

03060
4



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Universidad Nacional Autónoma de México



Of. No. PCT/JOCE/737/00

Asunto: Asignación de jurado para examen de grado.

ING. LEOPOLDO SILVA GUTIERREZ
Director
Dirección General de Administración Escolar
UNAM
Presente,

El Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, reunido en sesión ordinaria el 27 de junio del año en curso, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el examen de **Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera)** del Ingeniero en Aeronáutica José Carlos Jiménez Escalona, con número de cuenta **99826516** y número de expediente **55991001**, quien defenderá la tesis titulada **"CONTRIBUCION A LA COMPOSICION DE PARTICULAS DE AEROSOL POR EMISIONES DEL VOLCAN POPOCATEPETL"**, dirigida por la Dra. Graciela Binimelis de Raga.

PRESIDENTE:	Mtro. Armando Báez Pedrajo
VOCAL:	Dr. Hugo Delgado Granados
SECRETARIO:	Dr. Graciela Binimelis de Raga
SUPLENTE:	Dr. Darrel Baumgardner
SUPLENTE:	Dr. Ofelia Morton Bermea

Sin otro en particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria el 27 de junio del 2000.
EL COORDINADOR DEL PROGRAMA


DR. J. OSCAR CAMPOS ENRIQUEZ

203540

C.c.p. Archivo.

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

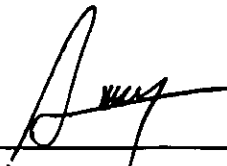
Cd. Universitaria, agosto del 2000

Dr. J. Oscar Campos Enriquez
Coordinador del Posgrado en
Ciencias de la Tierra, U.N.A.M.
Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), José Carlos Jiménez Escalona, he leído y revisado la tesis titulada "Contribución a la composición de partículas de aerosol por emisiones del volcán Popocatepetl" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Mtro. Armando Báez Pedrajo

Cd. Universitaria, agosto del 2000

Dr. J. Oscar Campos Enriquez
Coordinador del Posgrado en
Ciencias de la Tierra, U.N.A.M.
Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), José Carlos Jiménez Escalona, he leído y revisado la tesis titulada "Contribución a la composición de partículas de aerosol por emisiones del volcán Popocatepetl" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Dr. Hugo Delgado Granados

Cd. Universitaria, agosto del 2000

Dr. J. Oscar Campos Enriquez
Coordinador del Posgrado en
Ciencias de la Tierra, U.N.A.M.
Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), José Carlos Jiménez Escalona, he leído y revisado la tesis titulada "Contribución a la composición de partículas de aerosol por emisiones del volcán Popocatepetl" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente


Dra. Graciela Binimelis de Raga

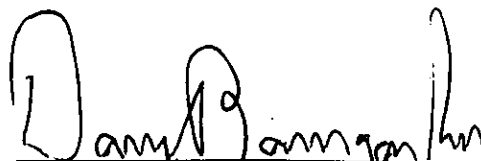
Cd. Universitaria, agosto del 2000

Dr. J. Oscar Campos Enriquez
Coordinador del Posgrado en
Ciencias de la Tierra, U.N.A.M.
Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), José Carlos Jiménez Escalona, he leído y revisado la tesis titulada "Contribución a la composición de partículas de aerosol por emisiones del volcán Popocatepetl" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Dr. Darrel Baumgardner

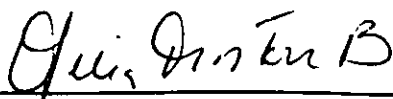
Cd. Universitaria, agosto del 2000

Dr. J. Oscar Campos Enriquez
Coordinador del Posgrado en
Ciencias de la Tierra, U.N.A.M.
Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), José Carlos Jiménez Escalona, he leído y revisado la tesis titulada "Contribución a la composición de partículas de aerosol por emisiones del volcán Popocatepetl" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente


Dña. Ofelia Morton Bermea

Dedico este trabajo a aquellas personas que me regalaron el milagro de la vida
y que me mostraron con el ejemplo que las cosas difíciles no son imposibles,
por eso y mil cosas más:

· Infinitas gracias Padres

Rosendo Jiménez

Ofelia Escalona

A mis Hermanas y Hermano:

Ana Elizabeth, que con sus palabras de aliento y sus regaños de hermana menor me inyecta entusiasmo, de esa misma manera espero con esto darle un ejemplo que siga y mejore.

Victor Manuel (†), que fue mi guía en la niñez y mi inspiración en la adolescencia.

María Elena, por esa rebeldía que la caracteriza y ese espíritu de competencia que espero nunca le falte.

A todos mis familiares que me dieron su apoyo su confianza y me regalaron una palabra de aliento en momentos difíciles.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a la Dra. Graciela B. Raga, por permitirme compartir durante todo este tiempo sus conocimientos, por dirigir con gran esmero y mucha paciencia este trabajo.

A la Dra. Telma Castro, por todos los consejos incondicionales que me ayudaron a salir de muchas dudas.

Al Dr. Darrel Baumgardner, for all his help, his nice coments and his counseles.

En especial a todos ellos por brindarme su amistad y todo el apoyo necesario para mi formación académica y profesional.

Agradezco al Mtro. Armando Báez P., al Dr. Hugo Delgado G. y a la Dra. Ofelia Morton B., por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Agradezco al programa de posgrado en ciencias de la tierra de la Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, por la oportunidad que me brindaron para llevar a cabo mis estudios.

Agradezco al CONACYT, por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo.

Agradezco la colaboración de la Dra. Beatriz Sánchez del Instituto de Astronomía (IA-UNAM) para la realización de la campaña de mediciones en instalaciones del IA-UNAM.

Agradezco al Dr. H. Padilla y la QFB M. C. Torres, quienes realizaron el análisis de cromatografía de iones.

Agradezco a la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) del gobierno del Distrito Federal, por la participación de la Unidad Móvil #2 y en particular al Ing. Pedroza y su equipo.

Agradezco al Ing. Arroyo de la empresa Televisa, quien hizo posible la ubicación de la Unidad Móvil en las instalaciones de Alzomoni.

Agradezco a la Dra. Irma Rosas P. y a su equipo de trabajo, por el apoyo en la realización de los análisis gravimétrico y PIXE de las partículas.

Agradezco al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), por el apoyo con el equipo de medición de gases CO y SO₂.

Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA-UAM), por el préstamo de equipo MiniVol.

Agradezco al Met. Salvador Yescas del Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y al Met. Rodolfo Salas (Profesores del CECyT #10), por el apoyo en la obtención de los datos meteorológicos del aeropuerto de Puebla.

Agradezco a todo el personal del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM), por facilitarme el material necesario para realizar este trabajo.

Agradezco al personal administrativo del posgrado, por la paciencia y atención en la elaboración de mis tramites.

Un agradecimiento especial a todos mis profesores, los cuales compartieron conmigo un poco de todo ese conocimiento y experiencia que me ayudo a formarme como persona y como profesional.

A mis Amigos:

A Oscar Peralta y Fernando Oropeza, por los grandes momentos que vivimos dentro y fuera del salón de clase.

A Nohemí Hernández, por que con tanta energía y entusiasmo motiva a no darse nunca por vencido.

A Paty Julio y Ester Romero, por sus comentarios agradables sus regaños y especialmente por esa alegría que las caracteriza.

A Karina, Guillermo (Memito), Lilia, Bernardo, Tere, por que hemos formado buenos equipos de trabajo y de baile.

A mis profesores y compañeros de Lima Lama, ya que me han formado un carácter disciplinado que no solo me ha servido en el deporte sino también en metas tan importantes como esta.

ÍNDICE

<u>CONTENIDO</u>	<u>PAGINA</u>
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	xiv
RESUMEN	xvii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1.- EMISIONES VOLCÁNICAS	1
1.2.- REACCIONES QUÍMICAS	3
1.3.- PARTÍCULAS DE AEROSOL EN LA ATMÓSFERA	5
1.4.- CONSECUENCIAS DEL AZUFRE EN LA ATMÓSFERA	7
1.5.- ANTECEDENTES VOLCÁNICOS	8
1.6.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
1.7.- OBJETIVO DEL PROYECTO	10
CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	11
2.1.- DECLARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LA HIPÓTESIS	11
2.2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO	16
2.3.- TÉCNICAS DE MUESTREO	20
2.3.1.- TIPOS DE DATOS	20
2.3.2.- INSTRUMENTAL	20
2.3.3.- MÉTODO DE MUESTREO	28
2.4.- ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS	28
2.4.1.- MASA DE LAS PARTÍCULAS	28

2.4.2.- ANALISIS QUÍMICO DE LAS PARTÍCULAS	29
2.4.3.- ANÁLISIS MATEMÁTICO	31
CAPÍTULO III	
ANÁLISIS DE LOS DATOS	32
3.1.- DATOS GENERALES	32
3.1.1.- GASES	32
3.1.2.- DATOS METEOROLÓGICOS	49
3.1.3.- PARTÍCULAS	55
3.2.- ANÁLISIS INDIVIDUAL	62
3.2.1.- DÍA 1 (25/04/99 – 26/04/99)	70
3.2.2.- DÍA 2 (27/04/99 – 28/04/99)	72
3.2.3.- DÍA 3 (29/04/99 – 30/04/99)	75
3.2.4.- DÍA 4 (30/04/99 – 01/05/99)	78
3.2.5.- DÍA 5 (04/05/99 – 05/05/99)	81
3.2.6.- DÍA 6 (06/05/99 – 07/05/99)	84
3.3.- DISCUSIÓN DE LOS DATOS	86
CAPÍTULO IV	
CONCLUSIONES	92
REFERENCIAS	94

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

TABLA 1.- Especies gaseosas volcánicas más comunes	2
TABLA 2.- Reacciones de oxidación atmosférica más importantes para el SO ₂	4
TABLA 3.- Parámetros muestreados y sistemas de muestreo	21
TABLA 4.- Parámetros muestreados y análisis de datos	23
TABLA 5.- Distribución de diámetros de partículas en las etapas del impactor de cascada	23
TABLA 6.- Reportes diarios de la actividad del volcán Popocatepetl para los días del 24 de abril al 10 de mayo de 1999	64
TABLA 7.- Días seleccionados por su posible influencia volcánica	69
TABLA 8.- Número de datos y ecuaciones de las rectas ajustadas para cada día seleccionado	86

FIGURAS

FIGURA 1.- Espectro de distribución de tamaños de aerosoles atmosféricos en diferentes regímenes de la atmósfera	6
FIGURA 2.- Mapa de ubicación de los sitios de muestreo	17
FIGURA 3.- Mapa de ubicación de la estación de Tonantzintla	18
FIGURA 4.- Analizadores de gases	22
FIGURA 5.- Funcionamiento del impactor de cascada	24
FIGURA 6.- Fotografías del impactor de cascada marca Andersen	25
FIGURA 7.- Recolectores de partículas PM ₁₀ y PM _{2.5} tipo MINIVOL	26

FIGURA 8.- Fotografía de la torre meteorológica instalada en Tonantzintla	27
FIGURA 9.- Series de tiempo del CO, SO ₂ y O ₃ para Tonantzintla (promedios de 10 min)	33
FIGURA 10.- Series de tiempo del CO, SO ₂ y O ₃ para Tonantzintla (promedios de 1 hora)	37
FIGURA 11.- Series de tiempo del CO, SO ₂ y O ₃ para Alzomoni (promedios de 1 hora)	38
FIGURA 12.- Diagrama de dispersión y gráfica de correlación para las concentraciones de CO obtenidos en la estación de la merced en la ciudad de México y los obtenidos en la estación de Alzomoni	40
FIGURA 13.- Diagramas de dirección y Velocidad del viento e Histograma de los datos de dirección del viento para la estación de Alzomoni	41
FIGURA 14.- Series de tiempo para el NO y NO ₂ para Alzomoni	44
FIGURA 15.- Diagramas de dispersión para los datos de las estaciones de Tonantzintla y Alzomoni	45
FIGURA 16.- Diagramas de dispersión para la estación de Tonantzintla y la estación de Alzomoni para el día y la noche	48
FIGURA 17.- Patrones de viento (niveles bajos y niveles altos)	51 y 52
FIGURA 18.- Distribución de la dirección y velocidad del viento en gráficas de forma polar e histograma de frecuencia de la dirección del viento, para los datos obtenidos en la estación de Tonantzintla para los días del 24/04/99 al 11/05/99	54
FIGURA 19.- Variación de la concentración de partículas PM ₁₀ para estaciones de Tonantzintla y Alzomoni	56
FIGURA 20.- Distribución de los promedios de masa de las partículas en función del tamaño para Tonantzintla	57

FIGURA 21.- Concentraciones de masa de los iones SO_4^- y NH_4^+ por etapa del impactor	59
FIGURA 22.- Variación en la concentración de masa por unidad de volumen para las partículas del impactor de cascada	61
FIGURA 23.- Diagramas de dispersión y correlación de los días de la campaña de muestreo en la estación de Tonantzintla	68
FIGURA 24.- Gráficas para los datos de gases y vientos para el 25 y 26 de abril de 1999	71
FIGURA 25.- Gráficas para los datos de gases y vientos para el 27 y 28 de abril de 1999	74
FIGURA 26.- Gráficas para los datos de gases y vientos para el 29 y 30 de abril de 1999	77
FIGURA 27.- Gráficas para los datos de gases y vientos para el 30 de abril al 01 de mayo de 1999	80
FIGURA 28.- Gráficas para los datos de gases y vientos para el 04 y 05 de mayo de 1999	83
FIGURA 29.- Gráficas para los datos de gases y vientos para el 06 y 07 de mayo de 1999	86
FIGURA 30.- Diagrama de dispersión para los días seleccionados, separados en dos grupos	87
FIGURA 31.- Gráficas para dirección y velocidad del viento e histogramas de frecuencia de la dirección del viento, datos del aeropuerto de Puebla	89
FIGURA 32.- Promedios de masa total, SO_4^- y NH_4^+	91

RESUMEN

Los volcanes son grandes emisores de SO_2 a la atmósfera, el cual reacciona transformándose en partículas de sulfatos. Este tipo de partículas, consideradas como un contaminante atmosférico, contribuye a la formación de lluvia ácida, corrosión en los materiales, irritación de las vías respiratorias, entre otras cosas. Desde 1993 el volcán Popocatepetl ha presentado un incremento importante en su actividad llegando a niveles de emisión de SO_2 de hasta 50,000 tons/día en 1997.

Utilizando como antecedente una investigación previa (Raga et al, 1999), en esta tesis se busca comprobar esta contribución en la composición de partículas en poblados alrededor del volcán. Para esto, se llevo a cabo una campaña de mediciones de gases y partículas en Tonantzintla (30 Km al E del cráter del volcán), en la fecha comprendida del 24 de Abril al 10 de Mayo de 1999. En esta campaña se recolectaron y analizaron concentraciones de SO_2 , CO , O_3 así como masa de partículas por medio de un impactor de cascada marca Andersen (diámetros de 0.4 a 10 μm) y con equipos MiniVol (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$).

La serie de tiempo del SO_2 obtenida en Tonantzintla mostró un comportamiento no usual, presentando picos de concentración en las últimas horas de la noche. El CO se utilizó como indicador antropogénico y se comparó su concentración temporal con la del SO_2 encontrando baja correlación entre los datos durante la noche. Los vientos no apoyan inequívocamente la hipótesis del transporte de emisiones del Popocatepetl hacia el poblado de Tonantzintla ya que en la noche que es la hora de máximos valores de SO_2 en los datos de viento no se observa una dirección predominante.

En las partículas se encontró la máxima concentración de masa de SO_4^- y NH_4^+ en los diámetros más pequeños (0.4 a 2.1 μm), indicando la formación de éstas a partir de la condensación de gas presente en la atmósfera. Se

seleccionaron los días de posible influencia volcánica y se compararon las masas de SO_4^- para los casos de posible influencia y no influencia, encontrándose un promedio mayor en la masa de los días que se consideran como de influencia volcánica.

Como apoyo a la investigación, se analizaron datos de la unidad móvil dos de la RAMA que se instaló en Alzomoni durante un periodo igual al de la estación de Tonantzintla. Estos datos presentan posible influencia de la ciudad de México que se observa en los niveles de CO. Los vientos fueron predominantemente del N por lo que sugiere que el SO_2 observado en las mediciones provenga de otra fuente que podría ser el volcán Iztaccihuatl.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en ciudades es producida principalmente por el alto índice de industrialización, el numeroso parque vehicular y la quema de materiales sólidos, que en conjunto son conocidos como fuentes antropogénicas de contaminación. Sin embargo, éstas no son las únicas fuentes de emisiones contaminantes a la atmósfera, también existen fuentes naturales que el hombre no puede controlar.

El caso que nos ocupa son los volcanes activos, que durante sus períodos de actividad pueden arrojar toneladas de sustancias a la atmósfera, en donde reaccionan con otras sustancias existentes en el aire formando compuestos que atacan la salud del ser humano y contribuyen al deterioro de los materiales que se encuentren expuestos a éstos.

1.1.- EMISIONES VOLCÁNICAS

Un volcán activo constituye una fuente muy importante de emisión a la atmósfera de múltiples especies gaseosas y partículas sólidas (cenizas y pequeños fragmentos de roca). En principio, estas especies gaseosas son emitidas a altas temperaturas y al mezclarse con el oxígeno atmosférico se oxidan rápidamente y pueden dar origen a aerosoles sólidos y líquidos (Symonds et al., 1993).

La composición de los gases en una pluma volcánica varía dependiendo de las características del volcán y principalmente de su estado de actividad, pero se ha encontrado que los principales componentes son H₂O, CO₂ y SO₂, los cuales constituyen más del 95% de la composición total de la pluma (Chester, 1993, Andres and Rose, 1995). En la Tabla 1 se presentan las 10 especies de gases volcánicos más comunes en orden de abundancia bajo diferentes condiciones.

Especies Gaseosas	Contribución estimada del volcán a la pluma altamente diluida.	Concentración en la troposfera	Concentración de la pluma mezclada
H ₂ O	10 – 20 ppm	40 – 40 000 ppm	40 – 40 000 ppm
CO ₂	0 – 0.5 ppm	alrededor de 300 ppm	301 – 310 ppm
SO ₂	1 – 2 ppm	0.1 – 70 ppb	1 – 2 ppm
HCl	0.1 – 2 ppm	alrededor de 1 ppb	0.1 – 2 ppm
H ₂ S	100 – 500 ppb	0.08 – 24 ppb	100 – 500 ppb
S ₂	10 – 80 ppb	*	*
H ₂	5 – 40 ppb	540 – 810 ppb	545 – 850 ppb
HF	5 – 40 ppb	*	*
CO	1 – 20 ppb	0.05 – 0.2 ppm	51 – 220 ppb
SiF ₄	1 – 5 ppb	*	*

Tabla 1.- Las diez especies gaseosas volcánicas más comunes (Andres and Rose, 1995). Los datos se basan en cálculos de gases homogéneos y muestreos directos en fumarolas a altas temperaturas. (* En estos casos se carece de la información)

En términos de abundancia elemental dentro de la pluma volcánica, se tiene en orden de importancia el hidrógeno (H) seguido por oxígeno (O), azufre (S), cloro (Cl) y nitrógeno (N). Con excepción del S, el orden de abundancia de estos elementos en las emisiones volcánicas es comparable con el orden de abundancia encontrado en la atmósfera, biosfera y superficie de las rocas en la

tierra (Chester, 1993). En el caso del S, las cantidades emitidas por los volcanes rebasa por mucho el orden de abundancia encontrado en otras fuentes. Por esta razón, los volcanes activos son considerados como la mayor fuente emisora de S a la atmósfera.

La cantidad de SO₂ que es emitida por un volcán dependerá de la intensidad de la actividad y de las características propias de éste. Estudios realizados por Stoiber et al. (1973) en volcanes de Centro América han revelado que la cantidad de SO₂ que emite un volcán activo es del orden de 10³ toneladas métricas por día. Se han hecho estimaciones de un total de SO₂ emitido por los volcanes del mundo del orden de 10⁷ toneladas métricas por día. (Stoiber and Jepsen, 1973; Stoiber et al., 1978).

1.2.- REACCIONES QUÍMICAS

En la pluma volcánica tienen lugar un extraordinario y diverso grupo de fenómenos químicos. En principio está constituida por un gran número de especies gaseosas reactivas a altas temperaturas, que al salir sufren un enfriamiento y una fuerte oxidación formando aerosoles (Symonds et al., 1993).

En el caso del SO₂ al ser inyectado a la atmósfera por una emisión volcánica, reaccionará con algunos de los elementos o compuestos que se encuentran suspendidos en el aire. Estudios realizados por McMurry y Wilson (1983) muestran que las reacciones en la fase líquida tienden a ser el mecanismo más importante de la formación de aerosoles sulfatados. Tales reacciones ocurren cuando la humedad relativa es mayor a 75%, mientras que las reacciones en la fase gaseosa, que son más lentas, son predominantes a humedad relativa más baja (McMurry and Wilson 1983).

Por tal razón, en ausencia de humedad relativa alta el SO_2 puede ser transportado más eficientemente antes de ser depositado en la superficie en forma de aerosol o disuelto en gotas de agua de lluvia. En la Tabla 2 se muestran las reacciones más importantes de la oxidación atmosférica del SO_2 .

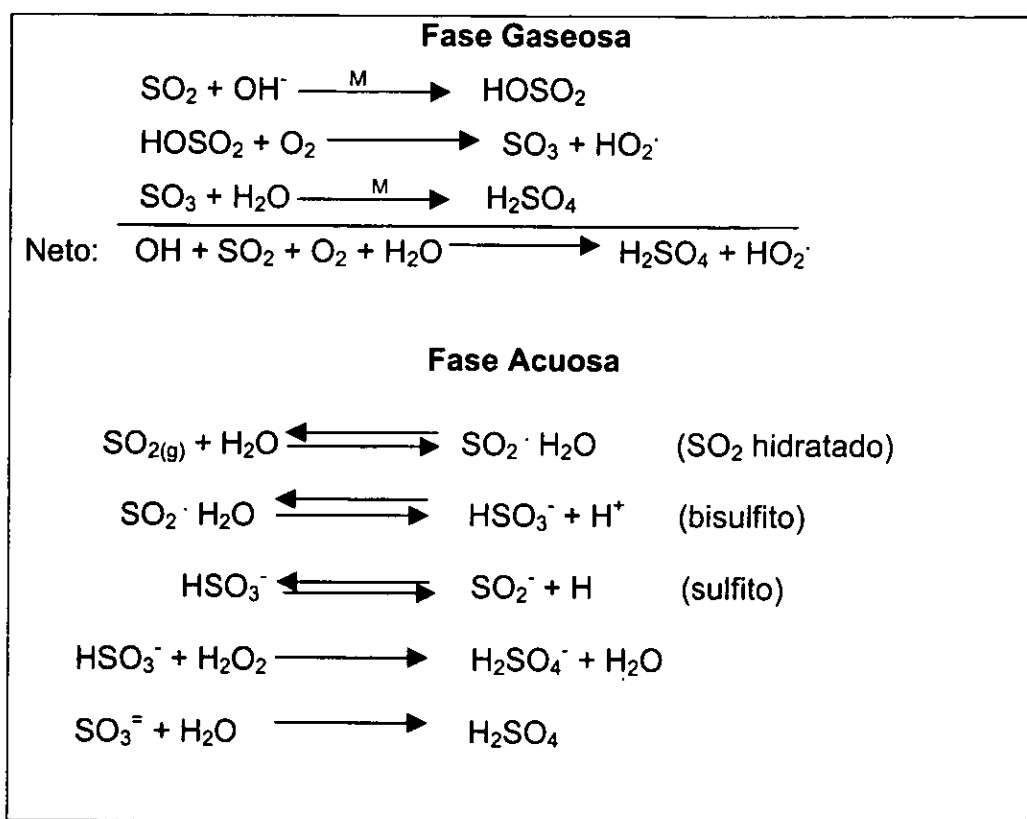


Tabla 2.- Reacciones de oxidación atmosférica más importantes para el SO_2 (Schwartz E. 1989). (Nota: **M** interviene como un tercer cuerpo sin reaccionar para la conservación del momento).

En la fase gaseosa las tasas de conversión varían típicamente entre 0 y 5% hr^{-1} y la contribución de la fase líquida llega a tener valores hasta del 12% hr^{-1} (McMurry and Wilson 1983).

1.3.- PARTÍCULAS DE AEROSOL EN LA ATMÓSFERA

Los procesos más importantes que incorporan partículas de aerosol a la atmósfera son:

- a) Dispersión de material proveniente de la superficie del planeta.
- b) Reacciones químicas y condensación de gases y vapores presentes en la atmósfera.

La dispersión de materiales de la superficie produce partículas principalmente en dos categorías: sal de mar y partículas minerales. Las partículas de sal de mar pueden ser formadas directamente por la dispersión del agua del océano proveniente de la espuma de las olas, entre otros mecanismos (Götz et al, 1991). La otra categoría de partículas es originaria de la superficie sólida de la tierra (suelo, rocas, materia orgánica, etc.) y son dispersadas por efecto del viento en superficie.

Partículas muy pequeñas ($r < 0.1 \mu\text{m}$) son formadas principalmente por condensación de vapor, el cual procede en muchos de los casos de reacciones químicas (Götz et al, 1991). Estas reacciones son generalmente iniciadas por procesos fotoquímicos aunque existen otras reacciones que no necesitan de la luz del sol para llevarse a cabo.

En la atmósfera, un buen ejemplo de la formación de partículas es la producción de partículas de sulfato y nitrato a partir de sustancias gaseosas. En el continente, las partículas de sulfato y nitrato provienen de SO_2 y NO_x que son emitidos a la atmósfera por diferentes fuentes de contaminación. Como se mostró en la Tabla 2, la oxidación del SO_2 se debe principalmente a la presencia del radical hidroxil (OH^\cdot) el cual es formado por procesos fotoquímicos seguido por una reacción termo-química (Logan et al., 1981). El producto de esta fase gaseosa es vapor de ácido sulfúrico el cual condensa en

el aire por medio de una condensación bi-molecular (Mirabel and Jaeger-Voirol, 1988).

Los procesos físicos que limitan el tiempo de vida de las partículas de aerosol están directamente relacionados con el tamaño de la partícula. Si éstas son muy pequeñas, el tiempo de vida es limitado por coagulación. Si son muy grandes, es limitado por sedimentación. En un tamaño intermedio, el tiempo de vida es mucho más largo, fluctuando hasta los cien días (Graedel et al., 1986).

Las partículas de aerosol en la atmósfera son químicamente complejas, teniendo, un amplio rango de tamaños y propiedades de transporte. La distribución de tamaños tiende a ser bimodal, como se muestra en la Figura 1.

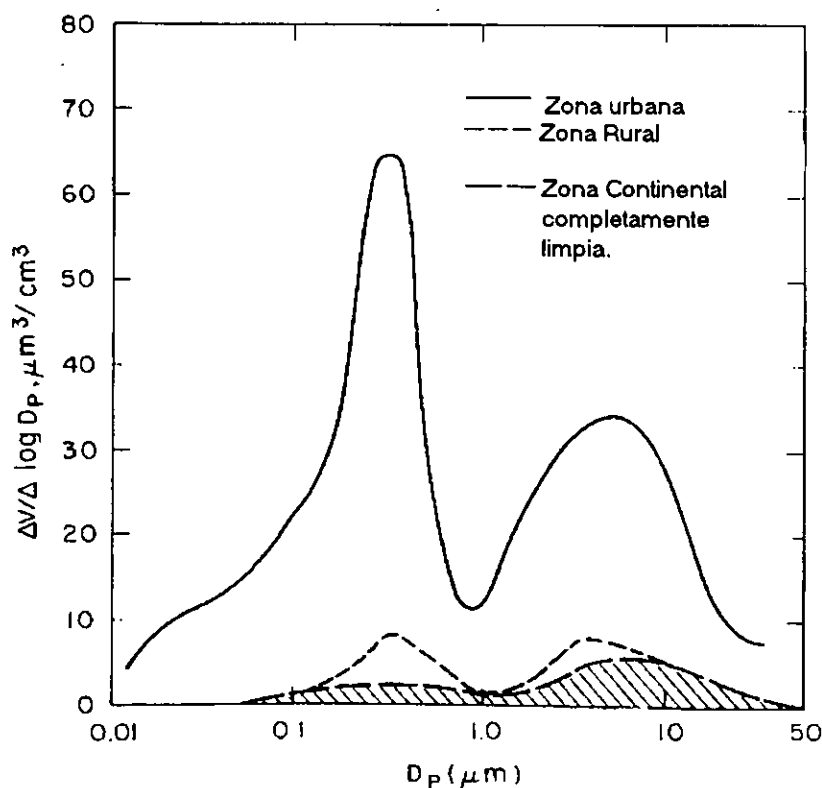


Figura 1.- Espectro de distribución de tamaños de aerosoles atmosféricos en diferentes regímenes de la atmósfera. V es el volumen total de aerosoles, D_p es el diámetro de las partículas de aerosol. (Graedel et al, 1986, pp. 11)

1.4.- CONSECUENCIAS DEL AZUFRE EN LA ATMÓSFERA

El azufre que se encuentra en la atmósfera comúnmente en forma de gas (SO_2) y de partículas de sulfato suspendidas, al combinarse con la humedad del aire producen efectos perjudiciales atribuidos a la contaminación del aire, como corrosión de materiales, lluvia ácida, irritación en nariz, garganta y ojos, etc. Por esta razón, es de gran importancia identificar las fuentes más importantes de emisiones de este gas con el fin de estimar el volumen aproximado de la cantidad de SO_2 que es arrojada a la atmósfera. Es deseable identificar la cantidad que es emitida por fuentes antropogénicas y por fuentes naturales, ya que técnicamente las primeras pueden ser controlables por medio de sistemas de control que funcionan de acuerdo a las normas de emisiones de contaminantes.

El SO_2 es uno de los principales formadores de lluvia ácida ya que, como se menciono anteriormente, reacciona muy eficientemente con la humedad del ambiente formando SO_3^- y posteriormente H_2SO_4 , que es diluido en las gotas de lluvia depositándose en superficie por precipitación. Los compuestos de azufre son responsables de daños importantes ocasionados a los materiales. Por lo general, los óxidos de azufre aceleran la corrosión del metal al formar ácido sulfúrico ya sea en la atmósfera o sobre la superficie del metal. Esto coloca al SO_2 como uno de los contaminantes más perjudiciales entre los que contribuyen a la corrosión. En lo que respecta a la salud humana se sabe que el H_2SO_4 es un irritante mucho más potente que el SO_2 ; por lo tanto, el principal interés en este punto es el mismo H_2SO_4 .

Asimismo, las partículas de aerosol de sulfato derivadas de las emisiones de SO_2 son una de las mayores causas de reducción de la visibilidad en áreas urbanas y a escalas regionales (Schwartz, 1989), debido a que dispersan la luz solar de manera muy eficiente.

1.5.- ANTECEDENTES VOLCANICOS

En México existen amplias provincias volcánicas, de los numerosos volcanes que las conforman, se consideran volcanes activos unos cuantos. Sin embargo, en torno a varios volcanes activos se encuentran localizadas importantes aglomeraciones urbanas y rurales (Velázquez y Delgado, 1997). En el caso particular del volcán Popocatepetl, éste se encuentra rodeado por importantes ciudades como la Ciudad de México, Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca, Cholula y por numerosos poblados de menor magnitud en su periferia.

El volcán Popocatepetl está ubicado a los 19.02°N y 98.62°W, es un estratovolcán andesítico, su altitud es de 5,425 msnm y se encuentra entre los estados de Puebla, México y Morelos (Goff et al., 1998, CENAPRED, 2000). La historia eruptiva del Popocatepetl data desde el año 23,000 A.C. a la fecha. A lo largo de su historia ha presentado diferentes etapas de actividad, siendo la más reciente la que se inició a finales de 1993 y principios de 1994 y que a la fecha se mantiene con frecuentes exhalaciones de gases y cenizas (Goff et al., 1998, CENAPRED, 2000).

En particular, las emisiones de SO₂ del Popocatepetl se han incrementando significativamente con el tiempo. Mediciones realizadas por Goff et al. (1998) muestran que la cantidad de SO₂ que es emitido a través del cráter del volcán ha tenido importantes incrementos durante el periodo de 1993 a 1997 que van de 2000 tons/día durante 1994 hasta valores tan grandes como 50,000 tons/día para 1997 (Goff et al., 1998).

Estas importantes emisiones de SO₂ son transportadas por los vientos y dependiendo la época del año y las condiciones meteorológicas son depositadas a diferentes distancias afectando a los poblados que se encuentran a su alrededor.

Raga et al. (1999) encontró evidencias de la presencia de las emisiones volcánicas en el cerro del Ajusco, al SW del valle de México, en una campaña de medición de gases atmosféricos efectuada a finales de 1997. (Esto mostraba cómo las emisiones de gases del volcán Popocatepetl afectan a la calidad del aire de la Ciudad de México).

1.6.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La ciudad de México es considerada una de las ciudades más contaminadas del mundo, lo cual obliga a las autoridades ambientales a implantar programas de control con el fin de lograr un índice aceptable en la calidad del aire. Hasta el momento se han implementado diversos programas de reducción de contaminantes, sin embargo no han dado los resultados deseados.

Raga et al. (1999) demostraron la influencia de las emisiones volcánicas en la composición de partículas en el valle de México. Esta publicación fue respaldada por una investigación realizada en el cerro del Ajusco al SW del valle de México, lugar donde se llevó a cabo una campaña de medición de gases y partículas presentes en la atmósfera. Dicha campaña se realizó durante la primer quincena del mes de noviembre de 1997. Se tomó en consideración la elevación del terreno donde se montó la estación de monitoreo (440 m sobre el nivel de la ciudad de México) ya que este lugar, por las noches, se encuentra por encima de la capa de contaminantes de la ciudad y durante el día cuando la

capa límite se encuentra completamente desarrollada este lugar se ubica dentro de la capa de contaminantes. Se llevaron a cabo mediciones de las concentraciones en la atmósfera de SO₂, CO y O₃ durante periodos de 24 hrs. También se hicieron mediciones de la masa de partículas utilizando un impactor de cascada durante periodos de 7 hrs (de 10:00 am a 5:00 pm), esto último con el fin de tomar muestras de la capa de mezcla contaminada.

