

01190



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.

2
29

COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA
DE LAS NUBES Y DE LA PRECIPITACIÓN
PLUVIAL ENTRE DIFERENTES ZONAS
MONTAÑOSAS DE MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA
P R E S E N T A E L
MAESTRO EN INGENIERÍA
HUGO PASCUAL PADILLA GORDÓN

h

00008

Dirigida por:

Dr. Fernando García García

Dr. Armando Báez Pedrajo

Cd. Universitaria, D.F. junio de 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Fernando García García

CODIRECTOR DE TESIS: Dr. Armando Báez Pedrajo

MIEMBROS DEL JURADO DOCTORAL

Presidente:	Dr. Armando Báez Pedrajo
Primer Vocal:	Dra. Rina Aguirre Saldívar
Segundo Vocal:	Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez
Tercer Vocal:	Dr. Douglas G. Fox
Secretario:	Dr. Fernando García García
Suplente:	Dr. Ernesto Jáuregui Ostos
Suplente:	Dra. Graciela Binimelis de Raga

Dedicada a Hortensia, Hugo Alberto y Ofelia; mi esposa, hijo y madre.

Con esta tesis doy un especial reconocimiento a mi esposa por su apoyo, amor y larga espera para ver esta tesis terminada.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y en especial al Laboratorio de Química Atmosférica las facilidades brindadas para desarrollar los trabajos de campo y los análisis químicos de las muestras.

Al Dr. Fernando García García, Director del Centro de Ciencias de la Atmósfera y al Dr. Armando Báez, Jefe del Laboratorio de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera, su interés y apoyo a lo largo del desarrollo de este trabajo. Igualmente, agradezco a la Dra. Rina Aguirre Saldívar y al Ing. Enrique Heras Herrera de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM su orientación para desarrollar el programa doctoral.

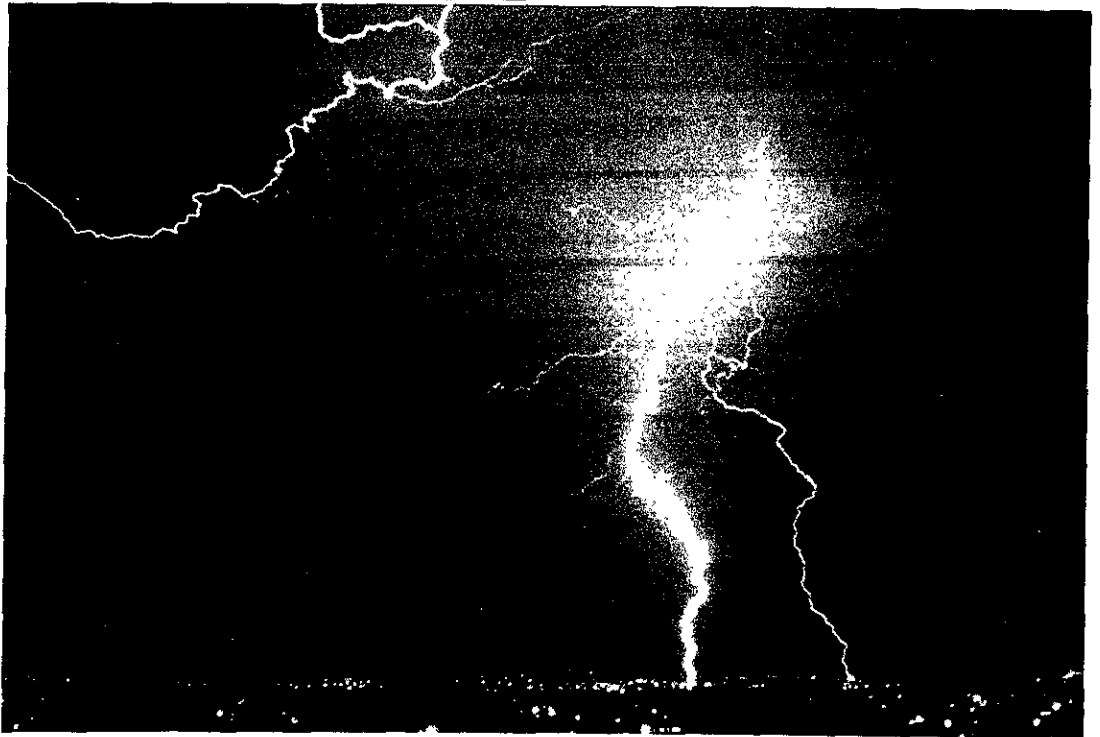
Como un reconocimiento muy especial agradezco a Raúl Belmont D., quien en forma desinteresada estuvo a cargo de la aplicación y asesoría relacionadas con los programas de software que se requirieron para la elaboración de esta tesis y del análisis por espectrofotometría de absorción atómica.

A las químicas María del Carmen Torres B., y Rocío García M., por su colaboración en el trabajo analítico por cromatografía líquida y espectrofotometría de absorción atómica, respectivamente.

También es importante reconocer el trabajo eficiente del Sr. Publio Berna M., de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería quien siempre me facilitó realizar los intrincados trámites administrativos.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, Proyecto IN108395, por el financiamiento parcial a este estudio.

A los miembros del Jurado Doctoral por sus valiosas sugerencias.



COMPARACION DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA DE NUBE Y DE LA PRECIPITACION PLUVIAL ENTRE DIFERENTES ZONAS MONTAÑOSAS DE MEXICO

RESUMEN

La importancia de este trabajo fue la de estudiar por primera vez la composición química del agua de nube y de lluvia en zonas montañosas de México. Se colectó agua de nube por medio de un colector pasivo omnidireccional y otro activo de la clase "Caltech" en Tlamacas (Volcán Popocatepetl) y en Teziutlán, Pue, en la Sierra Madre Oriental. El agua de nube presentó mayor concentración de las especies iónicas que el agua de lluvia. En Tlamacas las concentraciones promedio de sulfato en agua de nube fueron de 1.44 y 6.7 mg/L con el colector pasivo y activo, respectivamente, mientras que en Teziutlán fueron de 8.08 y 8.61 mg/L, respectivamente. Por otro lado, en la lluvia las concentraciones fueron de 2.47 y 2.49 mg/L en Tlamacas y Teziutlán, respectivamente. Los iones que se analizaron fueron sulfatos, nitratos, cloruros, hidrógeno, amonio, calcio, magnesio, sodio y potasio. Las concentraciones iónicas fueron más elevadas en el agua de nube en Teziutlán

Los muestreos de agua de nube en ambientes con alto contenido de partículas presentan problemas especiales en la determinación de la composición química de ésta. Bajo este tipo de ambientes y condiciones es ambiguo hablar únicamente de la composición química del agua de nube como se acostumbra a nivel mundial, debido a que es imposible coleccionar las gotitas de la nube sin coleccionar las partículas intersticiales. Estas partículas provienen del suelo, existiendo además gases y aerosoles de origen fotoquímico entre las gotitas de una nube. Así, lo que realmente se analiza es la composición química de la solución final que contiene componentes solubles en agua en las partículas y componentes que estaban originalmente disueltos dentro de las gotitas de la nube. Por lo tanto, se debe de usar el término composición química de la nube en lugar del término tradicional composición química del agua de nube. El colector pasivo funcionó mejor para coleccionar muestras de agua de nube para su análisis químico. Sin embargo, el colector activo funcionó mejor para estimar el contenido de agua líquida de la nube.

COMPARISON OF CLOUDWATER AND PRECIPITATION CHEMICAL COMPOSITION BETWEEN DIFFERENT MOUNTAINOUS REGIONS OF MEXICO

ABSTRACT

The importance of this research is that it was the first one accomplished on cloud and rainwater chemical composition. Cloudwater was collected by means of an omnidirectional passive and a Caltech active collectors in Tlamacas (Popocatepetl Volcano) and in Teziutlan, Pue. in the Sierra Madre Oriental. Cloudwater presented higher concentrations of ionic species than rainwater. Cloudwater mean sulfate concentrations were 1.44 and 6.7 mg/L with the passive and active collectors, respectively, in Tlamacas, whereas in Teziutlán they were 8.08 and 8.61 mg/L, respectively. On the other hand, rainwater mean sulfate concentrations were 2.47 and 2.49 mg/L in Tlamacas and Teziutlán, respectively. The analyzed ions were sulfate, nitrate, chloride, hydrogen, ammonium, calcium, magnesium, sodium and potassium. Higher ionic concentrations in cloudwater were found in Teziutlan.

Cloudwater samplings in environments with high airborne particles loadings pose special problems for determining its chemical composition. In these environments and conditions it is ambiguous to talk only about cloudwater chemical composition as it is done worldwide, since it is impossible to collect cloud droplets without collecting interstitial particles. These particles come from the soil, besides, there are also gases and aerosols of photochemical origin among cloud droplets. What it is actually analyzed is the chemical composition of the final solution containing water soluble components in the particles and components originally dissolved within the cloud droplets. Consequently, the term cloud chemical composition must be used instead of the traditional term cloudwater chemical composition. The passive collector performed better for collecting cloudwater samples for chemical analysis. However, the active collector performed better for estimating cloud liquid water content.

•

•

COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS NUBES Y DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL ENTRE DIFERENTES ZONAS MONTAÑOSAS DE MÉXICO

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	1
1.2 OBJETIVO	7
2. MÉTODOS.....	10
2.1 SITIOS DE MUESTREO.....	10
2.2 TÉCNICAS DE MUESTREO E INSTRUMENTACIÓN.....	13
2.2.1 Muestreo de agua de nube.....	13
2.2.2 Principios físicos de colección del agua de nube	14
2.2.3 Muestreo de agua de lluvia	26
2.3 DISEÑO ESTADÍSTICO.....	27
2.4 DESCRIPCIÓN DEL MUESTREO	28
2.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS COLECTORES.....	36
3.1.1 Características del colector pasivo cilíndrico.....	36
3.1.2 Características del colector activo.....	36
3.1.3 Características de la malla metálica.....	36
3.2 RESULTADOS DE LOS MUESTREOS	37
3.2.1 Tlamacas, septiembre de 1992 [TL-1]	37
3.2.2 Tlamacas, julio de 1994 [TL-2]	45

3.2.3 Tlamacas, julio de 1995 [TL-3]	47
3.2.4 Teziutlán, enero de 1993 [TE-1]	49
3.2.5 Teziutlán, noviembre de 1993 [TE-2]	51
3.2.6 Teziutlán, enero de 1995 [TE-3]	54
3.3 DISCUSIÓN GENERAL	70
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
5. BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO I. CROMATOGRAMAS Y CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	89
CROMATOGRAMA Y CURVA DE CALIBRACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES (MG/L) DEL ION AMONIO.....	90
CROMATOGRAMA DE LOS IONES CLORURO, NITRATO Y SULFATO Y CURVA DE CALIBRACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES (MG/L) DEL ION CLORURO.	91
CURVA DE CALIBRACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES (MG/L) DE LOS IONES NITRATO Y SULFATO.	92
ANEXO II. TABLAS.....	93
TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA (MG/L) DE AGUA DE NUBE Y LLUVIA EN TLAMACAS.....	94
TABLA 2. PARÁMETROS FÍSICOS DE NUBES EN TLAMACAS.	96
TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA (MG/L) DE AGUA DE NUBE Y LLUVIA EN TEZIUTLÁN.....	97
TABLA 4. PARÁMETROS FÍSICOS DE NUBES EN TEZIUTLÁN.	100
TABLA 5. CAPACIDAD DE COLECCIÓN DE LOS MUESTREADORES DE AGUA DE NUBE EN TEZIUTLÁN.....	102
TABLA 6. CONCENTRACIONES PROMEDIO (MG/L).....	103
TABLA 7. PRUEBA DE MANN-WHITNEY (VALORES DE Z).....	106
TABLA 8. PRUEBA DE MANN-WHITNEY (VALORES DE U).....	107

