños provocados por cada uno aisladamente; Jacobson (Citado en Manning, 1980) menciona el desarrollo de lesiones necróticas intervenales en frijol y tabaco expuestos a O_3 y SO_2 ; Posthumus (1980) no sólo reafirma el sinergismo entre estos dos últimos gases, sino que con respecto al NO_2 , cita que se requieren de 4 a 10 veces mas Dióxido de nitrógeno que Dióxido de azufre para provocar necrosis intervenal. Asimismo señala que (para estudios de campo) es importante considerar que en localidades donde suelen presentarse elevadas concentraciones atmosféricas de SO_2 , también llegan a registrarse altas concentraciones de NO_2 en el aire. Cabe señalar en este punto, que el uso de parámetros

como la cuantificación de azufre total apoyan las evaluaciones realizadas para conocer el efecto del SO_2 sobre la vegetación, las cuales normalmente se basan en una sintomatología descrita mas adelante.

III. Efecto del SO_2 sobre las plantas.

Con la exposición al SO_2 , uno de los efectos apreciables es un incremento en el contenido de azufre total (principalmente inorgánico) en el tejido vegetal (Tingey *et al.*, 1979). Aunque el S absorbido como SO_2 no queda fijo en el sitio de absorción, pues tiene un sustancial grado de movilidad. Tales traslocaciones se dan de hojas viejas a hojas jóvenes, de hojas a raíces y de raíces al medio, con lo cual las plantas pueden llegar a considerarse como un "depurador" del aire con respecto al SO_2 (Malhotra y Khan, 1984). Aunque al respecto ha sido señalado que los sulfatos formados en las hojas de alfalfa por esta vía son retenidos totalmente, situación que no ocurre por ejemplo con el tomate, donde una considerable cantidad de los sulfatos formados en las hojas son traslocados (USEPA, 1976). Según Malhotra y Khan (1984) precisamente las plantas más sensibles a SO_2 son las que absorben mayor cantidad de este aeropoluante. Presentándose una alta acumulación de azufre cuando son expuestas a bajas concentraciones de SO_2 durante tiempo prolongado, siendo menor el contenido de azufre en plantas expuestas a altas concentraciones de SO_2 en lapsos de tiempo cortos, ya que ello ocasiona un colapso de la regulación estomal. En este sentido, Guderian (Citado en Halbwaks, 1984) señala que la acumulación de

azufre se incrementa con la frecuencia de exposición de la planta al SO_2 . Este proceso de acumulación proporciona entonces una alternativa para apoyar la diagnosis del daño que suele provocar el SO_2 sobre la vegetación; puesto que si síntomas visuales indican que el SO_2 puede haber causado un daño particular en la planta, entonces un alto contenido de S en el tejido foliar apoya tal diagnostico, aunque no necesariamente la establece, pues el daño por SO_2 puede inclusive presentarse aun cuando el nivel de S en las hojas no sea mayor de el normal (Tingey et al., 1979).

En este punto es necesario resaltar la gran importancia que tiene para la realización del biomonitoreo de SO_2 la eficiencia del bioindicador elegido para tal fin. Pues la capacidad y velocidad con que es absorbido el SO_2 y la consecuente acumulación de S en la planta varían con el tiempo de exposición. Por lo cual en caso de utilizar una misma planta para este tipo de evaluación, es necesario llevar al bioindicador a un proceso de desaturación de S bajo condiciones favorables para su desarrollo, incluyendo desde luego aire exento de SO_2 . Como ejemplo de lo anterior se ha observado que en concentraciones altas (0.20 - 0.40 ppm) el efecto del SO_2 sobre las plantas aumenta en las 2 primeras horas de fumigación, siendo menos variable después de este lapso de exposición (Darrall, 1989).

El SO_2 también es capaz de causar alteraciones en la capacidad fotosintética del bioindicador. En este aspecto, experimentos realizados con alfalfa indican que si la destrucción del tejido fotosintéticamente activo es de un pequeño porcentaje (< 5 %),

no hay efecto sobre la productividad de este cultivo (Barret y Benedict, 1970). Aquí cabe señalar que al parecer las respuestas a fumigaciones cortas y repetitivas dependen de la concentración del SO_2 y la frecuencia de su aplicación. Puesto que luego de varias fumigaciones de este tipo se presenta un efecto inhibitorio y un declinamiento en la capacidad fotosintética del vegetal. Por su parte las fumigaciones con concentraciones bajas de SO_2 , muestran efectos que son reversibles en lapsos de tiempo relativamente cortos, si el área foliar fotosintética no ha sufrido un marcado decremento. En particular la menor dosis (concentración de SO_2 /tiempo de aplicación) de SO_2 con la cual se ha provocado una alteración sobre la capacidad fotosintética de la alfalfa es de 0.075 ppm durante 166 días, aunque en este caso no hubo una relativa reducción en el crecimiento. En cambio tanto en alfalfa como en otras especies agrícolas, se ha observado una variación en el porcentaje de crecimiento al iniciar un período de fumigación 6 bien bajo altas concentraciones de SO_2 ; con un posterior desarrollo de hojas más tolerantes a este aeropoluante (Darrall, 1989).

El efecto del SO_2 puede dividirse en 2 categorías: no visible y visible. La primera no es fácilmente identificable y puede ser reconocida sólo por el monitoreo del crecimiento de la planta, su productividad o bien por evaluaciones de parámetros fisiológicos seleccionados. En cuanto a la segunda categoría, se produce en el follaje por pigmentación o por el desarrollo de características y coloraciones foliares típicas como resultado de muerte celular (Krupa, 1977).

Los efectos visibles pueden ser divididos en daños agudos y crónicos: el daño agudo por SO_2 es caracterizado por muerte celular como resultado de exposiciones a altas concentraciones de SO_2 en periodos cortos de tiempo. Y se manifiesta como clorosis intervenal y áreas de tejido muerto en las orillas o zonas intercostales de las hojas, que previamente presentan una coloración gris-verde y una apariencia húmeda. Además, cuando la mayor proporción de la hoja es dañada una capa de absición se forma frecuentemente en la base del peciolo y la hoja es eliminada. En la alfalfa por ejemplo, primero aparece el marcado típico agudo en las orillas de las hojas y después se extiende hacia la base de las mismas (Halbwaks, 1984). Un exámen histológico de una lesión causada por SO_2 , en su etapa inicial revela un colapso de las células del mesófilo cercanas al estoma. En este aspecto se debe resaltar que la ausencia de mesófilo colapsado junto a las áreas necróticas puede eliminar al SO_2 como una causa de necrosis (USEPA, 1976).

En el caso del daño crónico, las plantas expuestas a concentraciones no mortales de SO_2 presentan síntomas cloróticos, especialmente si la exposición es continua. Aunque las células de las hojas no mueren, éstas presentan una decoloración o emblanquecimiento de la clorofila. Lo cual se observa como una suave clorosis o amarillamiento de la hoja, o bien como un plateado o bronceado de la parte inferior. La alfalfa y el algodón frecuentemente muestran un plateado subsuperficial debido a un colapso celular bajo la epidermis (Barret y Benedict, 1970 y Posthumus, 1980). Al parecer la pérdida de color verde resulta

de la plasmólisis de los cloroplastos en las células del mesófilo y consecuentemente, la destrucción de clorofila ocasiona una apariencia blanquecina y pérdida de verdor (USEPA, 1976).

Desde que el SO_2 entra al tejido del mesófilo está expuesto a varios procesos químicos. Reacciona con agua para producir sulfito, el cual a su vez es rápidamente oxidado hasta sulfato, y este ión ya puede ser utilizado por la planta como azufre nutrimental, incorporándolo posteriormente a compuestos de forma orgánica. Pero ambos iones son tóxicos para las plantas cuando están presentes en determinadas concentraciones, aunque autores como Posthumus (1980) señalan que el sulfito es hasta 30 veces más fitotóxico que el sulfato. Como se mencionó ya, una vez dentro de la hoja el SO_2 es convertido a SO_3 , si este proceso es más rápido que la conversión de SO_3 a SO_4 , entonces el sulfito se acumula y produce un daño de tipo agudo. Pero si la capacidad de la planta para oxidar el sulfito hasta sulfato es suficiente para evitar la acumulación de SO_3 , entonces la concentración de SO_4 se incrementa y al acumularse en exceso produce un daño crónico por un excesivo contenido de sales de este tipo (Barret y Benedict, 1970 y Manning, 1980).

Los efectos del SO_2 dependen grandemente de la capacidad de los tejidos vegetales para convertir a este aeropoluante en formas relativamente poco tóxicas. El SO_3 y el HSO_3 son los principales productos de la disolución del SO_2 en solución acuosa, y sus respectivas concentraciones dependen del pH que presente el medio. Ambos compuestos han mostrado ser tóxicos para varios procesos

bioquímicos y fisiológicos. Pero las plantas pueden abatir tales efectos fitotóxicos convirtiendo dichos iones en formas menos dañinas como los sulfatos. La oxidación de SO_3 a SO_4 puede ser efectuada por mecanismos enzimáticos o no enzimáticos. Esta oxidación del SO_3 puede ser estimulada por enzimas celulares como peroxidasas, citocromo oxidasas, ferredoxin-NADP reductasa y con catalizadores como metales y luz ultra violeta. Otra vía es por la presencia del radical peróxido en los cloroplastos durante la captación de luz, lo cual también fomenta la oxidación del SO_3 (Malhotra y Khan, 1984).

IV. El SO_2 y la nutrición vegetal.

Generalmente las plantas que cuentan con una adecuada proporción de nutrimentos para su desarrollo son menos sensibles a presentar daños por efecto de algún contaminante aéreo. En este aspecto cabe señalar que la deficiencia de un nutrimento puede ser reflejada por reducción del crecimiento y de el peso seco final, síntomas similares a los presentados por efectos no visibles del SO_2 . Además pueden presentarse signos visibles como clorosis, decoloración y necrosis en las hojas, síntomas que también se desarrollan como efectos visibles provocados por el SO_2 (Cowling y Koziol, 1982).

Al estudiar la respuesta que tienen las plantas expuestas a SO_2 , con respecto a su estado nutricional, se ha encontrado que éstas son más susceptibles de ser dañadas por tal aeropoluante cuando el contenido de azúcares en las hojas de las plantas es

bajo (Barret y Benedict, 1970). Por otro lado, autores como Bleasdale (Citado en Cowling, 1982) trabajando con trigo, tomate y alfalfa, han observado que si bien las plantas incrementan su crecimiento con la adición de nutrimentos, al ser expuestas al SO_2 ambiental el crecimiento decae y es aun menor en aquellas plantas con baja proporción de nutrimentos; presentándose además una senectud foliar prematura en ambos casos. Guderian (Citado en Mudd, 1975) también reafirma la importancia del estado nutrimental en el desarrollo de daños por causa del SO_2 ; por ejemplo señala que un incremento en los niveles de Ca y K tiende a disminuir los efectos del SO_2 . Al parecer la mayor posibilidad de un decremento en la cantidad de nutrimentos en las hojas es mayor en un estadio avanzado de madurez. Y a su vez, las hojas de plantas sanas suelen ser más resistentes a pérdidas de nutrimentos que aquellas con fitopatógenos ó bajo presión por contaminación atmosférica (Smith, 1981).

La importancia que tengan los elementos nutrimentales para las plantas depende de las funciones que desempeñen en el metabolismo y la constitución de las mismas. Así por ejemplo el Ca es importante en la síntesis de pectina y elemento fundamental en la constitución de las paredes celulares. También está involucrado en el metabolismo y formación del núcleo celular y las mitocondrias; igualmente es cofactor de muchas enzimas en la hidrólisis del ATP y los fosfolípidos. Favorece el desarrollo radicular y es esencial para la nodulación y fijación simbiótica del nitrógeno (Cázar, 1988 y Rojas, 1984). En la alfalfa la deficiencia de este elemento suele manifestarse por un colapso de

los peciolos, coloreándose de rojo púrpura la parte inferior de las hojitas nuevas. Mientras que las hojas jóvenes y maduras desarrollan una necrosis en sus orillas, que suele ser precedida por un amarillamiento del tejido. Esta necrosis comienza en el ápice de la hoja y se caracteriza por una coloración azul-verde inicial que más tarde pasa a color blanco (Graham, 1987).