Los resultados mostraron una elevada concentración de sulfatos durante los periodos de alta humedad relativa ocasionada por la alta eficiencia con la que reacciona el SO₂ con la humedad de la atmósfera, también descubrieron elevadas concentraciones de sulfatos en periodos de baja humedad, debido en este caso a la alta concentración de SO₂ en el ambiente en periodos lo suficientemente largos como para que las partículas presentes reaccionen con el SO₂ existente. Los datos permiten sugerir que los elevados niveles de concentración del SO₂ son originados por el volcán Popocatepetl y transportados por los vientos hasta la ciudad.

1.7.- OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este trabajo es identificar y explicar algunos de los procesos que ocurren en la atmósfera cuando son incorporadas a ésta diferentes sustancias gaseosas producidas por emisiones volcánicas. También se pretende demostrar la contribución de estas sustancias en la formación de algunas partículas de aerosol en la atmósfera de poblados que se encuentran en torno a volcanes activos.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.- DECLARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis que se desea comprobar con este trabajo de Tesis es:

- Las emisiones del volcán Popocatépetl no sólo influyen en la composición de las partículas de aerosol que se encuentran en la ciudad de México sino también en las que se encuentran en otros poblados que rodean al volcán.

Para encontrar una explicación a esta hipótesis primero se deben entender los procesos que influyen en la dispersión, dilución y reacción de los productos de emisiones volcánicas, tales como son los procesos de transporte a macro y microescala y procesos químicos.

La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende de varios factores relacionados entre sí, como son la naturaleza física y química de los contaminantes, las características meteorológicas, etc. En la latitud a la que se encuentra el volcán Popocatépetl los cambios del clima debidos a las estaciones del año son considerablemente notorios no sólo por los cambios de temperatura sino también por la cantidad de humedad que se encuentra en la atmósfera. Por lo tanto, las substancias que salen del volcán se encontrarán con diferentes condiciones atmosféricas dependiendo de la estación del año lo que influye directamente en su velocidad de reacción. Esto da como resultado, que estas substancias sean dispersadas y depositadas en superficie de

acuerdo con diferentes patrones dependiendo la época del año en la que se encuentre.

Un factor importante en la dispersión de las sustancias emitidas por los volcanes es el viento. Si la magnitud del viento es lo suficientemente grande favorecerá a que las áreas en donde serán depositadas estas sustancias sobre la superficie de la tierra en forma de partícula o de gas sean considerablemente mayores.

En el caso del volcán Popocatepetl, las emisiones gaseosas se realizan a grandes alturas, por lo que en este caso jugará un papel muy importante el viento en la altura, que al no sentir con tanta intensidad la influencia de la orografía de superficie tiene un comportamiento similar al viento geostrófico que presenta intensidades mayores que el viento de superficie. Esto hace que el transporte de las sustancias se vuelva más eficiente. Como ya se ha mencionado, el cráter del volcán Popocatepetl se encuentra a 5452 metros snmm, por lo que las emisiones de gases durante el día son depositadas con facilidad fuera de la capa límite planetaria aproximadamente sobre el nivel de los 500 mb y ahí son transportados por los vientos dominantes a esa altitud (viento geostrófico). De esta manera es transportado con mayor eficiencia, y sólo se incorpora a la capa de mezcla convectiva en cantidades que pronto son diluidas y que en la mayoría de los casos se vuelven imperceptibles ya que pueden ser confundidas con el SO_2 producido antropogénicamente.

Por otra parte, en las horas de la noche en que no hay influencia de la radiación solar y la capa límite decrece considerablemente, ya que los procesos convectivos producidos por el calentamiento de la superficie desaparecen y con la presencia de una atmósfera estable, los gases que salen del volcán son fácilmente incorporados a la capa residual penetrando a la capa límite nocturna

mayor cantidad de partículas de aerosol durante el día que durante la noche. En otros trabajos de mediciones en atmósferas urbanas contaminadas (e.g. Lopez et. al., 1973) se ha demostrado que después de la salida del sol la concentración de aerosoles se incrementa, con lo que se respalda la idea de que los procesos fotoquímicos son de suma importancia en la formación de partículas de aerosol.

Pero existen otras reacciones, como es el caso del SO_2 y el H_2O , que no necesitan de la radiación solar para llevarse a cabo (ver reacción en fase acuosa, Tabla 2), siendo esta la reacción más importante en este estudio ya que es la que transforma SO_2 a sulfato con mayor eficiencia. Por lo tanto, las partículas de sulfato encontradas en las muestras no se forman a una hora del día en particular, sino que se formaran principalmente en presencia de altos niveles de SO_2 .

Como en esta investigación se busca comprobar la formación de partículas a partir de gases presentes en la atmósfera, se analizarán los que se conocen como gases traza (e.g. SO_2 , NO_2 , H_2O , NH_3 y orgánicos) (Götz et. al., 1991). Hay que recordar que los volcanes son los principales productores de SO_2 por lo que se pondrá el mayor interés en las partículas que se generan por la condensación de SO_2 (Sulfatos). También hay que tener en cuenta que el SO_2 reacciona más eficientemente bajo condiciones de alta humedad.

La presencia de productos volcánicos en condiciones de baja humedad relativa podría manifestarse por la presencia de sulfatos en partículas pequeñas. Dado que al existir suficiente SO_2 pero poca humedad, la reacción con la que se transforma SO_2 en sulfato se vuelve más lenta y por lo tanto se produce mayor cantidad de partículas pequeñas.

haciendo notar su presencia en mayores concentraciones de SO₂ cerca de la superficie terrestre.

Es importante notar que tanto el SO₂ como el CO son gases de origen volcánico (Chester, 1993, McGuire et. al., 1995) pero también son producidos antropogénicamente por medio de la combustión de combustibles fósiles y otros procesos. La producción de CO de un volcán es muy pequeña comparada a la producción de un área urbana (fabricas, vehículos de combustión interna, quema de basura, etc) la cual llega a tener orden de varias partes por millón (ppm), sin embargo la producción volcánica de CO no rebasa los cientos de partes por billón (ppb) como se muestra en la Tabla 1. Esto permite que el CO sea un buen indicador de la presencia de la influencia antropogénica en la atmósfera. En el caso del SO₂, los mayores productores en la superficie terrestre son los volcanes, así que este gas puede tomarse como un indicador de la presencia de emisiones volcánicas, cuando no existe una correlación con el CO.

Para entender la contribución de gases volcánicos a la formación de partículas de aerosol se describirán algunas características importantes de las partículas así como de sus diferentes fuentes de emisión.

Una característica física esencial de las partículas es su concentración (Götz et. al., 1991). La concentración de las partículas puede expresarse de tres diferentes formas:

- a) El número de las partículas por unidad de volumen.
- b) La masa de las partículas por unidad de volumen (distribución de masa) o por unidad de masa de aire (tasa de mezclado).
- c) El área de partículas por unidad de volumen (distribución de área).

Desde el punto de vista de caracterización de tamaños de las partículas, la clasificación de aerosoles de Junge (1963) se vuelve muy conveniente. Junge divide las partículas de aerosol en 3 grupos.

Partículas Aitken	$r < 0.1 \mu\text{m}$
Partículas grandes	$0.1 \leq r < 1.0 \mu\text{m}$
Partículas gigantes	$r \geq 1.0 \mu\text{m}$

Este trabajo, se concentro en el estudio de las partículas grandes y gigantes ya que las mediciones se efectuaron a niveles muy cercanos a la superficie (1.5 m del suelo), que es el lugar donde se presenta una concentración de estos tipos de partículas (Götz et. al., 1991), ya que las partículas pequeñas (partículas Aitkens) predominan a grandes alturas en la atmósfera. Los instrumentos que se utilizaron para coleccionar partículas sólo muestrean en el rango de 0.4 a 10 μm .

Las partículas provenientes del suelo son dispersadas por acción del viento sobre rocas y sólidos. Este proceso es considerado como el más eficiente para generar partículas suspendidas provenientes de la superficie terrestre aunque la explicación de este mecanismo no es fácil de interpretar, excepto cuando un mecanismo externo agita la superficie (vehículos, animales, personas, etc.), ya que la velocidad promedio del viento decrece con el decrecimiento de la altura, y no permitiría que este proceso se efectuara con mucha eficiencia. En apoyo a este mecanismo de generación de partículas se deben los procesos turbulentos del aire cerca de la superficie.

Para el caso de las partículas formadas por medio de reacciones químicas o condensación de vapor o gases se tiene que este tipo de reacciones son generalmente iniciadas por procesos fotoquímicos (Götz et. al., 1991). McWilliams (1969) demostró en sus observaciones que podían ser detectadas

Por lo que se esperaría encontrar la mayor concentración de sulfatos en las partículas de diámetros menores y en las partículas de diámetros mayores se esperaría encontrar sustancias que provengan del mismo suelo o sea aquellas que no fueron creadas por reacciones químicas puramente sino provenientes directamente de la superficie. Por lo que la otra fuente natural que se debe considerar, es el mismo suelo el cual aporta emisiones de algunos gases que dependerán del contenido de sustancias en la tierra, los tipos de abonos y fertilizantes que se emplean, restos y desechos animales, entre otras cosas.

2.2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

A continuación se describirá el procedimiento que se desarrolló para llevar a cabo esta investigación. Teniendo como antecedente la investigación realizada por Raga et al. (1999) a finales de 1997 se llevo a cabo un estudio que complementa al anterior y se eligió la temporada de secas para llevar a cabo una campaña de mediciones durante el periodo comprendido entre el 24 de abril y el 11 de mayo de 1999.

Se seleccionó una localidad que se encontrara en un lugar opuesto al de la investigación realizada por Raga et al. (1999) con el objetivo de localizarla en la ruta de transporte de los productos gaseosos de las emisiones del volcán y poder interceptarlos.

El diseño del plan de trabajo para la obtención de datos fue similar al utilizado por Raga et al. (1999). Se monitorearon los gases SO₂, CO y O₃, con el fin de identificar sus patrones de comportamiento diarios y también se muestrearon partículas por medio de un impactor de cascada marca Andersen, para estudiar la concentración de masa en función del tamaño.

Tonantzintla es considerada una zona rural que podría estar influenciada por las emisiones antropogénicas de las ciudades de Puebla y de Cholula. Por lo anterior, se espera encontrar un alto índice en la concentración de CO y SO₂ por las mañanas, incrementándose con la actividad antropogénica debida a vehículos particulares (que consumen gasolina), vehículos diesel (como son los trailers y los autobuses de pasajeros que son los que producen SO₂) y fábricas de la zona industrial. Por otro lado, se esperaría que estas concentraciones decrecieran por las tardes cuando disminuye el tránsito vehicular y la actividad industrial.

Otro parámetro que se muestreó, fue la concentración de masa de partículas, para la cual se empleo un impactor de cascada marca Andersen de 8 etapas para tamaños de partículas desde 0.4 a 10 µm, instrumento que se describe más adelante. También se analizaron en las muestras las concentraciones de iones de Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, SO₄⁻², Cl⁻, NH₄⁺, NO₂⁻ y NO₃⁻.

Con los resultados de los muestreos se tratará de respaldar la hipótesis de que en temporada de secas el SO₂ reacciona menos eficientemente al encontrar poca humedad en el ambiente, por lo que se espera encontrar partículas de sulfato de tamaños menores ya que al transportar el SO₂ del volcán y al no reaccionar rápidamente formando aerosoles relativamente más pesados, éste es diluido haciendo notar su presencia sólo en partículas muy pequeñas.

2.3.- TÉCNICAS DE MUESTREO

2.3.1.- TIPOS DE DATOS

En Tonantzintla se tomaron muestras de gases (SO₂ , CO, O₃), de partículas (tamaños entre 0.4 a 10 µm) y datos meteorológicos (dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad). La estación móvil de la RAMA obtuvo los siguientes datos: gases (SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO, O₃), partículas (PM 10) y datos meteorológicos (temperatura, dirección y velocidad del viento). Asimismo se obtuvieron datos meteorológicos del Aeropuerto de Puebla.

2.3.2.- INSTRUMENTAL

La instrumentación que se utilizó para realizar la campaña de muestreo en la estación de Tonantzintla (Puebla) así como los tipos de tratamiento que se le dieron a los datos se describen brevemente en la Tabla 3.

PARAMETRO	Método de Medición/Tipo de Sensor	Rango y Precisión
O ₃	Absorción UV / TECO Inc.	0 -1ppmv ± 15%
SO ₂	Fluorescencia / TECO Inc.	0 -1ppmv ± 25%
CO	Absorción en infrarrojo / TECO Inc.	0 -10 ppmv ± 15%
Temperatura	Qualimetrics Modelo 14W3555	-55° a +55° ± 0.5°
Humedad	Estación Meteorológica.	0 a 100 % ± 3.5%
Presión		100 a 1024 mb ± 1.5mb
Vientos		0 a 50 m/s ± 0.266 m/s

Masa de Aerosoles (en función del tamaño)	Impactor de cascada marca Andersen de 8 etapas (28.3 L min ⁻¹).	± 5 µg
Masa de Partículas PM ₁₀ y PM _{2.5}	Armetrics de bajos volúmenes (Mini Vol). 5 L min ⁻¹	

Tabla 3.- Parámetros Muestreados y sistemas de muestreo.

El instrumento que se utilizó para medir el O₃ pertenece al CCA-UNAM mientras que los instrumentos que se utilizaron para medir el SO₂ y CO fueron prestados por el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) y por la RAMA, respectivamente.

Estos instrumentos proporcionan el resultado de la medición en forma de pequeñas variaciones de voltaje, las cuales fueron grabadas en forma continua por una computadora en intervalos de segundo. Se utilizó el Software LabView con el que se creó un programa de recolección y almacenamiento de los datos con ayuda de personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

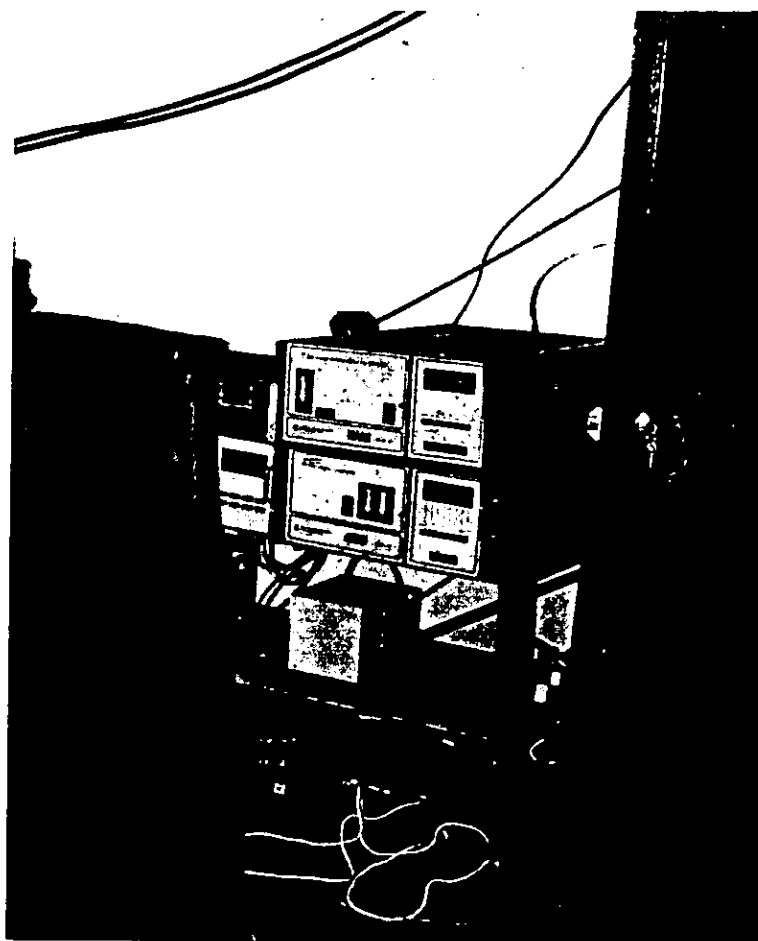


Figura 4.- Analizadores de gases utilizados en la campaña de muestreo de Tonantzintla.

Los impactores de cascada pertenecen al grupo de Aerobiología del CCA-UNAM. Como se muestra en la Tabla 4 se utilizaron diferentes tipos de filtros en dos impactores simultáneos, con el fin de comparar la información obtenida de filtros de un material con la información de filtros de otro material.

PARAMETRO	ANALISIS
O ₃ , SO ₂ y CO	Series de Tiempo
Temperatura, Humedad, Presión y Vientos.	Estadístico

Masa de Aerosoles en función del tamaño (Impactor de cascada de 8 etapas con filtros de fibra de vidrio, teflón y policarbonato).	Análisis gravimétrico con una balanza analítica Sartorius.
Composición de iones en los aerosoles	Cromatografía de iones
Masa de partículas PM ₁₀ y PM _{2.5} (Mini Vol con filtros de teflón)	PIXE (Emisión de rayos X inducida por protones)

Tabla 4.- Parámetros Muestreados y análisis de los datos.

La Tabla 5 muestra que el impactor consta de 8 etapas en las cuales recolecta diferentes diámetros de partículas en un rango que va de 0.4 μm a 10 μm .

Etapa	Rango de diámetros de las partículas (μm).
0	9.0 – 10
1	5.8 – 9.0
2	4.7 – 5.8
3	3.3 – 4.7
4	2.1 – 3.3
5	1.1 – 2.1
6	0.65 – 1.1
7	0.43 – 0.65

Tabla 5.- Distribución de diámetros de las partículas en las etapas de impactor de cascada tipo Andersen. Esta distribución es según el manual del Impactor de cascada marca GRASEBY ANDERSEN, Serie 20-800 de 8 etapas.

El impactor de cascada es un instrumento que funciona básicamente por medio de una bomba de vacío la cual hace pasar una corriente de aire a través de las etapas del impactor por medio de la succión de ésta desde la parte inferior del instrumento. En cada una de estas etapas se encuentra colocado un filtro en el que se impactan por efecto de su inercia las partículas que son arrastradas por la corriente de aire. Conforme se avanza en las etapas los orificios que dejan pasar el aire se vuelven más pequeños provocando con esto que el flujo aumente su velocidad, con el fin de que las partículas que no se impactaron en los primeros filtros porque su fuerza inercial no fue lo suficientemente grande para desprenderlas del flujo, se impacten en los filtros de etapas posteriores. Es así como se pueden recolectar partículas de diferentes tamaños en las diferentes etapas de un impactor de cascada. Este proceso aerodinámico se ilustra en la Figura 5.

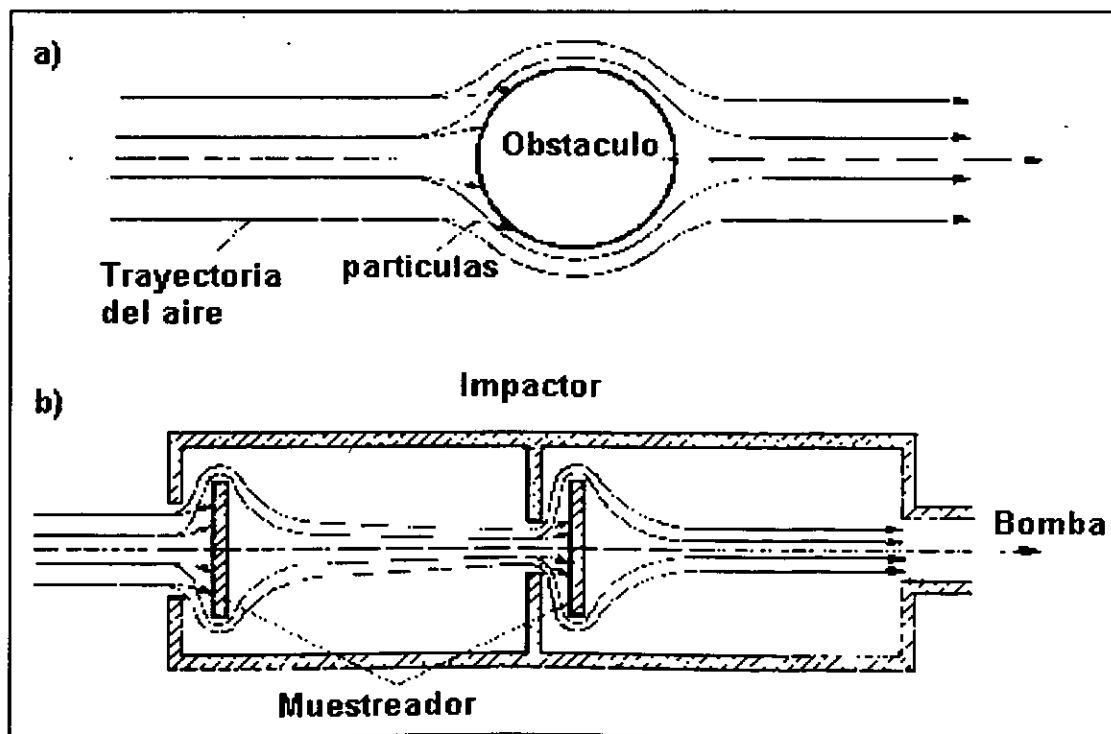


Figura 5.- Funcionamiento del Impactor de cascada.

En la Figura 5a, se muestra como un flujo que se encuentra con un obstáculo lo rodea, continuando posteriormente con su trayectoria original, este efecto de cambio brusco de dirección que efectúa el flujo que transporta a las partículas de aerosol que se encuentran en él, provoca que éstas se impacten sobre los muestreadores ya que, por la masa de éstas, su inercia no les permite cambiar de dirección con el flujo. En la Figura 5b, se muestra el esquema de un impactor en el que se describe el proceso anteriormente explicado.

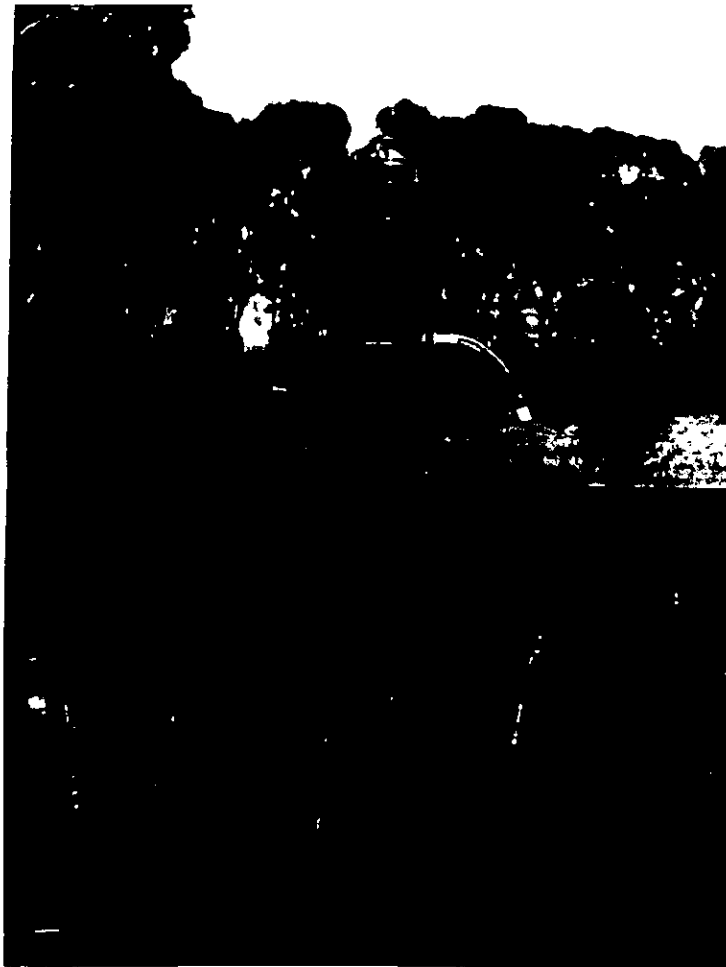


Figura 6.- Fotografías de un impactor de cascada tipo Andersen de 8 etapas. En la fotografía de arriba se muestra el impactor de cascada completamente armado y en la fotografía de abajo se muestran un impactor semi desarmado mostrando los filtros de recolección de muestras en algunas de las etapas.

Los MiniVol utilizados en esta campaña de muestreo para la recolección de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, fueron proporcionados por el CENICA-UAM (Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental).



Figura 7.- Recolectores de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ Tipo Mini-Vol. En la fotografía de arriba se muestran los recolectores de partículas Mini-Vol en funcionamiento y en la fotografía de abajo se muestran estos mismos recolectores semi desarmados (Este tipo de recolectores son automáticos por lo que fueron programados para trabajar por periodos de 24 hrs continuas al término de las cuales se sustituyo tanto el filtro como la batería recargable).

El MiniVol es básicamente una bomba de vacío con un mecanismo programable el cual puede hacer muestreos en períodos de hasta 24 hrs y se puede programar para llevar a cabo estos muestreos hasta por 7 días continuos. Consta de una pila recargable la cual se deberá cambiar cada 24 hrs y en la parte superior se encuentran instalados los filtros muestreadores que se encargan de la recolección de las partículas. Las partículas que son transportadas por el flujo de la bomba son impactadas en los filtros de teflón, previamente tratados con una mezcla de grasa especial y solvente. El aire pasa a través de los poros del filtro quedando allí atrapadas las partículas.

Los datos meteorológicos de la estación de Tonantzintla se obtuvieron con una miniestación meteorológica que se instaló en el lugar como se muestra en la Figura 8. También se utilizaron los datos meteorológicos proporcionados por la estación móvil de la RAMA y los datos meteorológicos del aeropuerto de Puebla.



Figura 8.- Fotografía de la torre meteorológica instalada en el observatorio de Tonantzintla. En esta torre meteorológica además de colocar los instrumentos de medición de viento y temperatura se colocó la chimenea para la recolección de las muestras de gases teniendo especial cuidado de darle la altura suficiente para estar por encima de la copa de los árboles.

2.3.3.- MÉTODO DE MUESTREO

Los datos fueron recolectados en períodos de 24 hrs. En el caso de los gases se obtuvieron, como se mencionó anteriormente, datos cada segundo con los cuales se generaron promedios de 10 minutos para poder elaborar las gráficas de serie de tiempo y facilitar el análisis de estos datos con otras técnicas que posteriormente se describen.

Para el caso de las partículas los filtros de los muestreadores se cambiaron cada 24 hrs, sin embargo hubo momentos en que el funcionamiento de los instrumentos tuvo que ser suspendido por causas del tiempo o falla de los instrumentos. Esto se realizó con el fin de tener un registro exacto del tiempo de funcionamiento y así poder conocer con mayor precisión el volumen de aire que pasaba por el filtro.

2.4.- ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

2.4.1.- MASA DE LAS PARTÍCULAS

Análisis gravimétrico:

Antes de que se llevara a cabo el muestreo con los impactores, los filtros se estabilizaron en un cuarto a temperatura y humedad constante de $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ y $40.0\% \pm 5\%$ respectivamente, durante un período de 24 hrs. Posteriormente, se determinó su peso en una microbalanza analítica (ver tabla 3). Después de ser utilizados en los muestreos, los filtros se acondicionaron nuevamente bajo las mismas condiciones y se obtuvo el peso de la muestra. La estabilización y el pesado de los filtros se realizaron en los laboratorios de Aerobiología del CCA-UNAM. La masa de las partículas colectadas se calculó por diferencia de peso entre los filtros con y sin muestra. Para expresar el

resultado de las partículas suspendidas por volumen de aire, se consideró el tiempo de muestreo de cada filtro y el flujo de aire con los impactores, (28.3 L min⁻¹).

Método TEOM:

El método de TEOM (Tapered Element Oscillating MicroBalance) se utiliza para el muestreo y obtención de la concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} (Allen et al., 1997 y Bullin y Moe, 1982). Este método fue utilizado por la estación automática número dos de la RAMA que se instaló en la estación de microondas de Alzomoni.

El TEOM mide la acumulación de masa en un filtro adherido al extremo de una varilla de vidrio oscilante. Los cambios en la frecuencia de oscilación son usados para hacer una medición directa de la acumulación de masa en el filtro en el tiempo. La tasa del flujo a través del filtro es medida con un medidor de flujo. La concentración de partículas es determinada cada 2 segundos utilizando estas dos mediciones.

2.4.2.- ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS PARTÍCULAS

Cromatografía de líquidos:

La composición de iones en las muestras se obtuvo por cromatografía de líquidos, técnica que se describe a continuación.

Se empleó un cromatógrafo de líquidos (High Performance Liquid Chromatographer "HPLC") Perkin Elmer equipado con una bomba isocrática, una interfase Nelson y un conductímetro Conductor Monitor II acoplado a una computadora Epson. Los iones que se analizaron con este equipo fueron: Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, SO₄⁻², Cl⁻, NH₄⁺, NO₂⁻ y NO₃⁻. Las columnas analíticas fueron las

siguientes: para la mayoría de los iones se uso una columna Hamilton PRP X100 y para el ion amonio una columna Hamilton PRP X200. El análisis de cromatografía de líquidos se llevo a cabo en los laboratorios de química de la atmósfera del CCA-UNAM.

Para la preparación de la muestra, los filtros utilizados en el muestreo se colocaron en vasos de precipitados de 100 ml previamente lavados con agua desionizada. Luego se agregaron 20 ml de agua desionizada y se extrajeron las partículas durante una hora utilizando un baño de ultrasonido. Para el análisis correspondiente se inyectaron 100 μ l de muestra para los iones y 500 μ l para el ion amonio. La calibración se hizo por medio de patrones certificados para cada compuesto con lo que se elaboraron las curvas correspondientes. Los resultados de los análisis se obtuvieron directamente de la computadora en mg L⁻¹ (los que posteriormente se convirtieron a μ g m⁻³).

PIXE:

La técnica de análisis utilizada para determinar la composición elemental de las partículas, fue la emisión de rayos X inducida por un haz de protones de 2MeV (PIXE). Para la detección de los rayos X se empleó un detector del tipo Si(Li), cuya resolución es de 210 eV a 5.9 keV. La señal producida por el detector se procesó con un amplificador Ortec 672, y el espectro resultante se colectó en un analizador multicanal Ortec TRUMP, conectado a una computadora personal. La corriente del haz se integró mediante una caja de Faraday por detrás del blanco irradiando.

Los filtros de teflón utilizados para el muestreo de PM₁₀ y PM_{2.5} con el equipo Mini-Vol, se montaron en marcos para transparencia plásticos (50 mm x 50 mm), para ser irradiados en la cámara de PIXE (en vacío) del laboratorio del Acelerador Van Graaff de 5.5 MV, del Instituto de Física, UNAM. Con el fin de validar los resultados, se analizó también una membrana del material de

referencia certificada por el NIST 3087a (elementos en membrana). El diámetro del haz fue de 4 mm y las corrientes típicas oscilaron alrededor de 5 nA. Las cargas integradas variaron entre 0.5 μC y 4.5 μC . Los espectros obtenidos se analizaron mediante el programa QXAS del organismo Internacional de Energía Atómica (Van Espen et al., 1979).

La curva de sensibilidad del sistema de detección de rayos X se determinó a través de patrones en forma de película delgada de los elementos Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn Ga, Ge, Se y Br (para las líneas K de elementos comprendidos en el intervalo de números atómicos 13 a 35), y los elementos Tl, Pb y Bi (para las líneas del elemento Pb). El espesor de los patrones (fabricados por MicroMatter Co., Deer Harbor, WA, EUA), fue de alrededor de 50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ cada uno, soportados en Mylar de 3.5 μm de espesor.

2.4.3.- ANÁLISIS MATEMÁTICO

Para la interpretación de los datos tanto de gases como de los obtenidos en el muestreo de partículas de aerosol se utilizaran métodos estadísticos como son: elaboración e interpretación de histogramas de frecuencia, gráficas de correlación entre datos, gráficas de autocorrelación y correlación cruzada y creación de las gráficas de series de tiempo para el caso de los gases (Spiegel, 1991 y Philip and Robinson, 1992).

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS DATOS

En este capítulo se presentan los datos obtenidos en los diferentes lugares de muestreo así como los datos proporcionados por el aeropuerto de Puebla, que se utilizaron para desarrollar esta investigación. Con el fin de lograr una mejor interpretación de los datos, la presentación de los mismos es la siguiente:

1. Presentar toda la base de datos.
2. Presentar los datos obtenidos durante el día y los obtenidos durante la noche.
3. Presentar los datos por cada día de medición.

3.1.- DATOS GENERALES

3.1.1.- GASES

La Figura 9 presenta las series de tiempo para los gases muestreados en la estación de Tonantzintla (CO, SO₂ y O₃), utilizando promedios de 10 min.