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO.	12
FIGURA 2. PRINCIPIO DE LAS MALLAS COLECTORAS DE AGUA DE NUBE.	22
FIGURA 3. CIZALLAMIENTO VERTICAL DE LOS VIENTOS EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO, SEPT. 92.	40
FIGURA 4. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO CILÍNDRICO) Y DE LLUVIA EN TLAMACAS, 9 SEPT. 92.	55
FIGURA 5. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO CILÍNDRICO) EN TLAMACAS, 10-11 SEPT. 92.	55
FIGURA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO CILÍNDRICO) EN TLAMACAS, 29-30 SEPT. 92.	56
FIGURA 7. COMPARACIÓN SIMULTÁNEA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) Y DE LLUVIA EN TLAMACAS, 19 JUL. 94.	57
FIGURA 8A. COMPARACIÓN SIMULTÁNEA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) Y DE LLUVIA EN TLAMACAS, 20 JUL. 94.	58
FIGURA 8B. COMPARACIÓN SIMULTÁNEA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) Y DE LLUVIA EN TLAMACAS, 20 JUL. 94.	58
FIGURA 9A. COMPARACIÓN SIMULTÁNEA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) Y DE LLUVIA EN TLAMACAS, 21 JUL. 94.	59
FIGURA 9B. COMPARACIÓN SIMULTÁNEA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) Y DE LLUVIA EN TLAMACAS, 21 JUL. 94.	59
FIGURA 10. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO CILÍNDRICO) EN TEZIUTLÁN, 26-27 NOV. 93.	60
FIGURA 11. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) EN TEZIUTLÁN, 28 NOV. 93.61	
FIGURA 12. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO CILÍNDRICO) EN TEZIUTLÁN, 28 NOV. 93.	61
FIGURA 13. CONTENIDO DE AGUA LÍQUIDA SECUENCIAL DE LA NUBE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE COLECTOR EN TEZIUTLÁN, 28 NOV. 93.	62
FIGURA 14. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR ACTIVO) EN TEZIUTLÁN, 18-19 ENE. 95.	63
FIGURA 15. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO DE MALLA) EN TEZIUTLÁN, 18-19 ENE. 95.	64

FIGURA 16. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE NUBE (COLECTOR PASIVO CILÍNDRICO) EN TEZIUTLÁN, 18-19 ENE. 95.	65
FIGURA 17. COMPOSICIÓN QUÍMICA SECUENCIAL DEL AGUA DE LLUVIA EN TEZIUTLÁN, 18-19 ENE. 95.	66
FIGURA 18. CONTENIDO DE AGUA LÍQUIDA SECUENCIAL DE LA NUBE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE COLECTOR EN TEZIUTLÁN, 18-19 ENE. 95.	67
FIGURA 19. COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MUESTRA PARA TODAS LAS ESTACIONES.....	68
FIGURA 20. COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MUESTRA PARA TLAMACAS.	69
FIGURA 21. COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MUESTRA PARA TEZIUTLÁN.	69

LISTA DE SÍMBOLOS

a.-	Área transversal de los hilos del colector de agua de nube (m^2).
A.-	Área transversal total de la superficie de colección de agua de nube (m^2).
CAL.-	Contenido o concentración de agua líquida de la nube (g/m^3).
CC.-	Capacidad de colección del colector de agua de nube ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$)
d.-	Diámetro de las gotitas de las nubes (cm).
d_{50} .-	Diámetro de corte (cm).
d_c .-	Diámetro de los hilos del colector de agua de nube (cm).
Δt .-	Tiempo de colección de las muestras de agua de nube (s o h, según la aplicación).
E.-	Eficiencia de colección del agua de nube.
η .-	Viscosidad dinámica del aire $g\ cm^{-1}\ s^{-1}$.
$\Psi^{1/2}$.-	Raíz cuadrada del número de Stokes.
γ .-	Factor de corrección de deslizamiento.
K.-	Parámetro de inercia.
m.-	Cantidad de muestra de agua de nube colectada (g).
M_1 .-	Cantidad total de agua líquida en el volumen estimado de aire muestreado interceptado por los hilos del colector de agua de nube (g).
M_2 .-	Cantidad total de agua líquida en el volumen estimado de aire muestreado interceptado por toda la superficie de colección de agua de nube (g).
P.-	Presión atmosférica (mb).
r.-	Radio de las gotitas de las nubes (cm).
R.-	Constante de los gases para el aire seco ($cm^2\ s^{-2}\ K^{-1}$).
Re .-	Número de Reynolds.
ρ .-	Densidad de las gotitas de agua de nube (g/cm^3).
ρ_{aire} .-	Densidad del aire seco (g/cm^3).
$\rho_{aire\ húmedo}$.-	Densidad del aire húmedo (g/cm^3).
T.-	Temperatura del aire (K).
T_v .-	Temperatura virtual del aire (K).
v.-	Velocidad del viento (m/s o cm/s, según la aplicación).

- V₁- Volumen estimado de aire muestreado interceptado por los hilos del colector de agua de nube (m³).
- V₂- Volumen estimado de aire muestreado interceptado por toda la superficie de colección de agua de nube (m³).
- w.- Razón de mezcla del vapor de agua (Kg/Kg).

RESUMEN

La importancia de este trabajo fue la de estudiar por primera vez la composición química del agua de nube y de lluvia en zonas montañosas de México. Además se sentaron las bases para la planeación de futuros proyectos de investigación para conocer la cantidad de contaminantes que el agua de nube y de lluvia aportan en cualquier zona del país en donde sea posible realizar este tipo de estudios. Se colectó agua de nube y de lluvia por medio de un colector pasivo omnidireccional y otro activo de la clase "Caltech" en Tlamacas (en el Popocatepetl) y en Teziutlán, población situada en la Sierra Madre Oriental en el Estado de Puebla.

El agua de nube presentó mayores concentraciones de las especies iónicas que el agua de lluvia. En Tlamacas las concentraciones promedio de SO_4^{-2} en agua de nube fueron de 1.44 y 6.7 mg/L con el colector pasivo y activo, respectivamente, mientras que en Teziutlán fueron de 8.08 y 8.61 mg/L, respectivamente. Por otro lado, en la lluvia las concentraciones fueron de 2.47 y 2.49 mg/L en Tlamacas y Teziutlán, respectivamente. Los iones que se analizaron fueron sulfatos, nitratos, cloruros, hidrógeno, amonio, calcio, magnesio, sodio y potasio. Aunque sólo en dos ocasiones (entre un total de 17 muestreos realizados en los 2 sitios de muestreo casi al mismo tiempo) el agua de lluvia presentó mayor contaminación que la de nube en Tlamacas; se presenta la explicación de este hecho.

Por otro lado, las concentraciones iónicas fueron más elevadas en el agua de nube en Teziutlán. Los muestreos de agua de nube en ambientes con alto contenido de partículas presentan problemas especiales en la determinación de la composición química de ésta. Bajo este tipo de ambientes y condiciones es ambiguo hablar únicamente de la composición química del agua de nube como se acostumbra a nivel mundial, debido a que es imposible coleccionar las gotitas de la nube sin coleccionar las partículas intersticiales. Las partículas intersticiales provienen del suelo, existiendo además gases y aerosoles de origen fotoquímico entre las gotitas de una nube. Así, lo que realmente se analiza es la

composición química de la solución final que contiene componentes solubles en agua en las partículas y componentes que estaban originalmente disueltos dentro de las gotitas de la nube. Consecuentemente, se recomienda que el término composición química de la nube sea usado en lugar del término tradicional composición química del agua de nube, debido a que no colectamos únicamente las gotitas de la nube. El colector pasivo funcionó mejor para colectar muestras de agua de nube para su análisis químico. Sin embargo, para determinar el contenido de agua líquida de la nube (CAL) este dispositivo arrojó valores ficticiamente elevados de hasta 0.84 gr/m^3 . Con el colector activo se obtuvieron valores de CAL más realistas (hasta 0.16 gr/m^3), pero también se colectaron muestras de agua de nube mucho más contaminadas. Esto se debió a la mayor velocidad de colección de partículas del colector activo. Los dos resultados o conclusiones más importantes de esta investigación son:

1- Ningún tipo de colector de agua de nube es adecuado para estimar el CAL de las nubes, especialmente el colector pasivo, en regiones tropicales con bajas velocidades del viento, a diferencia de otras regiones en latitudes medias, donde es común colectar muestras de agua de nube bajo condiciones ventosas.

2- El uso del colector activo para muestrear agua de nube para su análisis químico es extremadamente inadecuado en ambientes con altas concentraciones de partículas, puesto que es imposible colectar las gotitas de las nubes sin colectar las partículas intersticiales.

ABSTRACT

The importance of this research is that it was the first one accomplished on cloud and rainwater chemical composition. Also, it set up the basis for future research work to find out the wet deposition of pollutants by cloud water and rain in any place in Mexico where it is possible to undertake such a research. Cloud and rainwater were collected by means of an omnidirectional passive and a Caltech active collectors in Tlamacas (in the Popocatepetl Volcano) and in Teziutlan, a town located in the Sierra Madre Oriental in Puebla State.

Cloudwater presented higher concentrations of ionic species than rainwater. Cloud water mean SO_4^{2-} concentrations were 1.44 and 6.7 mg/L with the passive and active collectors, respectively, in Tlamacas, whereas in Teziutlan they were 8.08 and 8.61 mg/L, respectively. On the other hand, rain water mean SO_4^{2-} concentrations were 2.47 y 2.49 mg/L in Tlamacas and Teziutlan, respectively. The analyzed ions were sulfate, nitrate, chloride, hydrogen, ammonium, calcium, magnesium, sodium and potassium. Although in only two occasions (out of 17 samplings performed in the 2 sampling sites almost at the same time) rainwater presented higher ionic concentrations than cloudwater in Tlamacas; it is given the explanation to this fact.