El magnesio por su parte es un integrante de la clorofila, por lo cual es esencial en el metabolismo de los carbohidratos (Primo, 1981). Interviene en el metabolismo del nitrógeno y en la síntesis de aceites. Considerándose que está asociado con el metabolismo del fósforo y que interviene en la activación de enzimas (Muslera y Ratera, 1984, citados en Cázarez, 1988). Un estado de deficiencia por magnesio en la alfalfa ocasiona clorosis intervenal, mientras que las orillas de las hojas pasan a un estado necrótico y después mueren. Estos síntomas progresan de las hojas maduras a las hojas jóvenes (Graham, 1987).

Otro nutrimento de gran importancia es el potasio, uno de los elementos con mayor presencia en la alfalfa. Bolton (Citado en Cázarez, 1988) señala entre las funciones más importantes de este nutrimento a las siguientes: a) Síntesis y degradación de carbohidratos y traslocación de almidón (que resulta en mayor área foliar y retraso en la senectud); b) Participación en el metabolismo del nitrógeno y la síntesis de proteínas; c) Neutralización de ácidos grasos y activación de enzimas; d) Estimulación del crecimiento de meristemas, así como del número y ritmo de la actividad estomatal y e) Contribución a la resistencia

de los tejidos vegetales, tornándolos menos sensibles a los efectos del frío y a las invaciones parasitarias. Una deficiencia de potasio en la alfalfa puede observarse como puntos blancos en la orilla de las hojas, donde las áreas entre estos puntos se tornan amarillas y posteriormente mueren. En algunos casos las hojas maduras cambian a un color amarillo, el cual se acentúa antes de llegar a un color café necrótico desarrollado en las orillas. Otro tipo de síntomas manifestado por la deficiencia de este macronutriente es la presencia de puntos gris tenue en la parte superior de la hoja y en el extremo del ráquis de las hojas maduras. Estas áreas cambian a color canela, resultando posteriormente un inicio de necrosis en los bordes, lo cual se extiende a través de la hoja entera (Graham, 1987).

El estado nutrimental de la planta es de primordial importancia, ya que un contenido nutrimental por debajo del óptimo ocasiona que el crecimiento también lo sea. Así se puede presentar un incremento en éste con una mayor disponibilidad nutrimental, hasta un punto crítico. Ya que niveles de abastecimiento nutrimental altos provocan la acumulación de determinados elementos, afectando con ello el desarrollo. La elevada concentración en la planta de algún nutriente, tiene repercusión en la absorción y asimilación de otros elementos, pues pueden presentarse efectos de sinergismo y antagonismo entre nutrientes. Una relación sinérgica se presenta cuando la absorción de un nutriente es mejorada por otro; mientras que en el antagonismo, con la absorción de un nutriente se restringe la absorción de otro (Mengel y Kirkby, 1978).

Al mantener las plantas una relación anión / catión más o menos constante, para una concentración dada de aniones, cualquier acumulación de uno o más cationes debe ir acompañada por un decremento aproximadamente equivalente de otro de los cationes respectivos (Gauch, 1972 y Wallace et al., 1949, citados en Cázarez, 1988).

Generalmente la absorción de cationes aumenta con la absorción de aniones; apreciándose por ejemplo que la absorción de Ca^{2+} en presencia de otros iones decrece en el orden $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- = \text{Br}^- > \text{SO}_4^-$ y H^+ (Maas, 1969 y York et al., 1953, citados en Hugh, 1973). Asimismo, un alto contenido de Ca en la alfalfa, puede inhibir la absorción de Mg, no presentándose la misma acción con respecto al K. Mientras que la elevada absorción del K en la alfalfa, interfiere con la absorción de Ca y Mg, no observándose inhibición en la absorción de potasio con una alta concentración de magnesio (Leggett y Egli, 1980 y Omar y El Kobbia, 1965, citados en Gartner, 1985).

Cabe señalar que el contenido de los elementos nutrimentales en los tejidos varia con la edad de la planta, por ejemplo el potasio es absorbido mayormente durante las etapas vegetativas y se redistribuye de órganos viejos a órganos jóvenes, siendo el más móvil de todos los nutrimentos. El Ca en cambio es un nutrimento inmóvil; este elemento no es redistribuido fácilmente a los tejidos jóvenes y sin embargo, tanto el desarrollo de nuevas hojas

así como el de los frutos dependen del transporte de calcio en el flujo transpiratorio por el xilema. Al igual que el Ca, el Mg frecuentemente se incrementa con la edad de la planta, aunque éste último es más móvil. La movilidad del magnesio tiene gran importancia, puesto que el desarrollo de frutos y órganos de almacenaje depende de su redistribución (vía floema) a partir de las hojas maduras (Steucek y Kootz, 1970 y Mc Kently, 1981 citados en Gartner, 1985 y Mengel y Kirkby, 1978).

V. Planteamiento del problema.

La contaminación por SO₂ en la Ciudad de México plantea la necesidad de realizar un mayor número de investigaciones en este campo, y de que los estudios a realizarse sean cada vez más completos. Proporcionando con ello información y alternativas para la mejor comprensión de el efecto que tiene este aeropoluante sobre los recursos naturales. Actualmente aun son pocas -dada su importancia- las dependencias de investigación y estatales que dedican parte de sus actividades a este problema. A pesar de que el SO₂ ocasiona importantes daños en los ecosistemas, como acidificación de sistemas acuáticos y del suelo, ocasionando en éste último una lixiviación de nutrientes y liberación y acumulación de compuestos de aluminio, mientras que en los primeros se ha observado un decremento de la diversidad en los peces que los habitan. Asimismo, dicho contaminante puede llegar a corroer (mediante la acción de sus derivados ácidos) algunos metales y deteriorar construcciones y monumentos de constitución

calcárea. La vegetación también se vé afectada, apreciándose una perturbación del intercambio gaseoso y de los procesos metabólicos.

Hoy en día la Ciudad de México cuenta con una red automática de monitoreo atmosférico (RAMA) con la cual se realiza un monitoreo continuo de SO₂. Sin embargo, el uso de bioindicadores (como la alfalfa) pretende, entre otras cosas, proponer métodos alternativos para el monitoreo de este contaminante. El método de biomonitoreo no es excluyente de aquellas técnicas que utilizan equipo automático, sino que proporciona información complementaria. Pues las plantas indicadoras además de detectar la presencia del aeropoluante, también manifiestan mediante una sintomatología característica el efecto que tiene en ellas su presencia y concentración en la atmósfera, y si además de la sintomatología desarrollada por las plantas, se realiza la cuantificación del azufre total en el bioindicador, la información generada por este método es más confiable, ya que la acumulación de azufre en las plantas expuestas al SO₂ suele ser una consecuencia de la absorción de este aeropoluante.

Pero en el estudio del SO₂ no sólo es necesario realizar su detección, sino que además es importante conocer que efectos tiene sobre la vegetación. Por ello se plantea realizar evaluaciones que nos permitan observar si este aeropoluante puede llegar a ocasionar alteraciones en el contenido de Ca, Mg y K de la alfalfa. Ya que estos elementos son considerados nutrimentos

para el desarrollo de las plantas, y cuyas deficiencias pueden manifestarse mediante síntomas visibles parecidos a los síntomas observados por daños crónicos y agudos provocados por SO₂.

VI. Descripción del área de estudio.

En cuanto a la localización de la zona de estudio, mencionaremos que la Ciudad de México se encuentra en el suroeste del Valle de México, entre los paralelos 19°03' y 19°35' de latitud norte y los meridianos 98°57' y 99°23' longitud oeste, con una altitud de 2240 msnm en las zonas más bajas, la cual suele variar de acuerdo a la topografía que se presente. En cuanto al clima, a pesar de que la urbe se localiza en una zona intertropical -debido a la altitudes de tipo templado, con influencias de aire marino y continental.

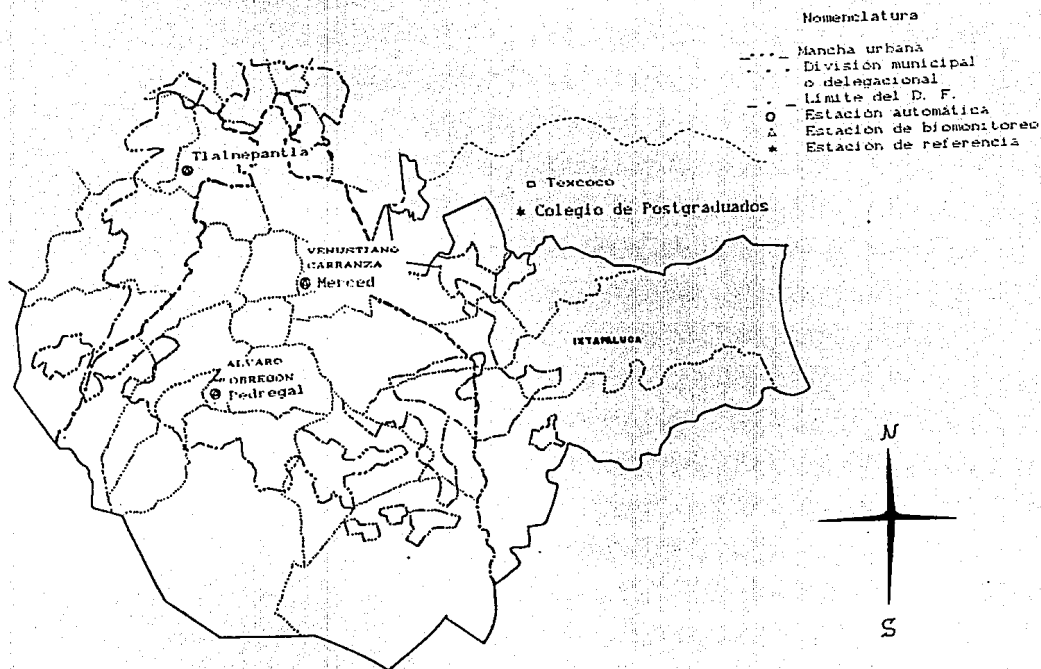
La zona metropolitana se encuentra rodeada por las cadenas montañosas de la Sierra de Pachuca (N), Sierra de Chichinautzin, (S) Sierra de Río Frío (E), Sierra Nevada (E) y Sierra de Las Cruces (W). Las cuales dan forma a una cuenca cerrada impidiendo con ello una buena circulación de las corrientes de aire que podrían "limpiar" la atmósfera de contaminantes. Presentando por lo tanto una serie de características muy particulares para estudios de contaminación ambiental (Tirado, 1982).

El presente estudio comprendió el biomonitoreo en tres diferentes puntos localizados en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Al norte se eligió el municipio de

Tlalnepantla, Edo. de México; en la parte central la delegación Venustiano Carranza y al sur la delegación Alvaro Obregón. En éste municipio y delegaciones se ubican respectivamente las estaciones de monitoreo atmosférico Tlalnepantla, Merced y Pedregal, pertenecientes a la RAMA (Fig. 1). Dichas estaciones presentan las siguientes características : Tlalnepantla se localiza a $19^{\circ} 33'$ latitud norte y $99^{\circ} 11'$ longitud oeste a 2251 msnm, con una precipitación de 640.8 mm y una temperatura promedio anual de 15°C ; Merced está localizada a $19^{\circ} 23'$ latitud norte y $99^{\circ} 7'$ longitud oeste a 2250 msnm, su precipitación anual es de 595.5 mm y su temperatura promedio anual de 16°C y finalmente Pedregal está ubicada a $19^{\circ} 26'$ latitud norte y $99^{\circ} 8'$ longitud oeste a 2273 msnm, con una precipitación de 596.5 mm al año y una temperatura promedio anual de 16.6°C (García, 1973).