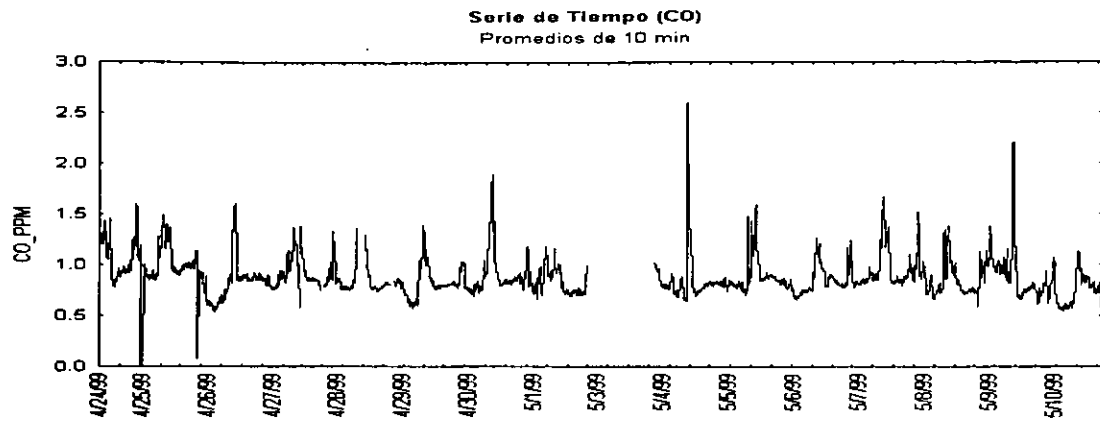


Figura 9a

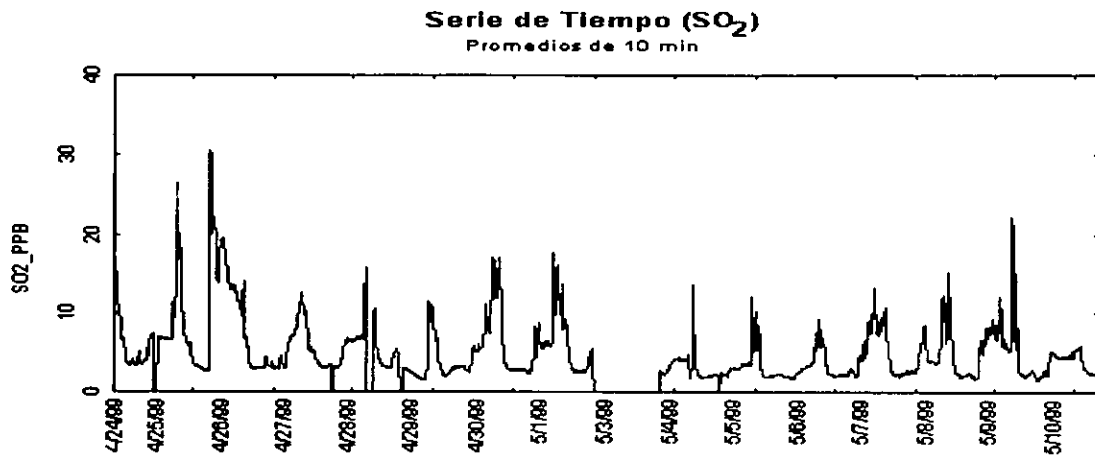


Figura 9b

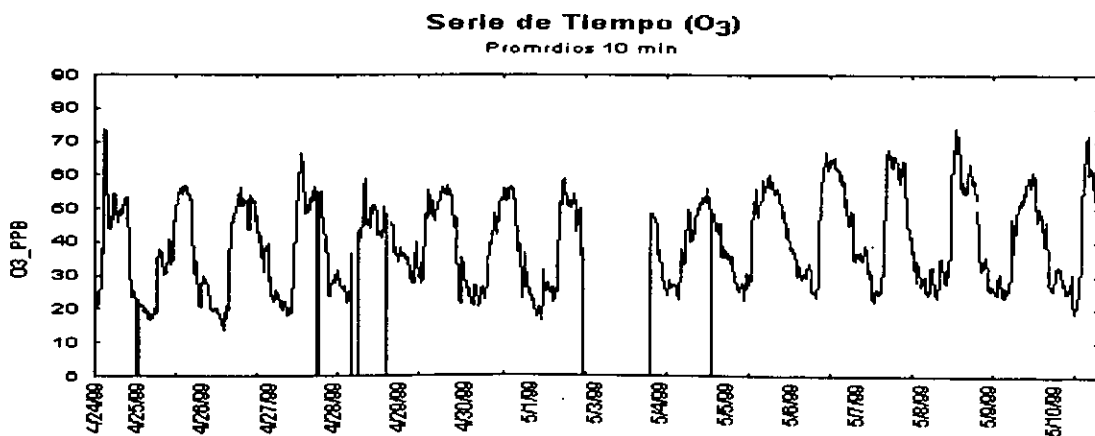


Figura 9c

Figura 9.- Series de tiempo del CO, SO₂ y O₃ respectivamente, para la estación de Tonantzintla en los días de muestreo de la campaña, promedios de 10 minutos.

En estas series de tiempo se pueden apreciar patrones de comportamiento en las concentraciones de cada uno de los gases, ocasionadas por la variación en la actividad de las fuentes de emisión en el transcurso de las 24 hrs del día.

Para el caso del CO se puede apreciar que los máximos de concentración se presentan en la mañana aproximadamente entre las 8:00 y las 10:00 hrs. Ese período se considera "horas pico" en una ciudad, ya que es cuando la mayoría de la gente se transporta hacia sus lugares de trabajo y por consiguiente el parque vehicular se encuentra funcionando al máximo contribuyendo además, las plantas industriales y muchas otras fuentes a la emisión de CO.

El SO₂ también es emitido por fuentes antropogénicas, pero los máximos de este gas no se presentan a la misma hora que los de CO. Los niveles de concentración máximos de SO₂ son observados entre las 5:00 y las 7:00 hrs que es cuando la superficie de la tierra llega a su máximo enfriamiento. Una atmósfera nocturna muy estable ayuda a que los gases que permanecían fuera de la capa de mezcla, se incorporen más eficientemente a la capa límite nocturna, considerablemente más delgada que la capa límite diurna. Estos gases descienden hasta muy cerca del nivel del suelo en esta hora al no encontrarse con las corrientes convectivas que se generan por el calentamiento de la superficie de la tierra en el día.

El SO₂ que se encuentra en la atmósfera puede provenir de la combustión industrial que usa combustóleo, combustión en motores diesel, de la combustión de materiales plásticos y otras fuentes, pero la principal es la volcánica. No es este el caso del CO, el es producido principalmente por la quema de combustibles fósiles y de otros materiales derivados del petróleo (los

emisores más importantes de CO son los motores de combustión interna). En otras palabras, el CO es producido principalmente por fuentes antropogénicas. Las diferencias en fuentes de emisión podrían ser una explicación a los patrones de comportamiento que presentan las series de tiempo del CO y el SO₂.

Es importante tomar en cuenta que el SO₂ reacciona más eficientemente en condiciones de humedad alta (Tabla 2), la cual se incrementa en la atmósfera con el aumento de la presión y la disminución de la temperatura. Es por ello que la humedad relativa en superficie es máxima antes de la salida del sol. Se esperaría que a esa hora la reacción del SO₂ se llevara a cabo con la máxima eficiencia haciendo, por consecuencia, que los niveles en la concentración de este gas disminuyeran. Sin embargo, se observan los máximos niveles, lo que sugiere que la concentración de SO₂ en el lugar debe haber sido mucho mayor que la medida. La explicación que se le podría dar a lo anterior es que el SO₂ registrado de las 5:00 a las 7:00 hrs provenga de una fuente importante relativamente cercana al lugar o podría ser el que se encuentra en el día en la parte externa de la capa límite planetaria.

En el caso del O₃, se puede apreciar en su serie de tiempo la típica fluctuación que presenta este gas en zonas urbanas, teniendo sus máximos valores entre las 12:00 y 14:00hrs, mostrando su menor valor en las últimas horas de la noche. Como es sabido, el O₃ se forma por procesos fotoquímicos y uno de sus principales destructores es el NO que es producido en grandes cantidades en áreas urbanas (por el efecto de la quema de combustibles fósiles, quema de plásticos, de llantas, etc.). Por esta razón, en zonas urbanas se presentan los niveles más bajos de O₃ en ausencia de luz solar ya que en esos momentos no hay generación de O₃, sino que sólo es destruido por el NO existente.

Es importante señalar que los niveles mínimos de SO_2 se presentan entre las 13:00 y las 16:00 casi coincidiendo con los niveles máximos de O_3 y los niveles mínimos de ambos gases se presentan entre las 5:00 y las 7:00 hrs. Esto apoya la hipótesis en donde la capa límite convectiva desarrollada por el calentamiento de la superficie de la tierra durante el día no permite que el SO_2 que se encuentra fuera de ésta se integre eficientemente. Es posible suponer que estos picos de SO_2 medidos entre las 5:00 y 7:00 hrs provienen de emisiones generadas por el Popocatepetl, las cuales son transportadas por los vientos de niveles superiores y en la noche son incorporadas a la atmósfera baja haciendo notar su presencia en superficie con mayor intensidad.

Para poder hacer la comparación de los datos obtenidos en Tonantzintla con los obtenidos por la estación de la RAMA en Alzomoni se presentaran las gráficas de las series de tiempo utilizando el mismo formato para todos los datos. En este caso, como la información que proporcionó la RAMA fue en forma de promedios horarios, se obtuvieron promedios horarios para los datos de Tonantzintla y se graficaron con éstos las series de tiempo. La Figura 10 presenta las series de tiempo de los gases monitoreados en la estación de Tonantzintla, utilizando datos horarios.

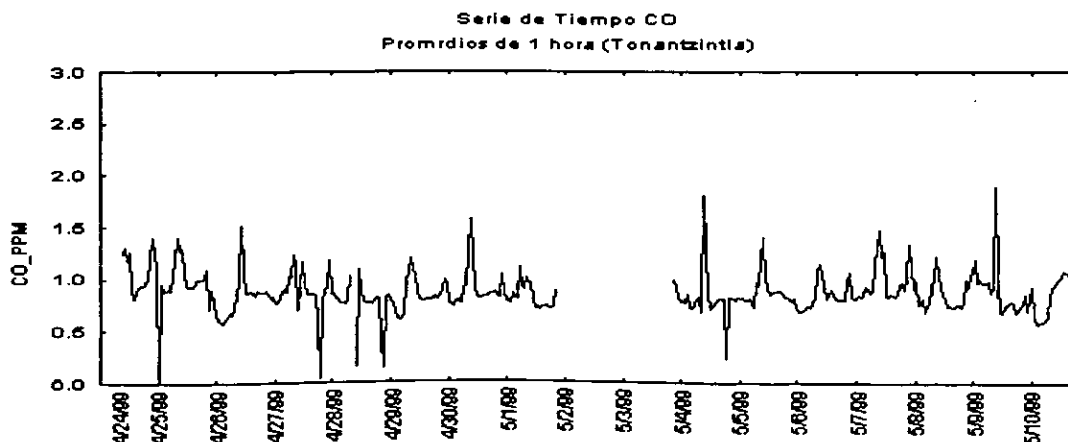


Figura 10a

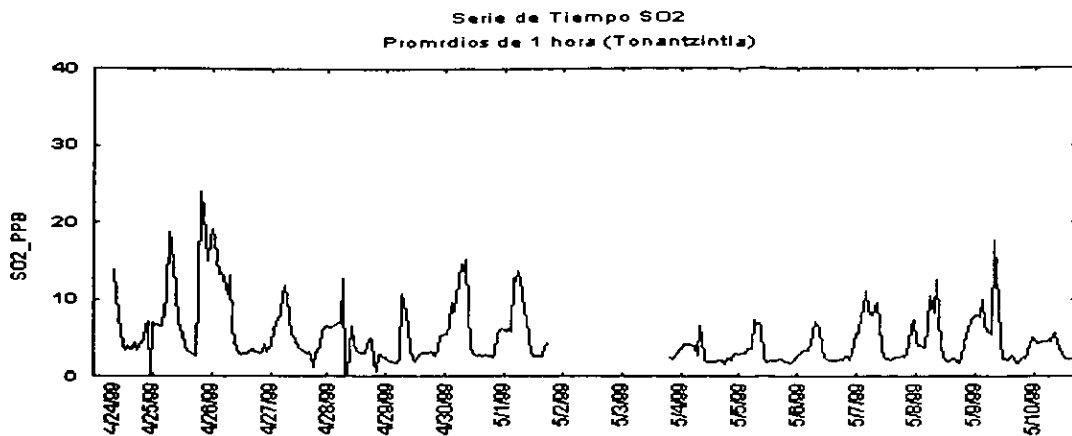


Figura 10b

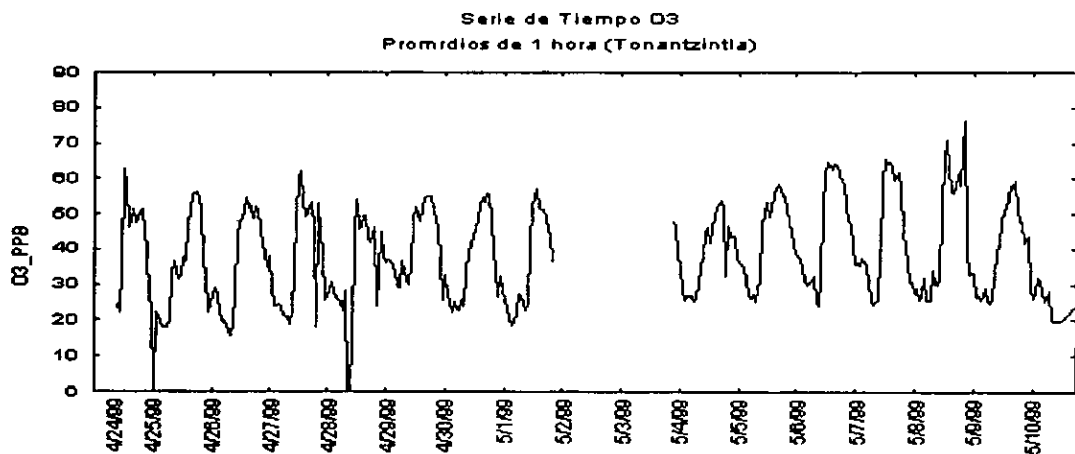


Figura 10c

Figura 10.- Series de tiempo del CO, SO₂ y O₃ respectivamente, para la estación de Tonantzintla en los días de muestreo de la campaña (promedios de 1 hora).

En la Figura 11 se presentan las series de tiempo de las mediciones de CO, SO₂ y O₃ hechas por la estación móvil 2 de la RAMA, que se ubicó en la estación de Microondas de Alzomoni. Esta estación (Figura 2) se encuentra aproximadamente a 60 km al SE de la ciudad de México, por lo que se puede considerar relativamente alejada de la influencia inmediata de emisiones antropogénicas.

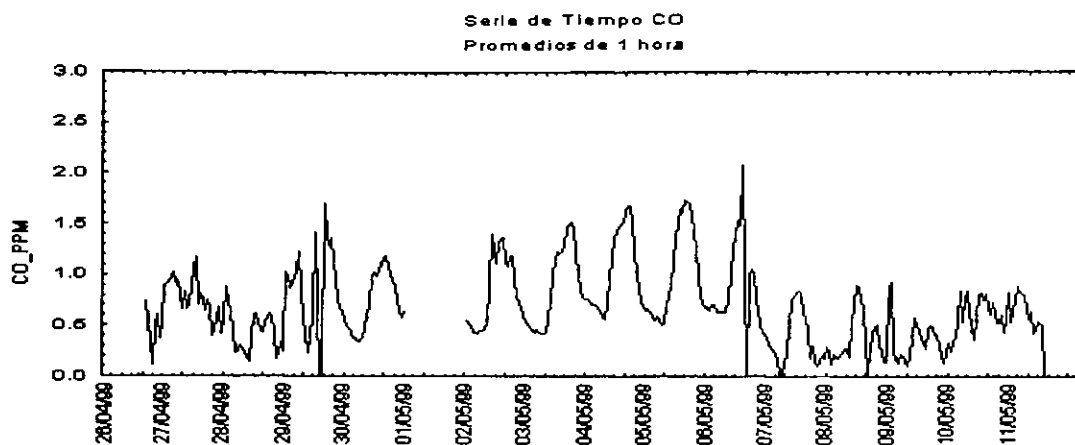


Figura 11a

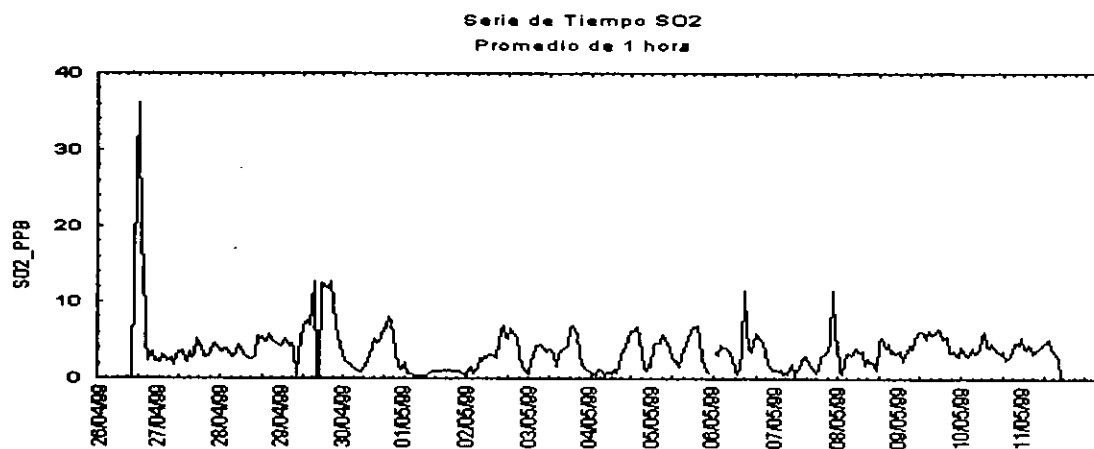


Figura 11b

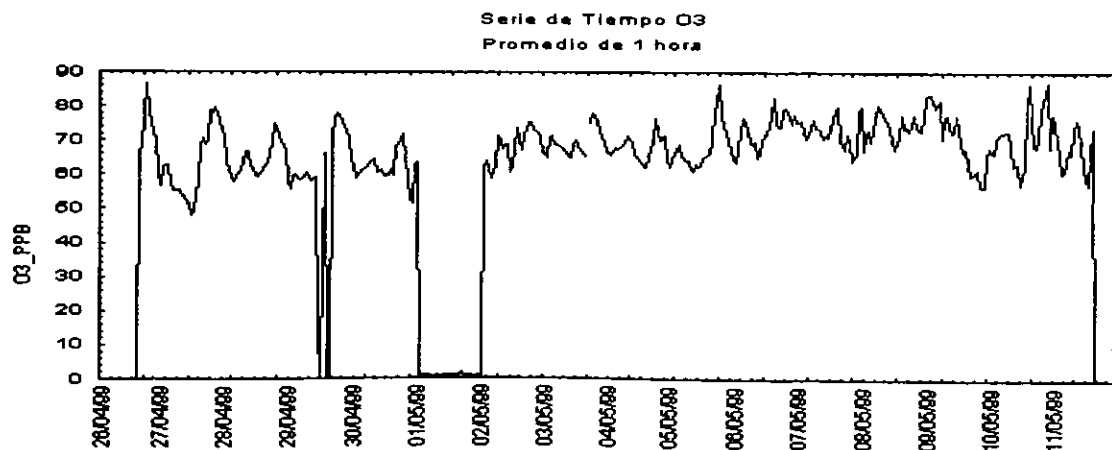


Figura 11c

Figura 11.- Series de tiempo del CO, SO₂ y O₃ respectivamente, para la estación de Microondas de Altzomoni en los días de muestreo de la campaña (promedios de 1 hora).

En estas series de tiempo se pueden apreciar los patrones de comportamiento en las concentraciones de cada uno de los gases. En este caso se podría considerar que no existe actividad cercana de las fuentes antropogénicas de emisión que influyan en el lugar (como podrían ser fábricas, vehículos con motor, quema de basura y algunas otras fuentes que son comunes en una ciudad) ya que éstas se encuentran muy lejos. Sin embargo, no hay que descartar la posibilidad del transporte de los contaminantes por efecto del viento y que en este caso los patrones (Figura 17) apoyarían un traslado desde la ciudad de México hacia la estación de Alzomoni.

Se esperaría entonces que los niveles en la concentración de CO (que se considera un indicador de presencia antropogénica), fueran menores que los encontrados en la estación de Tonanzintla. Como se observa en las Figuras 10a y 11a, el CO presenta patrones consistentes con la presencia de fuentes que varían su emisión durante el día de forma regular, sólo que en este caso los niveles máximos de concentración aparecen entre las 15:00 y las 18:00 hrs no coincidiendo con el ciclo de actividad típico que presenta una zona con influencia urbana, como en el caso de Tonanzintla. Esto sugiere que el CO es transportado desde una fuente no cercana al lugar que podría ser la Ciudad de México, ya que los vientos favorecen el transporte de gases hacia Alzomoni desde el valle de México. La Figura 12a muestra un diagrama de dispersión de los datos de concentraciones obtenidos en una estación de la RAMA dentro de la ciudad de México (Estación la Merced) y los datos de Alzomoni a los que se les ha ajustado una recta con el fin de medir la correlación que existe entre éstos. En apoyo a este diagrama se calcularon y graficaron los coeficientes de correlación entre las series de datos con desfazamientos en el tiempo que van desde 0 hasta 12 horas mostrados en la Figura 12b.

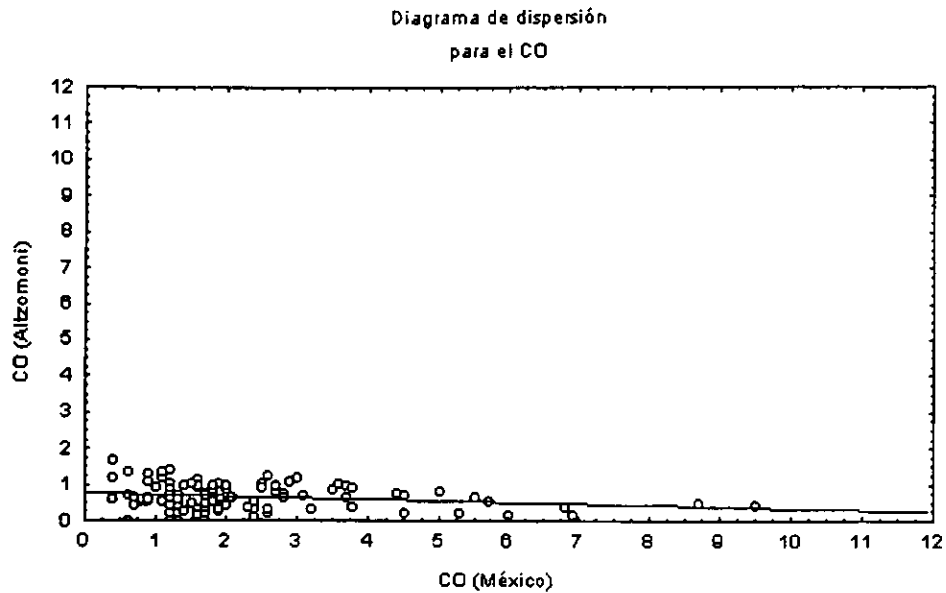


Figura 12a

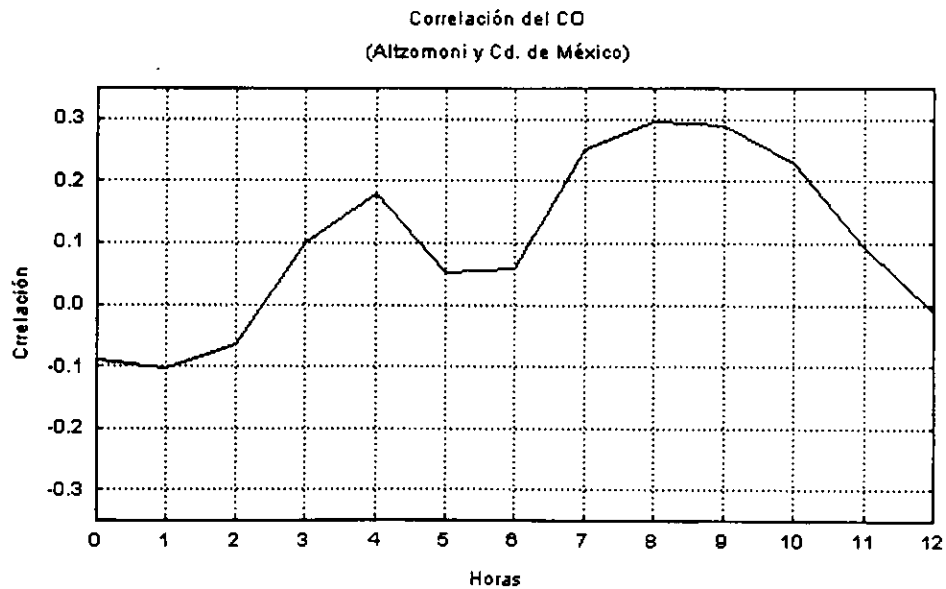


Figura 12b

Figura 12.- a) Diagrama de dispersión para las concentraciones de CO obtenidos en la estación de la Merced en la Ciudad de México y los obtenidos en la estación de Alzomoni ($y = 0.761 - 0.042x$). b) Correlación cruzada entre los datos de CO de la estación de Tonantzintla y la estación de Alzomoni desfasados en el tiempo de 0 a 12 horas.

En la gráfica de la Figura 12a se aprecia una correlación casi nula descrita por una pendiente de -0.042 , considerando la hipótesis del transporte hacia la estación de Alzomoni, los niveles de CO medidos en la estación son generados en una fuente lejana y transportados por el viento. En la Figura 12b se aprecia que la máxima correlación para los datos se da alrededor de 8 a 9 horas sugiriendo que este sea el tiempo que tardaría en ser transportado el CO desde la ciudad de México hasta la estación.

La serie de tiempo del SO_2 muestra un promedio menor en la concentración que el encontrado en la estación de Tonanzintla. En teoría, la estación de Alzomoni debería presentar mayor concentración de SO_2 , ya que está más cerca de la fuente de emisión pero hay que considerar que los datos de viento observados en esta estación fueron en su gran mayoría provenientes del N. Esto indica que los vientos soplaban de la estación hacia el volcán casi todo el tiempo, dificultando el transporte de las emisiones del volcán hacia la estación y sugiriendo además que estas concentraciones de SO_2 pudieran provenir de alguna otra fuente. Tal podría ser el caso del volcán Iztaccíhuatl al norte de la estación de Alzomoni (Figura 2), que también se considera un volcán activo pero con mucho menor actividad que el Popocatepetl.

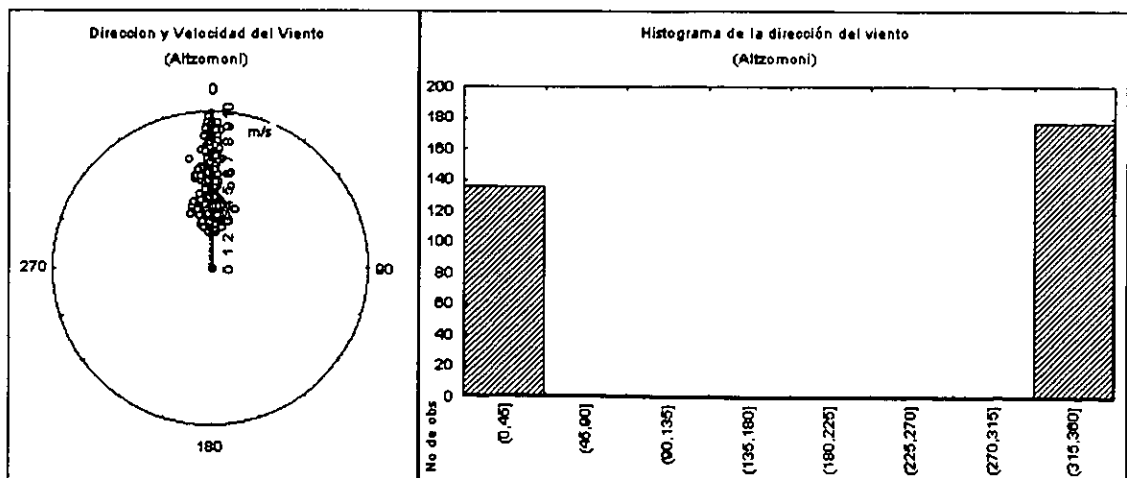
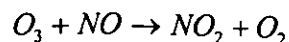


Figura 13.- Diagramas de dirección y velocidad del viento e histograma de los datos de dirección del viento para la estación de Alzomoni.

Se puede observar en esta serie de tiempo que en la mayoría de los días se presenta un doble pico en las concentraciones de SO_2 , el primero en la madrugada entre 4:00 y 6:00 hrs, que en ocasiones no aparece, y el segundo entre 17:00 y 18:00 hrs, que es más frecuente. El primero se podría explicar de la misma forma que se explicó anteriormente la aparición de los picos máximos en la estación de Tonantzintla, pero el segundo pico que aparece en la tarde y que es de mayor valor sólo se puede explicar por la contribución de alguna fuente de emisión cercana que emita el suficiente SO_2 como para elevar la concentración en la atmósfera del lugar antes de que éste sea reducido por la dilución por vientos o por la reacción en presencia de humedad. Teniendo como antecedente que los volcanes son los mayores emisores de SO_2 en la Tierra, estas concentraciones se pueden considerar emitidas por fuentes naturales relativamente cercanas (el Popocatépetl y/o el Iztaccíhuatl).

Para el caso del O_3 , la serie de tiempo de la concentración obtenida en la estación de microondas de Alzomoni, a diferencia de la obtenida en la estación de Tonantzintla, presenta un patrón no muy bien definido, ya que los picos máximos diurnos que se esperarían en la hora de mayor radiación solar no aparecen de manera muy clara. Asimismo presentan un promedio en la concentración muy elevado en comparación al de Tonantzintla, siendo en este caso, muy difícil distinguir entre el encontrado en el día y en la noche.

Lo anterior indica que el ozono en este lugar no es destruido eficientemente permitiendo la acumulación de éste. Uno de los principales destructores de O_3 en la atmósfera es el NO el cual es emitido en forma importante cerca de las áreas urbanas por vehículos de combustión (Georgr, 1994, Graedel et al., 1986).



En la serie de tiempo del NO (Figura 14a) se observa que los niveles en la concentración de este gas son relativamente bajos (en zonas urbanas el promedio es entre los 40 y los 80 ppb). Esto apoya la hipótesis del transporte de contaminantes desde la ciudad de México ya que el NO en presencia de hidrocarburos reacciona más eficientemente que con el O₃ formando NO₂ el cual es transportado hacia la estación de Alzomoni por el viento. El NO₂ presenta un patrón temporal (Figura 14b), muy parecido al del CO, presentando los máximos niveles entre las 15:00 y las 18:00 hrs, lo que sugiere que la mayor parte del NO encontrado en Alzomoni se genera por la reacción fotoquímica del NO₂ (Spiro and Stigliani, 1996),



siendo esta producción relativamente pequeña por lo que casi no hace variar los niveles de O₃ permitiendo que éste se acumule.

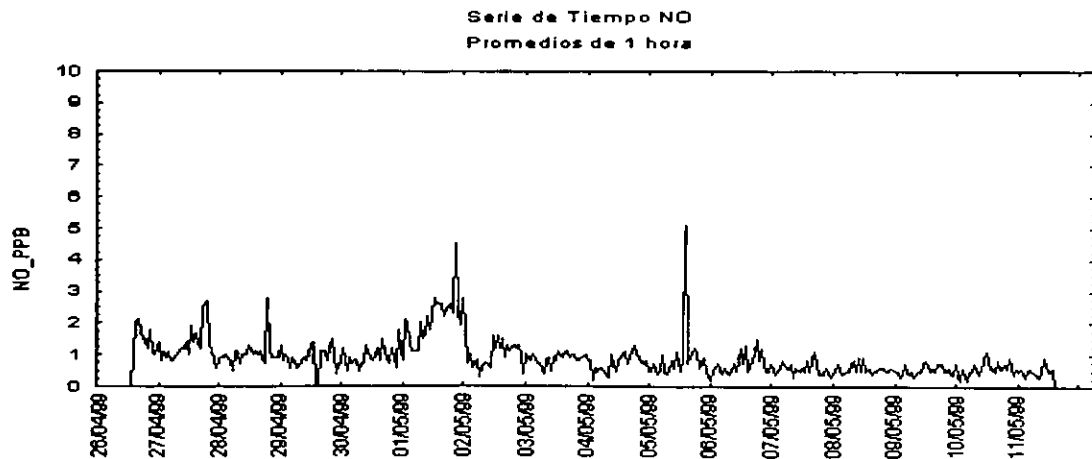


Figura 14a

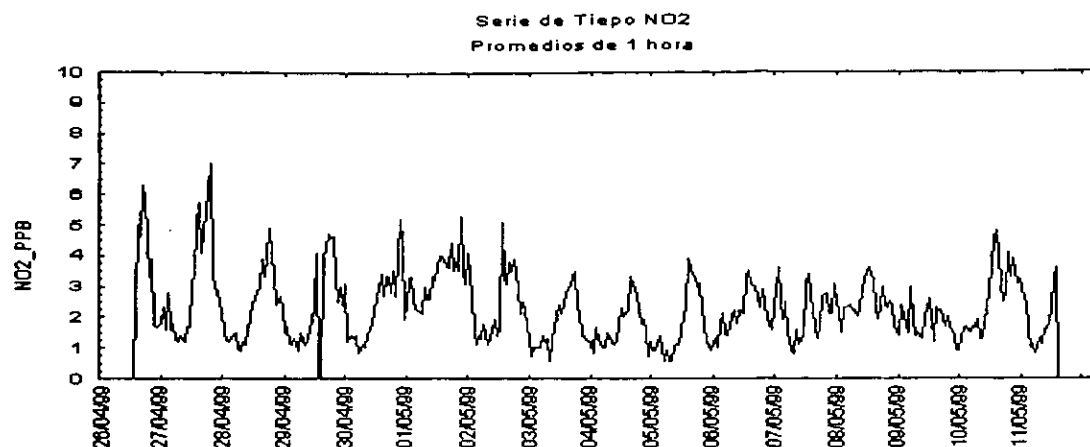


Figura 14b

Figura 14.- Series de tiempo para el a) NO y b) NO₂ para la estación de microondas de Alzomoni para los días de muestreo de la campaña.

El CO y el SO₂ pueden ser producidos por fuentes antropogénicas o por fuentes naturales como los volcanes, pero es importante recordar que el principal productor de CO son las fuentes antropogénicas y el principal productor de SO₂ son los volcanes, por lo que se hará una comparación por medio de diagramas de dispersión a los que se le ajustará una recta para medir la correlación entre un indicador de presencia antropogénica y un indicador de presencia volcánica.

Primero, presentaremos los diagramas de dispersión para toda la base de datos tanto para la estación de Tonantzintla como para la estación de Alzomoni y posteriormente se presentaran los datos haciendo la separación entre la noche y el día.