On the other hand, higher ionic concentrations in cloudwater were found in Teziutlan. Cloudwater samplings in environments with high airborne particles loadings pose special problems for determining its chemical composition. In these environments and conditions it is ambiguous to talk only about cloudwater chemical composition as it is done worldwide, since it is impossible to collect cloud droplets without collecting interstitial particles. These particles come from the soil, besides, there are also gases and aerosols of fotochemical origin among cloud droplets. What it is actually analyzed is the chemical composition of the final solution containing water soluble components in the particles and components originally dissolved within the cloud droplets. Consequently, it is recommended that the term cloud chemical composition be used instead of the traditional term cloudwater chemical composition, because we do not collect cloud droplets only. The passive collector performed better for collecting cloudwater samples for chemical analysis. However, for cloud liquid water content (LWC) determinations this device gave unrealistic high values as high as 0.84 gr/m^3 . With the active collector more realistic LWC values were obtained (as high as 0.16 gr/m^3), but much more polluted cloudwater samples were also collected. This was due to the higher sampling rate of particles by the active collector. Two major conclusions of this research work are:

1-Neither cloudwater collector is suitable to estimate the LWC, specially the passive collector, in tropical regions with low wind speeds, opposite to other regions in midlatitude regions, where it is common to collect cloudwater samples under windy conditions.

2-The use of the active collector to sample cloudwater for chemical analysis is extremely inadequate in environments with high concentrations of particles, since it is impossible to collect cloud droplets without collecting interstitial particles.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En México, especialmente en el Valle de México, sobre cuyos altos índices de contaminación atmosférica tanto se ha hablado y escrito, resulta necesario ampliar nuestros conocimientos de cómo la contaminación atmosférica afecta a la composición química de las nubes. Por ejemplo, si en regiones mucho menos contaminadas como Quebec, Canadá, las investigaciones de Comtois y Schemenauer (1991) sugieren que la contaminación del agua de las nubes afecta la viabilidad del polen de árboles, ¿qué podemos esperar de las condiciones en el Valle de México? Incluso existe la posibilidad de que la deposición húmeda (siendo la intercepción de las gotitas de las nubes por la vegetación un caso especial) pueda modificar la calidad de las aguas subterráneas (Wright y Schindler, 1995). De lo anterior se desprende la importancia de cuantificar la composición química de las nubes, sobre todo en nuestro país, en donde no existen estudios previos al respecto.

Antes de continuar es conveniente definir claramente la precipitación húmeda y la deposición húmeda: la primera se refiere a la lluvia, a la nieve, al granizo, al agua nieve, entre otros fenómenos, y la deposición húmeda es la cantidad (en peso) de un contaminante, arrastrado por la precipitación húmeda, que cae por unidad de superficie y de tiempo. Para calcular la deposición húmeda en un intervalo de tiempo determinado sólo se necesita conocer el promedio ponderado de la composición química del agua de lluvia y la cantidad total de precipitación pluvial en ese mismo intervalo de tiempo. Como antecedente, Báez et al. (1989) estimaron la deposición total (húmeda más seca) de diversos contaminantes en el Bajío. En cuanto más densa sea la red de estaciones meteorológicas y de estaciones colectoras de agua de lluvia más exacta será la estimación de la deposición húmeda de un contaminante sobre una región específica. También se utilizará el término agua de nube depositada que se refiere a la cantidad de

agua de nube que es interceptada por la vegetación cuando las nubes pasan a través del follaje.

En la actualidad se piensa, cada vez con mayor frecuencia, que el deterioro de los bosques en zonas contaminadas se debe a una combinación de los altos niveles de contaminación en el aire y en las nubes (Weathers *et al.* 1988). Estudios previos sobre la composición química de la precipitación húmeda realizados en el Valle de México y en algunas áreas montañosas alrededor de éste, han demostrado una gran variación en la concentración de las especies iónicas (Báez *et al.* 1986, Padilla 1989, Báez *et al.* 1993). Esta variación se observó no solamente entre eventos diferentes de lluvia y de lugar a lugar, sino también dentro de un mismo evento de lluvia, como resultado de la distribución heterogénea de la contaminación atmosférica en el tiempo y en el espacio, aun dentro de áreas relativamente pequeñas. El estudio de la composición química del agua de nubes y nieblas es además necesario para comprender la incorporación de contaminantes del aire a éstas. Esta incorporación es más compleja en regiones montañosas puesto que, con respecto a otras zonas, en estas áreas la dirección del viento varía más abruptamente en la vertical (cizallamiento vertical), como lo han indicado las observaciones de los patrones de movimiento de las nubes. Esta característica física de las regiones montañosas podría conducir a cambios significativos en la composición química del agua de nube y de la precipitación húmeda en función de la altitud. Más aún, las investigaciones hechas por Erisman *et al.* (1988) mostraron variaciones con la altura en la concentración de gases y aerosoles en el aire. Igualmente, Fowler *et al.* (1988) demostraron la influencia de las nubes bajas sobre la composición de la lluvia cuando ésta cae a través de ellas, en Great Dun Fell, Gran Bretaña. Puesto que las regiones montañosas son las fuentes principales de agua dulce en muchas regiones del mundo, una investigación cuidadosa de la variación en su composición química y en su cantidad en dichas regiones tendría una importancia considerable. Esto se debe a que la deposición húmeda y la incidencia de nieblas son elevadas en ciertas zonas montañosas. Lo anterior sería más relevante en algunas de las zonas montañosas de México debido a diversas razones, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

1. Conocer la composición química de las nubes en México en donde no existen investigaciones previas sobre este tema.
2. Entender en qué medida la frecuencia elevada de nubes bajas y espesas contribuye a la deposición húmeda en las superficies de las hojas y de la vegetación en general.
3. La precipitación húmeda es la fuente abastecedora de los glaciares del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl.
4. Para el caso del Valle de México, entender cómo los contaminantes atmosféricos emitidos en la Ciudad de México son incorporados a las nubes y a la precipitación.
5. Por la importancia potencial de aplicar los resultados a proyectos más específicos que contemplan las nubes como fuentes abastecedoras de agua potable para poblaciones pequeñas.

Si bien en las montañas alrededor del Valle de México la cantidad de agua de nube depositada sobre la vegetación no es tan elevada como en la Sierra Madre Oriental, la alta emisión de contaminantes atmosféricos en aquél es responsable de que la deposición húmeda de contaminantes por las nubes sea también muy elevada. Esto es, la menor cantidad de agua de nube depositada está compensada por su mayor concentración de contaminantes.

Cada vez es mayor el interés sobre los efectos de la deposición húmeda de ácidos minerales en los ecosistemas forestales. No es fácil establecer una conexión definida y directa entre la deposición húmeda de contaminantes y el decaimiento de los bosques en zonas donde además existe una elevada contaminación atmosférica por gases y aerosoles. Sin embargo, sólo la posibilidad de que la lluvia ácida, ya sea por sí misma o junto con la contaminación del aire, contribuya a los daños observados en algunos bosques alrededor del Valle de México (especialmente en el Desierto de los Leones), justificaría este proyecto. Otra explicación de estos daños es la intercepción de las gotitas de nube o niebla por las hojas. Por ejemplo, se sabe que las gotitas de niebla contienen concentraciones mayores de contaminantes que el agua de lluvia (Hileman 1983). Lo anterior daña directamente la superficie de las hojas (Fowler *et al.* 1989). Algunos investigadores han estudiado el mecanismo mediante el cual se realiza la deposición

húmeda de contaminantes en los bosques por las nubes (Barrie y Schemenauer 1986, Joslin *et al.* 1990). De hecho, aunque no se ha colectado agua de nube en el Desierto de los Leones se anticipa que ésta debe estar muy contaminada, puesto que esta región se encuentra viento abajo de la Ciudad de México, y al hecho de que existe lluvia ácida en el área (Padilla 1989), en donde el pH promedio fue de 4.72. Recordar que como el agua de nube presenta mayor concentración de contaminantes que la de lluvia, la presencia de lluvia ácida en Desierto de los Leones indica la presencia de elevados niveles de contaminación en el agua de las nubes

Hasta la fecha ha sido más estudiada la composición química de la precipitación pluvial que la del agua de las nubes. Incluso en los Estados Unidos, pocos datos sobre este tema estaban disponibles y ninguna investigación coordinada existía hasta 1984 (Weathers *et al.* 1988). Schemenauer (1986) realizó una revisión bibliográfica y discusión de las investigaciones anteriores sobre la composición química de las nubes, así como un resumen de las actividades del proyecto "Chemistry of High Elevation Fog" (CHEF) en Canadá. En esta publicación Schemenauer enfatiza que como parte del problema de la lluvia ácida, la deposición húmeda debe incluir la contribución del agua de niebla al igual que la de la precipitación.

Como ya se mencionó, la deposición de contaminantes en los bosques por las gotitas de las nubes, cuando son interceptadas por las hojas, es un caso especial de deposición húmeda. De hecho, se ha llegado a considerar a la deposición de las gotitas de nube como un mecanismo intermedio entre la deposición seca y la húmeda. La tasa de colección de agua de nube mediante este proceso representa el 40% de la cantidad de lluvia en el monte Hohenpeissenberg en Bavaria y el 35% en Eifel y en las montañas Vogelsberg, a 600 metros sobre el nivel del mar en Alemania. Por su parte, la deposición del agua de nube equivale a 3200 mm en la montaña Table, cerca de Ciudad del Cabo, mientras que la precipitación pluvial es de 1940 mm al año (Georgii *et al.* 1986).

Como característica relevante encontrada en las regiones en donde se han podido realizar estos estudios como el noreste y oeste de los Estados Unidos, sureste de

Canadá, Inglaterra y Alemania, está el hecho de que el agua de nube presenta mayor concentración de contaminantes que la precipitación pluvial.

En México, Vogelmann (1973) estimó la cantidad de agua que las nubes aportan a la vegetación de la Sierra Madre Oriental. Vogelmann reportó que el agua de las nieblas es importante para el desarrollo y mantenimiento de ciertos tipos de vegetación. Por otro lado, las únicas investigaciones sobre la microfísica de las nubes en México fueron publicadas por García y Montañez (1991 y 1992) quienes obtuvieron el espectro de las gotitas de nube para los muestreos realizados en enero de 1991 en la Sierra Madre Oriental. Los resultados mostraron que aunque el número de gotitas con diámetro mayor que 50 μm representa menos del 1% de la concentración total obtenida, su contribución al contenido de agua líquida (CAL) de la nube es comparable al de las gotitas menores a este diámetro. Los resultados en detalle se encuentran en García y Montañez (1992). En términos prácticos lo anterior quiere decir que tanto las gotitas de diámetros mayores como las de diámetros menores que 50 μm contribuyen de manera importante a la cantidad de agua de nube depositada sobre la vegetación. Sin embargo, si sólo se piensa en el número de gotitas, las gotitas mayores que 50 μm aportan casi toda el agua depositada.

Habiendo expuesto lo anterior es oportuno definir lo que es la niebla. Estrictamente, la niebla es una nube a nivel del suelo. Sin embargo, esta definición da lugar a confusiones. Por consiguiente, es necesario entrar en detalles acerca de los diferentes tipos de nieblas que existen, los cuales se encuentran definidos en el "International Meteorological Vocabulary" publicado por la W.M.O. en 1992. Esta clasificación se hace con base en los procesos meteorológicos que producen la condensación del vapor de agua. Así, una nube a nivel del suelo en las laderas orientales de la Sierra Madre Oriental a lo largo de prácticamente toda su extensión de norte a sur es una combinación de niebla de ladera y de aire tropical, en las montañas alrededor de la Ciudad de México es una niebla de montaña y en el fondo de un valle es una niebla baja.