Los tres puntos de monitoreo fueron seleccionados con base a dos criterios: a) Que contáran con equipo automático para monitoreo de SO_2 y b) Considerando lo descrito por SEDUE (1990) según lo cual se observa una zonificación en la distribución de las concentraciones en la Ciudad de México para este contaminante, en la que se aprecian las mayores concentraciones atmosféricas al norte, disminuyendo hacia el centro y presentando su menor nivel en el sur de la ciudad. Además de las estaciones en la zona metropolitana, se ubicó una estación de referencia en el Colegio de Postgraduados localizado en el municipio de Texcoco, al noreste de la Ciudad de México. Esta estación se encuentra en la localidad de Chapingo, lugar situado a $19^{\circ} 29'$ latitud norte y $98^{\circ} 53'$ longitud oeste, donde se registra una temperatura promedio

FIG. 1. UBICACION DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO.



anual de 15° C y una precipitación de 644.8 mm por año (García, Op. cit.). Este sitio presenta poca influencia de los vientos que intervienen en la inmisión de los contaminantes atmosféricos emitidos en la zona urbana, y no cuenta con grandes complejos industriales productores de SO₂.

HIPOTESIS

- a) *El SO₂ en el aire de la Ciudad de México es absorbido por las plantas, como en el caso de la alfalfa.*
- b) *La absorción y acumulación de SO₂ en las plantas de alfalfa provoca variaciones en el contenido normal de algunos nutrimentos como Ca, Mg y K.*

OBJETIVOS

- a) Estudiar la relación que existe entre las concentraciones de SO₂ en el aire con las concentraciones de azufre total en la alfalfa utilizada como biomonitor.
- b) Relacionar las concentraciones de Ca, Mg y K en el cultivo señalado expuesta a SO₂ con la concentración atmosférica de este contaminante.
- c) Estudiar la relación cuantitativa que presenta la concentración de azufre con las concentraciones de Ca, Mg y K evaluadas en dicha leguminosa, expuesta a SO₂ ambiental.

MATERIALES Y METODOS

A. Material biológico.

El material biológico seleccionado para el biomonitorio de SO_2 fue la alfalfa (*Medicago sativa* Cv. Valenciana), la cual ha sido utilizada en múltiples estudios de este tipo, llegando inclusive a tomarse como referencia para evaluar el efecto del SO_2 en otras especies (Darley et al., 1966). Otras características para su elección fueron que se desarrolla bastante bien en climas como el que predomina en el Valle de México, las prácticas culturales para su producción son simples y que es de rápido crecimiento.

B. Diseño experimental.

Para el biomonitorio del SO_2 se utilizó un experimento factorial con un diseño experimental completamente al azar y cuatro repeticiones. Formando la unidad experimental (U.E.) de dos macetas con 40 plantas cada una. Los factores fueron estaciones y meses con cuatro y cinco niveles respectivamente. El tratamiento consistió en exponer al ambiente cuatro U. E. en cada estación por un periodo de un mes. La estación Chapingo se consideró como el tratamiento testigo; debido a que ésta área está relativamente libre de contaminantes atmosféricos y a que plantas indicadoras de contaminación atmosférica ubicadas en el mismo sitio donde se colocaron las plantas de referencia en esta localidad, no mostraron ningún síntoma visible en los tres años previos al experimento, ni durante la realización del mismo.

A todas las variables registradas se les hizo análisis de varianza, para lo cual se utilizó el Sistema de Análisis Estadístico (SAS versión 6.04, 1985), el cual asume como H_0 : que las medias son iguales ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots \mu_n$). Además se realizó análisis de correlación entre las variables manejadas.

C. Método de campo.

-Tanto la producción como la recuperación de las plantas se realizó en un invernadero del Colegio de Postgraduados.

-En cada maceta la siembra se realizó manualmente esparciendo uniformemente aproximadamente 15 g. de semilla sobre suelo tipo franco mezclado (1:1) con tezontle, usando recipientes de unicel (con 16 cm de diámetro y de profundidad) como macetas.

-Se diluyeron 42 ml de solución nutritiva de Schwarz (1975) en 3 litros de agua de riego, aplicando 70 ml (siendo este volumen suficiente para tener el suelo a capacidad de campo) de ésta en cada maceta, cada tres riegos a partir de la emergencia de las plántulas o bien al iniciar el periodo de recuperación del follaje.

-Se establecieron 2 lotes (A y B) de 16 U. E. cada uno alternándolos ya sea en la exposición en campo o en la recuperación de las plantas durante los cinco meses (de Enero a Mayo de 1992) que duró el estudio. Exponiéndose el lote A en Enero, Marzo y Mayo y el lote B en Febrero y Abril.

-Al iniciar la exposición cada maceta debía contener por lo menos 40 plantas de alfalfa de 10 cm de altura aproximadamente. Cortándose 20 plantas en cada maceta de la misma repetición y juntándose (40 en total) en una bolsa de papel estrasa para constituir una muestra-corte 1 (preexposición).

-Al finalizar el periodo mensual de exposición se cortaron nuevamente 20 plantas (no pertenecientes al corte 1) en cada una de las macetas de la misma repetición, almacenándose juntas en una bolsa de papel estrasa para constituir una muestra-corte 2 (postexposición).

-Las plantas de este lote (A) posteriormente fueron llevadas a condiciones de invernadero y aire filtrado para su recuperación. Mientras tanto, las plantas del otro lote (B) fueron expuestas a condiciones ambientales realizando con ellas el biomonitoreo del siguiente mes bajo el procedimiento arriba descrito. Esta sustitución de un lote expuesto a condiciones ambientales por otro no expuesto a éstas fue efectuado cada vez que finalizó el respectivo lapso mensual de biomonitoreo.

Por su parte el equipo de monitoreo automático realizó la cuantificación de SO₂ atmosférico en cada estación. Reportando la concentración de SO₂ cada hora. Esta información fue organizada y finalmente utilizada para la parte estadística como promedios mensuales de SO₂ para cada estación.

D. Metodos de laboratorio.

-Después de cada corte (fuera corte 1 ó 2) las muestras se secaron a 70° C durante 24 horas y posteriormente se almacenaron en un lugar no húmedo.

-Una vez secas, las muestras se molieron en un molino Willey con malla 40, para posteriormente realizar el análisis vegetal. Lo cual se efectuó en el Centro de Edafología del Colegio de Postgraduados.

-La determinación de azufre total en la alfalfa se realizó mediante el método turbidimétrico del sulfato de bario, previa oxidación del tejido vegetal con la mezcla $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ y O_2H_2 (Chapman, 1984).

-Para evaluar la concentración de Ca, Mg y K se sometió el material vegetal seco a una digestión húmeda triácida (H_2SO_4 , HClO_4 y HNO_3) y posteriormente se cuantificó el Ca y el Mg por espectrofotometría de absorción atómica, mientras que el K se cuantificó por flamometría.

E. Actividades complementarias.

La información de registro atmosférico de SO_2 en las estaciones Pedregal, Merced y Tlalnepantla fue proporcionada por la Secretaría de desarrollo urbano y ecología. La cual mediante

la Red automática de monitoreo atmosférico realiza dicho registro y almacena la información como concentraciones promedio por hora de SO₂ en cada estación.

ANALISIS DE RESULTADOS

Dióxido de azufre atmosférico.

El análisis de varianza mostró al dióxido de azufre como una de las variables con mas cambios, pues muestra que este contaminante atmosférico presentó diferencias altamente significativas al analizar sus resultados por estaciones así como al hacerlo por meses (Ver cuadro 1).

Al analizar las concentraciones promedio de SO₂ en las cuatro estaciones de biomonitoreo, se aprecia que las mayores concentraciones se registraron predominantemente en la estación Tlalnepantla (F), siendo menores en Merced (X) y con el mas bajo nivel en Pedregal (Cuadro 2 y Fig. 2). Con respecto a la variación temporal del SO₂ se observó que durante el mes de Enero es cuando este contaminante alcanza sus mayores concentraciones promedio mensuales (0.0719 ppm), las cuales decrecieron en Febrero, Marzo Abril y Mayo (0.0656, 0.0521, 0.0438 y 0.0426 ppm respectivamente) (Ver Apéndice II).

Con la interacción Estación * Mes (Apéndice II) se confirmó que es en los dos primeros meses cuando el SO₂ alcanzó las concentraciones atmosféricas mas elevadas (0.0943 y 0.0847 ppm), las cuales decrecieron hacia los últimos meses (0.0459 y 0.0514 en Merced y Tlalnepantla). Siendo F y X los sitios donde se observa esta tendencia, mientras que Pedregal (T) registró bajas concentraciones (0.0368 ppm) en Enero y mas SO₂ (0.0580) en Mayo.

CUADRO 1. ANALISIS DE VARIANZA DEL BIOMONITOREO CON ALFALFA.

VARIABLE EVALUADA	PARAMETRO EVALUADO	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS
PMSO ₂	ESTACION	3	0.0080 ***
	MES	4	0.0007 ***
	EST*MES	12	0.0003 ***
ΔS	ESTACION	3	0.1075 ***
	MES	4	0.0487 ***
	EST*MES	12	0.0832 ***
ΔCa	ESTACION	3	0.1320 ***
	MES	4	1.5940 ***
	EST*MES	12	0.1477 ***
ΔMg	ESTACION	3	0.1398 ***
	MES	4	0.0345 **
	EST*MES	12	0.0310 ***
ΔK	ESTACION	3	3.4789 ***
	MES	4	1.1928 ***
	EST*MES	12	2.2648 ***

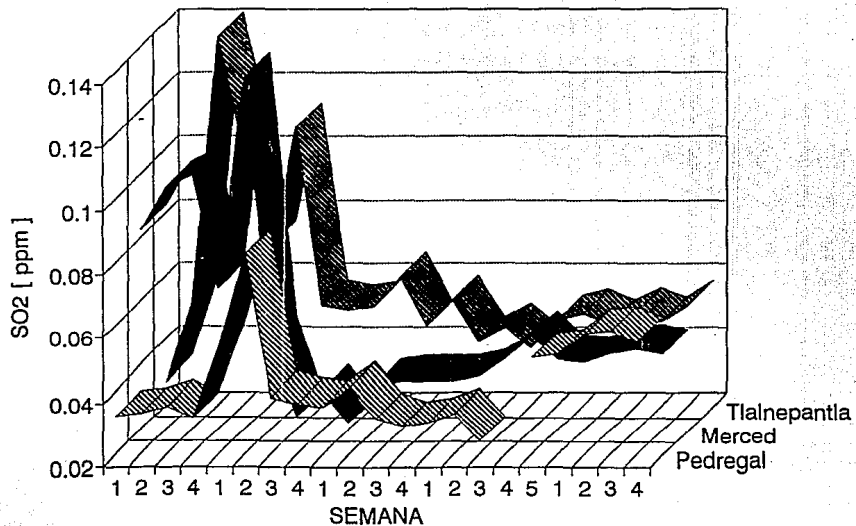
Significancia estadística: ** y *** con $\alpha = 0.01$ y 0.001 , respectivamente.
 PMSO₂ = Promedio mensual de dióxido de azufre.
 Δ = Concentración postexposición - Concentración preexposición

CUADRO 2. CONCENTRACIONES PROMEDIO MENSUALES DE SO₂ (ppm).