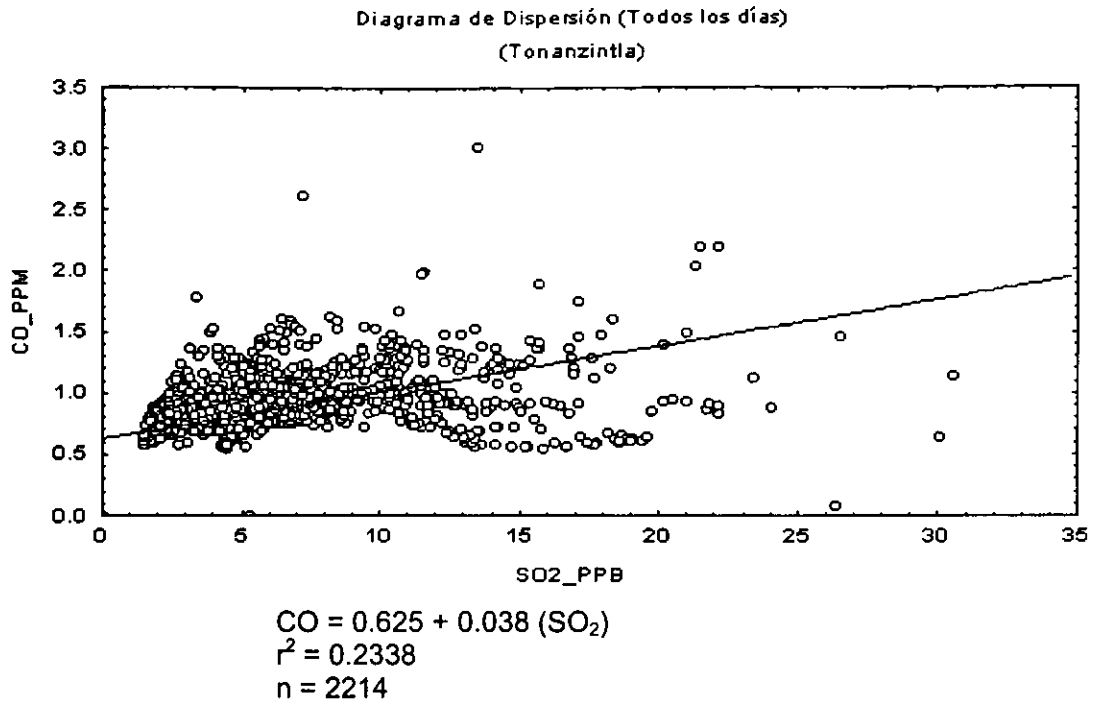


Figura 15a

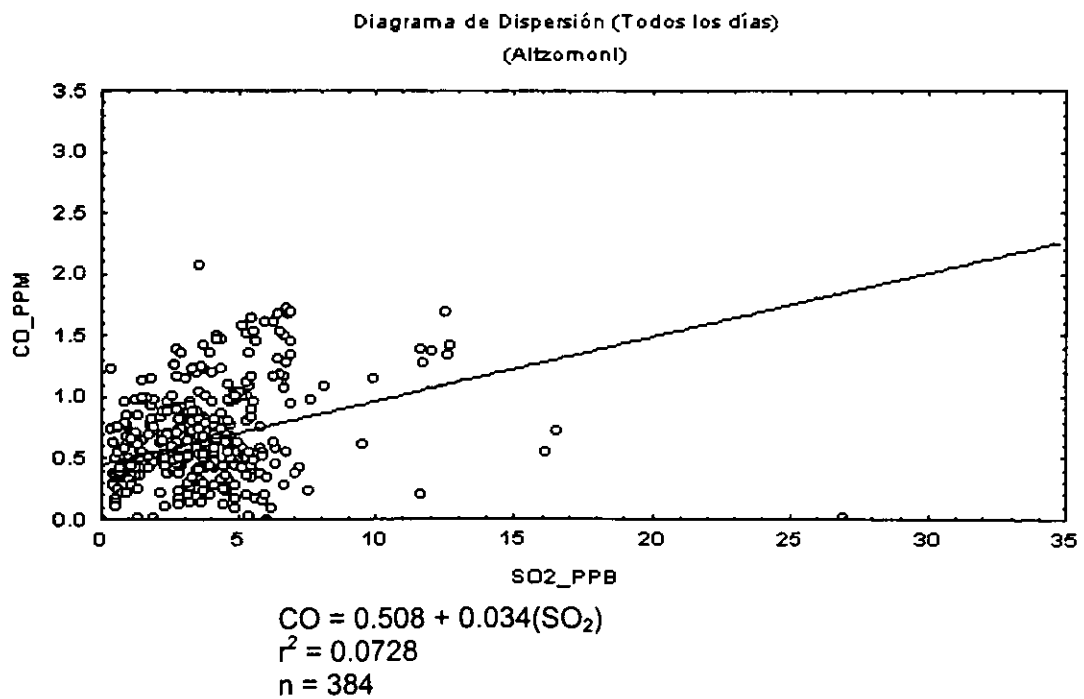


Figura 15b

Figura 15.- Diagramas de dispersión para los datos de las estaciones de a) Tonanzintla y b) estación de microondas de Altzomoni. A cada diagrama se le ajustó una recta de correlación entre los datos y en ambos casos presenta una pendiente positiva.

En ambos casos los datos (Figura 15a y 15b) presentan una recta de correlación con pendiente positiva, esto podría interpretarse como la posibilidad de que el SO₂ y el CO provengan de una fuente común en ambas estaciones sin embargo, el coeficiente de correlación de estas gráficas es mucho menor a uno ($r^2 < 1$), lo que indica que la principal fuente de emisión de cada gas no es la misma ya que su concentración en el tiempo varía de forma diferente. Es importante destacar que en ambas gráficas el valor de la pendiente es muy cercano pero para el caso de la estación de Atzomoni (Figura 15b) la dispersión de los datos hace que el coeficiente de correlación sea muy pequeño indicando que existe una posibilidad mayor de que las fuentes de emisión de los gases sean totalmente diferentes. El caso de Tonantzintla (Figura 15a) presenta un diagrama de dispersión con un coeficiente de correlación mayor, posiblemente explicado por la cercanía a la zona urbana de la ciudad de Puebla y por consiguiente la presencia de algunas fuentes que emiten tanto CO como SO₂. Aunque para el caso del SO₂, no sean las fuentes principales, influyen en las concentraciones encontradas en esta estación haciendo que la dispersión mostrada en la gráfica muestre una tendencia con menor dispersión de los datos. La Figura 16a y 16b presentan los datos separados entre día y noche para la estación de Tonantzintla, mientras que la Figura 16c y 16d corresponden a la estación de Atzomoni.

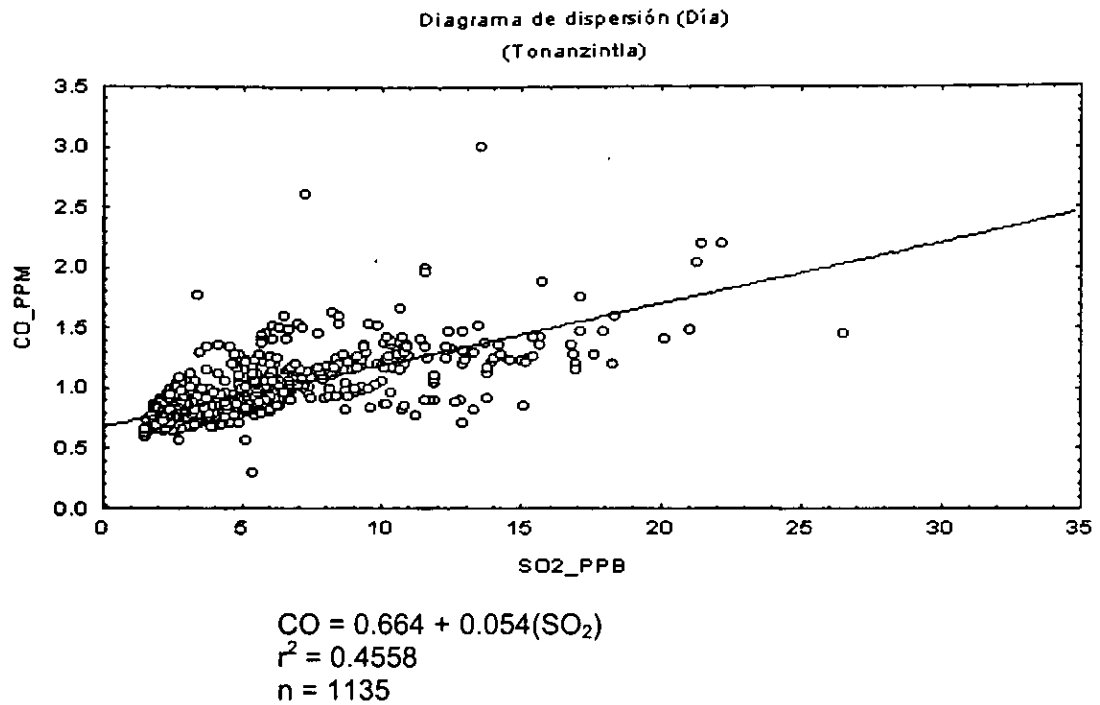


Figura 16a

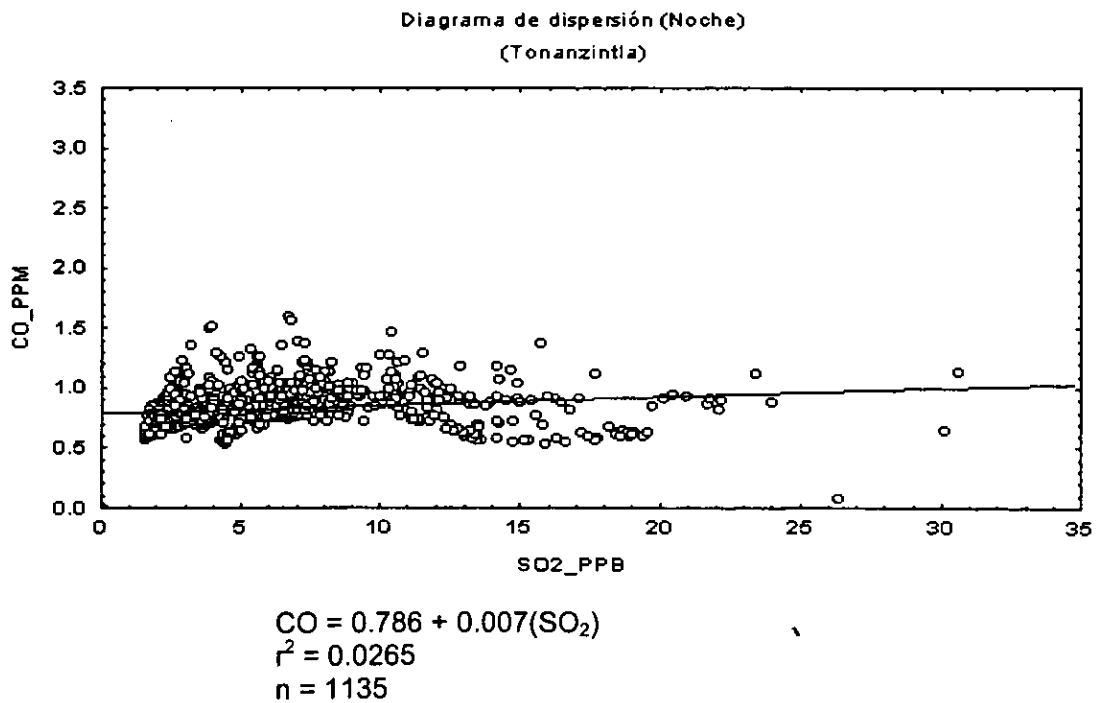


Figura 16b

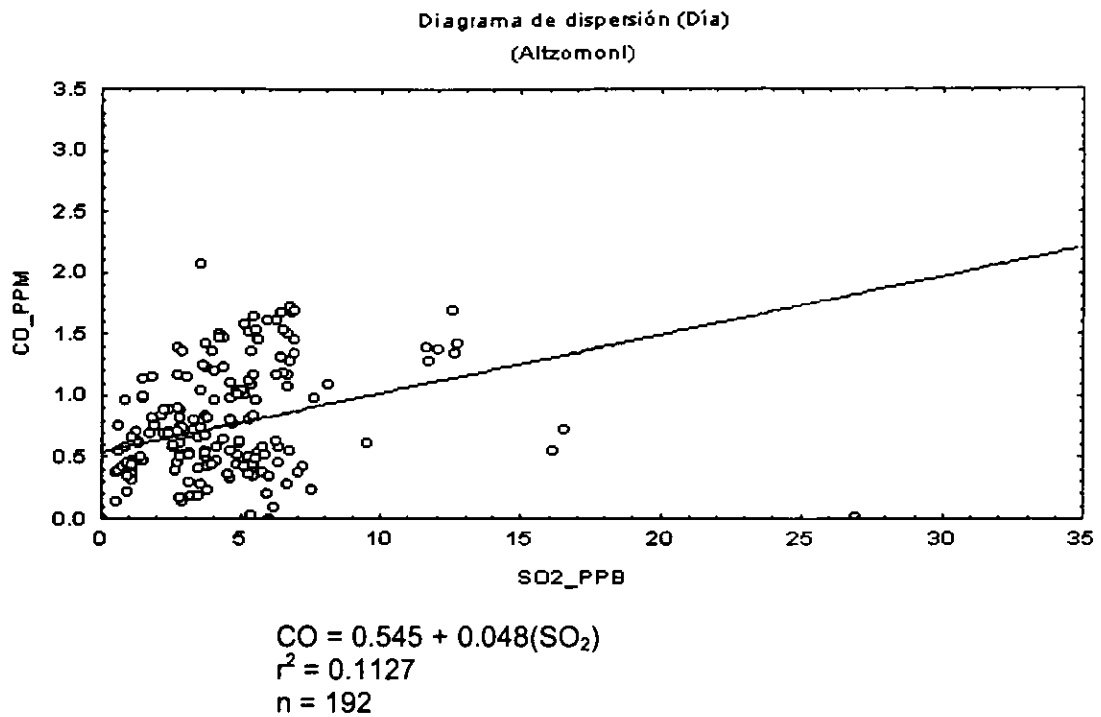


Figura 16c

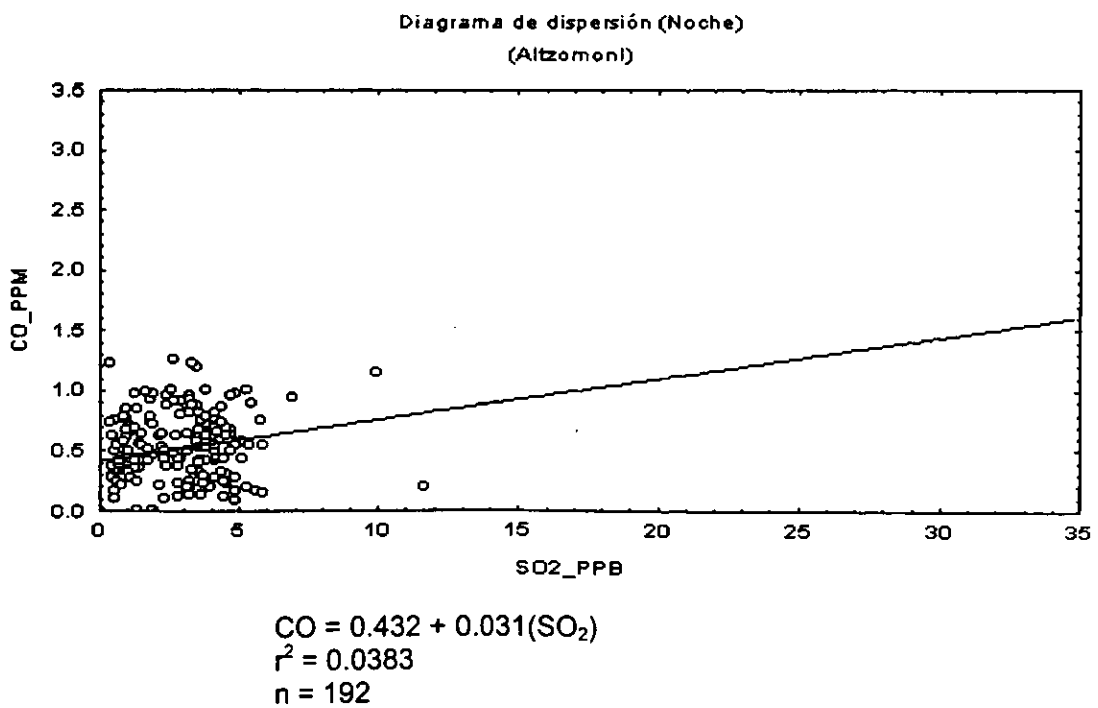


Figura 16d

Figura 16.- Diagramas de dispersión de las siguientes estaciones:
Tonantzintla a) el día y b) la noche. Altzomoni c) el día y b) la noche.

En ambos casos se puede observar que tanto la pendiente de la recta como los coeficientes de la correlación es más alta durante el día que durante la noche, en donde se observa una disminución marcada para los datos de la estación de Tonantzintla.

Como se esperaba, la posible presencia de productos volcánicos presentes en la atmósfera de las estaciones se hace más evidente en las horas nocturnas. Cabe mencionar que con estos resultados sería muy cuestionable el decir que efectivamente existe presencia de gases volcánicos en los lugares de muestreo, pero lo que sí podemos asegurar es que existe una diferencia entre los resultados obtenidos con luz de día y los obtenidos en la noche, por efecto de fuentes de emisión con diferentes variaciones a lo largo de las 24 hrs del día, lo que sugiere que se trata de diferentes fuentes de emisión las cuales podrían estar cerca de la zona de muestreo o bien algunos de estos gases podrían ser transportados desde fuentes muy importantes hasta la zona por efecto de los vientos predominantes.

3.1.2.- DATOS METEOROLÓGICOS

En estudios anteriores referentes al volcán Popocatepetl (Delgado et al., 1996) se han mostrado los patrones de viento predominantes en esa zona en diferentes épocas del año (Figuras 17a y 17b). Para este estudio se enfatizarán los patrones de viento predominantes para los meses de abril y mayo ya que son las fechas en las que se llevó a cabo la campaña de medición para este trabajo. Dado que el cráter del volcán Popocatepetl se encuentra ubicado por encima de los 5400 m.s.n.m. es importante poner especial interés en los patrones de viento superior mostrados en la Figura 17b. Es posible apreciar que tanto para el mes de abril como para mayo, aunque menos marcado en este último, existe una predominante presencia de los vientos provenientes del W los

cuales a su vez presentan las intensidades más elevadas. Lo anterior indica que el transporte climatológico de los gases para esa época del año se lleva a cabo de W a E, o sea, hacia la ciudad de Puebla (ver mapa Figura I), por lo que la pluma de gases que se deposita en la atmósfera por las exhalaciones del volcán es transportada en dirección de la ciudad de Puebla en los niveles superiores de la atmósfera.

Los vientos a niveles inferiores (cerca del suelo) son fuertemente influenciados por la orografía del lugar así como de los movimientos convectivos generados por el calentamiento en superficie y que forman parte de la capa límite planetaria, principalmente durante el día.

Patrón de Vientos Mensual
(altura menor a 5500 metros sobre el nivel medio del mar)

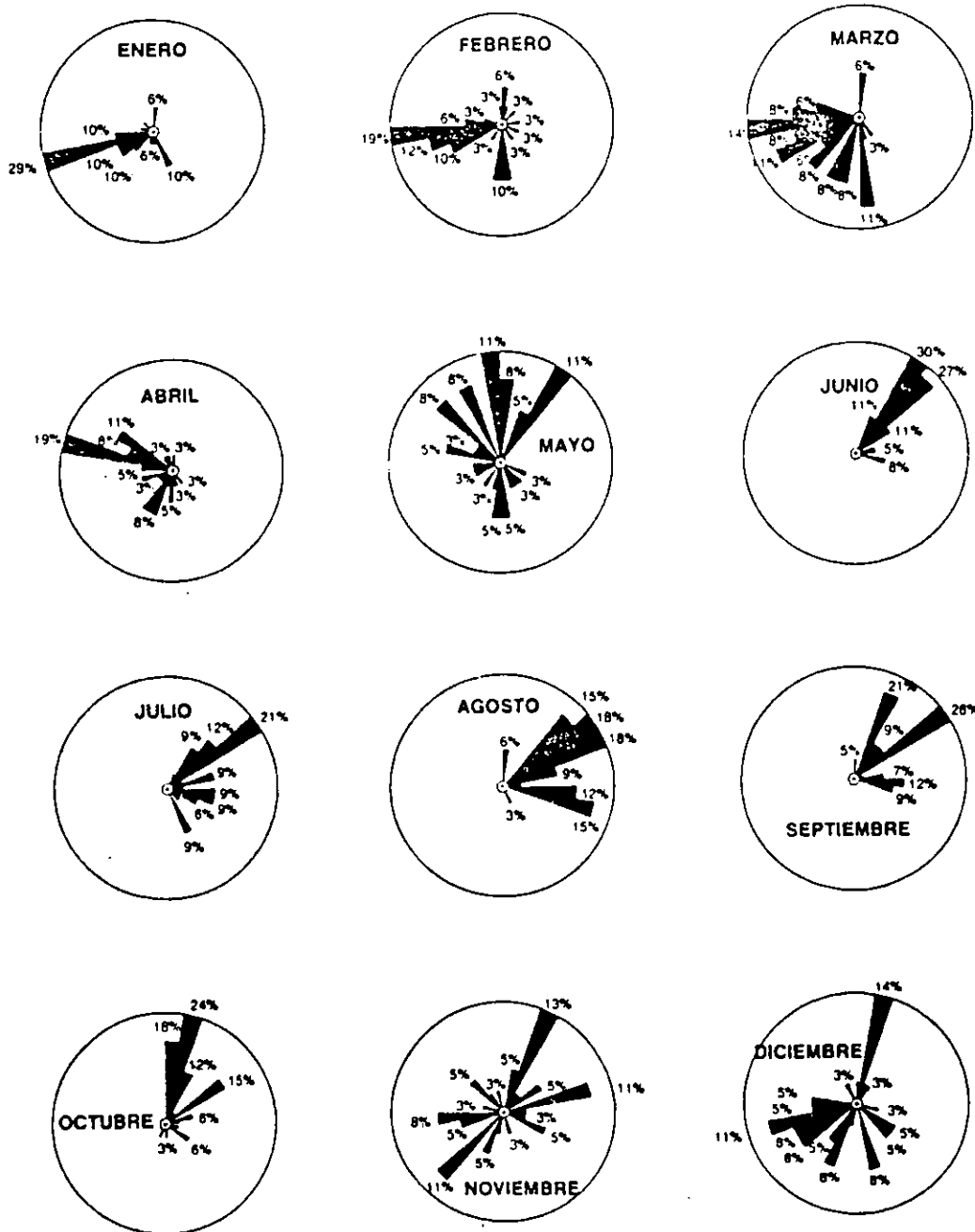


Figura 17a.- Patrón de vientos bajos. Histogramas circulares que muestran los vientos que soplan mensualmente debajo de los 5500 m.s.n.m., indicando la frecuencia de ocurrencia de cada dirección en por ciento. Datos de 1976-1982 proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional.

Patrón de Vientos Mensual
(altura mayor a 5500 metros sobre el nivel medio del mar)

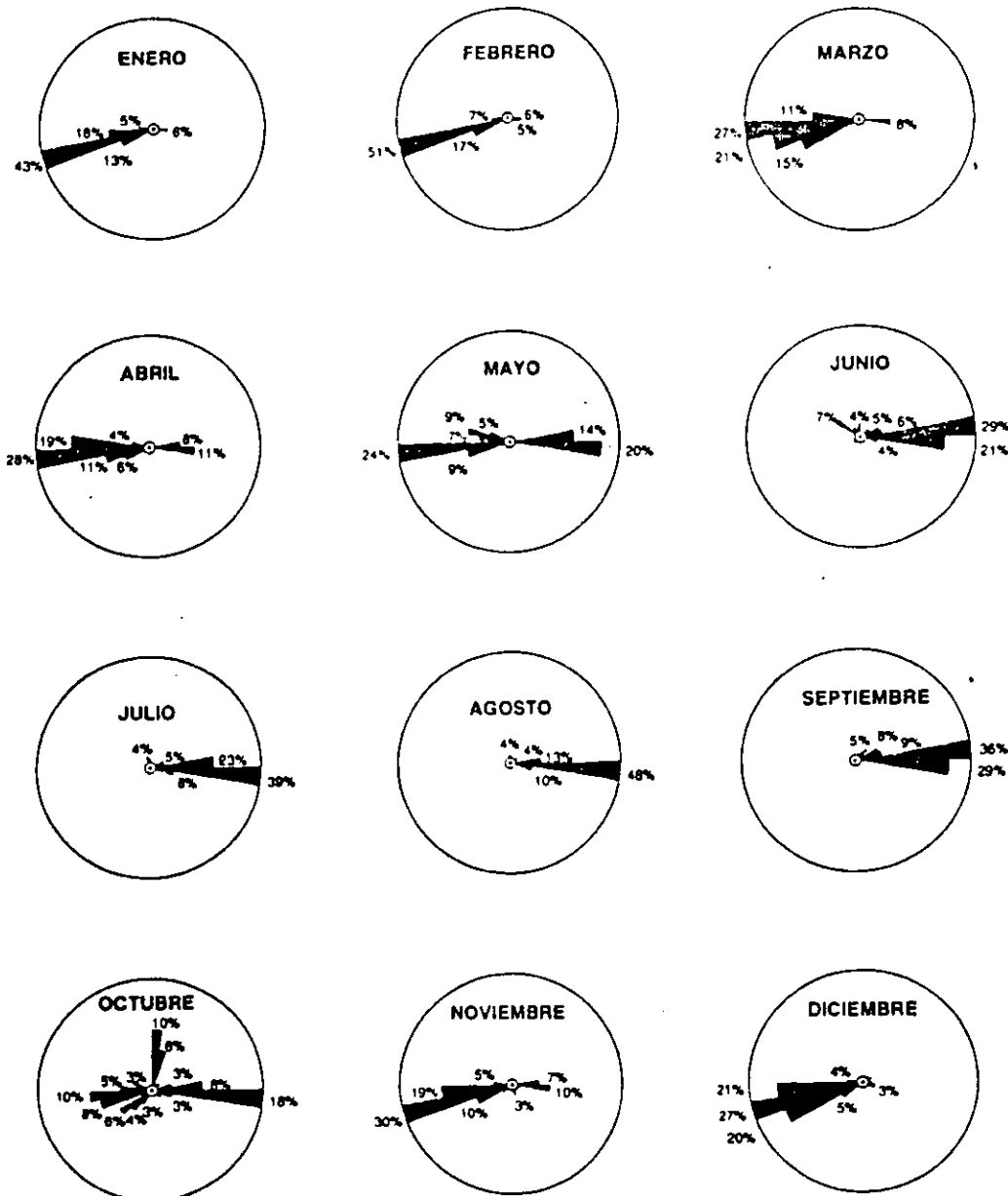


Figura17b.- Patrón de vientos superiores. Histogramas circulares que muestran los vientos que soplan mensualmente arriba de los 5500 m.s.n.m., indicando la frecuencia de ocurrencia de cada dirección en por ciento. Datos de 1976-1982 proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional.

En las Figuras 18a,18b y 18c se muestran los datos adquiridos en la estación de Tonantzintla, en donde se puede apreciar, en apoyo a lo mostrado en las figuras anteriores para los meses de abril y mayo, que existe una marcada presencia de los vientos provenientes del SW (entre los 190° y los 230° aproximadamente). Principalmente se ve que los vientos de mayor intensidad provienen de esta dirección.

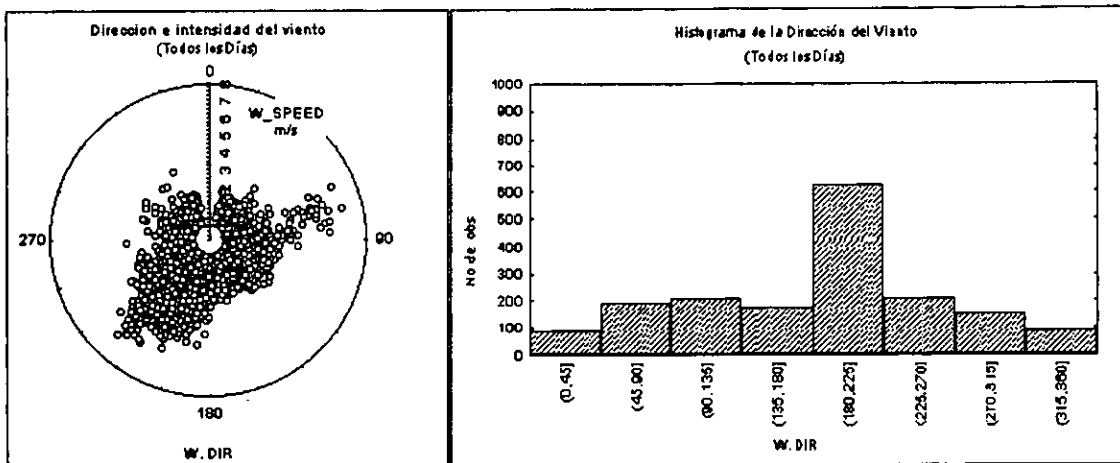


Figura 18a

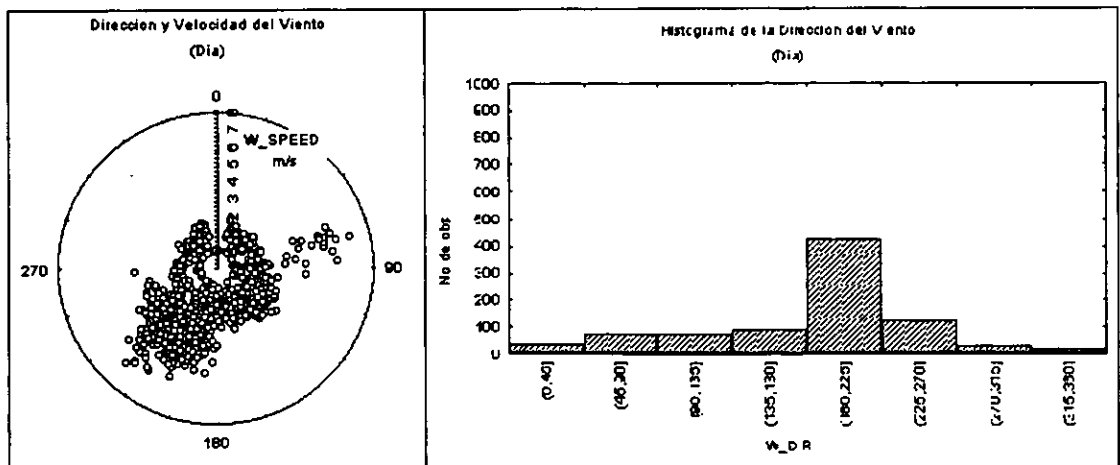


Figura 18b

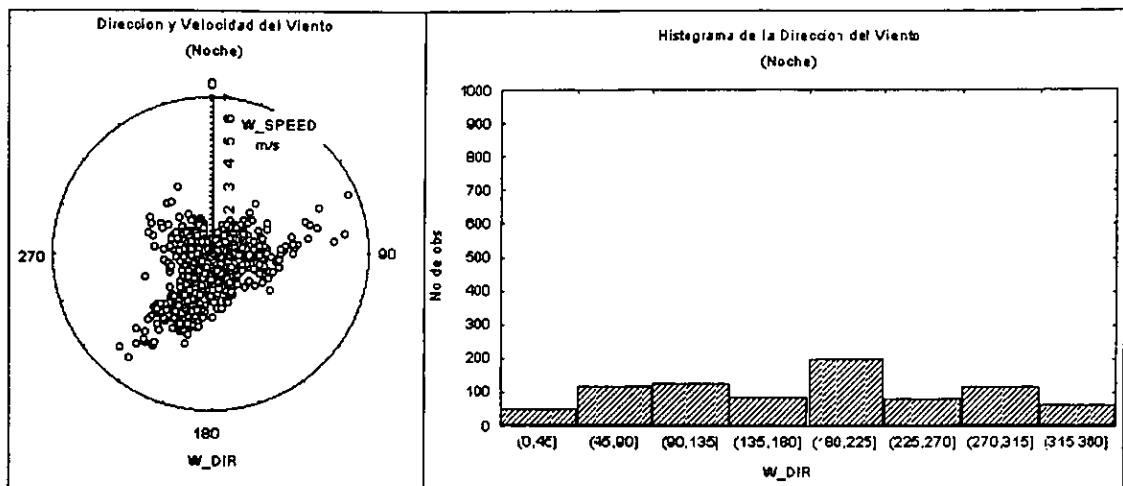


Figura 18c

Figura 18.- Distribución de la dirección y velocidad del viento en gráficas de forma polar a la izquierda e histograma de frecuencia de la dirección del viento a la derecha, para los datos obtenidos en la estación de Tonantzintla durante los días de la campaña (24/04/99 al 11/05/99). En la Figura 18a se muestran los datos en forma general, en las Figuras 18b y 18c se muestran los datos separados del día y la noche respectivamente (El instrumento con el que se obtuvieron los datos estima un grado de error de un 5%).

Se dividieron los datos de dirección e intensidad del viento en dos bloques que comprenden las horas de día (7:00 a 19:00 hrs) y las horas de la noche (19:00 a 7:00 hrs), Figura 18b y 18c respectivamente. En las gráficas que muestran los datos obtenidos durante las horas de día se puede observar nuevamente los vientos de mayor intensidad provienen del SW, como se observó en las gráficas de los datos generales. Por el contrario, para los datos tomados en las horas nocturnas, en las cuales la distribución de los resultados tanto de dirección como de intensidad son más uniformes en todas las direcciones. Aquí cabe mencionar, que aún así, existe una pequeña mayoría de datos en las mediciones provenientes del-SW.

Al comparar los gráficos para el día y la noche, se observa que en las horas de día la mayoría de los datos se encuentran muy por encima de los 2 m/s y en las horas de la noche la mayoría de la población de datos se

encuentra por debajo de esta velocidad. Esta disminución de la intensidad del viento por las noches podría ser la causa de que en estas horas los datos de dirección del viento no presenten una dirección predominante y más marcada. Al existir un viento muy débil fácilmente puede ser perturbado por pequeñas turbulencias que se forman por efecto de la orografía del terreno, modificando la dirección del viento. Por lo anterior, resulta difícil decir que los vientos transportan de manera eficiente los gases provenientes del volcán en las horas de la noche hacia la zona de muestreo, así como también se debe tener cuidado con la interpretación de los datos obtenidos en el día ya que estos son influenciados por la turbulencia que se genera por procesos convectivos en la capa de mezcla.

3.1.3.- PARTÍCULAS

En las Figuras 19a y 19b se muestran las variaciones de la concentración con respecto a los días de muestreo para las partículas PM_{10} en las estaciones de Tonantzintla y la estación de microondas de Alzomoni respectivamente. Los datos para la gráfica de la estación de Tonantzintla fueron tomados de las muestras de un impactor de cascada marca Andersen al cual se le cambiaron filtros cada 24hrs y los datos para la estación de Alzomoni fueron proporcionados por la estación móvil número 2 de la RAMA la cual utilizó el método de TEOM (descrito en el capítulo II). Este método proporciona los datos de concentración de partículas PM_{10} cada hora, por lo que para compararlas con los datos del impactor se obtuvieron promedios de 24 hrs.