Por supuesto que existen nieblas producidas por otros procesos, como las marinas, por advección de una masa de aire caliente sobre agua fría y de otros tipos (Jiusto, 1981). En este proyecto nos ocuparemos solamente de las nieblas de ladera, de aire tropical y de montaña. Las definiciones de los diferentes tipos de nieblas están en el "International Meteorological Vocabulary" de la W.M.O.

Las redes de monitoreo de la composición química de la precipitación húmeda han sido comúnmente diseñadas para obtener medidas representativas de la composición química promedio de la precipitación a nivel regional. Sin embargo, para calcular la deposición húmeda no sólo se necesitan estas medidas sino también los datos de las cantidades de precipitación húmeda, los cuales tienen poca resolución en el espacio. De aquí que es imprescindible generar también información precisa y con mayor resolución en el espacio de la cantidad de precipitación pluvial.

En general, se ha demostrado que las concentraciones promedio de los iones sulfato, hidrógeno, nitrato y amonio varían en menor grado que la cantidad de precipitación (Fowler *et al.* 1988). Sin embargo, en las regiones montañosas esto no es válido, debido a que es en estas regiones donde la precipitación y la variación horizontal de la cantidad de precipitación frecuentemente es mayor que en las grandes regiones con poco relieve. Desafortunadamente, en las regiones montañosas se han realizado pocas mediciones de la precipitación (especialmente en zonas tropicales). Para estimar la deposición húmeda en regiones elevadas en el noroeste de la Gran Bretaña, en Escandinavia y en Europa continental, se ha supuesto que la composición química de la lluvia permanece constante con la altitud (Fowler *et al.* 1988). Por estas razones en las zonas montañosas lluviosas y bajo la influencia de la contaminación atmosférica, es muy alta la deposición húmeda de los iones hidrógeno, sulfato, nitrato y amonio, entre otros, dando como resultado una interacción química con el suelo y por consiguiente una alteración en el crecimiento de los árboles.

Cabe mencionar que los iones inorgánicos que se encuentran en mayor concentración tanto en el agua de las nubes como en la precipitación pluvial y que son comúnmente

analizados en la mayoría de las investigaciones realizadas hasta el presente a nivel mundial, son los iones hidrógeno, amonio, calcio, magnesio, potasio, sodio, nitrato, sulfato y cloruro (Munger *et al.* 1990, Muir 1991, Collett 1989, Lazrus *et al.* 1983, Pratt *et al.* 1984, Stensland *et al.* 1982). Debido a que estos iones son los que se encuentran en mayor concentración, su análisis químico permite calcular el balance iónico (un método de control de calidad de los datos de composición química). El ion bicarbonato se analiza con menor frecuencia debido a que sólo se encuentra en concentraciones apreciables cuando el pH de las muestras es superior a 6 (recordar que el pH de neutralidad de las muestras de agua de nube o de lluvia es alrededor de 5.6, como consecuencia de la ligera acidez que produce la disolución del bióxido de carbono, dando ácido carbónico).

Se espera encontrar diferencias significativas entre la composición química de la precipitación húmeda y la de las gotitas de la nube entre una región montañosa y otra, y entre diferentes alturas, debido a que se ha observado que las nubes bajas (principalmente estratos) se desarrollan en masas de aire que son diferentes, desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, a aquéllas en donde se desarrollan otras nubes más altas de desarrollo vertical. En lo que se refiere a la relación entre la composición química de las nubes y de la lluvia, este proyecto también generó una base de datos que constituye la base para explicar, por ejemplo, el deterioro de algunos bosques cercanos a la Ciudad de México.

1.2 OBJETIVO

Lo expuesto en la sección anterior da relevancia al estudio de la composición química de la precipitación húmeda, ya sea como precipitación pluvial o como agua de nube. La gran diversidad de climas en México obliga al menos a muestrear zonas montañosas representativas de los climas más extendidos en el país. De aquí que el objetivo fundamental que se pretende lograr en una investigación de esta clase es:

Conocer la composición química del agua de nube en algunas zonas montañosas de México y comparar la composición química de las nubes con la de la precipitación pluvial entre sí y entre las zonas de estudio.

Otro objetivo práctico y de gran importancia es:

Evaluar las ventajas y desventajas de las diferentes metodologías de colección de agua de nube al ser aplicadas en zonas montañosas tropicales, bajo los siguientes enfoques:

- a. Efecto del tipo de material y de colector (pasivo o activo) en la composición química de las muestras de agua de nube.
- b. Estimación del contenido de agua líquida de las nubes.
- c. Cantidad de agua de nube colectada por unidad de área y de tiempo (dicha cantidad no es la eficiencia de colección pero está íntimamente relacionada con ésta).

El cumplimiento de estos objetivos es de importancia relevante para diseñar futuros proyectos de investigación más complejos como, por ejemplo, la comparación de la composición química del agua de nube en diferentes regiones bajo la influencia de un manto nuboso a escala regional, así como proyectos de Ingeniería Ambiental, que contemplen el uso de colectores de agua de nube en forma masiva para suministrar de agua potable a pequeñas comunidades en México en donde la precipitación pluvial sea escasa pero con cierta incidencia de eventos de niebla, y en donde la disponibilidad de agua subterránea no sea viable. Como ejemplo de estos lugares en México se encuentra la Península de Baja California. Evidentemente existen otras regiones montañosas en el país que presentan una frecuencia de nieblas mucho mayor. Sin embargo, como la precipitación pluvial es elevada, la cantidad de agua que se obtendría del agua de nube es despreciable en comparación con la que se obtendría de la de lluvia, por lo que no tendría sentido coleccionar el agua de nube. Además, es más fácil coleccionar el agua de lluvia.

El presente trabajo fue estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presentan los criterios de selección de los sitios de muestreo para coleccionar agua de nube y se

señala cuáles fueron los sitios finalmente escogidos. Igualmente, se presentan las metodologías e instrumentación para coleccionar agua de nube y de lluvia, así como las técnicas de análisis químicos realizados a las muestras coleccionadas. En el capítulo 3 se muestran los datos obtenidos y la discusión e interpretación de los mismos. En el capítulo 4 se resumen las conclusiones más importantes obtenidas en vista de los objetivos propuestos.

2. MÉTODOS

Para contar con sitios de muestreo que se encuentren en regiones con diferentes climas (ver objetivos), se decidió llevar a cabo los estudios en un punto en la Cordillera Neovolcánica, y en otro en la Sierra Madre Oriental.

Los muestreos de agua de nube se realizaron con diferentes tipos de colectores para tratar de entender mejor los mecanismos de colección y para probar su funcionamiento. Los equipos de muestreo que se utilizaron en este estudio ya habían sido exhaustivamente probados en regiones de latitudes medias; sin embargo, en regiones tropicales no se contaba con la experiencia suficiente. Se encontró que dichos equipos presentaron desventajas específicas según su tipo las cuales no habían sido detectadas en latitudes medias debido a que las condiciones meteorológicas son completamente diferentes.

En el presente capítulo, se hace una descripción detallada de los sitios de muestreo y se discuten los criterios de selección de los mismos. Además, se presentan y discuten los detalles de la metodología, las técnicas de muestreo y de análisis, así como la instrumentación utilizada.

2.1 SITIOS DE MUESTREO

El sitio de muestreo seleccionado debe satisfacer tres condiciones fundamentales para muestrear agua de nube:

a.- Que se encuentre a una altitud suficiente para poder estar por encima de las bases de las nubes (sean convectivas, orográficas o estratiformes) durante el tiempo suficiente para coleccionar una cantidad de muestra adecuada para realizar los análisis químicos descritos en la Sección 2.4. La colección del agua de nube es un proceso lento, el cual requiere de varias horas en ciertas condiciones, dependiendo de la estructura física de las nubes y de la velocidad del viento.

b.- Que sus alrededores inmediatos estén libres de cualquier obstáculo (como árboles o estructuras) que pudieran contaminar la muestra o interferir con la colección de agua de nube.

c.- Que presente seguridad y la infraestructura mínima para colocar el muestreador, el cual permanecerá a la intemperie durante varios días. Además, debe de contar con energía eléctrica para los colectores activos de agua de nube.

Para elegir un sitio de muestreo en la Cordillera Neovolcánica, se consideraron la Sierra del Ajusco, el Desierto de los Leones y los Volcanes Popocatepetl e Iztacíhuatl, todos ellos aledaños al Valle de México. Los criterios de selección b y c eliminaron al Ajusco y al Desierto de los Leones como puntos de muestreo. Por el contrario, Tlamacas (en el Popocatepetl) cumple con los tres requisitos, con la ventaja de que se encuentra a una altura sólo igualada por las regiones más inaccesibles de los otros dos sitios considerados. Adicionalmente, la región de los volcanes es un punto estratégico por encontrarse viento arriba de la Ciudad de México en la temporada de lluvias, con lo que en el futuro se podrán establecer comparaciones interesantes con las regiones montañosas viento abajo, como por ejemplo la Sierra de las Cruces.

El segundo sitio de muestreo elegido fue Teziutlán, población que se encuentra en las laderas orientales de la Sierra Madre Oriental, en el estado de Puebla. Teziutlán está alrededor de los 2000 msnm, en donde los episodios frecuentes de niebla aportan una cantidad apreciable de agua a la vegetación (Vogelmann, 1973). La Sierra Madre Oriental está sometida a una alta frecuencia de nieblas y a precipitaciones de más de 1000 mm, siendo en algunas regiones superiores a 4000 mm. También se seleccionó Teziutlán para tener la oportunidad de muestrear nubes con carácter oceánico (en el Popocatepetl se presentan nubes con características continentales) debido a que se encuentra a barlovento, frente a las planicies costeras del Golfo de México. Además, Teziutlán cumple con los tres requisitos de selección y sobre todo, la región en donde se encuentra aparentemente cumple con las características de una zona de control a saber:

a.- Tener una contaminación atmosférica relativamente baja.

b.- Estar bajo la influencia de distintos tipos de nubes y masas de aire.

El proyecto en su totalidad fue realizado durante la estación de lluvias en el Popocatepetl. En Teziutlán, las nieblas pueden presentarse casi todo el año, pero los muestreos se realizaron principalmente de noviembre a enero, cuando la frecuencia de nieblas es máxima. En las montañas del Altiplano Mexicano, sólo en la estación de lluvias (junio-octubre) se presentan nubes con la frecuencia necesaria como para obtener un número de muestras de agua de nube tal que permita obtener datos representativos de la región en cuestión.

A continuación se presenta un mapa de localización de los puntos de muestreo (fig 1).