Mes	Estación		
	Tlalnepantla (F)	Merced (X)	Pedregal (T)
Enero	0.08470	0.09438 [*]	0.03686 ^o
Febrero	0.06055	0.05600	0.04665 ^o
Marzo	0.05430	0.03210 ^o	0.03510
Abril	0.04570	0.04239	0.04017 ^o
Mayo	0.05100	0.04370 ^o	0.05800

Nota: * = Promedio máximo mensual
 o = Promedio mínimo mensual

**FIG. 2. PROMEDIOS SEMANALES DE SO₂
ENERO A MAYO, 1992**



Los promedios mensuales de SO_2 nos permiten apreciar que Tlalnepantla (F), en la zona norte, es la estación con mas contaminación por SO_2 (media por estación = 0.0622 ppm). Pues excepto en Enero y Mayo, cuando la máxima concentración promedio mensual se registró en Merced (la zona centro) y en Pedregal (zona sur) en Febrero, Marzo y Abril, es el sitio con los mayores promedios mensuales de SO_2 (0.0605, 0.0521 y 0.0457 ppm). Además Tlalnepantla (F) fue la única estación sin ningún promedio mínimo mensual. Cabe resaltar que aún el menor promedio mensual de SO_2 (PMSO_2) de esta estación (0.0457) es muy cercano a las concentraciones medias estacionales de Merced y Pedregal (0.0573 y 0.0461 ppm). Esto indica que en F el SO_2 regularmente se registró en concentraciones elevadas (Ver Cuadro 2 y Apéndice I).

Al analizar por estaciones, vemos que en Pedregal (T) durante Enero, Febrero y Abril se registraron los PMSO_2 mas bajos (0.0368, 0.0466 y 0.0401 ppm). Mientras que Merced (X) puede considerarse como una estación intermedia, ya que si bien durante Enero presentó el máximo promedio mensual de SO_2 (0.0943 ppm), en Marzo y Mayo tuvo las concentraciones mas bajas del mismo (0.0321 y 0.0437 ppm) (Cuadro 2).

Las concentraciones máximas y mínimas promedio (Cuadro 3) por hora y por día muestran en Tlalnepantla (F) una menor diferencia entre ambos extremos a medida que transcurren los meses, siendo mayor la diferencia entre máximos y mínimos durante Enero (0.3600 ppm por hora y 0.1670 ppm por día) y decreciendo en meses

subsecuentes como Marzo (0.183 ppm por hora y 0.044 ppm por día) y Mayo (0.0880 ppm por hora y 0.0200 ppm por día). En X (Merced), la mayor diferencia entre dichas concentraciones extremas se presentó durante Febrero (0.2780 ppm por día) y Marzo (0.3260 ppm por hora), descendiendo hacia Mayo (con 0.0580 ppm por hora y 0.051 ppm por día). En la estación T (Pedregal), el ascenso de las concentraciones de SO₂ durante Febrero permite que la mayor diferencia (0.0710) entre máximos y mínimos por día se registre durante este mes, aunque posteriormente hay un descenso en la misma, llegando inclusive a ser esta diferencia de 0.0200 ppm en Mayo. De lo anterior, podemos resumir que las menores diferencias entre máximos y mínimos de SO₂ se presentaron en T, siendo estas mayores en X y sobre todo en F.

CUADRO 3. CONCENTRACIONES MAXIMAS Y MINIMAS DE SO₂ (ppm).

MES	ESTACION PROMEDIO	TLALNEPANTLA		MERCED		PEDREGAL	
		Por Hora	Por Día	Por Hora	Por Día	Por Hora	Por Día
Ene.	Máximo	0.370	0.193	0.190	0.130	0.062	0.043
	Mínimo	0.010	0.026	0.040	0.070	0.034	0.028
Feb.	Máximo	0.248	0.132	0.338	0.174	0.140	0.102
	Mínimo	0.028	0.041	0.060	0.002	0.024	0.031
Mar.	Máximo	0.209	0.089	0.327	0.080	0.101	0.056
	Mínimo	0.026	0.044	0.001	0.002	0.023	0.019
Abr.	Máximo	0.251	0.066	0.109	0.072	0.216	0.062
	Mínimo	0.022	0.032	0.003	0.031	0.015	0.029
May.	Máximo	0.117	0.064	0.080	0.068	0.088	0.067
	Mínimo	0.029	0.044	0.022	0.017	0.035	0.047

En general se apreció que el SO_2 en la zona metropolitana de la Ciudad de México sigue una distribución descendente de norte a sur, concordando con lo descrito por SEDUE (1990). Aunque esta distribución varía en el transcurso del año, pues durante Enero y Febrero las zonas norte (F) y centro (X) presentan concentraciones elevadas (F: 0.0847 y 0.0740 y X: 0.0943 y 0.0658 ppm), mientras que en Mayo la parte sur (T) es la zona con mas SO_2 (0.0590 ppm). Asimismo, se observó que F (Tlalnepantla) fue el sitio con mayores concentraciones de SO_2 , seguido de Merced (X) y por último Pedregal (T) (Ver apendices II y III).

Dióxido de azufre y concentración de azufre total en la alfalfa.

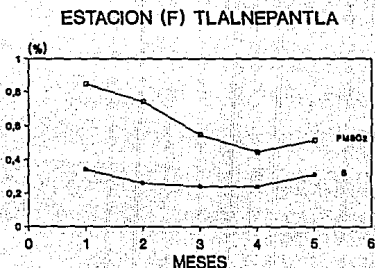
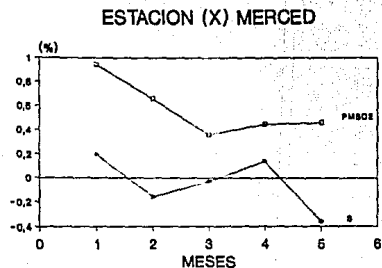
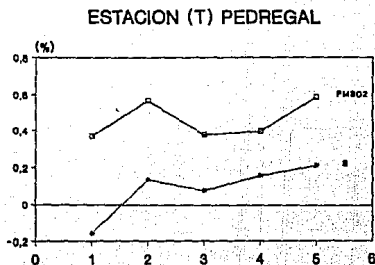
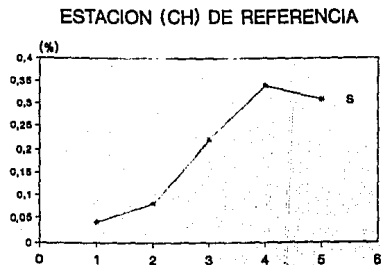
Podemos observar (Cuadro 3) que en Tlalnepantla (F) los valores mínimos por hora y por día son cercanos a 0.0300 ppm de SO_2 y los valores máximos en general son mayores a 0.0750 ppm, concentración de SO_2 a partir de la cual se ha reportado que la alfalfa presenta alteraciones en su capacidad fotosintética (Darrall, 1989). En la estación Merced (X) las concentraciones máximas de SO_2 por hora y por día no alcanzan el mismo nivel que en F, pero sí rebazaron la concentración crítica señalada; aunque la menor concentración de SO_2 en esta estación se reflejó en las concentraciones mínimas por hora y por día. La estación Pedregal (T) tuvo concentraciones máximas que también rebazaron las 0.0750 ppm de SO_2 , no obstante ello ocurrió con menor frecuencia que en las otras estaciones.

La distribución temporal y de localización del SO_2 en la zona metropolitana de la Ciudad de México concuerda con las observaciones registradas en campo. Pues se apreció que fue durante los dos primeros meses cuando, principalmente en las estaciones F y X, se presentó clorosis y abscisión foliar. Además se observó el desarrollo progresivo de necrosis apical y marginal previa a la abscisión foliar. Cabe señalar que la presencia de los síntomas descritos (clorosis principalmente), se presentaron frecuentemente hacia el final de la tercera semana de exposición.

Tanto la clorosis como la necrosis son síntomas visibles que suelen desarrollarse en alfalfa como consecuencia de su exposición a SO_2 , siendo el primero comunmente asociado con daños crónicos, mientras que la necrosis es un síntoma que puede ser provocado como consecuencia de daños agudos (Halbwaks, 1984; Posthumus, 1980 y USEPA, 1976).

A partir de Marzo, mes desde el cual las concentraciones de SO_2 descienden, tanto la abscisión como la necrosis foliar se apreciaron menos. No siendo así en el caso de la clorosis (síntoma visible que puede desarrollarse con concentraciones no letales de SO_2), aunque en T (Pedregal) ésta fue poco observada. Todo ello debió reflejarse en una menor destrucción y pérdida de área foliar fotosintéticamente activa. Con lo cual cabe suponer una mayor absorción de SO_2 por la alfalfa, principalmente en sitios como F (Tlalnepantla) y X (Merced), donde a pesar de disminuir la concentración de SO_2 , fue predominantemente mayor que en T (Fig. 3).

FIG. 3. CONCENTRACIONES DE AZUFRE Y SO₂



PMSO₂ = Promedio mensual de SO₂ (en ppm X 0.1)

S = S POSTEXPOSICION - S PREEXPOSICION

Esta exposición prolongada de la alfalfa a concentraciones no letales de SO_2 debió permitir que este aeropoluante fuera absorbido durante más tiempo, presentándose una mayor acumulación de compuestos de azufre en las plantas. Lo cual se reflejó en una similitud de las tendencias del SO_2 atmosférico con el cambio en la concentración del azufre total (ΔS) en la alfalfa, lo cual es aun mas notable en los últimos tres meses (Fig. 3).

La relación entre la concentración de azufre total en las plantas de alfalfa expuestas a condiciones ambientales en la Ciudad de México y el SO_2 atmosférico, se aprecia al observar sus tendencias (Fig. 3). Podemos ver que en la estación de referencia (CH) comunmente se presentaron incrementos en la concentración de S total en la alfalfa luego de su exposición, mientras que en Pedregal (con las concentraciones menores de SO_2) y Merced (concentraciones intermedias de SO_2) en meses como Enero y Febrero llegaron a presentarse decrementos de S luego de exponer la alfalfa a condiciones ambientales, no obstante lo cual, hay gran similitud en el comportamiento general de las concentraciones de SO_2 y el cambio en la concentración de azufre (ΔS). Tlalnepantla (F) muestra una tendencia muy estable, sin embargo, en esta estación (con las mas elevadas concentraciones de SO_2) el ΔS fue constantemente mas alto (aproximadamente 0.30 %) que en X y F cuyos ΔS fueron cercanos a 0.20 % (Ver apendice II).

El coeficiente de correlación entre el promedio mensual de SO_2 (PMSO_2) y el ΔS en la alfalfa expuesta, indicó que existe una correlación positiva lineal ascendente entre estas dos variables, siendo mayor el coeficiente de correlación en F, intermedio en X y ligeramente menor en T (Ver cuadro 4). Esto mostró que a mayor concentración de SO_2 atmosférico la planta absorbió mas dióxido de azufre, realizandose con ello un aceptable monitoreo del mismo principalmente en los meses en que este aeropoluante no registró concentraciones atmosféricas letales (> 0.075) para la alfalfa.

Dióxido de azufre y concentración de S total y Ca en la alfalfa.

El calcio es considerado como uno de los nutrimentos menos móviles en las plantas. No obstante, pudo observarse que el cambio en la concentración de Ca (ΔCa) en la alfalfa fue significativo tanto por estaciones como por meses, observándose también significancia estadística para la interacción Estación * Mes.

CUADRO 4. COEFICIENTES DE CORRELACION.

VARIABLES	ESTACION	PEDREGAL	MERCED	TLALNEPANTLA
		(T)	(X)	(F)
PMSO_2 Vs ΔS		0.4079	0.4728	0.7289
PMSO_2 Vs ΔCa		-0.5923	0.4298	-0.3777
PMSO_2 Vs ΔMg		0.2610	0.5425	-0.4800
PMSO_2 Vs ΔK		-0.0553	-0.6052	-0.2211
ΔS Vs ΔCa		-0.1789	0.7005	-0.8283
ΔS Vs ΔMg		0.9311	0.2679	-0.2102
ΔS Vs ΔK		-0.0086	-0.8057	0.2948

Δ = Concentración postexposición - concentración preexposición.