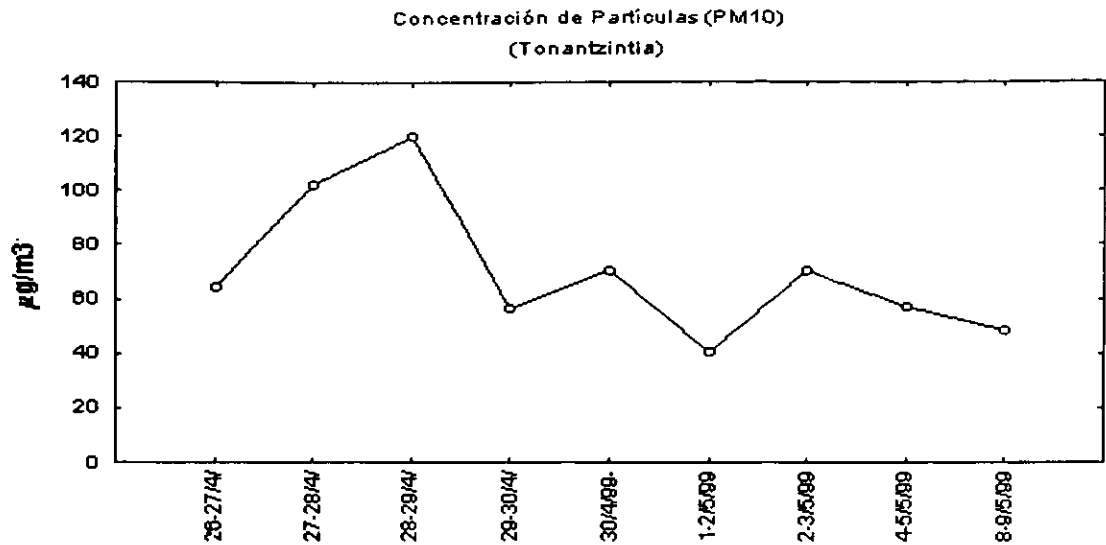


Figura 19a

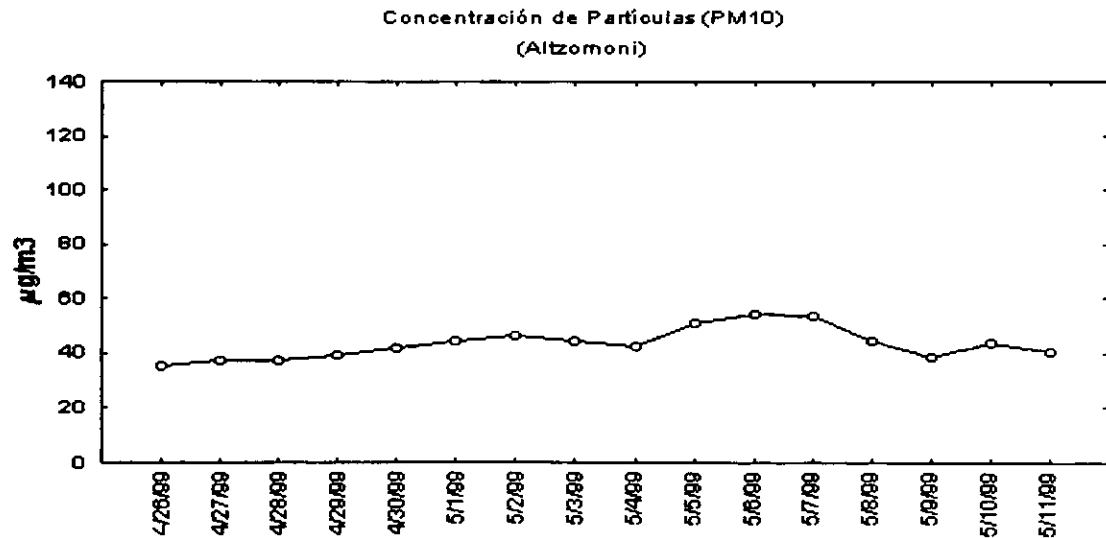


Figura 19b

Figura 19.- Variación de la concentración de partículas PM₁₀ en las estaciones de a) Tonantzintla y b) Altzomoni.

Tonantzintla es considerada como una zona rural, pero se deberá tomar en cuenta que está relativamente cerca de una ciudad, por lo que al analizar las partículas que se encuentran aquí se esperaría encontrar partículas provenientes de zonas rurales (suelo, desechos animales, fertilizantes, entre

otros) pero también partículas típicas de una ciudad (producidas por vehículos e industrias). Recordando lo dicho en el capítulo II este tipo de partículas generalmente son de gran tamaño, por lo que el análisis de las muestras tomadas en esta estación se enfocará en las partículas de menor tamaño ya que éstas son en su mayoría producidas a partir de reacciones químicas y fotoquímicas de gases que se encuentran en la atmósfera.

En estos diagramas se puede observar, como se esperaba, que las concentraciones de partículas en la estación de Tonantzintla son más elevadas que en la estación de microondas de Altzomoni sugiriendo la influencia de la zona urbana que se encuentra cerca del lugar. Otra evidencia de la influencia urbana en esta zona puede apreciarse en la distribución promedio de la concentración de partículas por etapa del impactor (Figura 20). Esta distribución muestra una semejanza muy marcada con la distribución mostrada en la Figura 1 para zonas urbanas.

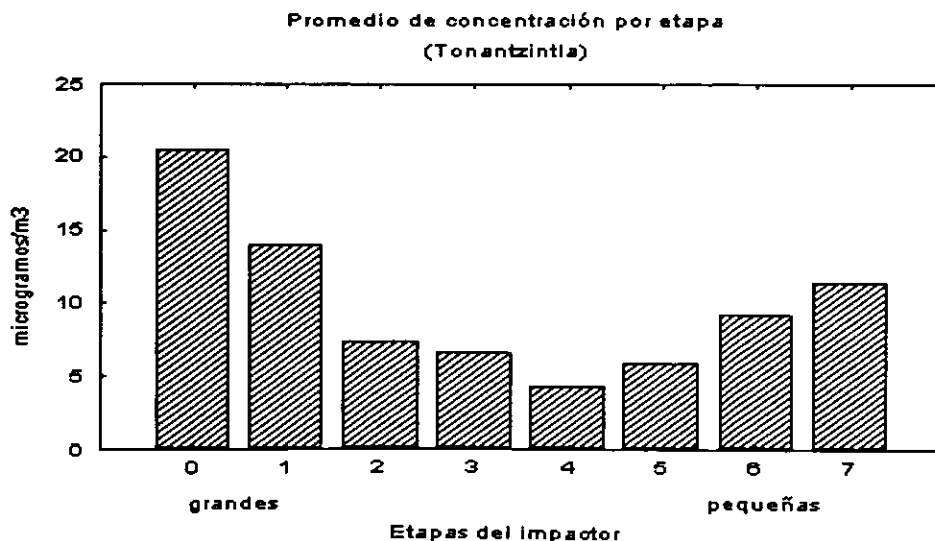
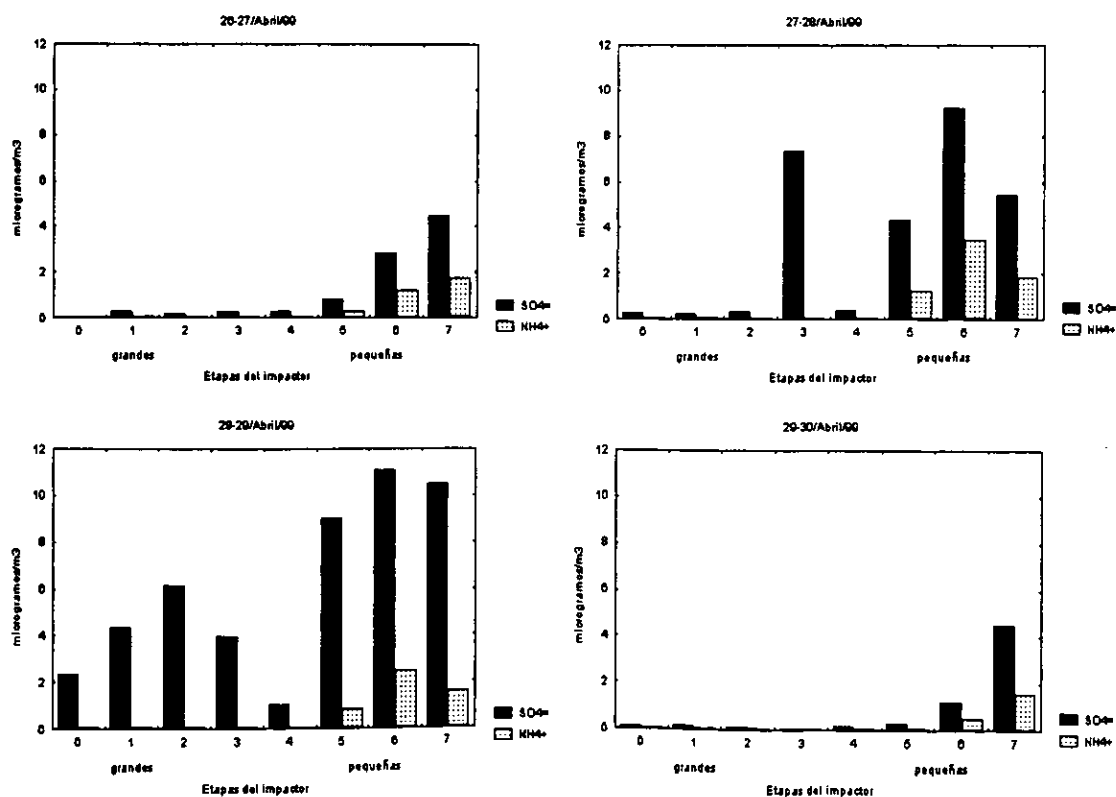


Figura 20.- Distribución promedio de masa de las partículas en función del tamaño en la estación de Tonantzintla.

En esta gráfica se puede observar que la principal concentración de masa, como se esperaba, se encuentra en las partículas de mayor tamaño (5.8 a 10 μm) mientras que en las partículas pequeñas la concentración de masa es menor. Es importante tomar en cuenta que estas mediciones se llevaron a cabo a niveles muy cercanos al suelo (1.6 m de altura aproximadamente) por lo que se puede suponer que muchas partículas grandes provenientes de este lugar, como podrían ser polvo u otros materiales que se encontraban depositados en el suelo son levantados y transportados por la acción del viento. Al analizar iones como el sulfato (SO_4^-) y el amonio (NH_4^+) que son formados por medio de reacciones de gases presentes en la atmósfera se encuentra que la principal concentración de masa de estos iones se observa en las etapas donde se recolectan las partículas más pequeñas, principalmente en las etapas 5,6 y 7 (0.65 a 1.1 μm). Esto se puede observar claramente en las gráficas de la Figura 21, la cual muestra las concentraciones de SO_4^- y NH_4^+ para algunos días de muestreo.



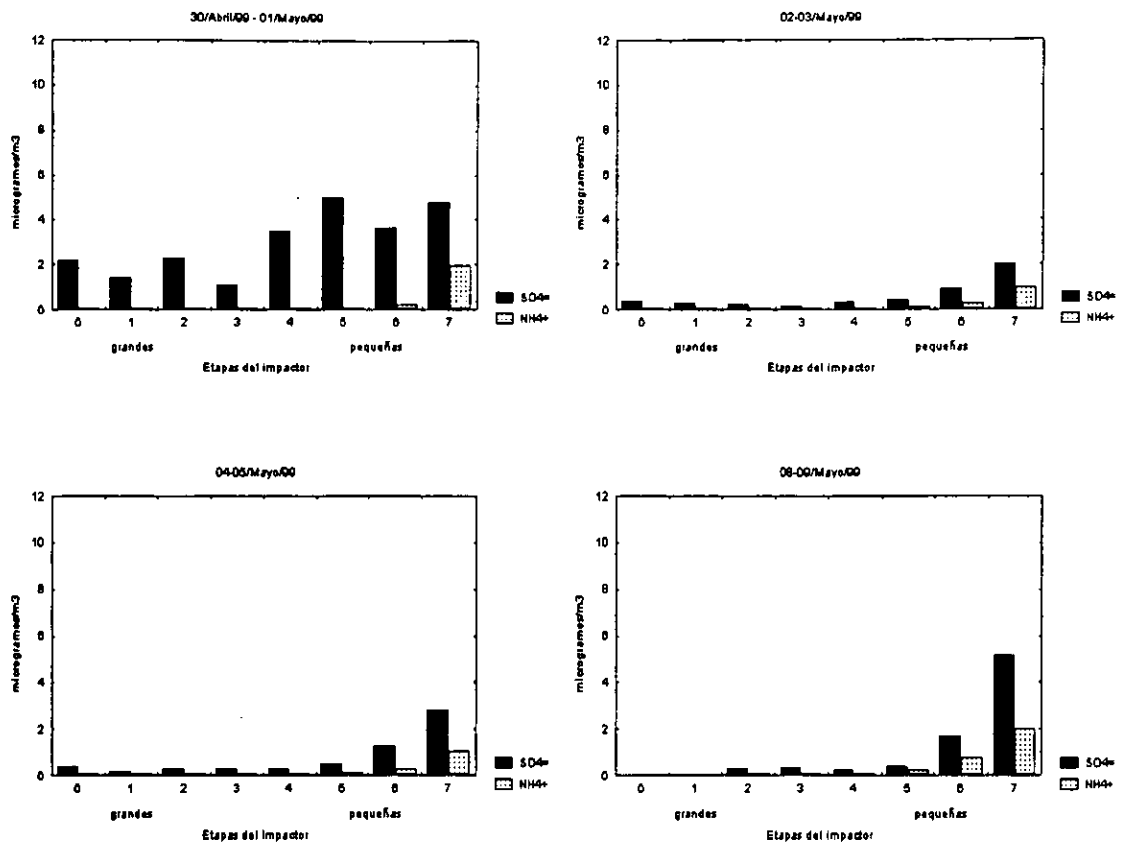
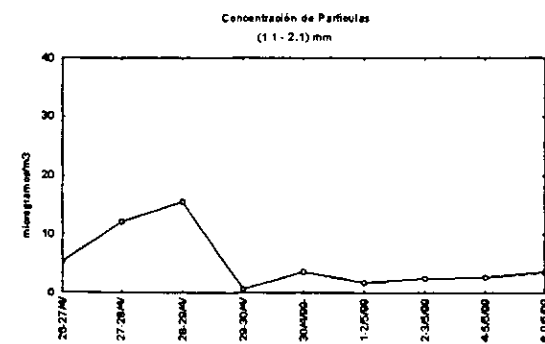
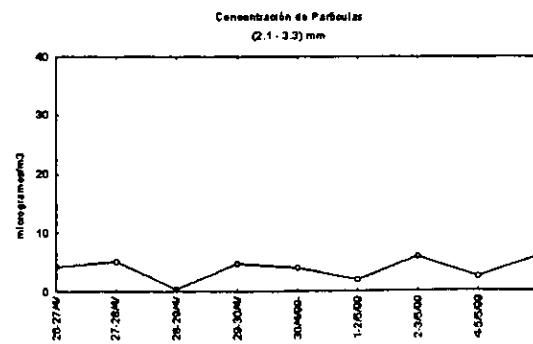
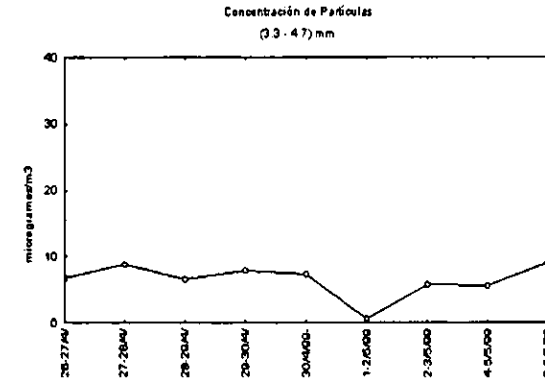
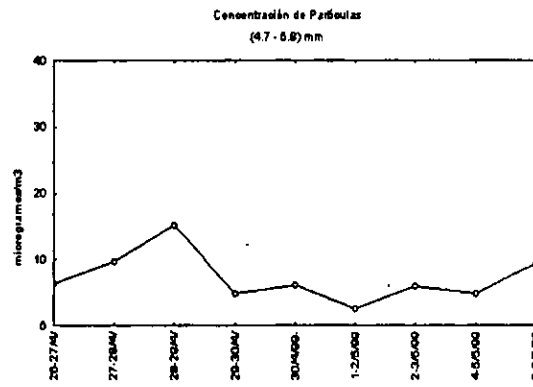
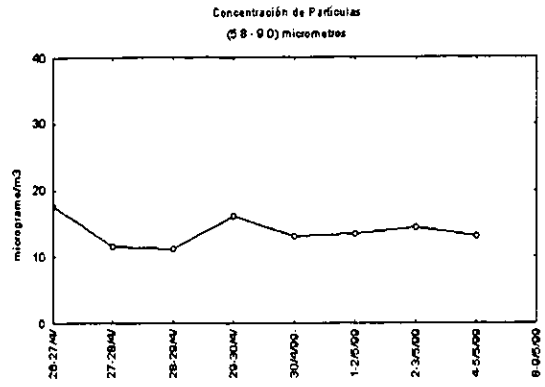
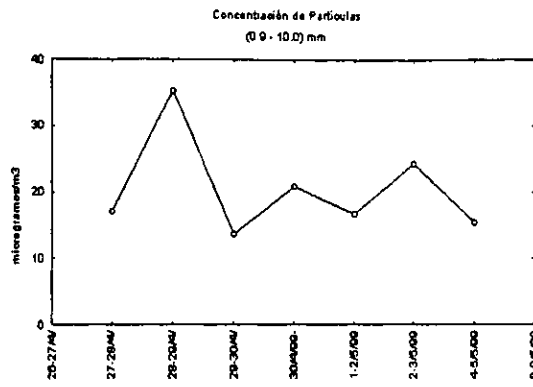


Figura 21.- Concentraciones de masa de los iones SO_4^{2-} y NH_4^+ por etapa del impactor (para el tamaño de las partículas por etapa del impactor se puede consultar la Tabla 5).

El hecho de que el SO_4^{2-} y el NH_4^+ se encuentren concentrados principalmente en las últimas etapas del impactor Andersen (partículas pequeñas) sugiere que la formación de la mayoría de las partículas se llevó a cabo a partir de la condensación de gas presente en la atmósfera.

A continuación se muestran diagramas de variación temporal de la masa para los diferentes tamaños de partículas que recolecta el impactor de cascada marca Andersen.



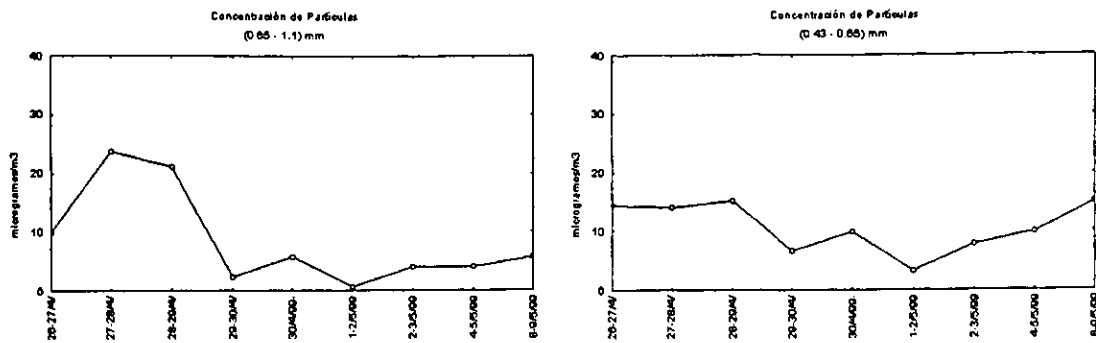


Figura 22.- Variación en la concentración de masa por unidad de volumen para las partículas por etapa del Andersen (Impactor de cascada) para la estación de Tonantzintla.

En la Figura 22 se muestran las variaciones en la concentración de masa por unidad de volumen en cada una de las etapas del impactor de cascada marca Andersen que se instaló en la estación de Tonanzintla. En estas gráficas se puede notar un incremento en las partículas especialmente en los días del 26 al 30 de abril. Este incremento en las partículas, especialmente en las partículas pequeñas (0.65 a 1.1 μm "etapa 5 y 6") podría ser explicado por la razón de que el 25 de abril en la noche (23:00 hrs) se registró una lluvia moderada la cual provocó un incremento en la humedad del ambiente, ésta es un elemento importante para la reacción de algunos gases que se encuentran en la atmósfera como el SO_2 . Por otro lado no se debe olvidar que la lluvia también ayuda a limpiar la atmósfera por lo que esperaríamos un decremento en la masa de partículas muestreadas. Las muestras indican que el mecanismo de formación de partículas por medio de la condensación de gases domino, aunque también se debe considerar que la máxima concentración de masa se registra 2 días después de la lluvia (muestra del 27 al 28 de abril). Por esta razón, se analizará posteriormente la composición de las muestras tomadas en los filtros del impactor.

3.2.- ANÁLISIS INDIVIDUAL

Debido a que la actividad de un volcán es variable con el tiempo el aporte de gases y partículas varía ya que en algunos días se podría tener mucha influencia y en algunos otros podría ser mínima. Tomando en cuenta dicha consideración, se decidió hacer una selección de los días de muestreo eliminando los posibles días de baja influencia volcánica.

Los criterios que se utilizaron para seleccionar los días que podrían proporcionar información acerca de contribución volcánica en el ambiente fueron:

- 1) Se consideró la actividad del volcán utilizando los reportes diarios que proporciona el CENAPRED en su pagina Web (CENAPRED, 2000).
- 2) Se consideró el comportamiento en la correlación diaria entre los datos de concentración del SO₂ y del CO tomando en cuenta los días de más baja correlación (días con la pendiente de correlación tendiendo a ser cero o con correlación negativa).

En la Tabla 6 se muestran los reportes diarios de la actividad del Popocatepetl que se utilizaron para hacer la selección de días que mostraran indicio de una posible influencia volcánica.

Tabla de reportes diarios de la actividad del volcán Popocatepetl (24 de abril al 10 de mayo de 1999).

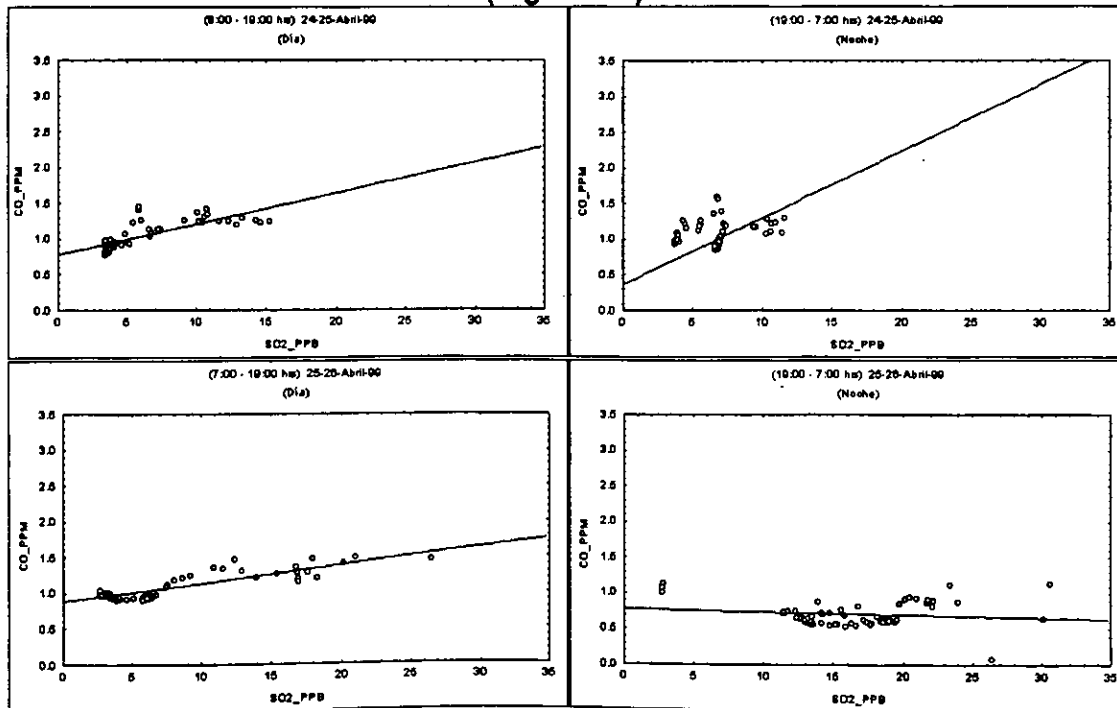
Fecha del reporte	Hora del reporte	Reporte
Abril 24, 1999	16:30 GMT	La actividad del volcán se mantuvo estable. En las últimas 24hrs se ha registrado un ligero aumento en el número de exhalaciones, todas de moderada a baja intensidad.
Abril 25, 1999	14:00 GMT	El volcán se mantuvo estable y sin cambios en las últimas 24hrs.

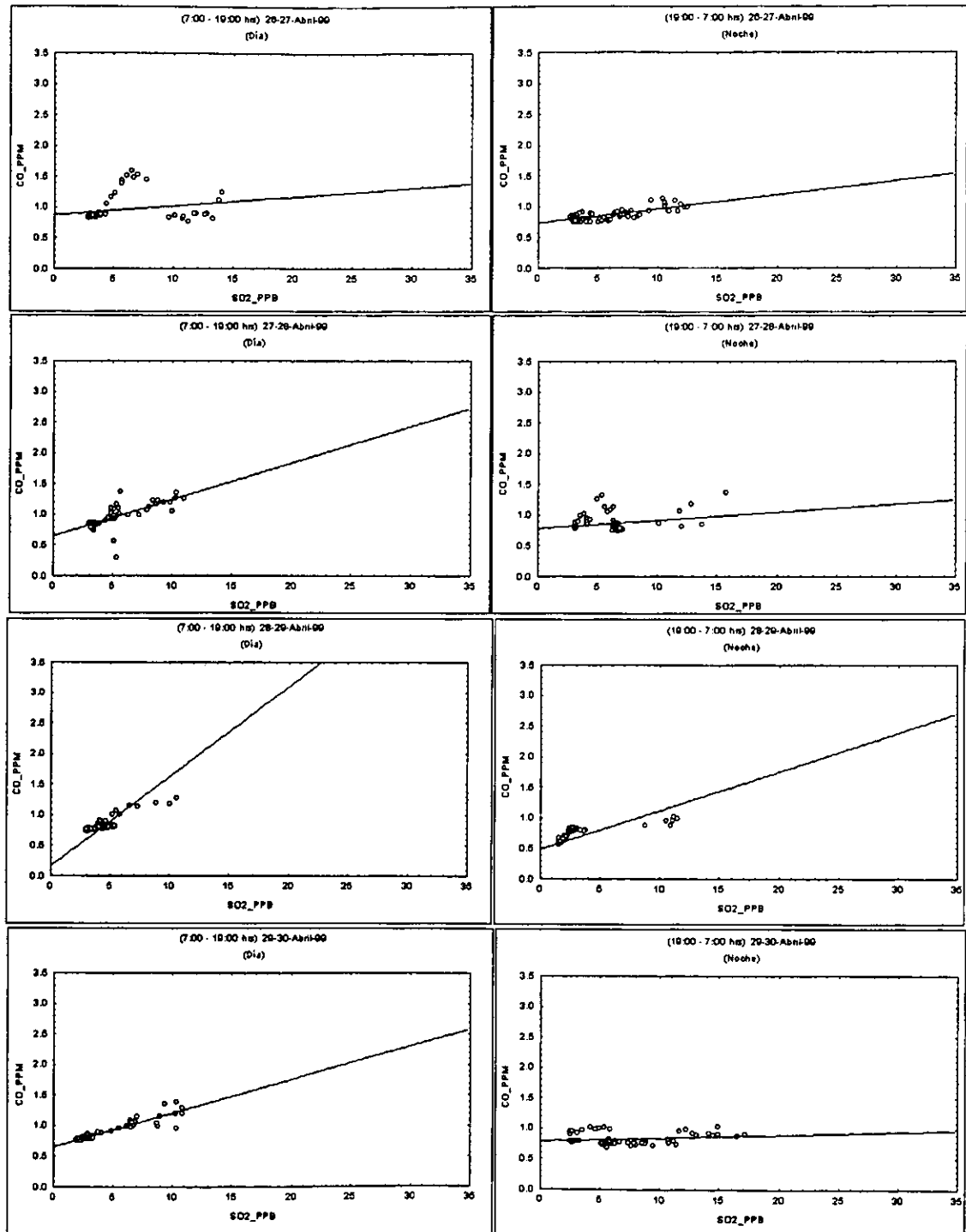
Abril 26, 1999	13:00 GMT	En las últimas 24 horas el volcán mostró pocos cambios en su estado de actividad. Se caracterizó por la ocurrencia de exhalaciones de baja a moderada intensidad acompañadas con emisiones de gas, vapor y en ocasiones algo de ceniza.
Abril 27, 1999	13:00 GMT	En las últimas 24 hrs la actividad del volcán se mantuvo estable en los mismos niveles presentados ayer.
Abril 28, 1999	13:00 GMT	La actividad del volcán ha mostrado una disminución en las últimas 24hrs. Se registraron solo aisladas exhalaciones de baja intensidad acompañadas con emisiones de gas, vapor.
Abril 29, 1999	13:00 GMT	El volcán continúa mostrando bajos niveles de actividad. La sismicidad registrada en las últimas 24hrs se redujo respecto a días anteriores presentándose únicamente exhalaciones aisladas y pequeñas.
Abril 30, 1999	13:00 GMT	El volcán mantiene en general bajos niveles de actividad.
Mayo 1, 1999	15:00 GMT	El volcán mantiene en general bajos niveles de actividad.
Mayo 2, 1999	15:00 GMT	El volcán mantiene en general bajos niveles de actividad.
Mayo 3, 1999	13:00 GMT	Aunque se presentó un ligero incremento en la sismicidad, el volcán en las últimas 24hrs mantuvo en general niveles bajos de actividad. Se presentaron varias exhalaciones de pequeña a moderada intensidad con emisiones de gas y vapor.
Mayo 4, 1999	13:00 GMT	En las últimas 24hrs el volcán presentó un ligero incremento en su actividad. El número y tamaño de las exhalaciones registradas aumentó respecto a días anteriores.
Mayo 5, 1999	15:00 GMT	En las últimas 24 hrs la actividad del volcán se mantuvo estable, sin cambios significativos. Solamente se registró en la tarde de ayer un ligero incremento en el número de las exhalaciones de gas y vapor de baja intensidad.
Mayo 6, 1999	13:00 GMT	En las últimas 24 hrs la actividad del volcán no mostró cambios importantes a los reportados ayer. Continuaron presentándose exhalaciones de gas y vapor de baja intensidad, de las cuales dos, una a las 14:35 y la otra a las 16:23, tuvieron

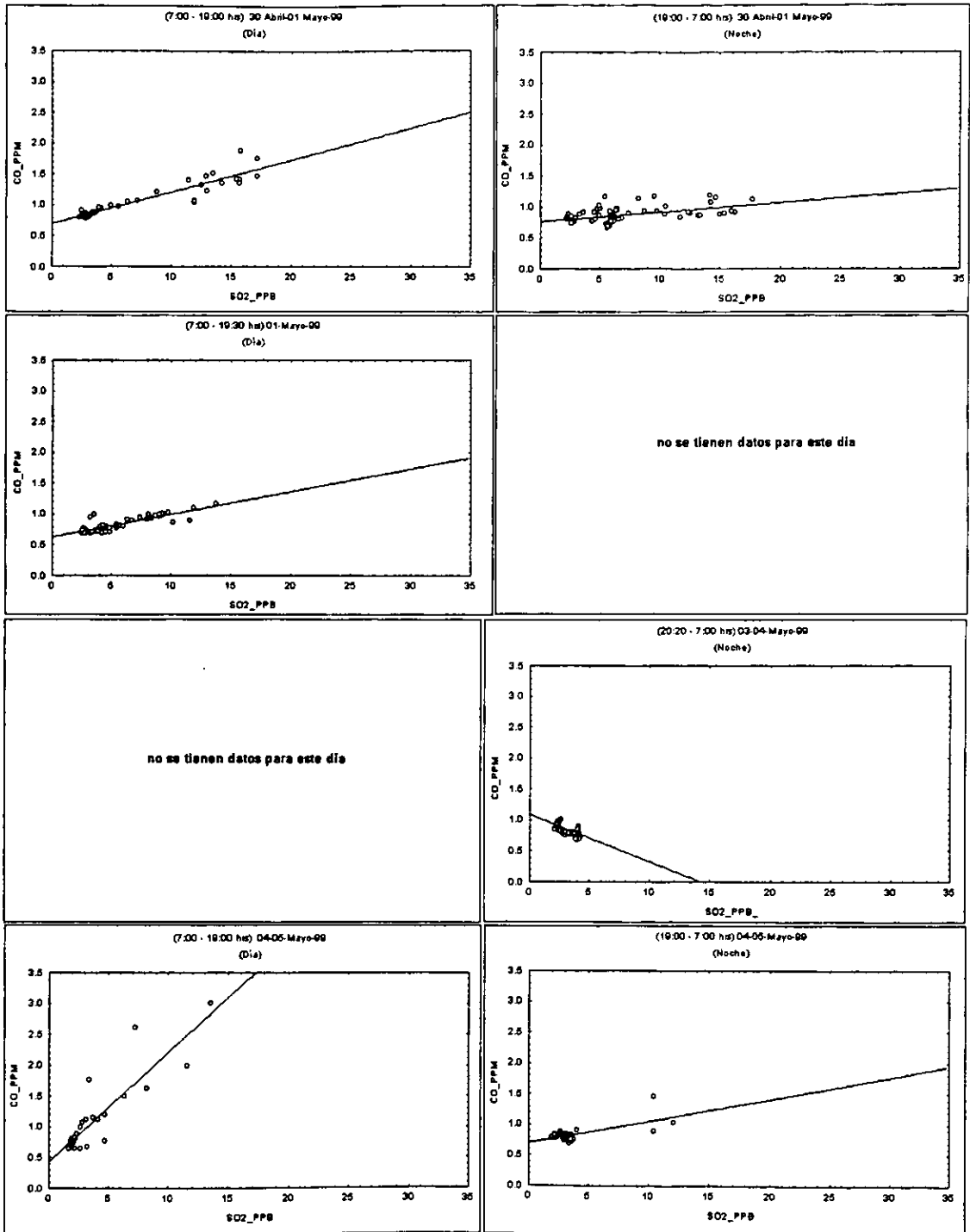
		una duración aproximada de 30 y 14 minutos respectivamente, produciendo una pluma de vapor de casi 1 km de altura.
Mayo 7, 1999	13:00 GMT	En las últimas 24 hrs la actividad del volcán se encuentra estable con respecto a la del día de ayer, los niveles que presenta son bajos.
Mayo 8, 1999	13:30 GMT	En las últimas 24 hrs la actividad del volcán se encuentra estable con respecto a la del día de ayer, los niveles que presenta son bajos.
Mayo 9, 1999	15:00 GMT	No se han registrado cambios importantes en la actividad del volcán en las últimas 24 hrs la cual se mantuvo en general en niveles bajos.
Mayo 10, 1999	13:30 GMT	No se han registrado cambios importantes en la actividad del volcán en las últimas 24 hrs la cual se mantiene estable.