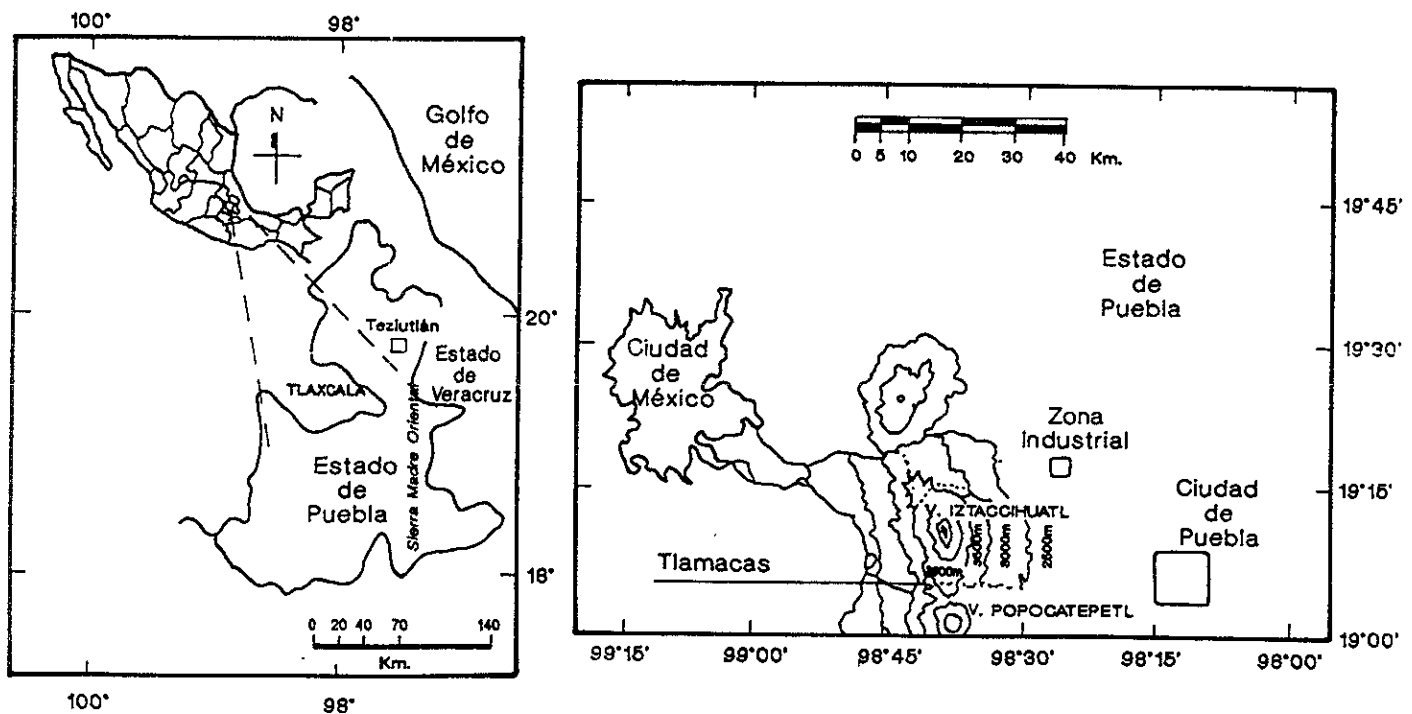


Fig.1. Mapa de localización de los sitios de muestreo

2.2 TÉCNICAS DE MUESTREO E INSTRUMENTACIÓN

2.2.1 Muestreo de agua de nube

El agua de nube fue colectada por medio de colectores pasivos y activos. El funcionamiento de los del primer tipo depende en forma crítica de la velocidad natural del viento, pero una gran ventaja es que es muy fácil instalarlos, siendo esto especialmente valioso en lugares de difícil acceso como la alta montaña. Su principal desventaja es que, cuando llueve, las muestras de agua de nube colectadas se mezclan con el agua de la lluvia. Otros investigadores ya han utilizado esta clase de colectores (Hileman 1983, Schemenauer *et al.* 1987, Olszyna *et al.* 1988, Fowler *et al.* 1988, Schemenauer y Joe 1989).

El colector pasivo más común es el omnidireccional utilizado por Winters *et al.* (1979), Schemenauer (1986), Mohnen y Kadlecek (1989) y Joslin *et al.* (1990), por citar algunos casos. Este colector tiene forma cilíndrica y consiste de una doble pantalla de hilos de teflón de 0.4 mm de diámetro dispuestos verticalmente, separados por espacios de 3 mm. Este diseño tiene la gran ventaja de que, al ser cilíndrico, no importa que la dirección del viento cambie constantemente durante el muestreo, pues su dirección siempre quedará perpendicular a la superficie de colección. Otro colector pasivo fue desarrollado por Schemenauer *et al.* (1987), el cual consiste en una pantalla cuadrada de 50 por 50 cm con hilos de teflón, montada en una veleta para que quede perpendicular a la dirección del viento.

En la construcción de los colectores activos se emplean materiales y diseños similares a los de los colectores pasivos. Son operados por motores de aspiración para facilitar que las gotitas de las nubes se impacten en la superficie colectora, necesitándose por consiguiente de una instalación eléctrica, por lo que su uso puede verse severamente restringido. Otra desventaja adicional es que se debe tener cuidado al interpretar la composición química de las muestras de agua de nube debido a que existen riesgos de evaporación y de una modificación de las propiedades termodinámicas originales del aire

al comprimirse cuando entra al colector (Schemenauer, comunicación personal). Sus principales ventajas consisten en que son de especial utilidad cuando existen velocidades de viento muy bajas y en que impiden un mezclado entre el agua de nube y de lluvia.

El colector activo más utilizado es el desarrollado por Jacob *et al.* (1985), que consiste en una doble pantalla de hilos de teflón de 0.4 mm de diámetro dispuestos verticalmente. Esta pantalla está colocada en el extremo de un ducto y en el otro extremo se coloca un extractor de aire con una capacidad de 22 m³/min de 1/3 HP. El extractor, al succionar el aire, lo obliga a pasar entre los hilos de teflón, produciéndose la impactación de las gotitas de nube las cuales, al acumularse sobre los hilos, resbalan por éstos para posteriormente ser colectadas en una botella. Una descripción completa de estos dispositivos se encuentra en Jacob *et al.* (1985), en Hering *et al.* (1987) y en deFelice y Saxena (1990); y existen también diseños que son operados en aviones (Scott 1978).

En el capítulo 3 se tratarán las características específicas de los colectores que fueron utilizados en los trabajos de campo de esta investigación, mientras que los principios hidrodinámicos detrás de la colección de las gotitas de nube serán tratados a continuación.

2.2.2 Principios físicos de colección del agua de nube

Tanto en los colectores pasivos como en los activos, se aplican las mismas leyes físicas que gobiernan las trayectorias e impactación de las gotitas de las nubes. Con el objeto de facilitar la discusión expuesta, se empleará el término cantidad total de agua líquida (M) presente en el volumen estimado (V) de aire muestreado para referirse a la cantidad de agua líquida que la nube tiene en dicho volumen y así distinguirlo de la cantidad de agua líquida que la nube tiene por metro cúbico de aire o, simplemente, contenido o concentración de agua líquida de la nube (CAL), que es el término clásico utilizado en física de nubes. Naturalmente, M depende del volumen de aire muestreado, mientras que CAL es independiente por ser un parámetro físico intrínseco a la nube.

Antes de entrar en materia, conviene definir la eficiencia de colección. Esta es el cociente de la masa de agua colectada por el instrumento (m), entre la cantidad total de agua líquida (M) en el volumen de aire (V) muestreado de aire; o bien, es el cociente de la cantidad o masa de agua colectada por metro cúbico de aire muestreado (m/V), entre el contenido o concentración de agua líquida de la nube (CAL). Entrando en detalles, la eficiencia de colección puede ser calculada de acuerdo a dos enfoques diferentes:

1.- Aplicando la metodología de Hindman *et al.* (1992) para calcular la eficiencia de colección, es necesario primero medir el área transversal (a) de todos los hilos del colector, esto es, el diámetro de los hilos multiplicado por su longitud. Ahora bien, si se multiplica esta área transversal por la velocidad del viento (v) y por el tiempo que dura la colección de la muestra de agua de nube (Δt), se obtiene el volumen estimado de aire (V_1) que es interceptado por los hilos o filamentos. Por otro lado, si se conoce la cantidad total de agua líquida (M_1) que la nube tiene en este volumen de aire junto con la cantidad de muestra obtenida (m), la eficiencia de colección está dada por el cociente m/M_1 . Tomando en cuenta sólo las gotitas mayores o iguales al diámetro de corte (diámetro de las gotitas colectadas con un 50% de eficiencia) entonces, según Hindman *et al.*, la eficiencia de colección es 100% para fines prácticos. Este criterio se basa en el hecho de que si los hilos colectores se encuentran en las trayectorias de las gotitas grandes (mayores que el diámetro de corte) habrá colisión (impactación) en prácticamente todas las ocasiones. Lo anterior quiere decir que la masa de agua colectada equivale a la suma de la de todas las gotitas de la nube mayores que el diámetro de corte. Naturalmente, si se considera todo el espectro de distribución de las gotitas, es decir, si también se incluyen las gotitas cuyos diámetros son menores que el de corte, la eficiencia de colección será menor del 100%.

2.- En lugar del área transversal de todos los hilos del colector, consideremos el área transversal TOTAL (A) de la superficie de colección perpendicularmente expuesta a la dirección del viento. Se debe entender que en el caso de una superficie cilíndrica esta área NO equivale a la suma del área transversal (a) de los hilos y de los huecos entre éstos por el simple hecho de que, dicha suma, consideraría también la parte posterior del colector. Si multiplicamos el área (A) por la velocidad del viento y por el tiempo que dure

el muestreo del agua de nube, se obtiene el volumen de aire (V_2) que pasa perpendicularmente a través del colector. Lógicamente, este volumen es mayor que el obtenido en el caso del primer enfoque. En este caso, la eficiencia de colección está dada por el cociente entre la cantidad de muestra de agua de nube obtenida (m) y la cantidad total de agua líquida (M_2) que la nube tiene en el volumen de aire que pasa a través de toda la superficie de colección (m/M_2). Bajo estas condiciones, aun para las gotitas con diámetros mayores que el diámetro de corte, la eficiencia de colección siempre será menor que el 100%, simplemente debido a que las gotitas que pasan a través de los espacios huecos de la superficie colectora no son interceptadas. Dicho de otra manera, la cantidad de muestra de agua de nube obtenida es igual que en el caso anterior (primer enfoque) pero, como el volumen de aire (V_2) que pasa a través de toda la superficie colectora es mayor que el interceptado por los hilos (V_1), entonces el número de gotitas de nube contenidas en V_2 lógicamente también es mayor. Por lo tanto, $m/M_2 < m/M_1$.

En física de nubes se calcula la eficiencia de colección de agua de nube bajo el punto de vista de la segunda interpretación. En la presentación de resultados y su discusión, se explicará la razón de esto. Adicionalmente, la segunda interpretación tiene la aplicación práctica de servir de base para calcular las dimensiones que debe de tener un colector para obtener una cantidad determinada de agua de nube. A pesar de esto, también se tomó en cuenta el primer enfoque debido a que frecuentemente es considerado en trabajos de investigación, probablemente en virtud de que simplemente las gotitas de nube que pasan entre los hilos colectores no son colectadas.