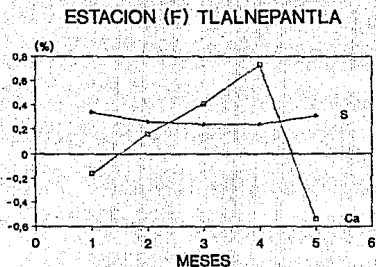
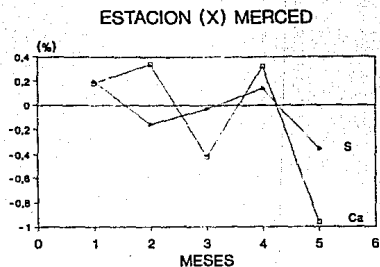
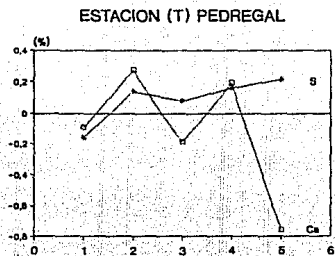
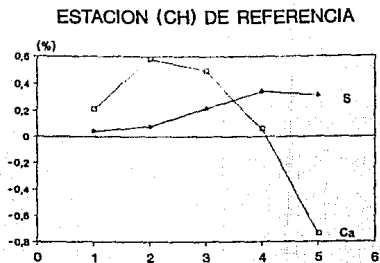
PMSO_2 = Promedio mensual de dióxido de azufre.

Al analizar la tendencia del Ca es notorio que en general tuvo una tendencia a disminuir, pues mientras el promedio mensual del ΔCa en Febrero es de 0.3385, en Mayo fue de -0.7546. Esta tendencia queda manifiesta en los ΔCa de la estación Chapingo (CH), donde después de Febrero se observa un continuo descenso de los ΔCa (Fig. 4). Se apreció también que tanto en esta estación (CH) así como en Tlalnepantla la tendencia del ΔCa es opuesta al ΔS . Sin embargo, a pesar de su tendencia descendente no se observaron síntomas por deficiencia de Ca en la alfalfa (lo cual tampoco ocurrió para Mg y K) en ninguna estación de monitoreo.

Al observar la tendencia del ΔCa en Pedregal (T) se apreció que difiere notablemente de la presentada por el ΔS para la misma estación (Fig. 4). Observándose algunas semejanzas entre ambas tendencias en Enero, cuando el ΔS fue menor que en meses ulteriores como Mayo, durante el cual el ΔS se incrementó (0.2143) y el ΔCa disminuyó (-0.76075). Es notable además que mientras el ΔS sólo fue negativo en Enero, el ΔCa lo fue durante Enero, Marzo y Mayo.

En la estación Merced (X) el ΔCa también difiere en su tendencia de la que presentó el ΔS , sobre todo en los tres primeros meses, cuando la concentración de éste último fue alta (por ejemplo de 0.4946 en Marzo), apreciándose algunas similitudes entre ΔS y ΔCa en Abril y Mayo, meses en los cuales el ΔS disminuyó a 0.1415 y -0.3515 %, respectivamente.

FIG. 4. CONCENTRACIONES DE AZUFRE Y CALCIO



S- S POSTEXPOSICION - S PREEXPOSICION

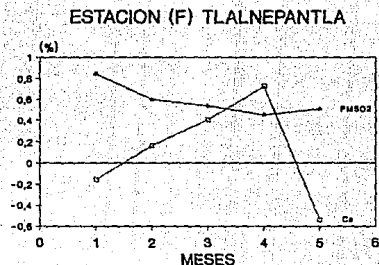
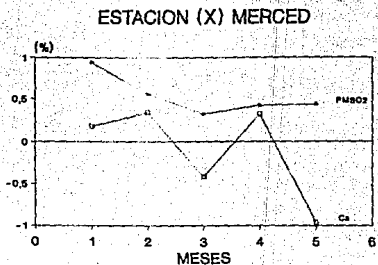
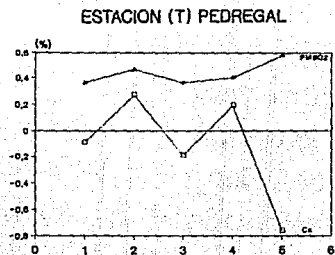
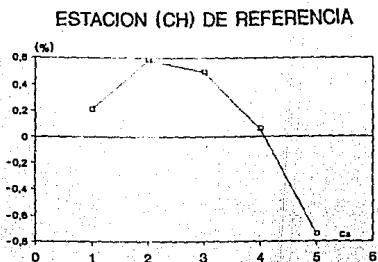
Ca- Ca POSTEXPOSICION - Ca PREEXPOSICION

Como en las otras estaciones, en Tlalnepantla (F) el ΔCa también presentó decrementos en meses como Enero y Mayo. Y es en esta estación donde mejor se aprecia la tendencia opuesta entre el ΔS y el ΔCa (Fig. 4). Observandose que mientras el ΔCa tiene ascensos de Febrero a Abril el ΔS varió en los mismos meses de manera opuesta. Cabe señalar además que la concentración de S en la alfalfa después de ser expuesta a condiciones ambientales, frecuentemente excedió 0.5 % (salvo en Enero y Febrero para Pedregal), concentración considerada alta para dicha leguminosa (Reuter et al., 1986, citado por Cázarez, 1988).

Al igual que con el azufre, el ΔCa presenta diferencias notables en su tendencia con respecto a la tendencia del promedio mensual de SO_2 ($PMSO_2$). Estas diferencias se aprecian en las tres estaciones de la zona metropolitana, siendo Merced (X) el sitio donde son menos acentuadas. Mientras que en Pedregal (T) la diferencia entre las tendencias de las dos variables señaladas es mas evidente. Finalmente, en Tlalnepantla (F) se observa que los comportamientos de el SO_2 y el ΔCa son opuestos (Fig. 5).

De lo arriba descrito se puede señalar que en general el Ca difirió notablemente en su tendencia con respecto a la presentada por el S y el SO_2 , llegándose a observar que su concentración en la alfalfa varió de manera opuesta a la concentración de S en esta leguminosa. Una situación similar se encontró al comparar el ΔCa con respecto al SO_2 , siendo esto mas notable al observar el coeficiente de correlación entre estas variables, el cual para la estación F fue de -0.3777 para $PMSO_2$ vs ΔCa y de -0.8283 para ΔS

FIG. 5. CONCENTRACIONES DE SO2 Y CALCIO



PMSO2= Promedio mensual de SO2 (en ppm X 0.1)

Ca= Ca POSTEXPOSICION - Ca PREEXPOSICION

vs ΔCa. Con lo cual puede señalarse que existe relación entre la concentración de Ca en la alfalfa con respecto a la concentración de S total, siendo esta relación negativa descendente. No apreciándose de manera clara una relación entre el SO₂ y la concentración de calcio.

Dióxido de azufre y concentración de S total y Mg en la alfalfa.

La concentración de magnesio en la alfalfa, al igual que la de S y Ca, resultó ser altamente significativa en el análisis de varianza al realizar éste por estaciones, meses y para la interacción estación * mes. La prueba de Tukey por su parte mostró, mediante los promedios por mes, que fue en los dos primeros meses cuando se presentaron decrementos postexposición del Mg en la alfalfa (-0.0318 y -0.0312), incrementándose éste postexposición a condiciones ambientales durante Marzo (0.0736), Abril (0.0428) y Mayo (0.118).

La tendencia ascendente en la concentración de Mg se apreció principalmente en Chapingo (CH), donde incluso se registraron los mayores incrementos por estación (0.1254). Las otras estaciones donde también se observaron incrementos considerables de Mg fueron Merced (0.078) y Tlalnepantla (0.0733), no siendo así en el caso de Pedregal (-0.1396) (Ver apéndice I).

Se apreciaron similitudes entre las tendencias del ΔMg (Cambio en la concentración de magnesio) y el ΔS, lo cual fue mas notable en la estación de referencia (CH), seguida de Pedregal (T) y

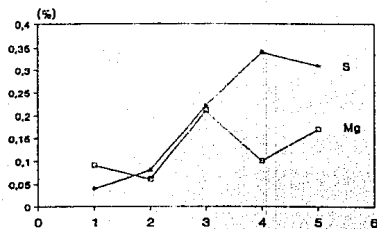
Merced (X). Observándose mayores diferencias en la estación Tlalnepantla (F) (Fig. 6). Siendo la correlación entre ΔS y ΔMg para esta última estación de -0.2102, de 0.2679 para X y de 0.9311 en T.

En el Magnesio se aprecian, al igual que en el azufre total, los mayores incrementos en los últimos meses. Mientras que tanto el Ca como el K decrecieron en la alfalfa durante este lapso de tiempo (Marzo - Mayo). Por lo cual pudo haberse presentado una acción antagonica, sobre todo del K sobre el Mg, durante los dos primeros meses. Pues en éstos la concentración de K sobrepasó el 1.8 % en la alfalfa, nivel considerado como alto (Reuter et al., 1986, citado por Cázarez, 1988). Por otra parte, el S tuvo una tendencia ascendente en los últimos meses, esto pudo haber favorecido el incremento de Mg en la alfalfa, puesto que una mayor absorción de aniones (como el $SO_4^{=}$) suele favorecer la absorción de cationes.

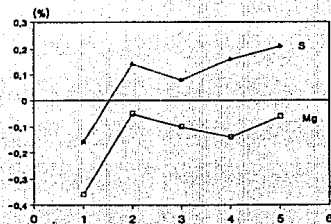
Al comparar el comportamiento del Mg con respecto al de el SO_2 , se observó una mayor similitud entre las tendencias del promedio mensual de SO_2 ($PMSO_2$) y el ΔMg en las estaciones T y X, encontrando diferencias en la estación F (Fig. 7). Asimismo, es durante los últimos meses cuando se pueden apreciar comportamientos mas cercanos entre estas variables. Periodo de tiempo cuando también el azufre total en la alfalfa se incrementó. Además, en la estación F se presentó una correlación de -0.48 entre $PMSO_2$ y el ΔMg , siendo ésta de 0.5425 en X y de 0.2610 en T.