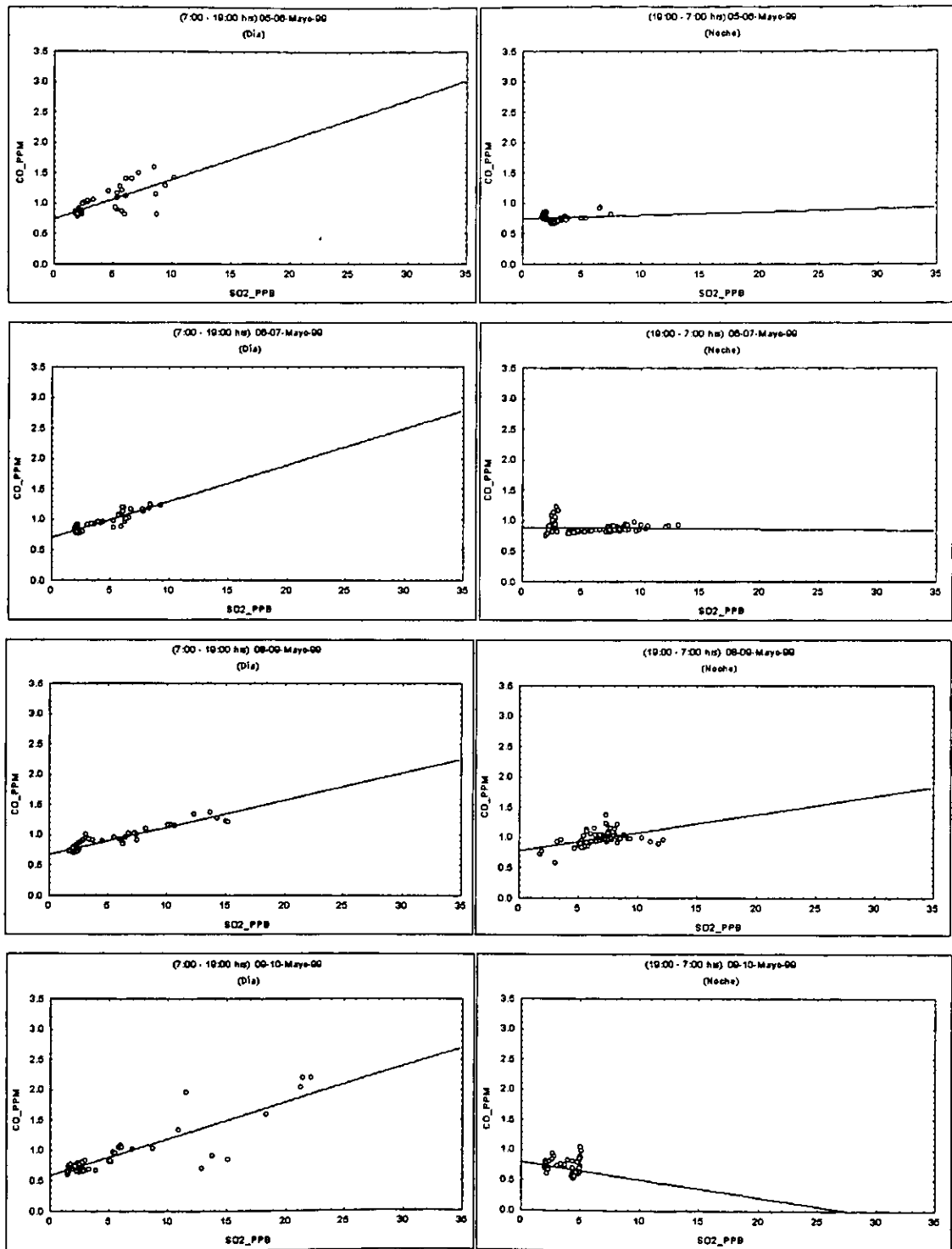
Tabla 6.- Reportes diarios de la actividad del volcán Popocatepetl para los días del 24 de abril al 10 de mayo de 1999. Estos reportes diarios fueron obtenidos de la pagina Web de CENAPRED (CENAPRED, 2000) y resumidos a solamente la información referente a las exhalaciones de gas y vapor. (Nota: Esta información se tomo con cierta reserva ya que solo se trata de información técnica no arbitrada).

Correlación por medio de diagramas de dispersión para el CO y SO₂ para los días del 24 de abril al 10 de mayo de 1999 (Estación de Tonantzintla). (Figura 23)









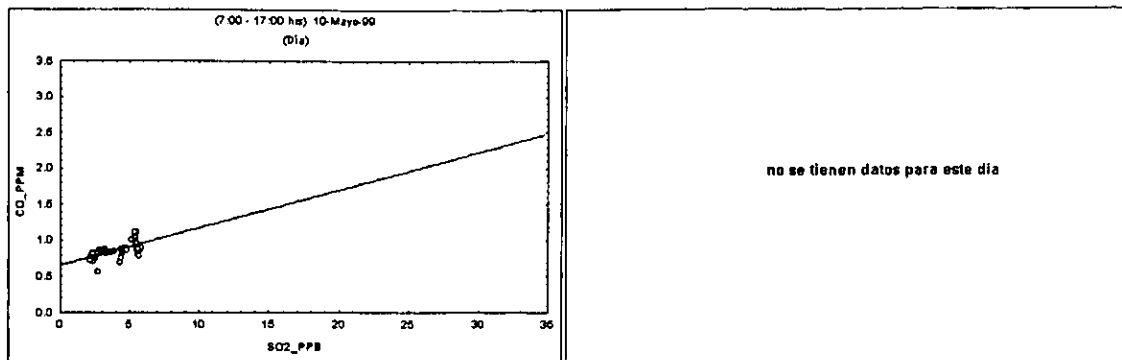


Figura 23.- Diagramas de dispersión y correlación de los días de la campaña de muestreo en la estación de Tonantzintla, Puebla. Se presentan los diagramas de dispersión para el día (columna izquierda) y los datos de dispersión en la noche (columna derecha), a cada uno de los diagramas se le ajustó una recta de correlación. Los datos de la tarde del 1 de mayo al 3 de mayo fueron interrumpidos por una falla en el equipo de computo que recolectaba estos datos.

En las gráficas de la Figura 23 se presentan las correlaciones entre el CO y SO₂ para todos los días de la campaña de mediciones. A cada una de las gráficas de dispersión se le ajustó una recta con el fin de mostrar la tendencia de la correlación entre los gases, y de ese modo determinar si los gases provienen de una misma fuente. Se consideró que una correlación positiva con una pendiente mayor de 0.05 implicaría una fuente en común. En caso contrario, se concluye que provienen de fuentes totalmente diferentes, lo cual daría como consecuencia una pendiente de correlación muy pequeña (menor de 0.05).

Tomando lo anterior en cuenta y usando como apoyo la Tabla 6 y la Figura 23, se seleccionaron los datos de los días siguientes (Tabla 7) como aquéllos en los que se espera ver influencia volcánica.

Días que presentan posible influencia volcánica.

25/04/99 (7:00 hrs) al 26/04/99 (19:00 hrs)
27/04/99 (7:00 hrs) al 28/04/99 (19:00 hrs)
29/04/99 (7:00 hrs) al 30/04/99 (19:00 hrs)
30/04/99 (7:00 hrs) al 01/05/99 (19:00 hrs)
04/05/99 (7:00 hrs) al 05/05/99 (19:00 hrs)
06/05/99 (7:00 hrs) al 07/05/99 (19:00 hrs)

Tabla 7.- Días seleccionados por su posible influencia volcánica. Estos son los días que según el criterio explicado podrían presentar indicio de influencia de gases volcánicos en la atmósfera.

Se examinarán ahora cada uno de los días ya seleccionados buscando los posibles indicios que pudieran afirmar una contribución de los gases que emite el volcán Popocatepetl a la composición de las partículas de aerosol encontradas en la atmósfera del poblado de Tonantzintla. Se mostrarán en primer lugar las gráficas con el comportamiento temporal de los datos y posteriormente se llevará a cabo una interpretación de éstas. Para ayudar a la interpretación, se presentarán las gráficas de los datos obtenidos en el día junto con las gráficas de los datos obtenidos en la noche.

3.2.1.- DIA 1 (25/04/99 – 26/04/99)

Diagrama de dispersión CO v.s. SO₂

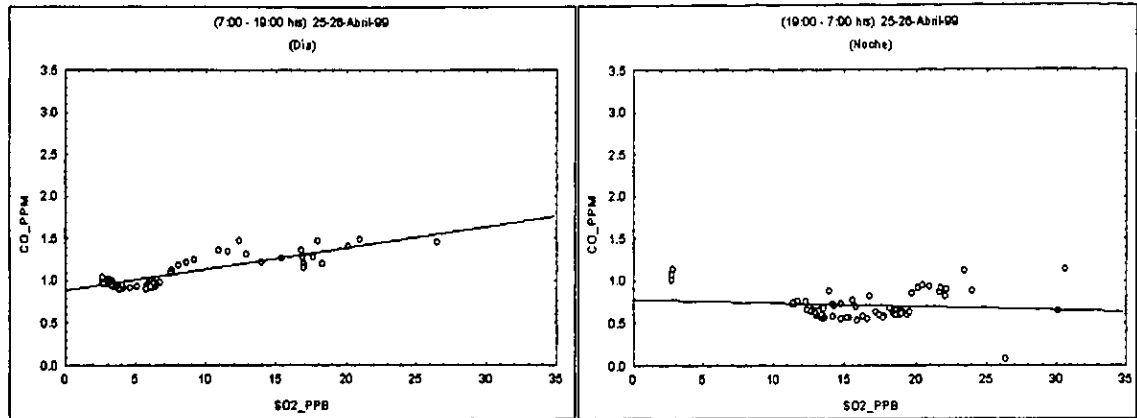


Figura 24a

Histogramas de frecuencia para el SO₂

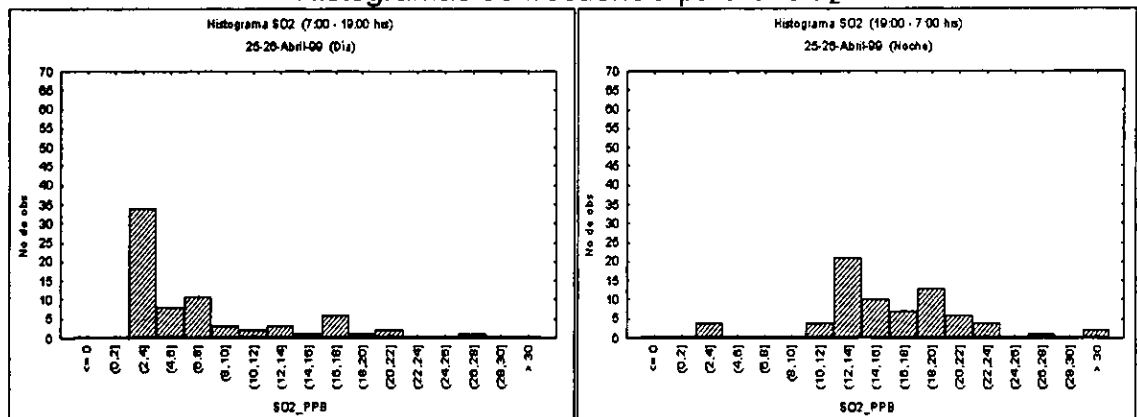


Figura 24b

Histogramas de frecuencia para el CO

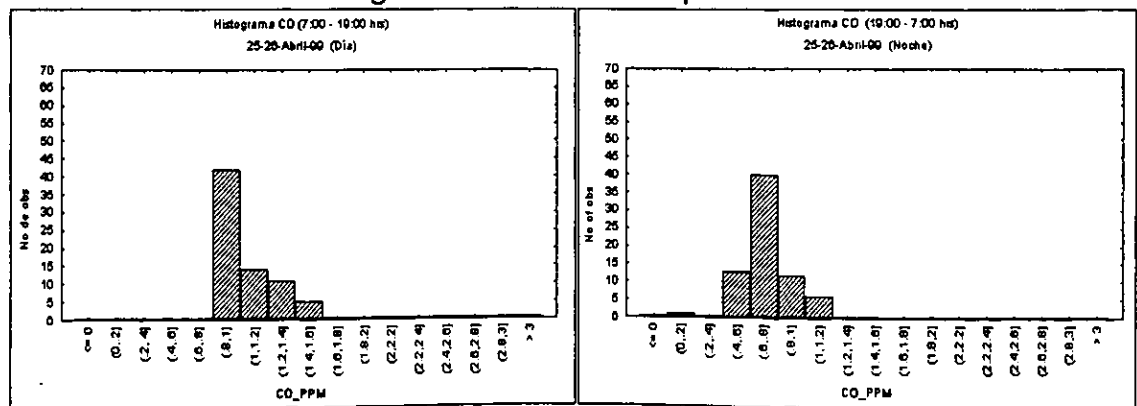


Figura 24c

Gráficas para los datos del viento (noche)

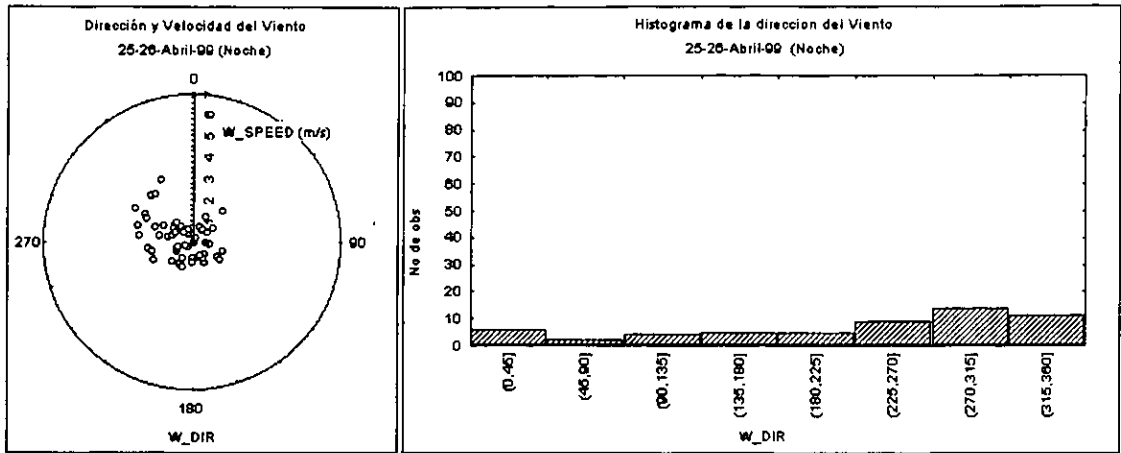


Figura 24d

Distribución del SO₂ en función de la dirección y la velocidad del viento

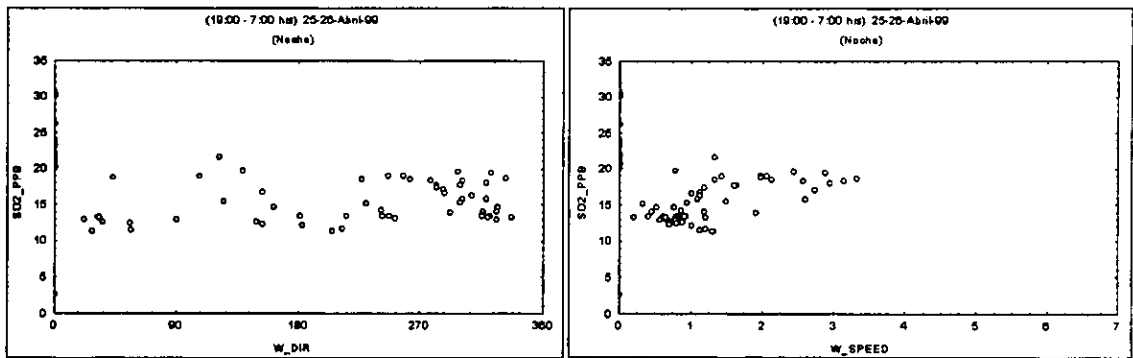


Figura 24f

Distribución del CO en función de la dirección y la velocidad del viento

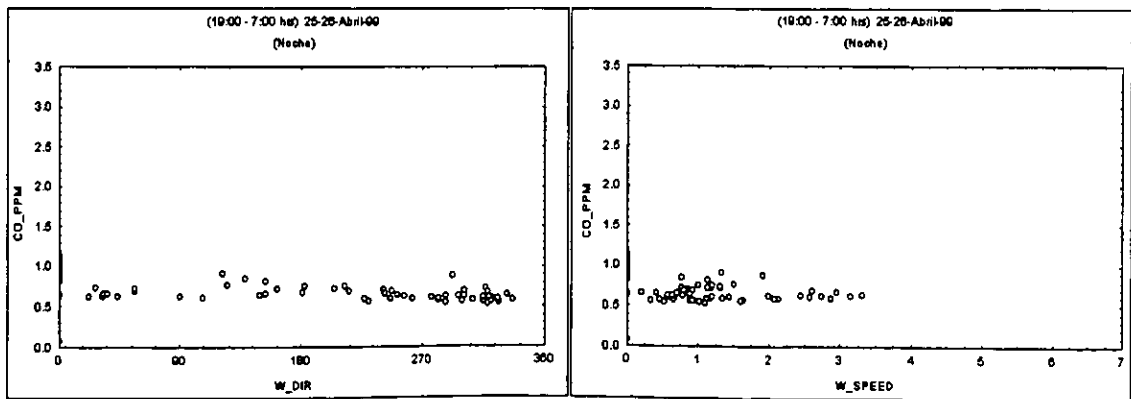


Figura 24g

Figura 24.- Gráficas para los datos de gases y vientos para 24 horas a partir del 25 de abril al 26 de abril de 1999.

3.2.2.- DIA 2 (27/04/99 – 28/04/99)

Diagrama de dispersión CO v.s. SO₂

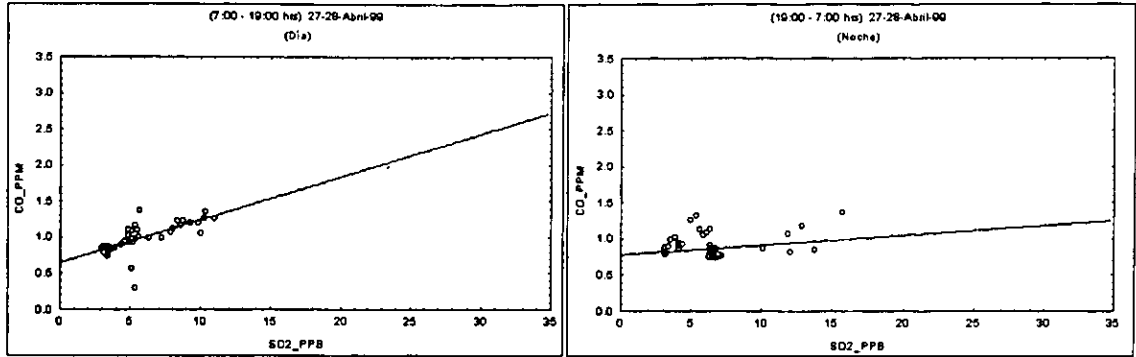


Figura 25a

Histogramas de frecuencia para el SO₂

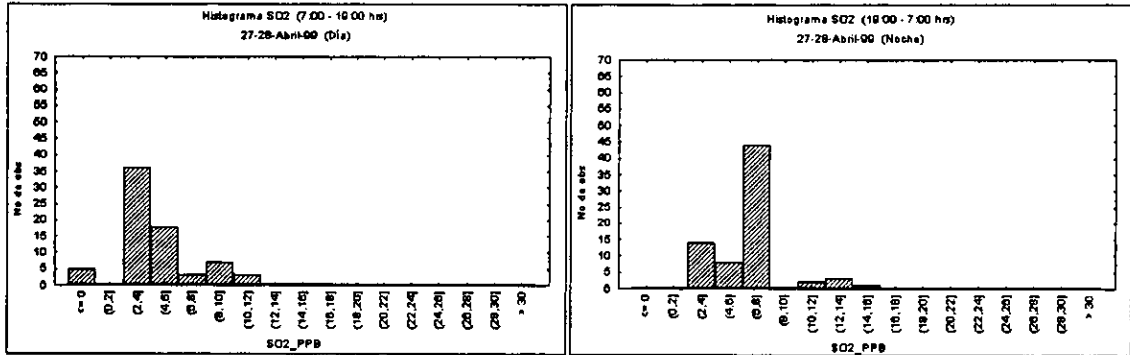


Figura 25b

Histogramas de frecuencia para el CO

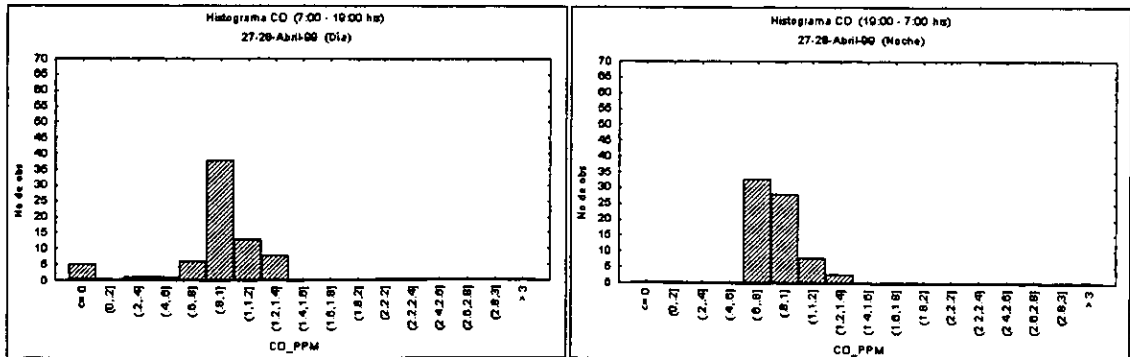


Figura 25c

Gráficas para los datos del viento (día)

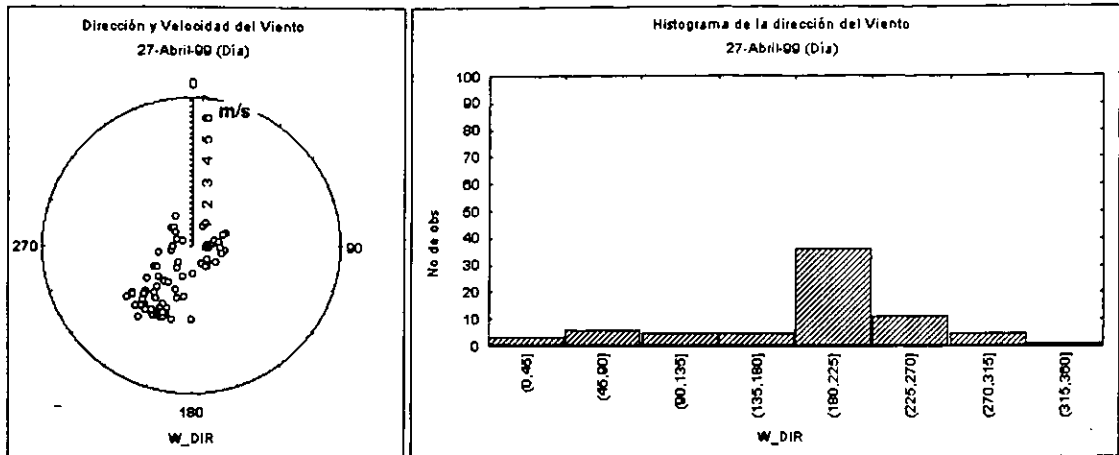


Figura 25d

Gráficas para los datos del viento (noche)

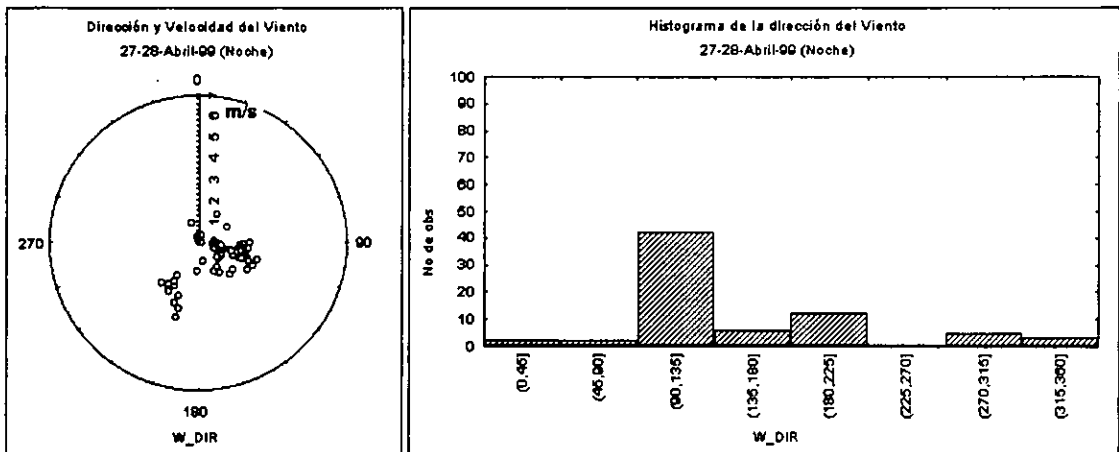


Figura 25e

Distribución del SO₂ en función de la dirección y la velocidad del viento.

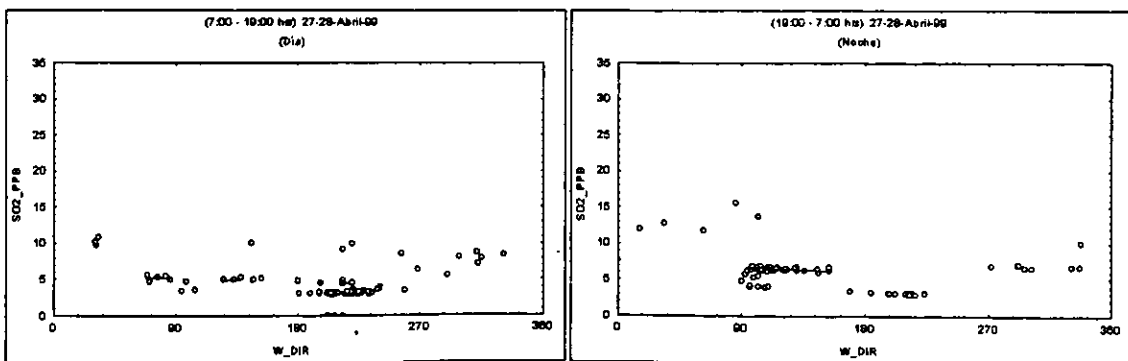


Figura 25f

Distribución del CO en función de la dirección y la velocidad del viento.

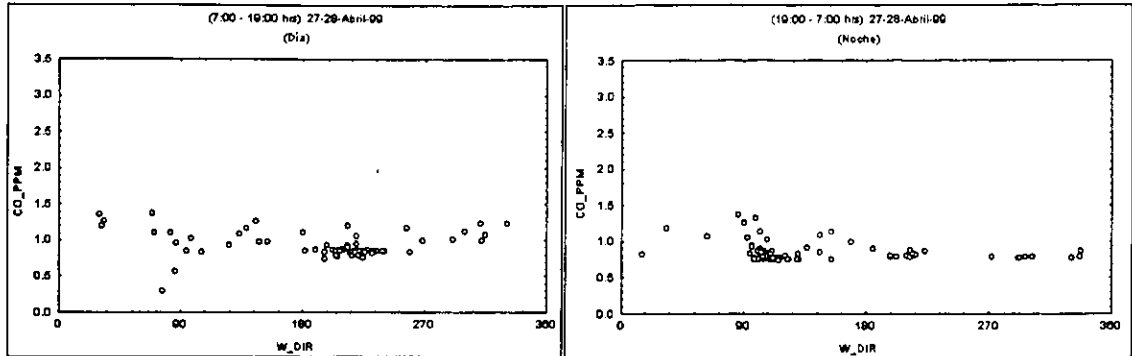


Figura 25g

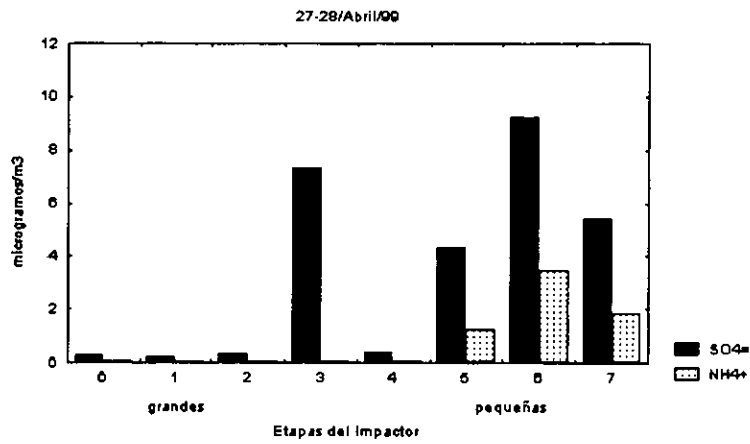


Figura 25h

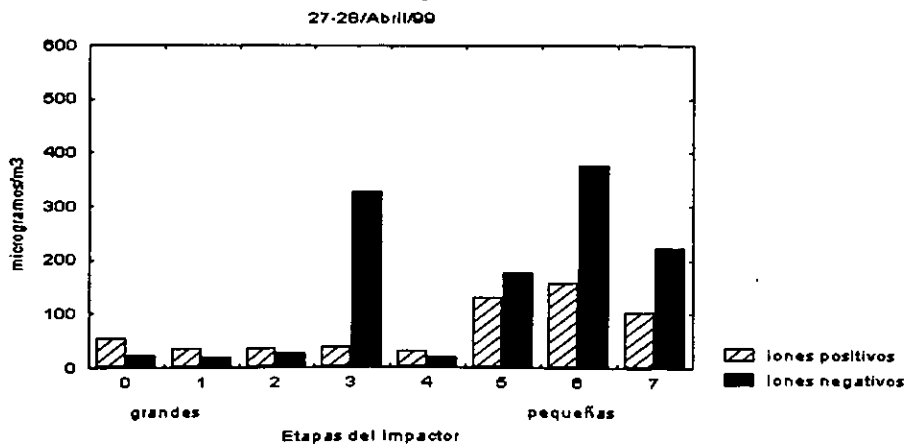


Figura 25i

Figura 25.- Gráficas para los datos de gases, vientos y partículas para 24 horas a partir del 27 de abril al 28 de abril de 1999.