La cantidad o masa total de agua líquida que la nube tiene en el volumen total de aire muestreado por el colector y la concentración de agua líquida de la nube por metro cúbico de aire, se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$M_1 = (CAL) * V_1 \tag{1}$$

ó

$$M_2 = (CAL) * V_2$$

La concentración de agua líquida (CAL) de la nube se expresa en gramos por metro cúbico y se calcula a partir de la distribución o espectro de las gotitas de la nube. Esta distribución puede determinarse mediante el Espectrómetro de Dispersión Frontal (FSSP las siglas en inglés para "Forward Scattering Spectrometer Probe"), capaz de detectar gotitas con diámetros entre 2.5 y 70 micras, y el Espectrómetro de Arreglo Óptico (OAP, del inglés "Optical Array Probe") para gotitas más grandes (Knollenberg, 1976). El FSSP calcula el tamaño de las gotitas midiendo la cantidad de luz dispersada dentro de la apertura de la óptica colectora durante el paso de las gotitas a través de un rayo láser. En el OAP, las gotitas pasan a través de una fuente de luz generada por un tubo láser, produciendo una sombra sobre un arreglo lineal de fotodiodos. El tamaño de cada gotita es determinado electrónicamente contando el número de sensores de luz que son oscurecidos en más de un 50% por la sombra de la gotita.

Es importante mencionar que los instrumentos hasta aquí mencionados presentan ciertos problemas debido a que los tamaños de las gotitas de la nube son medidos por intervalos, presentando de esta manera una distribución por intervalos en lugar de una distribución continua. Sin embargo, existe otro método más apropiado para medir el contenido o concentración de agua líquida de la nube. Este método se basa en un instrumento cuyo principio de operación consiste en mantener la intensidad de corriente (o voltaje) constante en un circuito al entrar las gotitas en contacto con un "hilo" caliente y evaporarse. A estos dispositivos se les conoce con el nombre de "King probe" o "Johnson-Williams LWC probe" (Neel, 1973, King et al., 1978, Baumgardner, 1983, Huebert y Baumgardner, 1985, King et al. 1985). Estos instrumentos presentan además la gran ventaja de ser mucho más económicos. Pueden ser operados en nubes con un CAL de hasta 4 gr/m^3 . Como originalmente se operaban en aviones, una desventaja es que es necesario implementar algún mecanismo mediante el cual se haga pasar una corriente de aire a través del dispositivo.

Parece sencillo obtener la eficiencia total de un colector de agua de nube, pues además de conocer el volumen de aire muestreado sólo se necesita conocer dos parámetros: la cantidad de muestra de agua de nube colectada (m) y la concentración de agua líquida

de la nube. Sin embargo, la obtención de este último parámetro presenta gran complejidad, requiriéndose de alguno de los equipos mencionados anteriormente. Con esta información, es necesario calcular la cantidad de agua con la que contribuye por separado cada grupo de gotitas a la masa total y, finalmente, integrar todas las contribuciones individuales por intervalo de tamaño de gota (si se trata del FSSP o del OAP). Según Hindman *et al.* (1992), como ya se mencionó anteriormente, para las gotitas con diámetros mayores que el diámetro de corte, la cantidad de agua colectada equivale a la cantidad de agua que contienen estas gotitas. Por lo tanto, en este caso particular, el cálculo del contenido de agua líquida de la nube se deriva directamente de la cantidad de muestra colectada dividida entre el volumen total de aire muestreado, el cual obviamente es función la velocidad del viento. También, como se verá más adelante, el diámetro de corte es función de la velocidad del viento, entre otras cosas. Para las gotitas que comprenden todo el espectro de la nube, el contenido de agua líquida se obtiene con el equipo mencionado anteriormente. En este caso, para calcular la eficiencia de colección se necesita conocer también el volumen de aire muestreado. De aquí que el problema en las mediciones de campo es el obtener un registro exacto y continuo de la velocidad del viento durante todo el tiempo que dure el muestreo. Por lo tanto, la eficiencia de colección es:

$$E = \frac{m}{(CAL)*V_1} \quad (2)$$

ó

$$E = \frac{m}{(CAL)*V_2}$$

donde $(CAL)*V_1 = M_1$ y $(CAL)*V_2 = M_2$

De lo anterior se infiere inmediatamente que la única forma de conocer realmente la eficiencia de un colector es a partir de la medición directa del CAL en paralelo con la colección del agua de nube para su análisis químico en cada campaña de muestreo. Dicho lo anterior, parece suficiente calcular, por una sola ocasión, la eficiencia de colección (E) de un colector de agua de nube con ayuda de la información obtenida de

los espectrómetros de gotas de acuerdo a ecuación 2. Sin embargo, el utilizar la eficiencia obtenida a partir del CAL medido con los espectrómetros para un muestreo dado para estimar el CAL de las nubes para otros muestreos, sólo sería válido si el espectro de las gotitas (o, en otras palabras, si la estructura física de las nubes) fuera siempre la misma. Desafortunadamente, las características microfísicas varían de una nube a otra, e incluso dentro de una misma nube. De aquí que, como la eficiencia de colección es función del tamaño de las gotitas (entre otras cosas), ésta variará continuamente, siendo necesario medir el espectro de las gotitas en cada muestreo, si lo que se quiere es calcular la eficiencia de colección para todas las gotitas en conjunto de la nube en forma rigurosa. A falta de una medición directa del CAL, para las gotitas mayores que el diámetro de corte lo mejor que se puede hacer para estimar el CAL es despejarlo de la ecuación 2. En esta estimación del CAL se está asumiendo que las gotitas mayores que el diámetro de corte son colectadas con una eficiencia de 100%. Nótese sin embargo, que el valor del CAL es ambiguo según se aplique V_1 o V_2 , lo que hace que la estimación del CAL siga presentando problemas por la simple razón de que en realidad el CAL es una cantidad independiente de las condiciones del muestreo. Más aún, si se considera el espectro completo de las gotitas de la nube, la estimación del CAL a partir de este procedimiento es todavía más inexacto en virtud de que las gotitas menores que el diámetro de corte son ineficientemente colectadas. Para remarcar lo expuesto en párrafos anteriores, y en virtud de que Hindman *et al.* (1992) considera que la eficiencia de colección de las gotitas mayores que el diámetro de corte es del 100%, obviamente no es necesario medir el espectro de gotas de nubes para calcular la eficiencia de colección para las gotitas de estos tamaños. Pero si se quiere conocer el CAL y la eficiencia de colección es forma más exacta, los medidores del CAL de "hilo" caliente son de un gran valor. Como su costo es bajo, podrían ser utilizados no solamente para cada muestreo de agua de nube en particular, sino que además para varios muestreos simultáneos. Esto último permitiría estudiar la distribución espacial del CAL dentro de una nube.

Otro aspecto importante es el cálculo del tiempo que se necesita exponer el colector para coleccionar una cantidad determinada de agua de nube. Como se ha estado mencionando,

el contenido de agua líquida de la nube en (g/m^3) para las gotitas mayores que el diámetro de corte, equivale a la cantidad total de agua colectada (m) durante el tiempo de muestreo, entre el volumen estimado de aire muestreado (V_1 o V_2). Este volumen puede expresarse en función de la velocidad del viento y de la geometría del colector, como sigue:

$$\begin{aligned} V_1 &= v * a * \Delta t \\ &\text{ó} \\ V_2 &= v * A * \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

donde v es la velocidad del viento en m/s ; a es el área efectiva del colector (área transversal de todos los hilos en conjunto), A es el área total transversal del colector en m^2 ; y Δt es el tiempo transcurrido de muestreo (en segundos).

Substituyendo en la ecuación (1) y despejando CAL se obtiene:

$$\begin{aligned} CAL &= \frac{m}{v * a * \Delta t} \\ &\text{ó} \\ CAL &= \frac{m}{v * A * \Delta t} \end{aligned} \quad (4)$$

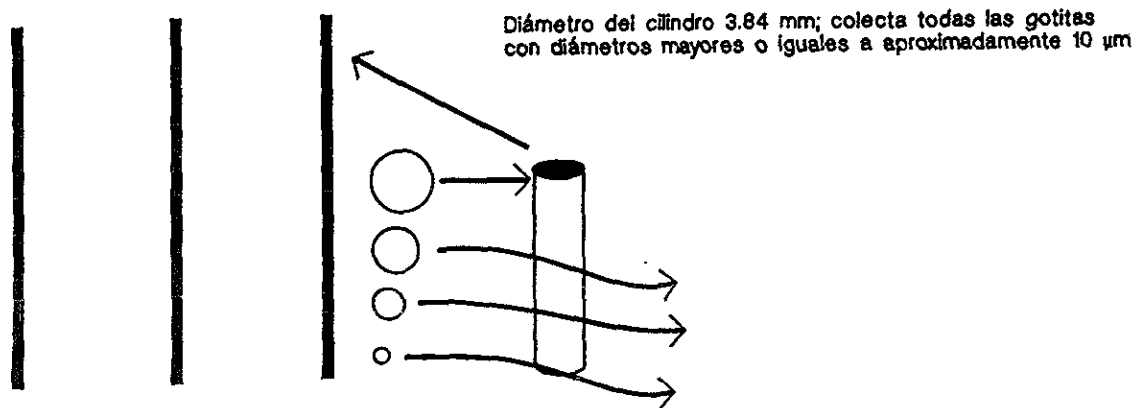
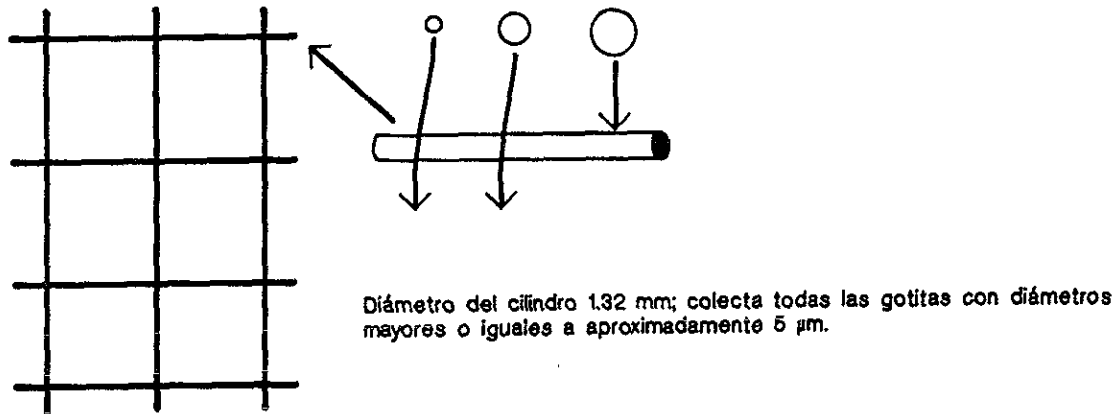
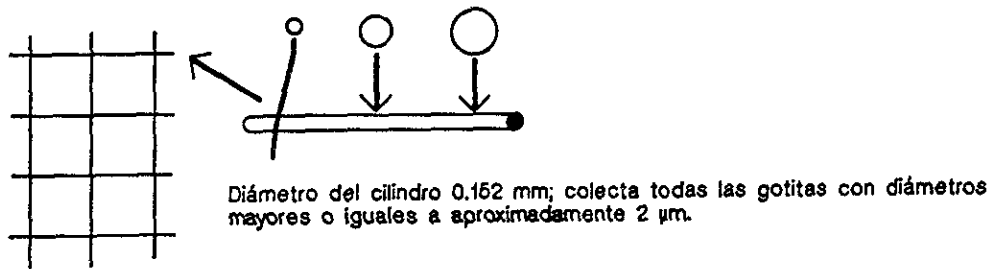
Es aquí donde claramente se aprecia la ambigüedad de la estimación del CAL mencionada en párrafos anteriores. Lógicamente, si se aplica A , el contenido de agua líquida de la nube (CAL) calculado a partir de la cantidad total de muestra (m) disminuirá. Esto se verá en detalle en el siguiente capítulo.