FIG. 6. CONCENTRACIONES DE S Y MAGNESIO

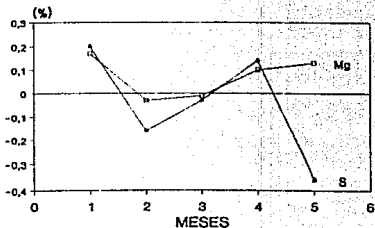
ESTACION (CH) DE REFERENCIA



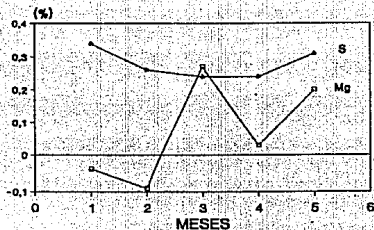
ESTACION (T) PEDREGAL



ESTACION (X) MERCED



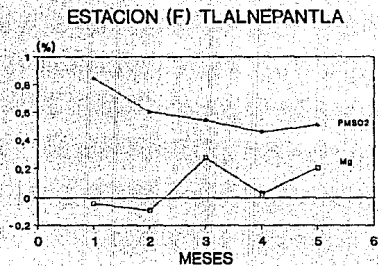
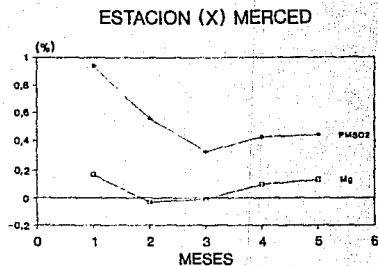
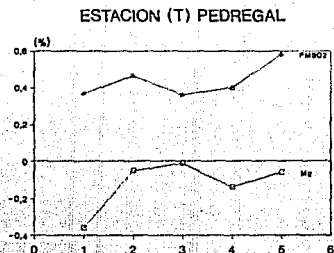
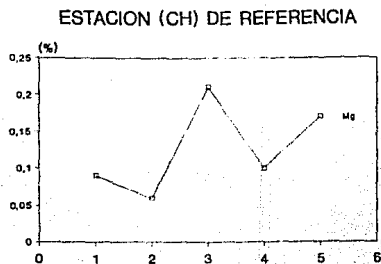
ESTACION (F) TLALNEPANTLA



S- S POSTEXPOSICION - S PREEXPOSICION

Mg- Mg POSTEXPOSICION - Mg PREEXPOSICION

FIG. 7. CONCENTRACIONES DE SO2 Y MAGNESIO



PM SO2 = Promedio mensual de SO2 (en ppm X 0.1)

Mg = Mg POSTEXPOSICION - Mg PREEXPOSICION

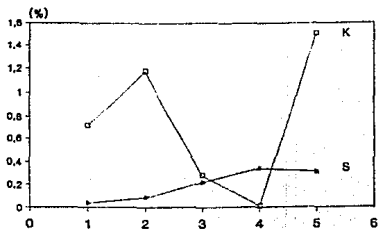
Aparentemente existe relación entre la concentración de S total y la de Mg en la alfalfa, lo cual es observable en las tendencias de los ΔS y ΔMg durante los meses finales (Fig. 6 y Apéndice I). No obstante, la mejor asociación entre estas variables no se observó en Tlalnepantla, sino en la estación Merced. Donde se registraron comunmente considerables incrementos de el S total en la alfalfa. En cuanto al SO_2 , si bien se aprecian semejanzas en su comportamiento con respecto al de el ΔMg , no fue en Tlalnepantla (la estación con mas SO_2) donde se encontró el mayor grado de asociación entre ambos, sino en la estación X (correlación= 0.5425). Mientras que en la estación Pedregal (T) se registró la menor correlación (0.261) entre ΔMg y SO_2 (Consultar Cuadro 4).

Dióxido de azufre y concentración de S total y K en la alfalfa.

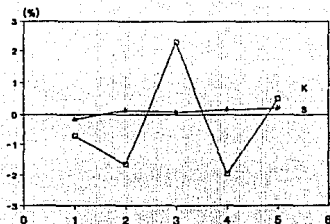
La gran variabilidad en las concentraciones de potasio en la alfalfa se reflejó en una alta significancia del cambio en la concentración de K (ΔK) registrada en el analisis de varianza, tanto en las estaciones como durante los meses de estudio, así como para la interacción estación * mes. Esta variabilidad en el ΔK no permitió apreciar claramente la tendencia del mismo, sin embargo se observó que normalmente (excepto en Marzo) el K decrementó en la alfalfa luego de exponer ésta a condiciones ambientales en la Ciudad de México, no ocurriendo lo mismo en la estación de referencia (CH), donde el ΔK nunca fue negativo (Fig. 8).

FIG. 8. CONCENTRACIONES DE S Y POTASIO

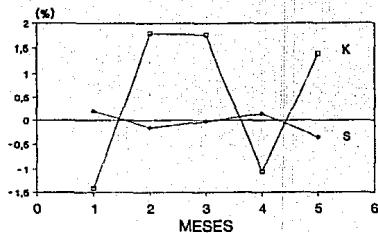
ESTACION (CH) DE REFERENCIA



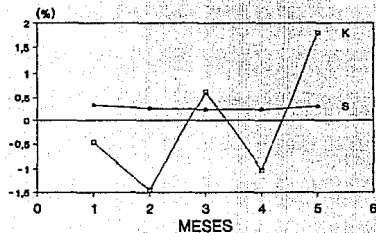
ESTACION (T) PEDREGAL



ESTACION (X) MERCED



ESTACION (F) TLALNEPANTLA



S- S POSTEXPOSICION - S PREEXPOSICION

K- K POSTEXPOSICION - K PREEXPOSICION

Al analizar por estaciones el ΔK se encontró que la estación CH tuvo los mayores incrementos (0.733 en promedio), siendo Merced (X) la estación que se le aproximó mas al registrar un ΔK de 0.484, en tanto que Tlalnepantla (F) sólo alcanzó un ΔK promedio de 0.109, mientras que en Pedregal (T) el K descendió frecuentemente (ΔK promedio= -0.621) (Ver Apendice I).

Con respecto al S total, encontramos que el ΔK mostró un comportamiento que difiere ostensiblemente del presentado por el ΔS , observándose una mayor variabilidad en las concentraciones de K que en las de S en la alfalfa (Fig. 8). Es importante resaltar que a diferencia del S, el potasio está considerado como uno de los nutrimentos mas móviles, es decir que es fácilmente traslocado en la planta, siendo distribuido de órganos viejos a órganos jóvenes, considerándose además que su concentración desciende (en base a peso seco) en las plantas con la madurez de las mismas. No obstante esto, sólo parcialmente pudo observarse un descenso en el ΔK de la estación Chapingo (CH). En la cual, como en Tlalnepantla (F), la concentración de S total tiene una tendencia a incrementarse.

En general, apesar de las diferencias notables en las concentraciones y la variabilidad de las mismas, se puede observar que normalmente se presentaron decrementos del K simultáneamente con incrementos de S, siendo cuantitativamente mas apreciables los primeros. Este comportamiento es tal vez el principal factor que incidió de manera directa al tratar de asociar las concentraciones de estos nutrimentos. No apreciándose una

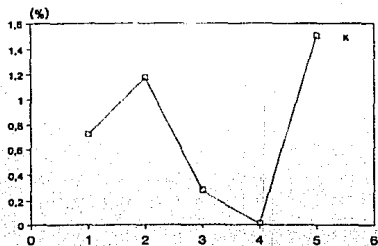
relación clara entre ambos, pues el coeficiente de correlación para el ΔS y el ΔK fue de -0.0086 en Pedregal (T) y de 0.2948 en Tlalnepantla (F). Mientras que en Merced (X) fue de -0.8057 , que aparentemente mostraría una relación negativa descendente, pero que consideramos pudo ser producto de la movilidad del K, pues es poco probable que el azufre haya influido en un decremento de este elemento, situación que además no se presentó en ninguna otra estación.

El promedio mensual de SO_2 ($PMSO_2$), al igual que el ΔS , difiere notoriamente en sus tendencias con respecto al ΔK en la alfalfa, observándose contrastes en el comportamiento de estas variables (Fig. 9). Apreciándose las mayores diferencias en Pedregal (T) y Tlalnepantla (F), donde el coeficiente de correlación entre $PMSO_2$ y ΔK fue de -0.0553 y -0.2211 , respectivamente; mientras que en Merced (X) se registró un coeficiente de correlación de -0.6052 , lo cual en conjunto no permitió establecer una relación entre estas variables.

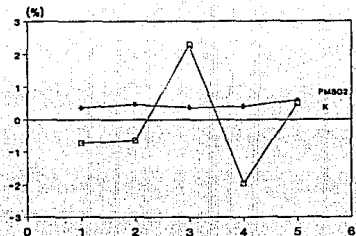
Puede considerarse al potasio como el nutrimento (de Ca, Mg y K) que más difirió en su comportamiento con respecto a la tendencia mostrada por el azufre total en la alfalfa. Reflejándose estas diferencias en una escasa correlación entre estos nutrimentos. Asimismo, el SO_2 tampoco presentó relación con las concentraciones de K en la alfalfa, pues se encontraron diferencias y contrastes en las tendencias de ambas variables. Asumiéndose que, en el caso de la concentración de potasio, su tendencia debió ser afectada por su gran movilidad, lo cual pudo

FIG. 9. CONCENTRACIONES DE SO2 Y POTASIO

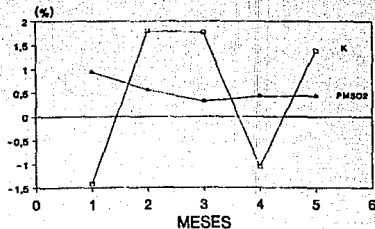
ESTACION (CH) DE REFERENCIA



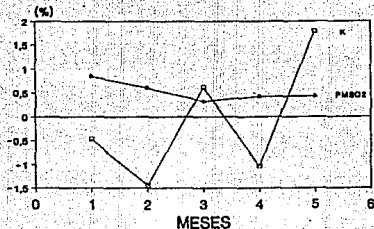
ESTACION (T) PEDREGAL



ESTACION (X) MERCED



ESTACION (F) TLALNEPANTLA



PMSO2= Promedio mensual de SO2 (en ppm X 0.1)

K= K POSTEXPOSICION - K PREEXPOSICION

repercutir en los decrementos de su concentración observados en la alfalfa conforme se avanzó en el desarrollo de las plantas de esta leguminosa.

CONCLUSIONES

Durante el periodo de estudio (Enero - Mayo, 1992) el SO₂ atmosférico tuvo una distribución en general decreciente de norte a sur, es decir, fue mayor su concentración en la zona norte o industrial, seguida de la zona centro (con menos industrias pero elevada actividad vehicular y comercial) y finalmente la zona sur (preponderantemente habitacional).

El SO₂ atmosférico presenta una gran variabilidad en sus concentraciones, siendo estas más elevadas durante los meses de Enero y Febrero en el norte (Tlalnepantla) y el centro (Merced), mientras que al sur (Pedregal) se incrementa ligeramente en Febrero y principalmente en Mayo.

Los mayores incrementos en la concentración de S total en la alfalfa se registraron durante los meses (Marzo a Mayo) cuando se observó una menor pérdida de área foliar por necrosis y abscisión foliar, durante los mismos se registraron normalmente concentraciones no letales de SO₂ y se observó clorosis foliar como síntoma predominante en las hojas de las plantas.

Los principales incrementos de S total se presentaron en los sitios donde se registraron normalmente las mas elevadas concentraciones de SO₂. Con lo cual se demostró que el SO₂ es absorbido y acumulado por la alfalfa como compuestos de azufre en sus tejidos.

Pudo apreciarse que existe relación entre la concentración atmosférica del SO_2 y el contenido de azufre en las plantas bioindicadoras utilizadas, siendo la alfalfa un bioindicador de eficiencia aceptable para el biomonitoreo del dióxido de azufre.

Se observó una tendencia decreciente del calcio en el tejido de las plantas expuestas apreciándose una aparente relación lineal descendente entre éste elemento y la concentración de azufre total. Situación que aunque no de manera clara, también se presentó con respecto al SO_2 atmosférico.

Contrastando con el Ca y el K, el Mg mostró una tendencia ascendente en su concentración. Observándose relación de éste con la concentración de S total en el tejido vegetal principalmente en aquellos meses en los cuales, tanto el Ca como el K, decrecieron. Apreciándose una escasa relación del SO_2 con el Mg.

No se encontró relación entre la concentración de S total y el contenido de potasio en la alfalfa. Lo cual tampoco se observó al tratar de asociar el SO_2 con el K.

Las concentraciones ambientales de SO_2 y las concentraciones de S total en las plantas expuestas fueron asociados con decrementos de Ca e incrementos de Mg, lo cual no ocurrió con respecto al K.

SUGERENCIAS

En el estudio presente se trató de realizar un aporte al conocimiento de el efecto del SO_2 sobre la vegetación. No obstante, este tema es todo un gran campo de la investigación que debe continuarse analizando de manera mas profunda.

A continuación mencionaremos algunos puntos que sugerimos se consideren para seguir trabajando en la presente línea de investigación. Puntos que pueden ayudar a complementar, enriquezer y generar nuevas perspectivas sobre el conocimiento de la contaminación atmosférica y su efecto en la vegetación.