3.2.3.- DIA 3 (29/04/99 – 30/04/99)

Diagrama de dispersión CO v.s. SO₂

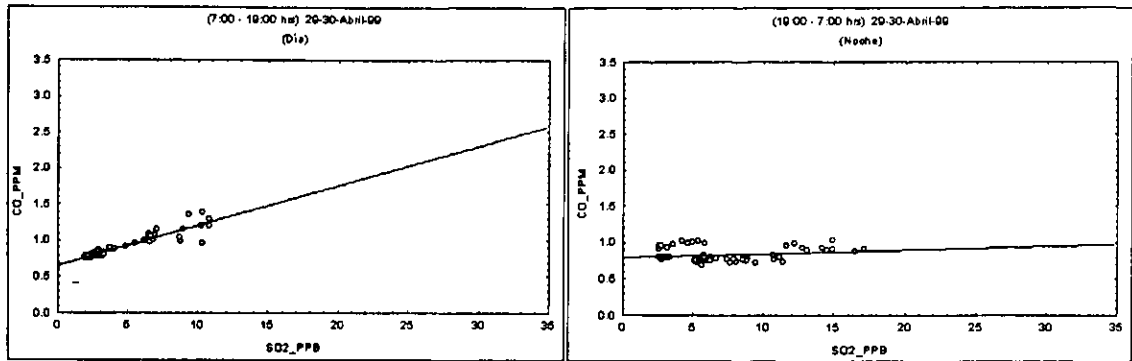


Figura 26a

Histogramas de frecuencia para el SO₂

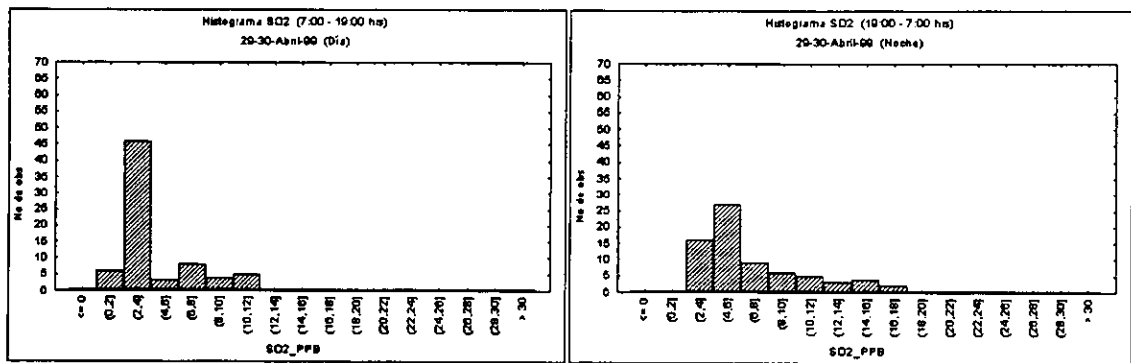


Figura 26b

Histogramas de frecuencia para el CO

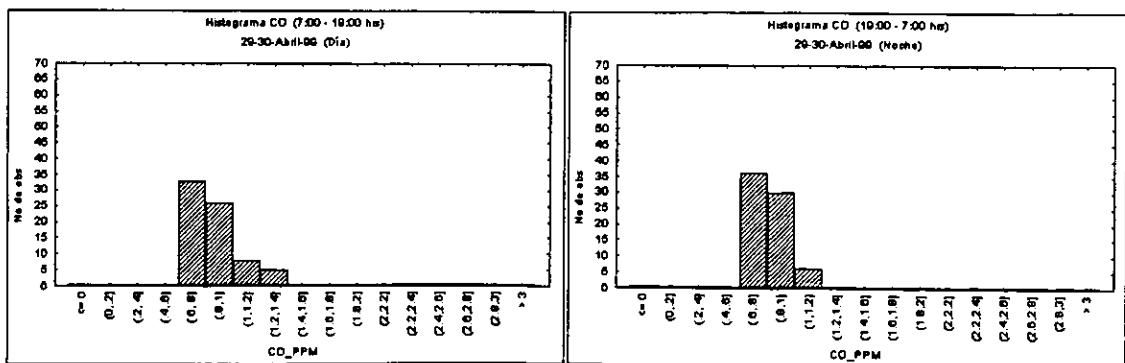


Figura 26c

Gráficas para los datos del viento (día)

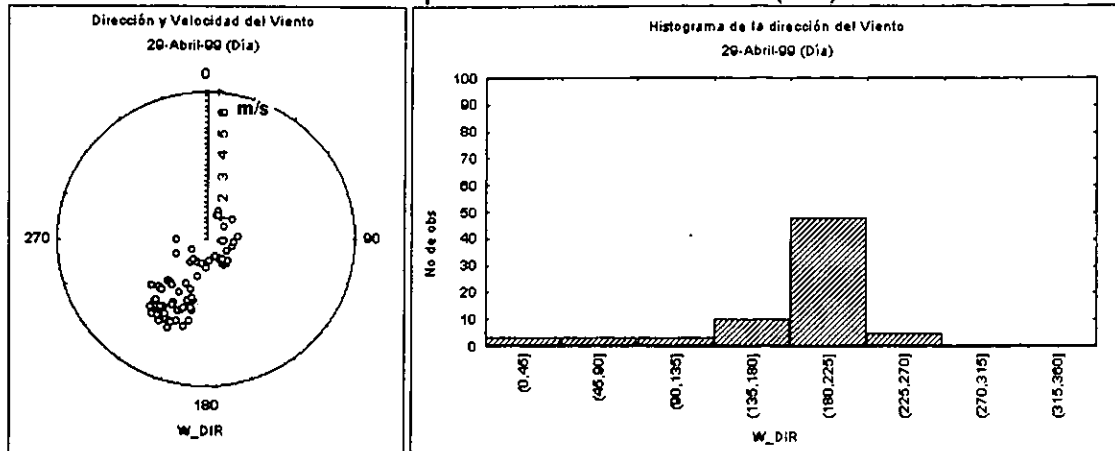


Figura 26d

Gráficas para los datos del Viento (Noche)

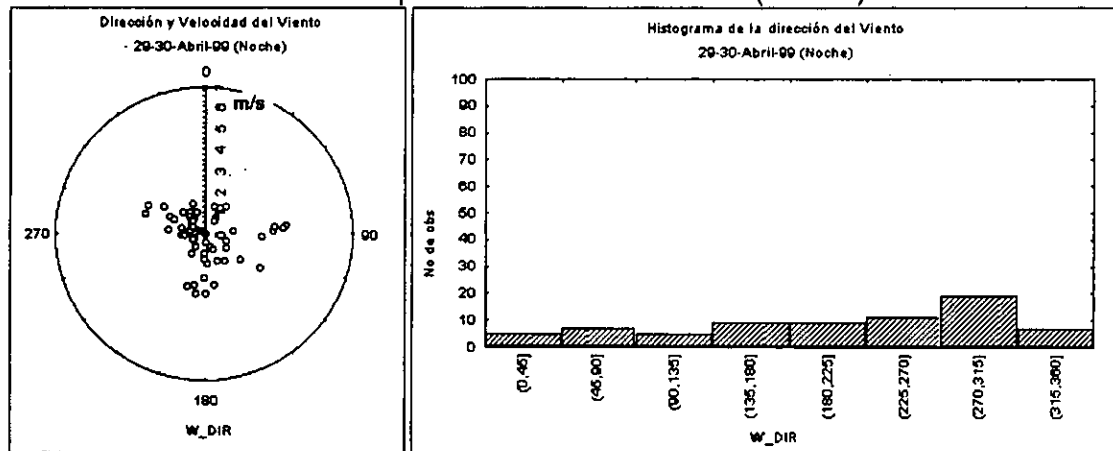


Figura 26e

Distribución del SO₂ en función de la dirección y la velocidad del viento.

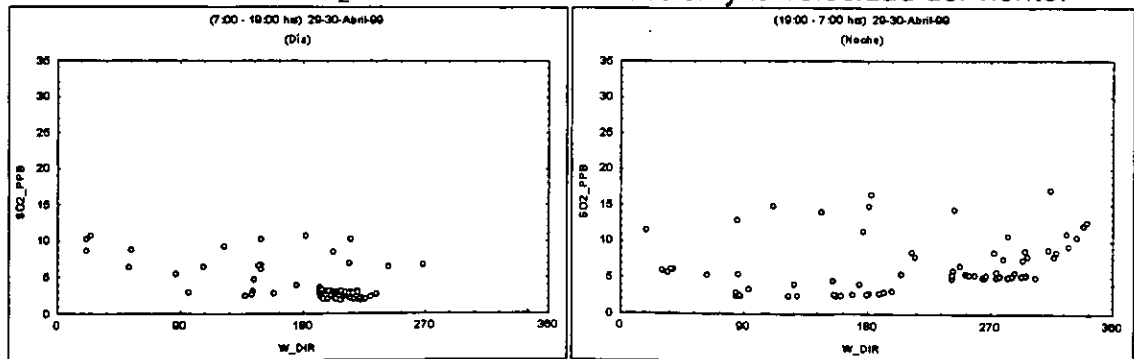


Figura 26f

Distribución del CO en función de la dirección y la velocidad del viento.

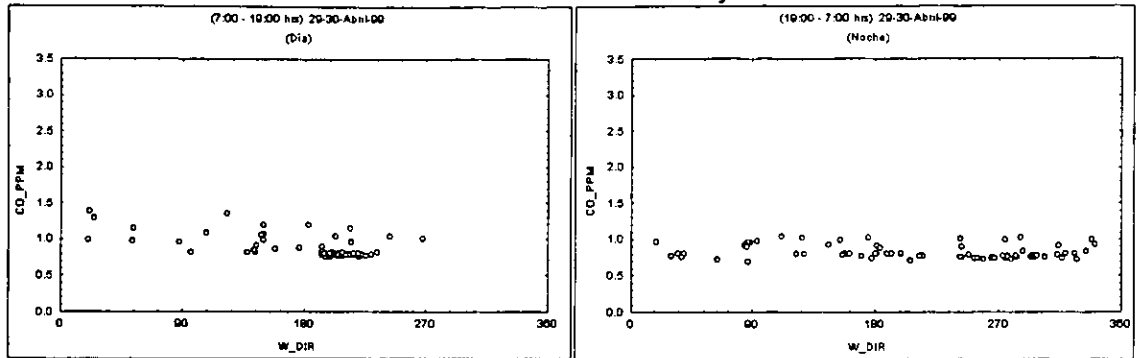


Figura 26g

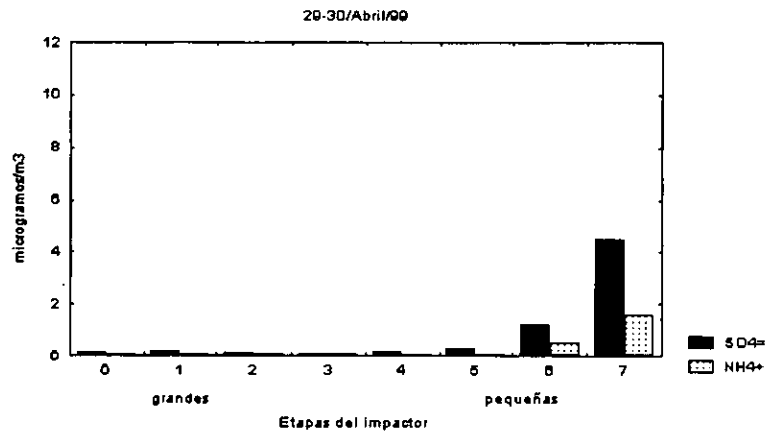


Figura 26h

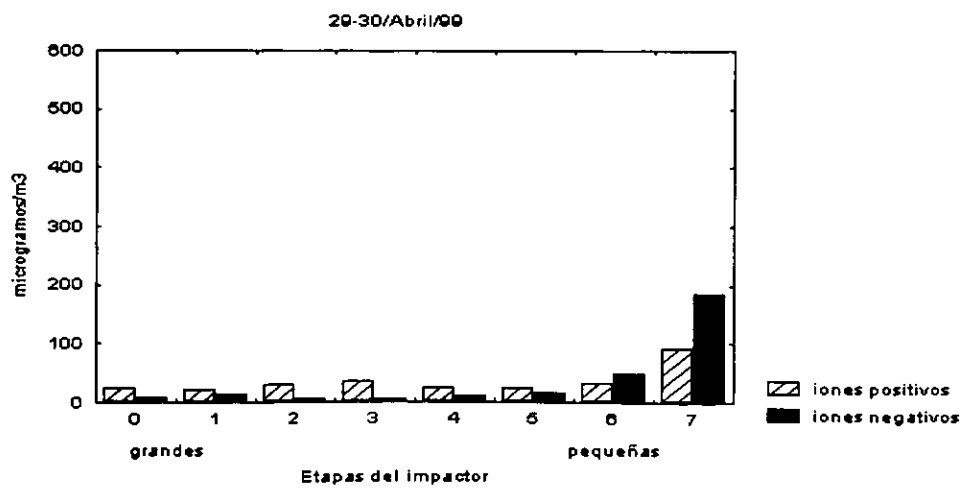


Figura 26i

Figura 26.- Gráficas para los datos de gases, vientos y partículas para 24 horas a partir del 29 de abril al 30 de abril de 1999.

3.2.4.- DIA 4 (30/04/99 – 01/05/99)

Diagrama de dispersión CO v.s. SO₂

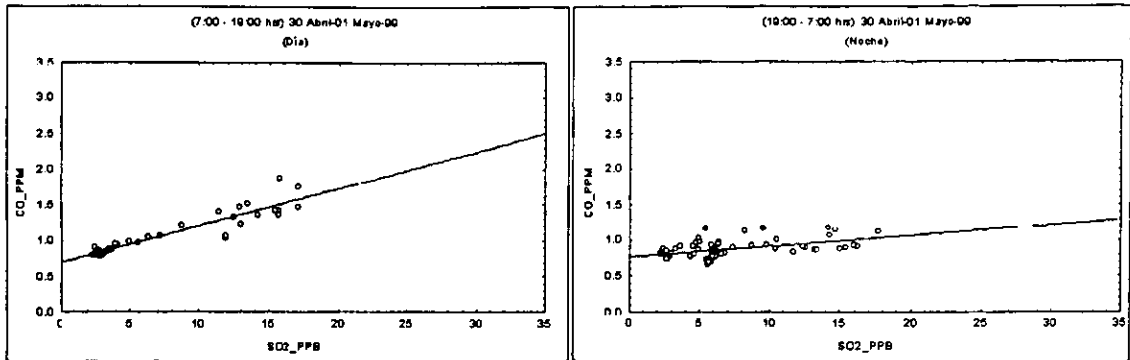


Figura 27a

Histogramas de frecuencia para el SO₂

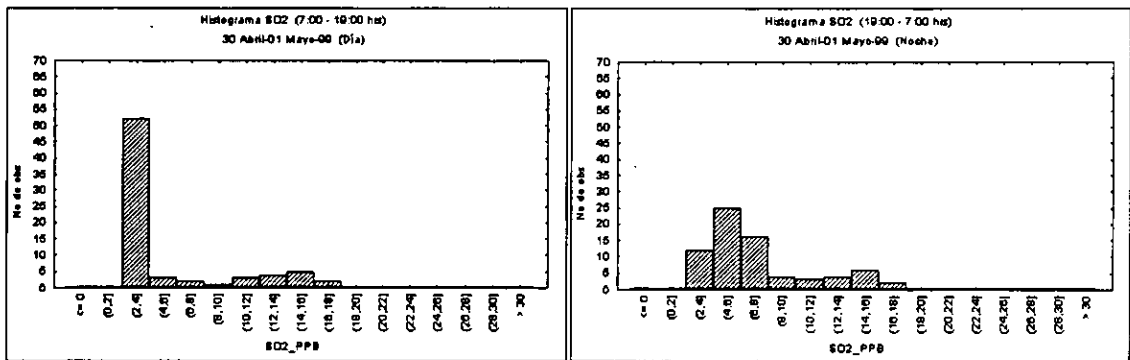


Figura 27b

Histogramas de frecuencia para el CO

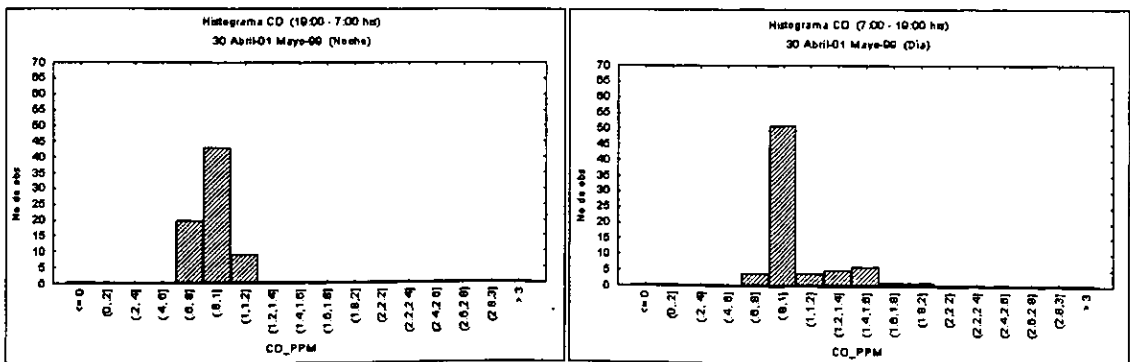


Figura 27c

Gráficas para los datos del viento (día)

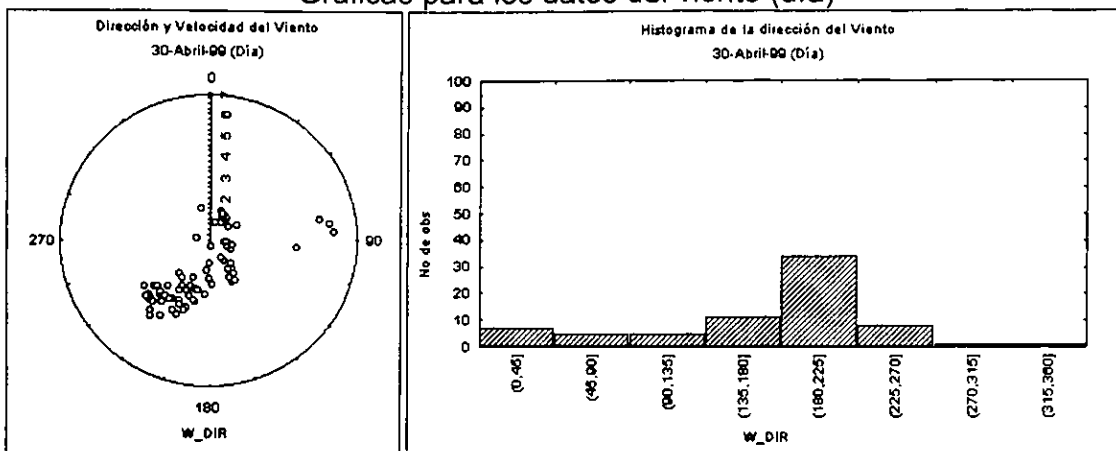


Figura 27d

Gráficas para los datos del viento (noche)

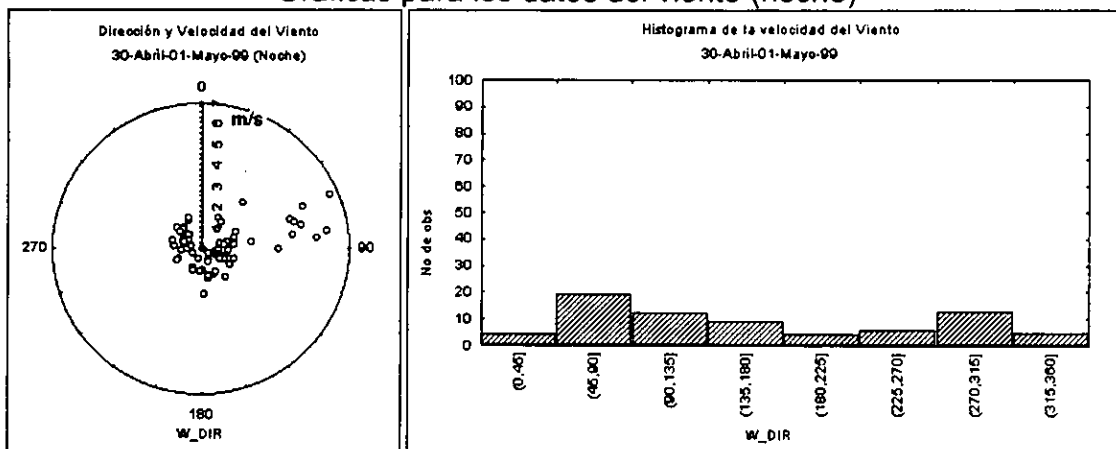


Figura 27e

Distribución del SO₂ en función de la dirección y la velocidad del viento.

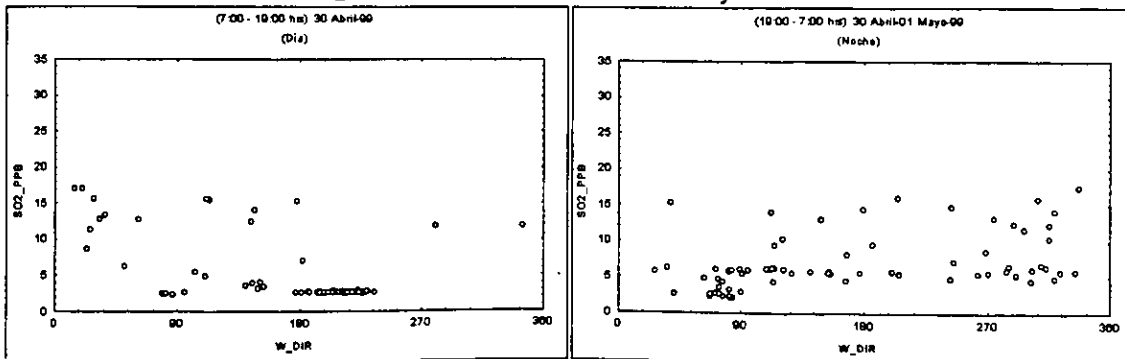


Figura 27f

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Distribución del CO en función de la dirección y la velocidad del viento.

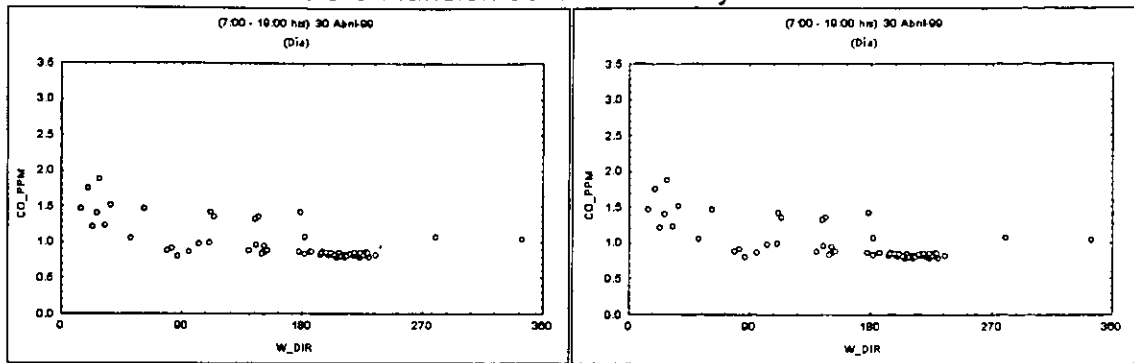


Figura 27g

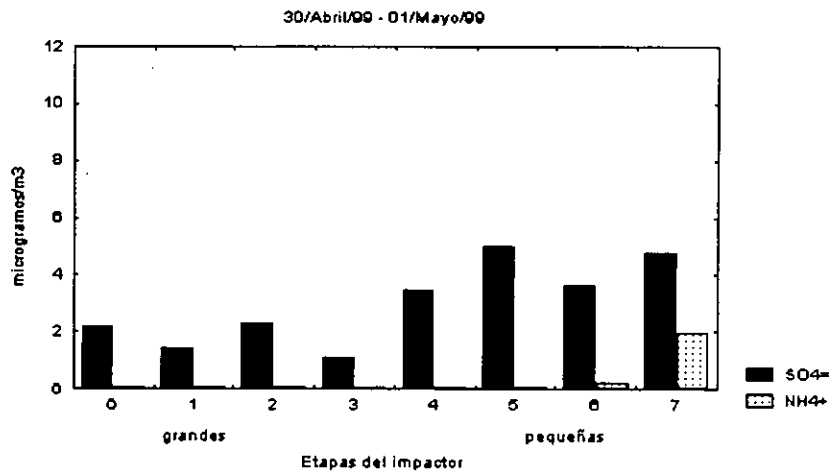


Figura 27h

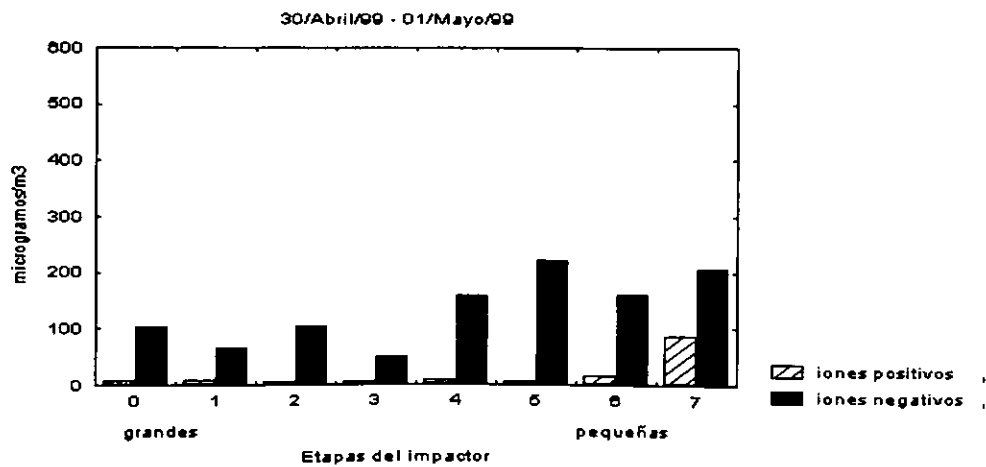


Figura 27i

Figura 27.- Gráficas para los datos de gases, vientos y partículas para 24 horas a partir del 30 de abril al 01 de mayo de 1999.

3.2.5.- DIA 5 (04/05/99 – 05/05/99)

Diagrama de dispersión CO v.s. SO₂

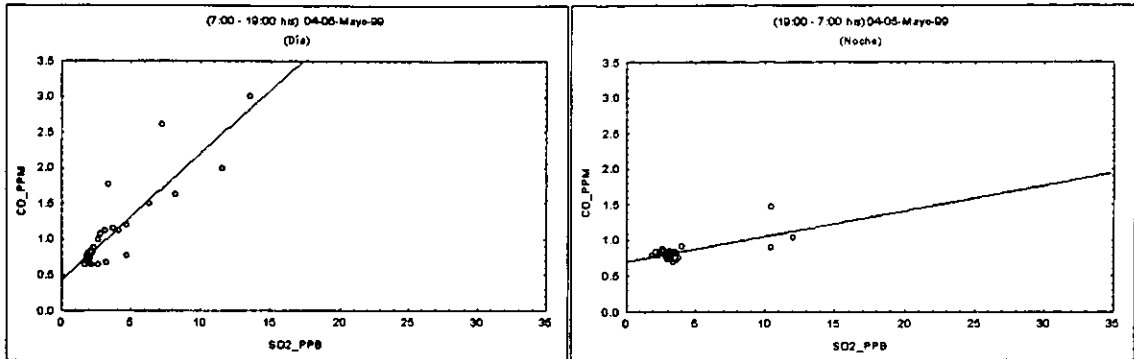


Figura 28a

Histogramas de frecuencia para el SO₂

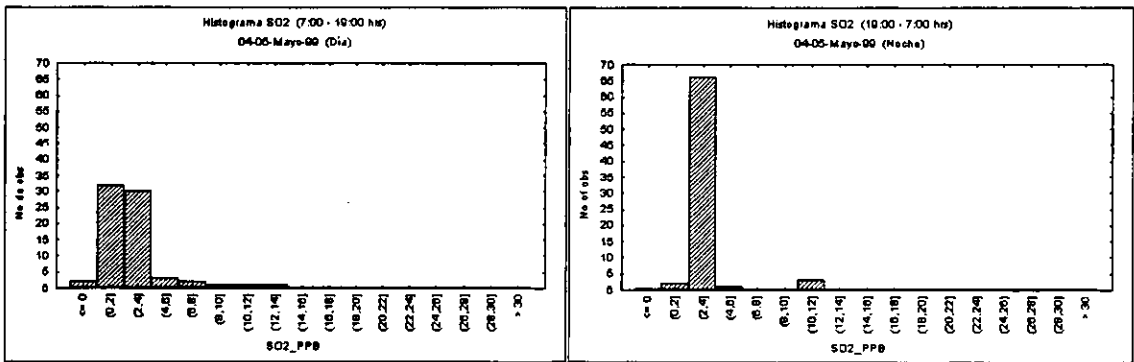


Figura 28b

Histogramas de frecuencia para el CO

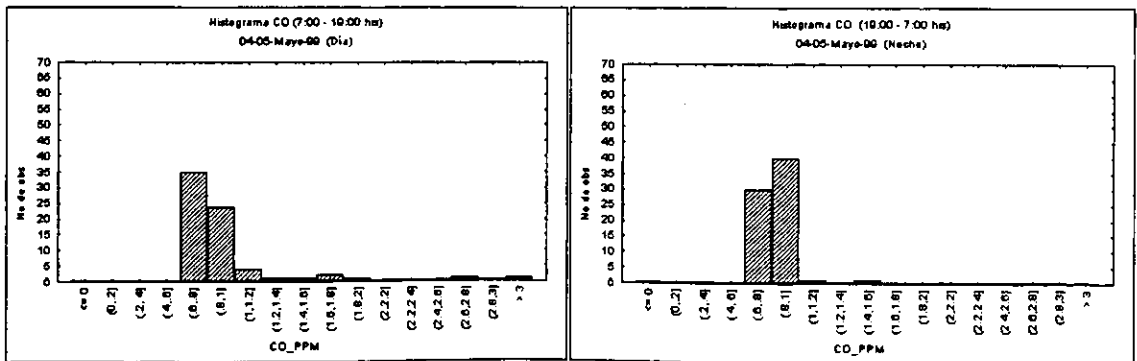


Figura 28c

Gráficas para los datos del viento (día)

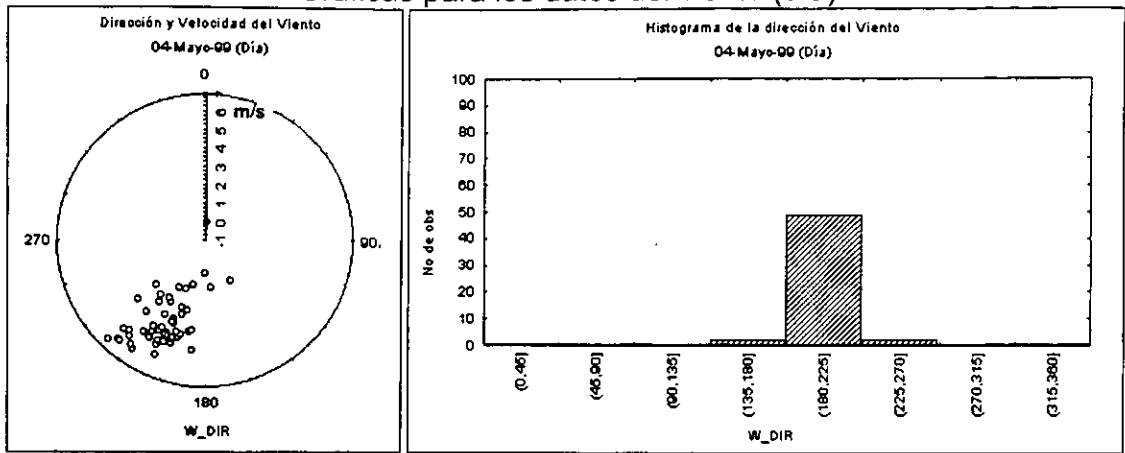


Figura 28d

Gráficas para los datos del viento (noche)

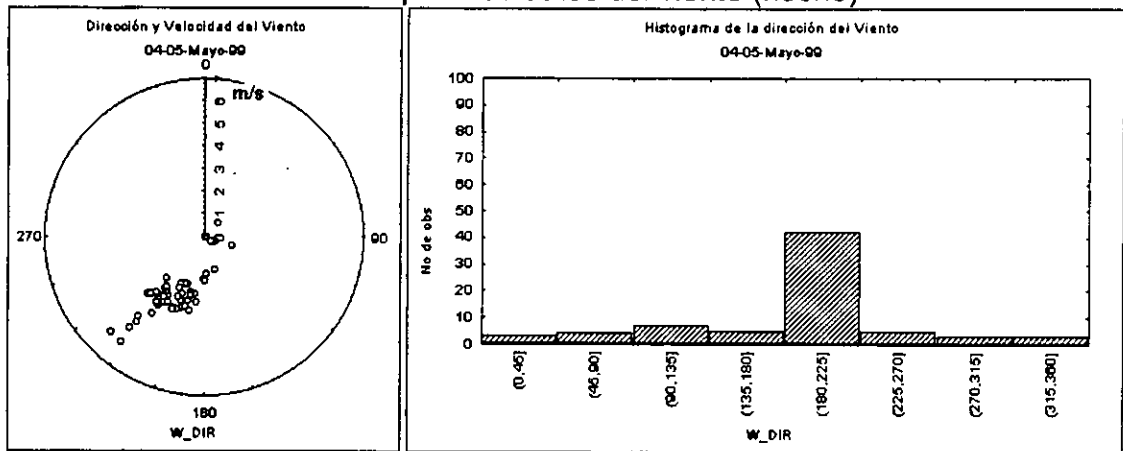


Figura 28e

Distribución del SO₂ en función de la dirección y la velocidad del viento.

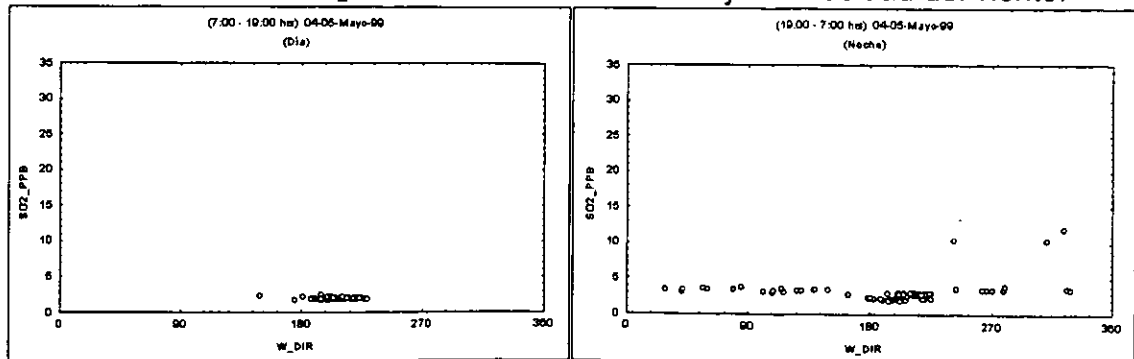


Figura 28f

Distribución del CO en función de la dirección y la velocidad del viento.