Si el tiempo de muestreo está dado en minutos la ecuación anterior queda:

$$\begin{aligned} CAL &= \frac{m}{60 * v * a * \Delta t} \\ &\text{ó} \\ CAL &= \frac{m}{60 * v * A * \Delta t} \end{aligned} \quad (5)$$

Lo hasta aquí expuesto se entenderá mejor analizando en detalle el fenómeno de la intercepción de las gotitas por una superficie cilíndrica. La eficiencia de colección está relacionada con la velocidad del viento, el diámetro de las gotitas y el de los hilos de la superficie colectora (Mohnen y Kadlecek, 1989).

La eficiencia de colección aumenta al aumentar la velocidad del viento y el diámetro de las gotitas y al disminuir el diámetro de los hilos. Hindman *et al.* (1992) explican de una manera muy clara cómo a medida que el diámetro de los hilos se incrementa, la eficiencia de colección de las gotitas pequeñas disminuye progresivamente. Esto está esquematizado en la siguiente figura 2:



Principios de las mallas colectoras de agua de nube. Los diámetros de las gotitas son colectadas con una eficiencia de 50 %. Los diámetros de corte son válidos para las siguientes condiciones: Velocidad del viento 9.5 ms^{-1} , temperatura 10°C y presión 700 mb (Hindman *et al.* 1992)

Las ecuaciones que cuantifican estos principios son examinadas a continuación. El trabajo de Langmuir (1961) es pionero en el tratamiento matemático de las trayectorias de las gotitas de agua. Stallabrass (1978) y Hindman *et al.* (1992) resumen claramente lo más importante de este trabajo y, por lo tanto, son las referencias básicas de esta sección.

El diámetro de corte (diámetro de las gotitas colectadas con un 50% de eficiencia) se calcula a partir de:

$$d_{50} = \psi^{1/2} \left[\frac{\gamma \rho v}{18 \eta d_c} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

donde $\psi^{1/2}$ es la raíz cuadrada del número de Stokes, cuyo valor es 0.9 para una eficiencia del 50%; d_{50} es el diámetro de corte en cm; γ es la corrección de deslizamiento, la cual es casi 1 para las gotitas de las nubes; ρ es la densidad de las gotitas en g/cm^3 , también es casi 1 para las gotitas de las nubes; η es la viscosidad dinámica del aire en $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$; v es la velocidad del viento en cm/s ; y d_c es el diámetro de los hilos o filamentos colectores en cm. ψ es una medida de la inercia de las gotitas y varía en relación a la densidad y aumenta con su tamaño.

El parámetro de inercia K está dado por:

$$K = \frac{\rho v d^2}{9 \eta d_c} \quad (7)$$

donde d es el diámetro de las gotitas en cm; d_c es el diámetro de los hilos colectores en cm; v y η tienen el mismo significado que en la ecuación (6); ρ es la densidad de las gotitas en g/cm^3 .

Otro parámetro que se va a necesitar en las ecuaciones para calcular las eficiencias de colección, es el número de Reynolds, dado por:

$$\text{Re} = \frac{2r \rho_{\text{aire}} v}{\eta} \quad (8)$$

donde r es el radio de las gotitas en cm; y ρ_{aire} es la densidad del aire en g/cm^3 .

La densidad del aire seco está dada por:

$$\rho_{\text{aire}} = 0.348 \cdot 10^{-3} \left(\frac{P}{T} \right) \quad (9)$$

Es importante señalar que aunque en la bibliografía se hace referencia a la densidad del aire seco (ecuación 9), sería más exacto considerar la densidad del aire húmedo, por el simple hecho de estar dentro de una nube. De esta manera para el aire húmedo tenemos:

$$\rho_{\text{airehmedo}} = 0.348 \cdot 10^{-3} \left(\frac{P}{T_v} \right) \quad (10)$$

donde T_v es la temperatura virtual dada por (Hess, 1959):

$$T_v = \left(\frac{1 + 1.609w}{1 + w} \right) T = T(1 + 0.61w) \quad (11)$$

donde w es la razón de mezcla del vapor de agua.

La temperatura virtual está definida como la temperatura que tendría el aire seco si su presión y volumen específico fueran iguales a los de una muestra dada de aire húmedo. Si se está muestreando agua de nube, lógicamente se debe de usar la razón de mezcla de saturación del vapor de agua. Nótese que lo único que hay que hacer es substituir T_v por T en la ecuación (9).

La constante $0.348 \cdot 10^{-3}$ resulta de los siguientes cálculos:

$$R = \frac{8.314 \cdot 10^3 \left(\frac{J}{\text{kmol} \cdot K} \right) 10^7 \left(\frac{\text{erg}}{J} \right)}{\left(\frac{29 \text{ kg}}{\text{kmol}} \right) 10^3 \left(\frac{g}{\text{kg}} \right)} = 0.2867 \cdot 10^7 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2 \cdot K} \right) \quad (12)$$

donde $\text{erg} = \text{g cm}^2 \text{ s}^{-2}$

así, la densidad del aire húmedo queda:

$$\rho \left[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \right] = \frac{P(\text{mb}) \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{atm}}{\text{mb}} \right) 10^6 \left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{atm}} \right)}{T_v(K) \cdot 0.2867 \cdot 10^7 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2 \cdot K} \right)} = 0.348 \cdot 10^{-3} \left(\frac{P}{T_v} \right) \quad (13)$$

donde $\text{dinas} = \text{g cm s}^{-2}$

En realidad para la mayor parte de las condiciones atmosféricas la diferencia entre la densidad del aire seco y la del aire húmedo saturado es mínima. Por ejemplo, a 600 mb de presión atmosférica, a 5 °C las densidades del aire seco y saturado son 0.75 y $0.747 \cdot 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$, y a 10 °C son 0.737 y $0.732 \cdot 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$, respectivamente. Para el aire no saturado las diferencias son aún menores. Por lo anterior, la mayor parte de los autores consideran suficientemente exacto utilizar la densidad del aire seco.

Para calcular las eficiencias de colección, a continuación se describen las ecuaciones empíricas, cuya derivación se encuentra en el trabajo de Stallabrass (1978). Los procedimientos se basan en una clasificación de los valores de K (parámetro de inercia).

Así, tenemos:

Si $K \leq 3$ se emplea el parámetro K_0 , que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_0 = 0.125 + \frac{(K - 0.125)}{(1 + 0.1206 \text{Re}^{0.59})} \quad (14)$$

Siendo la eficiencia de colección (E):

$$E = 0.457(\log 8K_0)^{1.634} \quad (15)$$

Si $K > 3$ se emplea el parámetro H_E definido como:

$$H_E = \frac{\pi}{2} + 0.121 \text{Re}^{0.6} + 0.754 \cdot 10^{-4} \text{Re}^{1.38} \quad (16)$$

Siendo la eficiencia de colección:

$$E = \frac{K}{(K + H_E)} \quad (17)$$

Aplicando las ecuaciones anteriores se obtiene por ejemplo que las gotitas de 2 y 8 μm de diámetro son colectadas con una eficiencia de 50 y 95%, respectivamente, por hilos de 0.152 mm de diámetro a -10°C , 700 mb y con una velocidad del viento de 9.5 m/s.

2.2.3 Muestreo de agua de lluvia

La precipitación pluvial fue colectada empleando embudos de polietileno de aproximadamente 27 cm de diámetro, conectados a botellas de polietileno. Las precauciones indispensables para este fin están expuestas en la descripción del muestreo.

2.3 DISEÑO ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos se basó en pruebas no paramétricas. Estos métodos son especialmente útiles cuando los tamaños de muestra son pequeños. En investigaciones en las que se requiere coleccionar agua de nube es indispensable la aplicación de los métodos no paramétricos, debido al escaso número de muestras de agua de nube que se pueden obtener. La colección de agua de nube es un proceso extremadamente lento, especialmente en condiciones de bajas velocidades de viento, y esto es más crítico para los eventos de niebla muestreados en este trabajo, que son de corta duración con respecto a otros sitios reportados en la literatura. Por otro lado, las pruebas paramétricas sólo pueden ser aplicadas a muestras extraídas de poblaciones con una distribución normal o que al menos pueda ser transformada a ésta. Sin embargo, para conocer con certidumbre qué tipo de distribución presenta una población es necesario obtener más de 30 observaciones o muestras. De esta manera, la aplicación de los métodos no paramétricos es la mejor opción ya que, a pesar de no ser tan estrictos como otros métodos estadísticos, no requieren de un conocimiento previo de la distribución que siguen los datos. En general, los tamaños de muestra variaron entre 9 y 36.

Las pruebas no paramétricas que se aplicaron fueron las de Mann-Whitney para muestras mayores y menores que 20 (ver Anexo II). La comparación de estas pruebas dio resultados consistentes, esto es, las dos pruebas rechazaron igualdad de medias en los mismos casos. La descripción detallada de estas pruebas se encuentra en Sprent (1989) y Dixon y Massey (1969).

Todos los métodos de análisis químicos, descritos en la Sección 2.5, fueron evaluados con métodos estadísticos para verificar su exactitud y precisión (control de calidad) de acuerdo con el manual de entrenamiento técnico de la E.P.A (EPA-43011-78-012, ver bibliografía). Para mayor exactitud, la calibración del equipo y de los diferentes métodos analíticos se hizo para cada lote de muestras analizado. De hecho, esta acción es la

recomendada para cualquier determinación en química analítica para obtener precisión y exactitud.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MUESTREO

Colección de agua de nube.- Se probaron tanto los muestreadores pasivos como los activos. En general, los muestreadores pueden estar contruidos con diversos materiales siempre y cuando éstos sean químicamente inertes, al menos a los compuestos presentes en el agua de nube. Los muestreadores presentan también diversos diseños geométricos. Los pasivos no requieren de motores de ninguna clase; en este caso, la colección de agua de nube se realiza cuando el viento que transporta las nubes fuerza a las gotitas de la nube (no a todas como se vió en la Sección 2.2.1) a impactarse sobre las superficies colectoras. Por el contrario, los colectores activos utilizan, como ya se mencionó en la Sección 2.2.1, motores para producir artificialmente una velocidad relativa elevada entre el colector y las gotitas y así impactarlas.

Ya sea en los colectores pasivos o activos, la superficie de colección debe de ser perpendicular a la dirección del viento para aumentar la eficiencia de colección. Cada vez que fue posible, ambos tipos de colectores fueron operados simultáneamente uno junto al otro.