Al estudiar el SO_2 como contaminante, es evidente que ello requiere de un continuo registro de sus concentraciones atmosféricas. Por tanto, es recomendable su continuo monitoreo no solo durante todo el año, sino durante lapsos de tiempo mas prolongados y en sitios debidamente localizados. La ubicación de estos sitios deberá tomar en cuenta el patrón de vientos en las áreas de estudio, para lo cual puede recurrir a la roza de vientos, que proporciona importante información sobre la inmisión de los aerocontaminantes. Además, es desde luego necesario actualizar la información de la zona metropolitana de la Ciudad de México sobre el número de industrias, su localización, tipo de emisiones y estimaciones cuantitativas de éstas últimas.

Lo antes descrito nos puede proporcionar elementos para tener una perspectiva sobre el ambiente a estudiar. Sin embargo, con ello solo se contempla parte del panorama general, pues en el efecto de los aeropoluantes sobre la vegetación intervienen una gran cantidad de factores. Entre ellos podemos señalar por su gran importancia a la temperatura, humedad relativa, precipitación pluvial y composición química de ésta, tipos de aerocontaminantes presentes (además del SO_2) y concentración de éstos. Factores que deben ser continuamente registrados, ya que en el caso de los tres primeros, intervienen en el "comportamiento" estomático, afectando o favoreciendo la absorción del aeropoluante por la planta. Además la lluvia, cualitativa y cuantitativamente, tiene repercusiones en la concentración de diversos compuestos y elementos en el tejido vegetal.

La presencia y concentración de varios poluantes aéreos y la absorción de éstos por la planta es, por sí solo, todo un amplio campo de estudio. Pues las interacciones de sinergismo y antagonismo entre aeropoluantes y sus consecuencias en la generación de daño o inhibición del mismo en las plantas, requiere no únicamente el registro del contaminante, sino un estudio detallado del desarrollo de daños en la planta, que puede ser realizado en todos los niveles de organización.

En particular, consideramos que la alfalfa puede proporcionar aún abundante información como material biológico para estudiar el SO_2 . Pues mostró una buena respuesta al ser utilizada como bioindicador de éste, no obstante el periodo de exposición debe

reconsiderarse, siendo recomendables exposiciones de dos a tres semanas máximo, sobre todo en sitios con elevadas concentraciones de SO_2 . Asimismo, consideramos mas adecuado utilizar siempre plantas nuevas (sin previa exposición) para el biomonitoreo, con lo cual se evitaría una posible acumulación de compuestos de azufre para la siguiente exposición. Lo anterior puede mejorar la calidad de los datos, sobre todo al estudiar el desarrollo de daños agudos. En el caso de daños crónicos por efecto del SO_2 , desde luego que la exposición del bioindicador en zonas con concentraciones atmosféricas de SO_2 no letales para las plantas, permitiría una mejor evaluación de su efecto. Pudiendo realizarse para ello no sólo observaciones de daños visibles, sino también de daños poco apreciables como el decaimiento del crecimiento, la cantidad de materia seca producida y la composición de ésta, así como el rendimiento agronómico e incluso el desarrollo de nódulos en las raíces, ya que se trata de una leguminosa.

LITERATURA CITADA

Barret W. T. y Benedict M. H. (1970). Sulfur dioxide. En Recognition of air pollution injury to vegetation. En Jacobson J. . A pictorial atlas. Air Pollution Control Association. Pittsburgh, pp C-1 a C-5.

Bravo A. H. (1990-A). Time and space variations of sulfur dioxide concentrations in the metropolitan area of the Mexico City. Geofísica internacional. Vol. 29 (3), pp 137- 147.

Bravo A. H. (1990-B). Variación espacial, temporal y tendencial del SO₂ en la zona metropolitana de la Ciudad de México 1986-1989. VII Congreso nacional: La ingeniería ambiental y la salud.

Cázarez G. L. (1988). Evaluación del estado nutrimental de los alfalfares del Valle de México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. México, México. pp 6-44 y 68-69.

Chapman H. D. (1984). Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Editorial Trillas. México, pp 122-129 y 132-137.

Cowling W. D. y Koziol J. M. (1982). Mineral nutrition and plant response to air pollutants. En Unsworth M. y Ormrod D.

P. Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture. Butterworth scientific. London, pp 349 - 356.

Darley F. E., Nichols W. C. y Middleton T. J. (1966). Identification of air pollution damage to agricultural crops. The Bulletin. Department of agriculture from the state of California, The Angels, pp 11-19.

Darrall M. N. (1989). The effects of air pollutants of physiological processes in plants. Plant, cell and environmental. Vol. 12, pp 1-30.

Gardner P. F. (1985). Physiology of crop plants. Iowa, U.S.A., pp. 109-121.

García E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificaciones climáticas de Köepen. U.N.A.M., México. pp 102-104

Gauch G. H. (1973). Inorganic plant nutrition. Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., U.S.A., pp. 121-126.

Graham H. J. (1987). A compendium of alfalfa diseases. Published by American Phytopathological Society. U. S. A., pp 5-11.

Halbwachs G. (1984). Organismal responses of higher plants to atmospheric pollutants: Sulphur dioxide and Fluoride. En Treshow M. Air pollution and plant life. John Wiley and Sons Ltd. New York, pp 175-205.

Jacobson S. J. (1989). Change in foliar elements in Red spruce seedling after exposure to sulphuric and nitric acid mist. Water, air and soil pollution. Vol 48, pp 141-159.

Kabata P. A. (1979). La agresión química a la biósfera. UNASYLVA Revista interamericana de silvicultura e industrias forestales. Vol. 35 (41), pp 1-6.

Krupa V. S. (1977). Impact of the air pollutants on terrestrial vegetation. Plant pathology 5110. Departamentt of plant pathology. University of Minnesota, pp 43-96.

Le Blanc F. (1973). Effects of sulphur dioxide on lichen and moss transplants. Ecology. Vol. 54 (3), pp 612-617.

Linzon S. N. (1973). Sulphur dioxide injury to vegetation in the vicinity of a sulphite pulp and paper mill. Water, air and soil pollution. Vol. 2, pp 135-138.

Linzon S. N., Temple P. J. y Pearson R. G. (1979). Sulfur concentrations in plant foliage and related effects. Journal of the Air Pollution Control Association. Vol. 29 (5), pp 520-525.

Malhotra S. S. y Khan A. A. (1984). Biochemical and physiological impact of mayor pollutants. En Treshow M. Air pollution and plant life. John Wiley and Sons Ltd. New York, pp 114- 119.

Manning J. W. (1980). Biomonitoring air pollutants with plant. Aplied Science Publishers Ltd. Londres, pp 19-21 y 79-90.

Mengel K. y Kirkby E. A. (1978). Principles of plant nutrition. International Potash Institute, Suiza, pp 88-90 y 117-119.

Mudd J. B. (1975). Sulfur dioxide. En Mudd J. Response of plants to air pollution. Academic Press Inc. New York, pp 9-22.

Nash T. H. (1974). Sensitivity of mosses to sulfur dioxide. Oecología. Vol. 17, pp 257-263.

Posthumus A. C. (1980). Elaboration of a comunitive methodology for the biological surveillance of the air quality by the evaluation of the effects on plants. Environmental and quality of life, pp 27-30.

Primo E. Y. (1981). Química agrícola. Alhambra. Madrid, p 351.

Riveros R. H. (1990). La contaminación atmosférica en la Ciudad de México. Ciencia y desarrollo. Vol. XVII (94), pp 73-79.

Rojas G. M. (1984). Fisiología vegetal aplicada. Mc Graw Hill, México, pp 132-135.

Scherzer J. A. (1989). Effects of ozone or sulfur dioxide on Pitch pine seedling. Journal environmental quality. Vol. 18, pp 53-61.

SEDUE. (1990). Reporte final del programa de biomonitorio en la zona metropolitana de la Ciudad de México, pp 6-10, 14-17 y 20.

Smith H. W. (1981). Air pollution and forest. Springer verlang. New York, pp 98-103 y 180-182.

Schwarz M. (1975). Guide to comercial hydroponics. Israel Universities Press, Jerusalem, Israel. 136 p.

Taylor R. J. (1978). Industrial impact in northwestern whatcom county. Washington. Water, air and soil pollution. Vol. 10, pp 179-213.

Tingey T. D., Wilhour G. R. y Taylor C. O. (1979). The measurement of plant responses. En Heck W., Krupa S. y Linzon S. Methodology for the assessment of air pollution effects on vegetation. Air Pollution Control Association, Minneapolis, pp 7-14.

Tirado S. D. (1982). Contenido de metales pesados en partículas totales en la atmósfera de la Ciudad de México, 1981-1982. Segundo Congreso Sobre Problemas Ambientales, pp 1-34.

Treshow M. (1984). Diagnosing of air pollution effects and mimicking symptom. En Treshow M. Air pollution and plant life. John Wiley and Sons Ltd. New York, pp 103-111.

Turner D. P. (1990). Foliar leaching and root uptake of Ca, Mg and K in relation to acid fog effects on Douglas fir. Water, air and soil pollution. Vol. 49, pp 205-214.

USEPA. (1976). Sulfur dioxide. En Lacase L. y Treshow M. Diagnosing vegetation injury caused air pollution. Air Pollution Training Institute. U. S.A., pp 4-1 a 4-11.

Zech W. (1985). Elemental analisis and physiological responses of forest trees in SO₂-polluted areas of NE-Bavaria. Water, air and soil pollution. Vol. 25, pp 175-183.

APENDICES

APENDICE I. PRUEBA DE TUKEY POR ESTACION Y POR MES.

VARIABLE	ESTACION	MEDIA POR ESTACION	MES	MEDIA POR MES
PM ₅₀₂	F	0.06229 (A)	1	0.07198 (A)
	X	0.05731 (B)	2	0.06568 (B)
	T	0.04617 (C)	3	0.05210 (C)
	CH	TESTIGO (D)	4	0.04384 (D)
			5	0.04269 (E)
ΔS	F	0.2814 (A)	3	0.2656 (A)
	CH	0.1981 (B)	4	0.2064 (A, B)
	T	0.0760 (C)	5	0.1201 (B, C)
	X	0.0640 (C)	1	0.1028 (C)
			2	0.0820 (C)
ΔCa	CH	0.1215 (A)	2	0.3385 (A)
	F	-0.0457 (B)	4	0.3237 (A)
	T	-0.1166 (B)	1	0.0120 (B)
	X	-0.1275 (B)	3	-0.1300 (B)
			5	-0.7546 (C)
ΔMg	CH	0.1254 (A)	5	0.1180 (A)
	X	0.0780 (A)	3	0.0736 (A, B)
	F	0.0733 (A)	4	0.0428 (A, B)
	T	-0.1396 (B)	2	-0.0312 (B)
			1	-0.0318 (B)
ΔK	CH	0.7330 (A)	3	0.8160 (A)
	X	0.4840 (A, B)	5	0.2340 (B)
	F	0.1090 (B)	4	0.0350 (B)
	T	-0.6210 (C)	2	-0.0410 (B)
			1	-0.1640 (B)

Letras iguales en () indica que no hay diferencia mínima significativa entre tales medias.

CH= Chapingo, T= Pedregal, X= Merced y F= Tlalnepantla.

PM₅₀₂= Promedimensual de dióxido de azufre.

Δ= Concentración postexposición - concentración preexposición.

APENDICE II. PRUEBA DE TUKEY PARA LA INTERACCION ESTACION * MES.