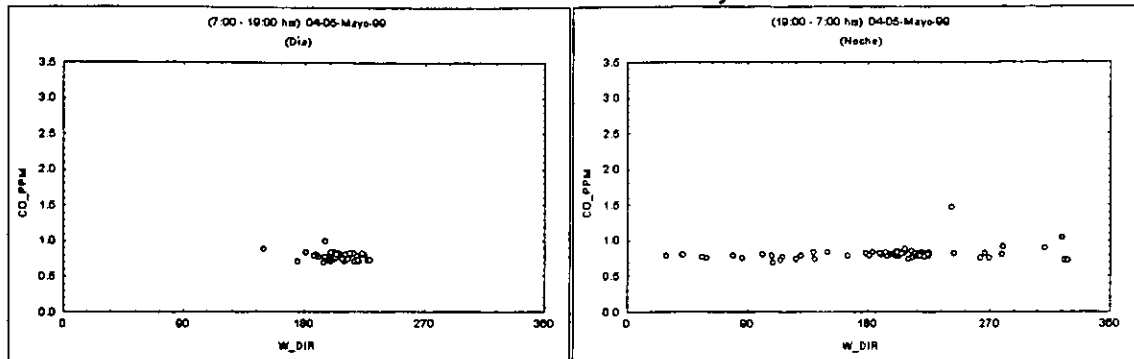


Figura 28g

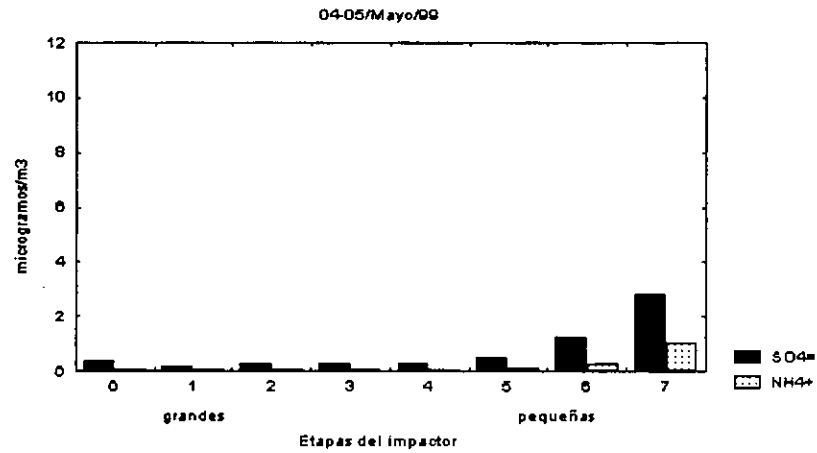


Figura 28h

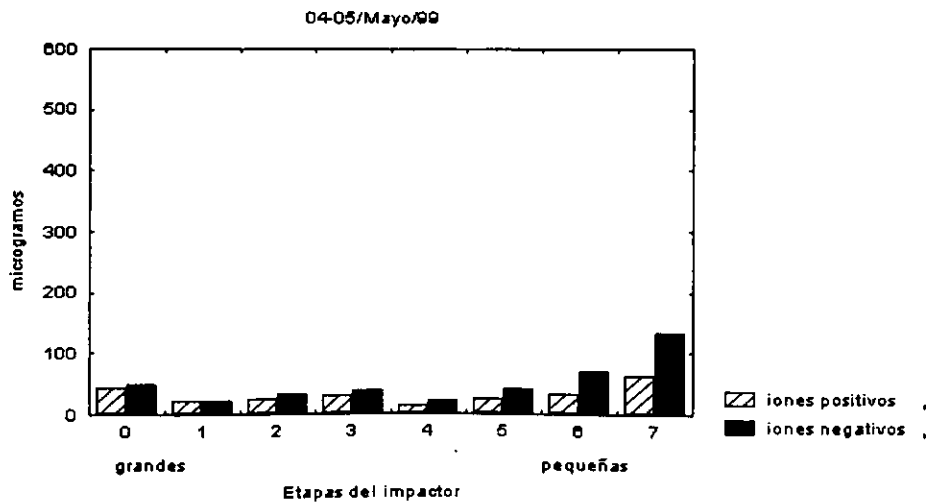


Figura 28i

Figura 28.- Gráficas para los datos de gases, vientos y partículas para 24 horas a partir del 04 de mayo al 05 de mayo de 1999.

3.2.6.- DIA 6 (06/05/99 – 07/05/99)

Diagrama de dispersión CO v.s. SO₂

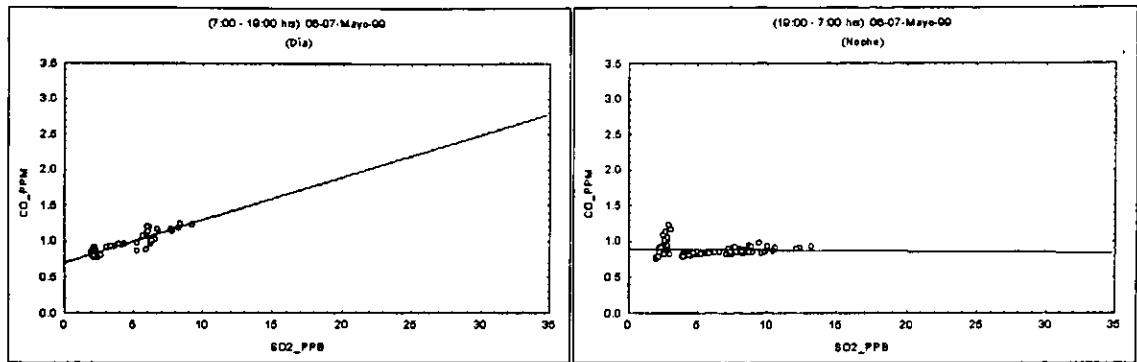


Figura 29a

Histogramas de frecuencia para el SO₂

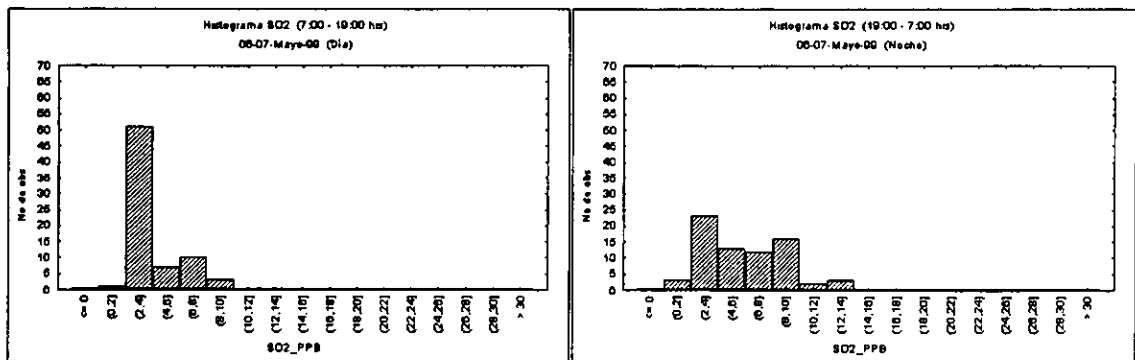


Figura 29b

Histogramas de frecuencia para el CO

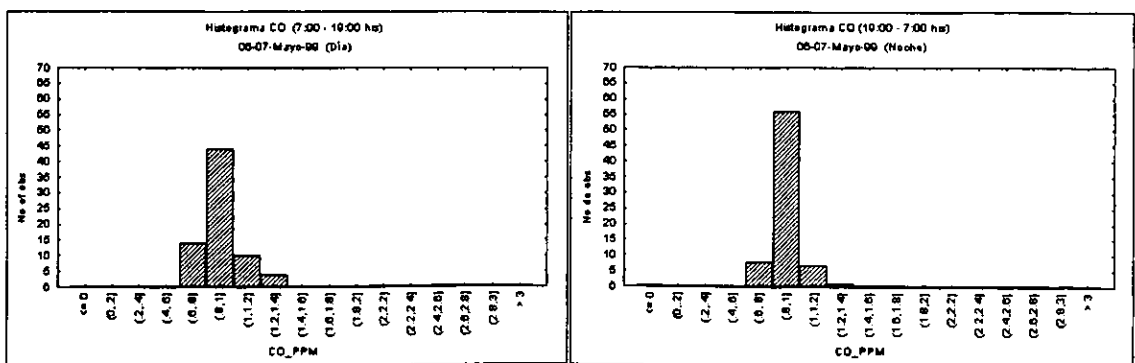


Figura 29c

Gráficas para los datos del viento (día)

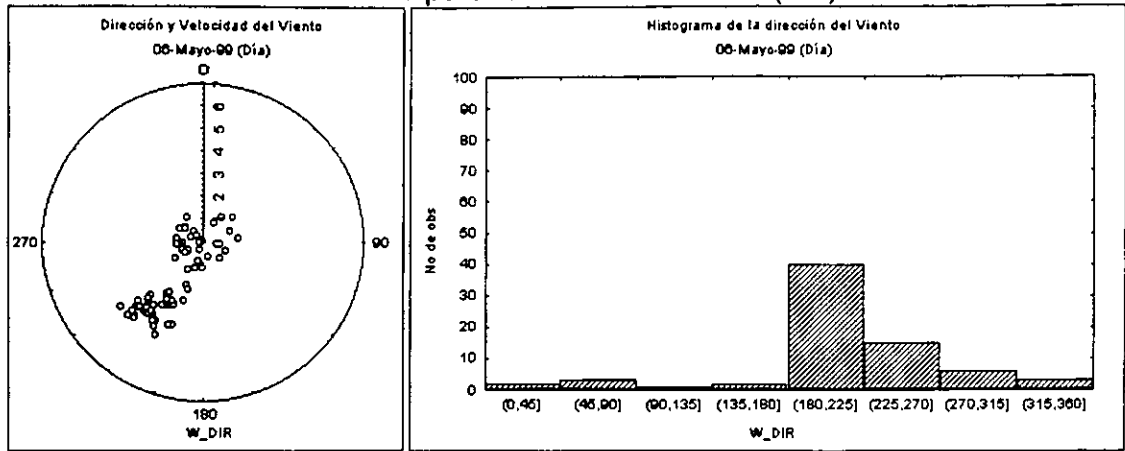


Figura 29d

Gráficas para los datos del viento (noche)

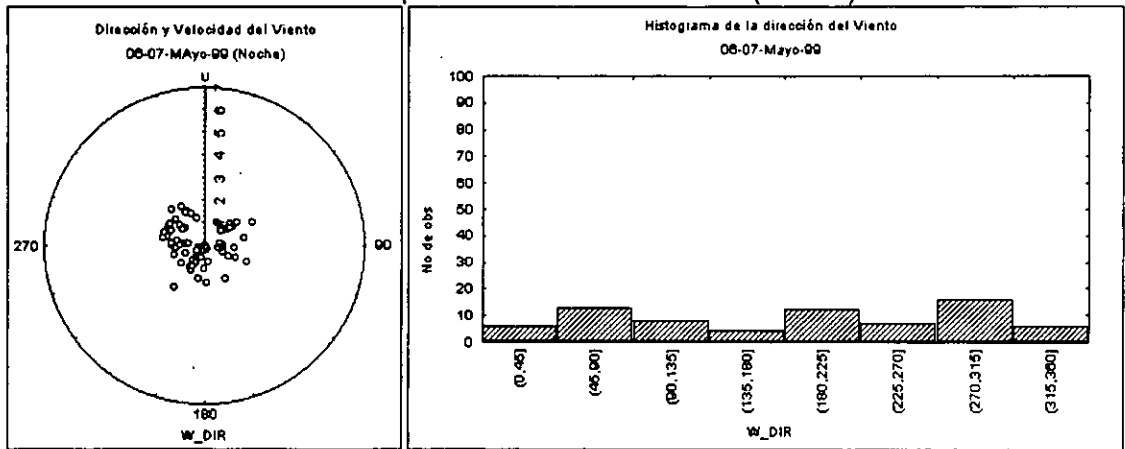


Figura 29e

Distribución del SO₂ en función de la dirección y la velocidad del viento.

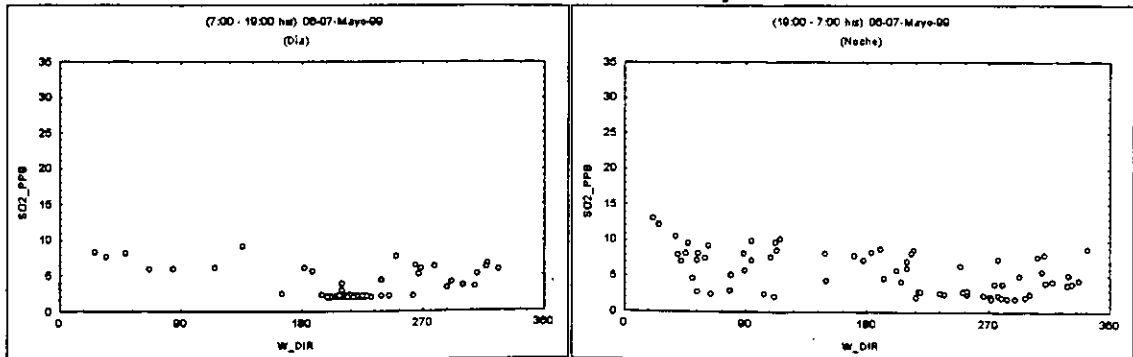


Figura 29f

Distribución del CO en función de la dirección y la velocidad del viento.

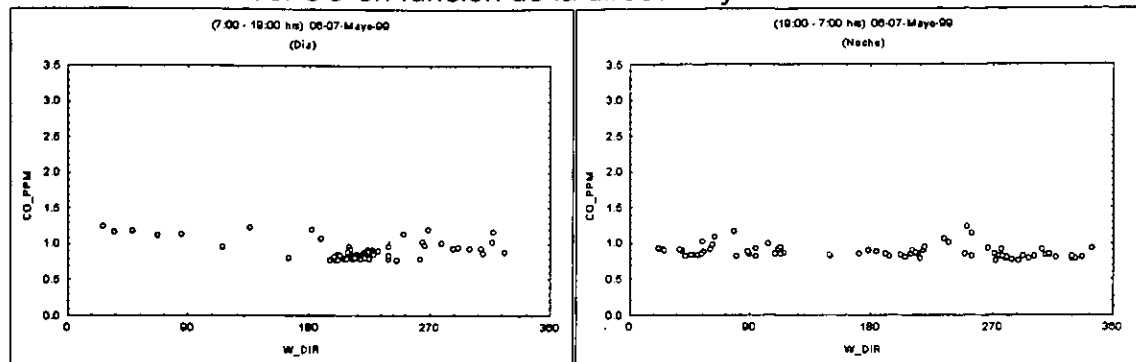


Figura 29g

Figura 29.- Gráficas para los datos de gases y vientos para 24 horas a partir del 06 de mayo al 07 de mayo de 1999.

3.3.- DISCUSIÓN DE LOS DATOS

En las gráficas de cada uno de los días mostradas anteriormente se comparan las concentraciones de CO y SO₂ por medio de diagramas de dispersión a los que se les ha ajustado una recta por medio de la cual se puede medir la tendencia de la correlación entre ambos gases. Las ecuaciones de cada una de las rectas de estas gráficas se muestran en la Tabla 8, en la que se colocan de un lado las ecuaciones para las rectas de ajuste en las gráficas de día y a un lado las de la noche.

Correlaciones del CO v.s. SO₂

Fig.	No. Datos	Y = b + m x (Día)	r ²	Y = b + m x (Noche)	r ²
23a	72	CO=0.887+0.025(SO ₂)	0.736	CO=0.782-0.004(SO ₂)	0.016
24a	72	CO=0.356+0.11(SO ₂)	0.548	CO=0.781+0.013(SO ₂)	0.054
25a	72	CO=0.656+0.055(SO ₂)	0.866	CO=0.794+0.005(SO ₂)	0.039
26a	72	CO=0.697+0.052(SO ₂)	0.901	CO=0.765+0.015(SO ₂)	0.234
27a	72	CO=0.331+0.2(SO ₂)	0.693	CO=0.7+0.036(SO ₂)	0.435
28a	72	CO=0.703+0.06(SO ₂)	0.829	CO=0.893-0.001(SO ₂)	0.002

Tabla 8.- Número de datos y ecuaciones de las rectas ajustadas para cada día seleccionado como posible indicador de influencia.

En esta Tabla se observa claramente una discrepancia entre los coeficientes de correlación de los datos de día con respecto a los coeficientes de correlación para los datos de noche. Para las graficas de dispersión correspondientes a los datos de día los coeficientes de correlación llegan a ser en ocasiones muy cercanas a 0.9 y sin embargo, los correspondientes a los datos de noche en ocasiones llegan a ser negativas. Esto sugiere que en estos días durante las horas diurnas se tiene un comportamiento de los gases muy similar, el cual correspondería a posibles fuentes comunes para estos dos gases, pero en las horas nocturnas las concentraciones de los gases se comportan de diferente manera, lo que corresponde a posibles fuentes diferentes para cada gas.

Lo anterior se puede observar más claramente en la Figura 30, en la cual se grafican todos los datos correspondientes a estos días seleccionados como posibles días de influencia volcánica haciendo la separación entre datos obtenidos en horas diurnas y horas nocturnas.

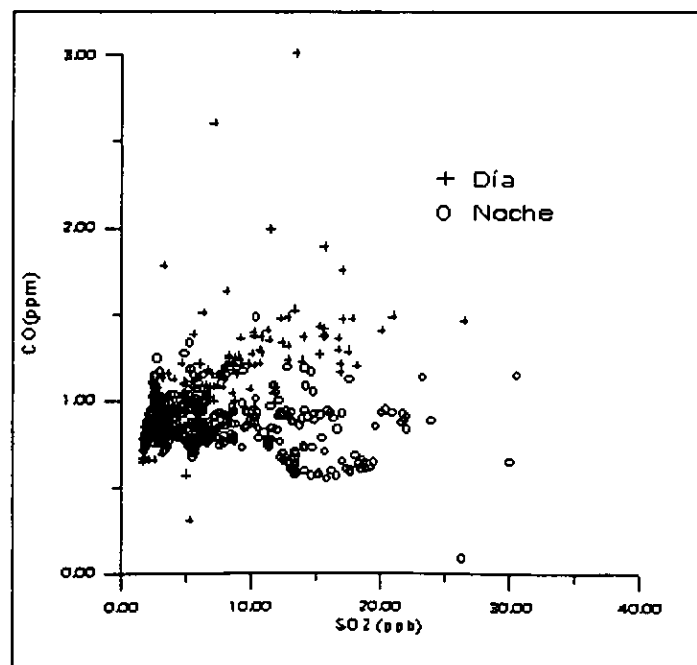


Figura 30.- Diagrama de dispersión para los días seleccionados, separados en dos grupos: datos de diurnos (+) y nocturnos (o).

En el segundo y el tercer grupo de gráficas mostradas (Figura 24 a 29) con los datos de los días de posible influencia (Figuras *b y *c) se presentaron los histogramas de frecuencia para los mismos gases (SO_2 y CO). En estos histogramas se puede observar que en el caso del SO_2 la moda tiende a recorrerse hacia la derecha (valores más altos de concentración) durante la noche con respecto a la posición diurna, también en algunos días se ve una "cola" en la distribución hacia valores más altos. El caso contrario ocurre para el CO , ya que en este caso la moda sufre un desplazamiento hacia la izquierda (valores más bajos de concentración) con respecto a la posición de día y los valores se ven menos distribuidos que el SO_2 concentrándose en un rango más estrecho de valores. Esto indica que la máxima frecuencia de datos con mayor concentración de SO_2 se presenta en la noche y para el caso del CO se presenta durante el día, en apoyo de lo mencionado en el análisis de las series de tiempo, al principio de este capítulo.

Los análisis anteriores parecieran sugerir la presencia de una fuente que contribuya de manera importante a la concentración de SO_2 principalmente durante las horas de la noche, pero al observar las gráficas que describen el comportamiento del viento (Figuras *d y *e) hay que tomar con reserva esta consideración. En dichas gráficas se observa una marcada mayoría en la intensidad y en la dirección del viento del W para las horas del día, situación que favorecería un transporte de gases del volcán hacia el sitio de muestreo. En cambio para las horas de la noche, los patrones de viento predominante no muestran un movimiento favorable al transporte de gases del Popocatepetl hacia el sitio de muestreo. Dichos patrones presentan una distribución de la dirección y la velocidad del viento más uniforme en todas direcciones solamente mostrando una pequeña tendencia del W, lo que no favorece en mucho a la hipótesis del transporte nocturno de los gases provenientes del volcán en dirección a la estación.

Los datos de viento del aeropuerto de Puebla sólo nos ayudan a confirmar lo que pasa durante el día ya que no cuenta con datos durante las horas de la noche (desde las 19:00 a las 4:00 hrs). Estos datos presentados en la Figura 31 muestran que la dirección del viento predominante se encontraba entre los 135° y los 180°, zona que indica un transporte de las emisiones del Popocatepetl hacia la estación de Tonantzintla. Estos datos se muestran en promedios para todos los días que duró la campaña (Figura 31a) y para sólo los días seleccionados con posible influencia volcánica.

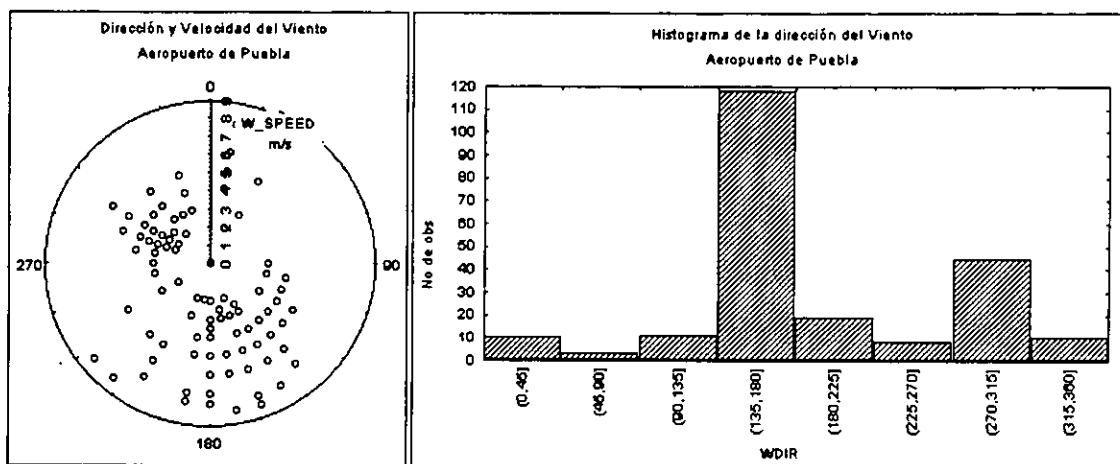


Figura 31a

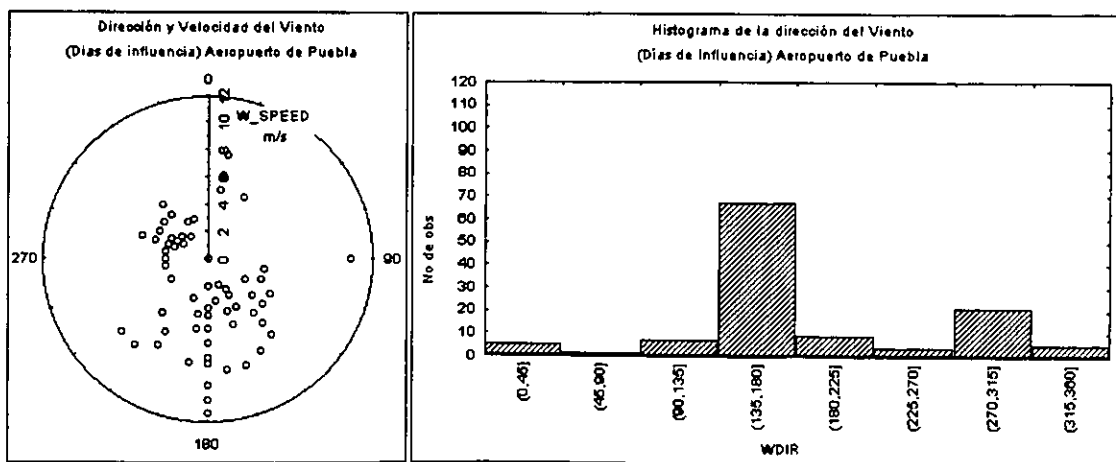


Figura 31b

Figura 31.- Gráficas para dirección y velocidad del viento (izquierda) e histogramas de frecuencia de la dirección del viento para datos del aeropuerto de Puebla en los casos a) Todos los días de campaña y b) Todos los días considerados con posible influencia volcánica.

El último grupo de gráficas (Figuras *h y *i) muestran el análisis de la concentración de masa en función del tamaño de algunos de los iones más importantes en la formación de partículas de aerosol. En la mayoría de los casos presentados se observa una mayor concentración de los iones SO_4^- y NH_4^+ en las etapas del impactor correspondientes a los tamaños menores de partículas. Sin embargo, en la gráfica correspondiente a los días 30 de abril al 01 de mayo no se presenta esta marcada concentración de la masa de SO_4^- en las partículas pequeñas, sino que se observa una distribución más uniforme para todos los tamaños de las partículas. La explicación a esto podría ser la alta correlación que presentan estos días en las concentraciones de SO_2 y CO (ver Tabla 8) sugiere una influencia antropogénica en las partículas de la ciudad de Puebla.

Las gráficas de las Figuras *i muestran la concentración tanto de iones positivos como negativos por etapa del impactor. Es fácilmente apreciable una mayor concentración de iones positivos en las últimas etapas del impactor (partículas pequeñas), lo que podría indicar que en las partículas de menor tamaño (principalmente etapas 5,6 y 7) existen iones que no se estén analizando.

Para terminar con esta presentación de los datos se hace una comparación entre los promedios de la masa total y la masa de los iones SO_4^- y NH_4^+ para todos los días de la campaña y sólo los días con posible influencia volcánica.

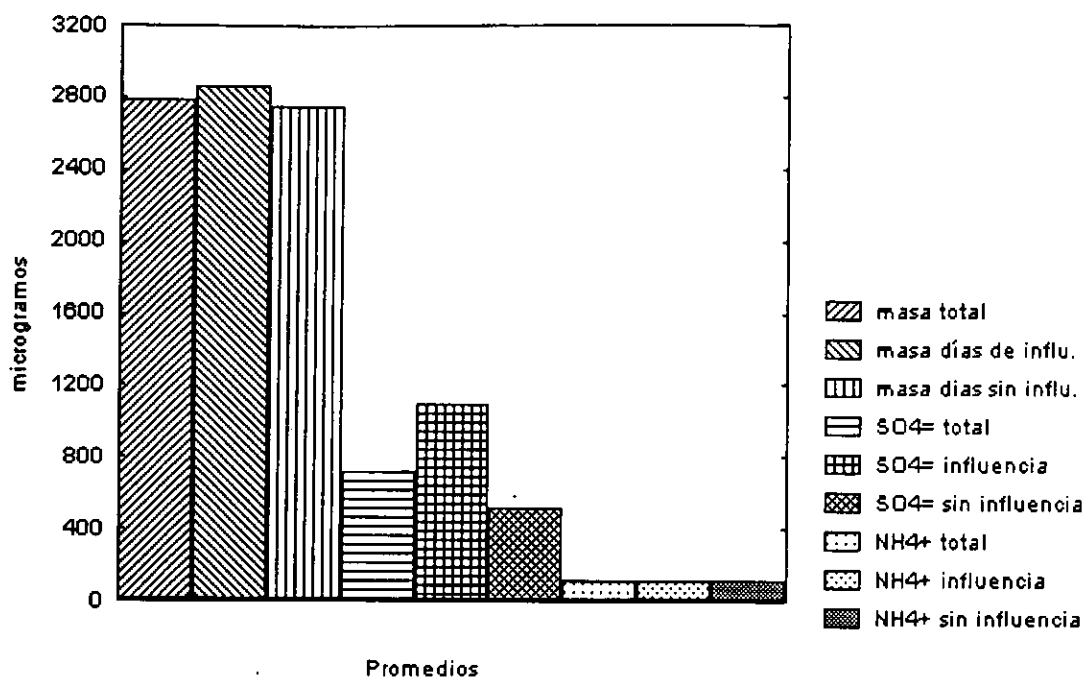


Figura 32.- Promedios de masa total, SO_4^- y NH_4^+ para todos los días de la campaña, los días con posible influencia volcánica y los días sin influencia volcánica.

En esta gráfica se observa que el promedio de masa total y de masa de NH_4^+ son muy aproximados para todos los días de la campaña y para los días de posible influencia. Para el caso del SO_4^- se observa un mayor promedio en la masa de los días seleccionados como de posible influencia y una disminución del promedio de la masa para los días de no influencia, en comparación con el promedio de masa de todos los días. Esto apoya la hipótesis de una posible contribución en la composición de las partículas de aerosol por emisiones del volcán Popocatepetl.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

Se realizaron mediciones de gases y partículas en el poblado de Tonantzintla, 30 km al E del cráter del Popocatepetl, del 24 de abril al 10 de mayo de 1999. Simultáneamente, se realizaron mediciones equivalentes en la estación de microondas de Alzomoni, a 11 km al N del cráter del volcán. El análisis de las mediciones obtenidas permite llegar a las siguientes conclusiones.

- 1- El comportamiento temporal del O_3 observado en Tonantzintla fue el esperado, con máximos durante las primeras horas de la tarde.
- 2- El comportamiento temporal del O_3 observado en Alzomoni mostró niveles de concentración casi constantes durante el día, esto debido a que existía aportación de O_3 posiblemente transportado desde la ciudad de México.
- 3- El comportamiento temporal del CO observado en Tonantzintla fue el esperado, con máximos durante las primeras horas de la mañana. Esto debido a la influencia de la ciudad de Puebla y a los vehículos que utilizan las carreteras cercanas al lugar.
- 4- El comportamiento temporal del CO en Alzomoni mostró posible influencia urbana de la ciudad de México. Los niveles de concentración máximos se presentan después de medio día y los vientos predominantes apoyan el transporte hacia el lugar desde el Valle de México.
- 5- El comportamiento temporal del SO_2 observado en Tonantzintla fue poco usual, debido a que se observaron 6 de los 17 días de datos con concentraciones altas durante la noche no correlacionadas con el CO. Se consideró como hipótesis de trabajo que dichas altas concentraciones eran evidencia de influencia volcánica.

- 6- El análisis de los vientos medidos en Tonantzintla y cerca del volcán no permiten concluir de forma inequívoca que en efecto haya habido un transporte significativo de emisiones volcánicas a los sitios de muestreo.
- 7- El promedio de masa total muestreada en el impactor de cascada es menor que el promedio de masa en los días de influencia.
- 8- El análisis de los promedios de la masa de las partículas obtenidas en las muestras del impactor de cascada, muestran que para los días de influencia la masa de SO_4^- es mayor que para todos los días de la campaña.
- 9- El análisis químico de las partículas obtenidos en los impactores de cascada indica que las partículas más pequeñas contienen el 70% de la masa de SO_4^- y el 90% de la masa de NH_4^+ , tal como se esperaba.
- 10- El balance iónico se presenta en las partículas de tamaños mayores a $2.1\mu\text{m}$ y en partículas más pequeñas no se observa este balance.

REFERENCIAS

- Allen G., Sioutas C., Koutrakis P., Reiss R., Lurmann F. W., and Roberts P. T., 1997, Evaluation of the TEOM Method for Measurement of Ambient Particulate Mass in Urban Areas, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47, 682-689.
- Andres R. J. and Rose W. I., 1995, Remote sensing spectroscopy of volcanic plumes and clouds. In Latter, Bill McGuire, Christopher R. J. Kilburn, John Murray, (Ed) *Monitoring Active Volcanoes*, UCL press, 310-314.
- Bullin J. A. and Moe R.D., 1982, Evaluation of Four Types of Samplers for Aerosols along Roadways, *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol.32, No. 7, 733-737.
- CENAPRED, 2000,
<http://www.cenapred.uman.mx/cgi-bin/popo/reportes/consulta.cgi>
- Chester D., 1993, *Volcanoes and Society*, Edward Arnold, Adivision of Hodder & Stoughton, LONDON MELBOURNE AUCKLAND, pp 351.
- Delgado H., Carrasco G., Cervantes P., Cortés R., y Molinero R., 1996, Capitulo VI, Aspectos Geoquimicos y de Impacto atmosférico, "Patrones de Viento en la Region del Volcán Popocatepetl y Ciudad de México", en el libro *Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, UNAM, pp 295-324.
- Garratt J.R., 1992, *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, pp 315.
- George M. Hidy., 1994, *Atmosferic Sulfur and Nitrogen Oxides*, Academic Press. N.Y. pp 447.
- Goff, F., et al., 1998, Geothermal surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl volcano, Mexico, *GSA Bulletin*, 110, 695-710.
- Götz G., Mészáros E., Vali G., 1991, *Atmospheric Particles and Nuclei*, Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Graedel T.E., Hawkins D.T., Claxton L.D., 1986, *Atmospheric Chemical Compounds, Sources, Occurrences, and Bioassay*, Academic Press, inc, London. pp 732.

- Holston J. R., 1992, An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press, Inc. N.Y., pp 507.
- J.Marti y V. Araña,1993. La Vulcanología actual, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid .
- Junge, C. E., 1963: Air Chemistry and Radioactivity. Academic Press, New York.
- Logan, J. A., Prether, M. J., Wofsy, S. C. and McElroy, M. B., 1981: Tropospheric chemistry: a global prespective., J. Geophys. Res., 86, 7210-7254.
- Lopez, A., Servant, J. and Fontan, J., 1973, Variation des concentrations et caractéristiques noyaux d'Aitken dans l'atmosphère. Atmos. Environ., 7, 945-965.
- McGuire, bill, Kilburn, Christopher R.J., Murray, Jhon (editors); 1995, Monitoring active volcanoes. University College London Press. 421 p.
- McMurry P.H. and Wilson J.C., 1983, Droplet Phase (Heterogeneous) and Gas Phase (Homogeneous) Contributions to Secondary Ambient Aerosol Formation as Functions of Relative Humidity, Journal of Geophysical Research, 88,5101-8
- McWilliams, S., 1969: The concentration of atmospheric condensation nuclei at Valentia observatory. Irish Meteorological Service, Techn. Note No. 33, Dublin.
- Mirabel, P.J. and Jaecker-Voirol, A., 1988: Binary homogeneous nucleation. In Atmospheric Aerosol and Nucleation (eds.:P. E. Wagner and G. Vali). Springer-Verlag, Berlin. 3-14.
- Philip R.B., D.K. Robinson, 1992, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, 2nd ed., 316pp, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Raga G.B., Kok G.L., Baumgardner D., Báez A. and Rosas I., 1999, Evidence for Volcanic Influence on Mexico City Aerosols , Geophys. Res. Lett., 26.
- Schwartz E. 1989, "Acid Deposition", Unraveling a Regional Phenomenon, Science 243, 753-63.
- Spiegel M.R.,1991, Probabilidad y Estadística, McGraw-Hill, México.
- Spiro T.G. and Stigliani W.M., 1996, Chemistry of the Enviroment, 356pp, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

Stoiber R.E. and Jepsen E., 1973, Sulfur Dioxide Contributions to the Atmosphere by Volcanoes. *Science* 182, 577-8.

Stoiber R.E., Malone G.B. and Bratton G.P., 1978, Volcanic Emission of SO₂ at Italian and Central American Volcanoes. *Geological Society American Abstract*. 10, 148

Symonds, R.B. and M. H. Reed., 1993, Calculation of multicomponent chemical equilibria in gassolid-liquid systems: calculation methods, thermochemical data, and application to studies of hightemperature volcanic gases whit examples from Mount St Helens. *American Juornal of Science* 293,*in press*.

Tanner R.L., Cederwall R., Garber R., Leahy D., Marlow W., Meyers R., Phillips M. and Newman L., 1977, Separation and Analysis of Aerosol Sulfate Species at Ambient Concentrations. *Atmospheric Enviroment*, Vol 11, pp 955-966

Van Espen, P., H. Nullens, and W. Macnhut., 1979, En: *Microbeam Analysis*, (1979), Newbury San Francisco Press, San Francisco.

Velázquez T. F. y Delgado H., 1997, *Conviviendo con los volcanes*, Secretaria de Gobernación Dirección General de Protección Civil, México, D.F.