VARIABLE	ESTACION	MES	MEDIA
PMSO ₂	X	1	0.09438 (A)
	F	1	0.08470 (B)
	F	2	0.07406 (C)
	X	2	0.06580 (D)
	T	5	0.05900 (E)
	T	2	0.05719 (F)
	F	3	0.05470 (G)
	F	5	0.05143 (H)
	F	4	0.04660 (I)
	X	5	0.04590 (J)
	X	4	0.04461 (K)
	T	4	0.04032 (L)
	T	3	0.03750 (M)
	T	1	0.03686 (N)
	X	3	0.03590 (Ñ)
	CH	1-5	TESTIGO (O)
AS	X	3	0.49460 (A)
	CH	4	0.34210 (A, B)
	F	1	0.34200 (A, B)
	CH	5	0.31470 (A, B, C)
	F	5	0.30310 (A, B, C)
	F	4	0.26195 (A, B, C, D)
	F	2	0.26000 (A, B, C, D)
	F	3	0.24000 (B, C, D)
	CH	3	0.21775 (B, C, D)
	T	5	0.21430 (B, C, D)
	X	1	0.19955 (B, C, D)
	X	4	0.14150 (B, C, D)
	T	2	0.14000 (B, C, D)
	T	3	0.10990 (B, C, D)
	CH	2	0.08240 (C, D, E)
	T	4	0.08000 (C, D, E, F)
	CH	1	0.03370 (D, E, F)
	X	2	-0.16160 (E, F, G)
	T	1	-0.16405 (F, G)
X	5	-0.35150 (G)	

Letras iguales en paréntesis indica que no hay diferencia mínima significativa entre tales medias.

Δ= Concentración postexposición - concentración preexposición.

PMSO₂= Promedio mensual de Dióxido de azufre.

CH= Chapingo, T= Pedregal, X= Merced y F= Tlalnepantla.

CONTINUA ...

APENDICE II. PRUEBA DE TUKEY PARA LA INTERACCION ESTACION * MES.

VARIABLE	ESTACION	MES	MEDIA
ΔCa	F	4	0.72470 (A)
	CH	2	0.58825 (A,B)
	CH	3	0.49850 (A,B,C)
	X	2	0.33610 (A,B,C,D)
	X	4	0.32125 (A,B,C,D,E)
	T	2	0.27095 (A,B,C,D,E,F)
	CH	1	0.20940 (B,C,D,E,F)
	T	4	0.18910 (B,C,D,E,F)
	F	2	0.15875 (B,C,D,E,F)
	X	1	0.09090 (C,D,E,F)
	CH	4	0.05985 (C,D,E,F,G,H)
	T	1	-0.09310 (D,E,F,G,H,I)
	F	1	-0.15920 (E,F,G,H,I)
	T	3	-0.18925 (F,G,H,I)
	F	3	-0.41095 (H,I,J)
	X	3	-0.41820 (H,I,J)
	F	5	-0.54175 (I,J)
	CH	5	-0.74840 (J)
	T	5	-0.76075 (J)
	X	5	-0.96755 (J)
ΔMg	F	3	0.26450 (A)
	CH	3	0.21900 (A,B)
	F	5	0.20425 (A,B,C)
	X	1	0.18950 (A,B,C,D)
	X	4	0.18325 (A,B,C,D)
	CH	5	0.17125 (A,B,C,D)
	X	5	0.15775 (A,B,C,D)
	CH	4	0.09250 (A,B,C,D)
	CH	1	0.08250 (A,B,C,D)
	CH	2	0.06150 (A,B,C,D)
	F	4	0.03600 (A,B,C,D)
	X	2	-0.03850 (A,B,C,D,E)
	F	1	-0.04100 (A,B,C,D,E)
	T	2	-0.05075 (A,B,C,D,E)
	T	5	-0.06125 (A,B,C,D,E)
	T	3	-0.08700 (B,C,D,E)
	F	2	-0.09700 (B,C,D,E)
	X	3	-0.10200 (B,C,D,E)
	T	4	-0.14075 (D,E)
	T	1	-0.35825 (E)

Letras iguales en paréntesis indica que no hay diferencia mínima significativa entre tales medias.
 Δ= Concentración postexposición - concentración preexposición.
 PM502= Promedio mensual de Dióxido de azufre.
 CH= Chapingo, T= Pedregal, X= Morced y F= Tlalnepantla.

CONTINUA ...

APENDICE II. PRUEBA DE TUKEY PARA LA INTERACCION ESTACION * MES.

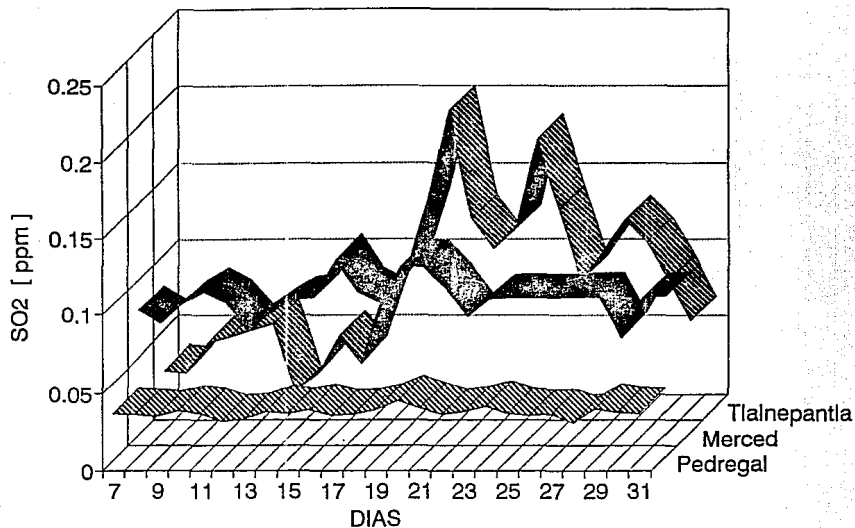
VARIABLE	ESTACION	MES	MEDIA
AK	X	2	1.77240 (A)
	X	3	1.74690 (A)
	F	3	1.71660 (A)
	CH	2	1.17100 (A, B)
	CH	5	0.98600 (A, B, C)
	F	5	0.81525 (A, B, C, D)
	CH	1	0.72070 (A, B, C, D)
	CH	4	0.51050 (A, B, C, D, E)
	T	1	0.50990 (A, B, C, D, E)
	X	4	0.29100 (A, B, C, D, E)
	CH	3	0.27475 (A, B, C, D, E)
	X	5	0.02875 (B, C, D, E, F)
	F	4	-0.06800 (B, C, D, E, F)
	F	1	-0.46800 (C, D, E, F, G)
	T	3	-0.47250 (C, D, E, F, G)
	T	4	-0.59150 (D, E, F, G)
	T	5	-0.89250 (E, F, G)
	X	1	-1.42000 (F, G)
	F	2	-1.45310 (F, G)
	T	2	-1.65600 (G)

Letras iguales en paréntesis indica que no hay diferencia mínima significativa entre tales medias.
 Δ= Concentración postexposición - concentración preexposición.
 PMS02= Promedio mensual de Dióxido de azufre.
 CH= Chapingo, T= Pedregal, X= Merced y F= Tlalnepantla.

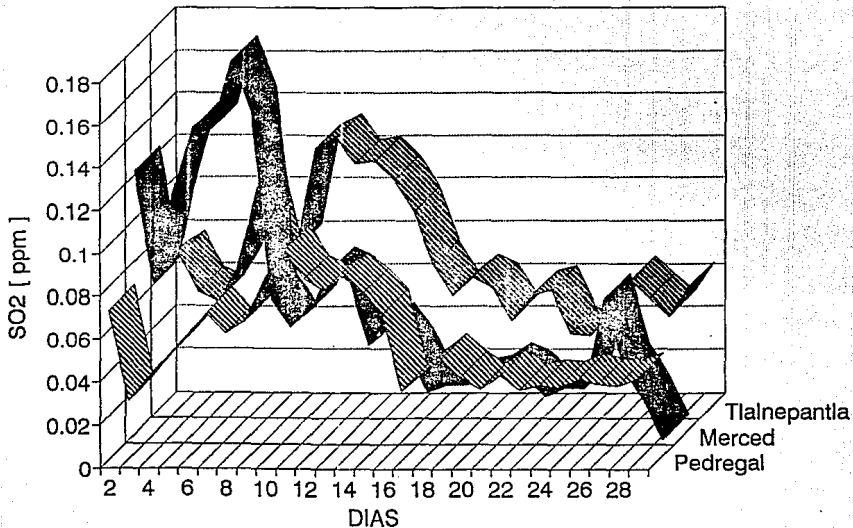
APENDICE III

GRAFICAS DE SO₂ CON CONCENTRACIONES PROMEDIO DIARIAS

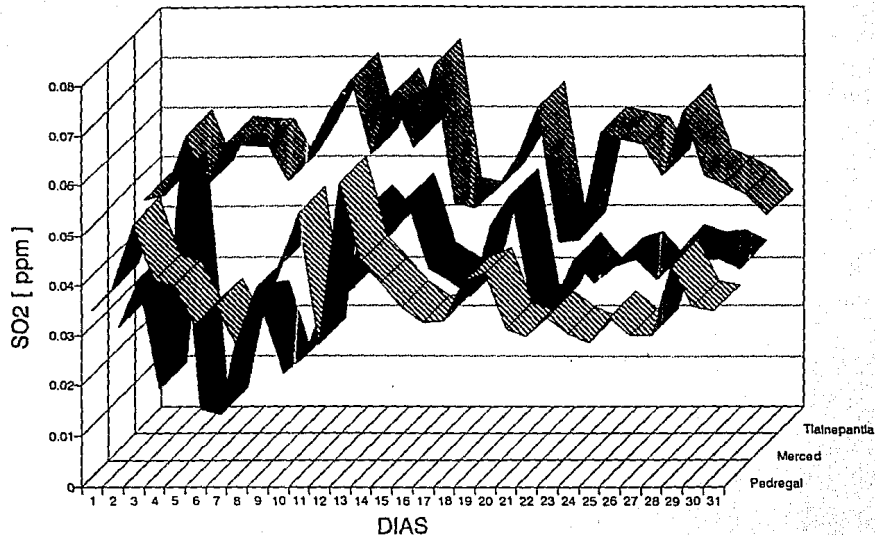
GRAF. 1. PROMEDIOS DIARIOS DE SO₂
ENERO DE 1992



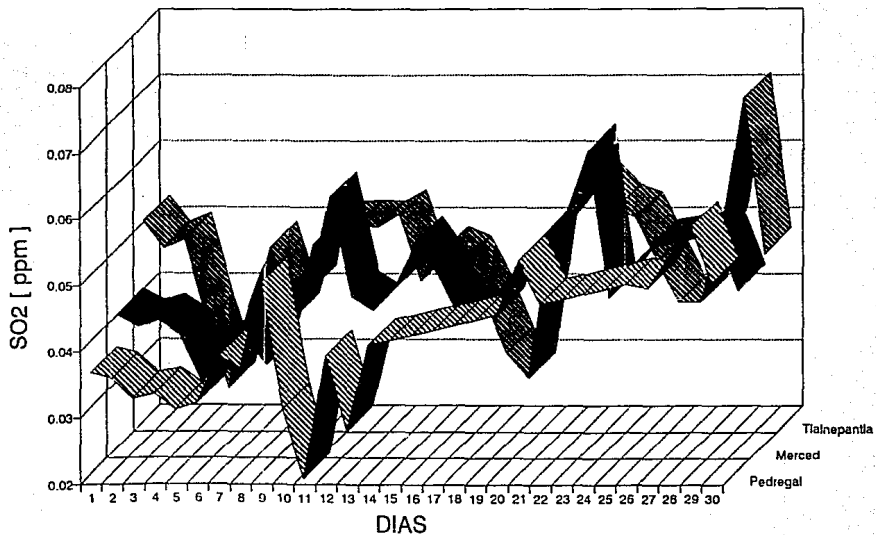
GRAF. 2. PROMEDIOS DIARIOS DE SO2
FEBRERO, 1992



GRAF. 3. PROMEDIOS DIARIOS DE SO₂
MARZO, 1992



GRAF. 4. PROMEDIOS DIARIOS DE SO₂
ABRIL, 1992



GRAF. 5. PROMEDIOS DIARIOS DE SO₂
MAYO, 1992