Colector activo.- Por su uso más generalizado y construcción relativamente simple, en este estudio se utilizó el desarrollado por Jacob *et al.* (1985), sólo que en lugar de emplear hilos de teflón de 0.4 mm de diámetro, se utilizaron hilos de acero inoxidable de 0.25 mm. de diámetro. Los hilos de teflón son muy difíciles de conseguir incluso en los Estados Unidos. El acero inoxidable que se utilizó es el de la más alta resistencia a la corrosión que existe en el mercado (AISI 316 distribuido por Alambres Calibrados, S.A. de C.V.)

Colector pasivo.- Se utilizó el omnidireccional (ver Sección 2.2.1). Al igual que en el caso anterior, se utilizaron hilos de acero inoxidable de 0.25 mm. de diámetro en lugar de los

de teflón de 0.4 mm de diámetro. Este tipo de colector es recomendado ampliamente por Schemenauer (comunicación personal).

Se observó el funcionamiento de los dos colectores seleccionados, cuando era posible utilizarlos simultáneamente, para verificar si en nuestro caso se cumple lo dicho por Schemenauer en la misma comunicación personal, quien concluyó que el colector omnidireccional es el mejor dispositivo que se puede usar para coleccionar agua de nube a nivel del suelo. Él comenta que como consecuencia de la aceleración y compresión que sufre el aire al entrar al ducto del colector activo de Jacob *et al.* (1985), las propiedades termodinámicas y físicas de la nube pueden cambiar.

Por otro lado, Hering *et al.* (1987) expusieron que los colectores activos (de cualquier diseño) presentan serias desventajas para calcular los contenidos de agua líquida de las nubes. Esto es debido a que pequeños cambios en el equilibrio del vapor de agua en estos muestreadores, inducidos por una expansión o compresión adiabáticas del aire muestreado, pueden causar un cambio grande en el contenido de agua líquida observado. Esto se comprende mejor si se tiene en cuenta que, aun en una niebla densa, la mayor parte del agua presente se encuentra en fase gaseosa. Por ejemplo, para temperaturas entre 10 y 13 °C, muy comunes en las zonas montañosas muestreadas, la presión de equilibrio del vapor de agua equivale a 9-11 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire. De esta manera, un contenido de agua líquida tan elevado como 2 g/m³ representaría alrededor del 20% del agua presente como vapor. A esto se añade la ventaja adicional de que el colector pasivo no necesita corriente eléctrica, que muchas veces no se tiene disponible en las zonas montañosas, y menos aún durante las malas condiciones meteorológicas que se prevé encontrar en el desarrollo de campo de este tipo de proyecto.

Debido a que en las regiones montañosas del centro del país las nieblas y lluvias se presentan frecuentemente en forma simultánea, el uso del colector pasivo tiene algunos problemas. Sin embargo, desde el punto de vista del medio forestal, no importa coleccionar muestras de agua de nube mezcladas con agua de lluvia, ya que la deposición húmeda

de contaminantes en los bosques la constituyen la lluvia y las gotitas de las nubes al ser interceptadas por las hojas, entrando todo esto al bosque. Pero desde el punto de vista de la química atmosférica, sí es importante tener al menos una cantidad suficiente de muestras de agua de nube no mezcladas con agua de lluvia en lo absoluto, debido a que, por lo general, el agua de nube presenta mayor concentración de iones que la de la lluvia (ver la introducción). Mohnen y Kadlec (1989) dan una explicación del por qué de este fenómeno. De esta manera, a pesar de las desventajas del colector activo ya señaladas, también se utilizó este colector en los sitios de muestreo en donde fue posible y que a la vez contaran con energía eléctrica. El uso de este colector también facilita la colección de agua de nube cuando las velocidades del viento son muy bajas.

En virtud de que en las regiones montañosas alrededor del Valle de México se presentan nubes con mucha mayor frecuencia en la temporada de lluvias, con los colectores pasivos se esperaba obtener muestras de agua de nube mezcladas con agua de lluvia en la mayor parte de los muestreos. De aquí que el uso de los colectores activos se haga necesario. Obviamente, la comparación entre estos dos tipos de colectores permite conocer cómo se modifica la composición química de las muestras de agua de nube en función de la manera en que se colecten.

Los parámetros de física de nubes, como el contenido de agua líquida (CAL) y el diámetro de corte (Sección 2.2.1), sólo fueron calculados a partir del volumen de muestra de agua de nube y de los datos meteorológicos obtenidos durante períodos de muestreo relativamente cortos. Esto es, debido a que en muestreos largos puede haber períodos sin niebla que pasan desapercibidos, lógicamente esto sucede con más facilidad en las noches. Por otro lado, el cálculo de CAL supone una colección continua de agua de nube durante el período de muestreo, Δt , lo que tampoco sucede en períodos en los cuales la niebla es poco densa. De esta manera, se obtienen valores de CAL artificialmente bajos.

Finalmente, nuestra experiencia en la colección de agua de nube muestra que es conveniente introducir un nuevo parámetro, al que denominaremos la "capacidad de colección" del colector de agua de nube (CC). Sus unidades son gramos de muestra de

agua de nube colectados por metro cuadrado de área efectiva o total (según el enfoque, ver Sección 2.2.1) por hora ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). La razón es que el CAL, calculado según la ecuación 4, depende de la velocidad del viento (v). De aquí que si la velocidad del viento cae con frecuencia por debajo del umbral de inercia del sensor de velocidad del viento (lo cual de hecho ha sido frecuentemente observado) el valor medio de v es inferior a la velocidad real del viento y, consecuentemente, los valores de CAL podrían incluso ser sensiblemente mayores que los reales. Así, si eliminamos v en la ecuación 4, obtenemos:

$$CC = \frac{m}{A\Delta t} \quad (18)$$

donde A es el área total transversal del colector en m^2 ; y Δt es el tiempo de muestreo en horas. Una gran ventaja de este parámetro es que permite establecer una comparación objetiva entre varios colectores co-localizados, aun cuando no sea posible ni calcular las eficiencias de colección ni medir la velocidad del viento. Tal es el caso del presente estudio, debido a que no se conoce el contenido de agua líquida de las nubes muestreadas en particular.

Para comparar el funcionamiento de los colectores de agua de nube, la capacidad de colección fue calculada solamente para los datos obtenidos en Teziutlán en enero de 1995, debido a que en esta campaña de muestreo se utilizaron tres diferentes colectores en forma simultánea.

Colección de agua de lluvia.- Los embudos para la colección de las muestras de agua de lluvia fueron destapados y enjuagados con agua desionizada justo antes de iniciar la lluvia. La razón de esta forma de muestrear es para coleccionar solamente la precipitación húmeda, con el propósito de evitar la alteración de la composición química de ésta por la precipitación seca (deposición seca). Se siguieron los lineamientos generales para la colección de la lluvia descritos por Galloway y Likens (1978), para prevenir la contaminación de las muestras.

La preservación de las muestras de agua de lluvia se hizo conforme a las normas internacionales para evitar cambios significativos en su estabilidad iónica (Peden y Skowson 1978), mientras se realizaron todos los análisis químicos. De todas maneras, estos se iniciaron inmediatamente después de la llegada de las muestras al laboratorio, sin que transcurriera más de una semana para ser terminados. Naturalmente, la colección de las muestras de agua de lluvia se realizó también en los mismos lugares en los que se colectó el agua de nube.

2.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Las técnicas de análisis químicos utilizadas en este proyecto de investigación fueron finalmente seleccionadas después de haber ensayado numerosas técnicas durante varios años de trabajo de laboratorio. Las técnicas descritas a continuación mostraron ser las más adecuadas para analizar iones inorgánicos en muestras de agua de nube y de lluvia, después de numerosos análisis químicos.

Los problemas que se presentaron al aplicar diversas técnicas, los procedimientos analíticos, así como los principios básicos de la cromatografía de líquidos, se encuentran descritos en el anexo "Descripción de las técnicas analíticas para muestras de agua de nube y precipitación pluvial", el cual se puede conseguir con el autor de esta tesis. Sin embargo, más adelante se describen en detalle solamente las técnicas que finalmente fueron seleccionadas para la realización del trabajo de laboratorio de esta tesis.

Las especies iónicas analizadas en las muestras de agua de nube y de lluvia fueron: hidrógeno (H^+), amonio (NH_4^+), calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), potasio (K^+), sodio (Na^+), nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{-2}), cloruros (Cl^-) y bicarbonatos (HCO_3^-). Los análisis químicos de estos iones se realizaron como sigue:

pH (concentración de H^+).- Medidores de alta precisión con electrodos de combinación. Fueron tomadas en cuenta las recomendaciones de Galloway y Likens (1979) en la calibración del instrumento cuando se analizaron muestras con una fuerza iónica muy baja. El pH se determinó con un electrodo de combinación diseñado para medir este

parámetro en porciones de muestras de tan sólo 2 ml aproximadamente, con el objeto de ahorrar muestra de agua de nube, la cual suele tener volúmenes muy pequeños, y así contar con el volumen suficiente para los demás análisis.

Amonio (NH_4^+).- Cromatografía de iones. En la cromatografía de iones (una modalidad de la cromatografía líquida de alta presión) la separación del ion amonio se llevó a cabo mediante la técnica de intercambio catiónico fuerte. El principio de separación consiste en las diferentes afinidades entre los cationes (el ion amonio es uno de ellos) y los grupos funcionales de la columna de separación. Estos grupos tienen carga negativa y generalmente son grupos del ácido sulfónico. La estructura de la columna de separación se puede representar como: $\text{R-SO}_3^-\text{H}^+$, donde R puede ser sílice o copolímeros de estireno y divinilbenceno. La técnica en particular que se aplicó (recomendada por el fabricante de la columna) utiliza una columna de intercambio catiónico marca Hamilton PRP-X200 con grupos del ácido sulfónico sobre una base de copolímeros de estireno y divinilbenceno; la fase móvil es una solución 4 mM de ácido nítrico/30% de metanol a un flujo de 2 ml/min. La detección de este ion se hizo por conductividad mediante el conductímetro que forma parte del cromatógrafo de líquidos. El límite de detección fue de 0.07 mg/L. Como ejemplos se presentan un cromatograma y una curva de calibración en el Anexo Y.

Calcio, magnesio, sodio y potasio (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+).- Espectrometría de absorción atómica EAA). La EAA es un método analítico basado en la absorción de radiación de diferentes longitudes de onda, según el elemento a analizar, por átomos (no iones) del elemento en el estado de vapor. La gran ventaja de la EAA es su sensibilidad que, junto con el hecho de que la banda de absorción y de emisión de cada metal son extremadamente estrechas, evita la presencia de interferencias en numerosas ocasiones. La preparación de muestras a fin de que sean analizadas por EAA suele ser muy compleja, afortunadamente para el caso de muestras de agua de nube o de lluvia, no es necesaria ninguna preparación previa excepto la adición de óxido de lantano para evitar interferencias por ionización.

Nitratos, sulfatos y cloruros (NO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-).- Cromatografía de iones. La cromatografía de iones consiste en el uso de una columna de intercambio aniónico fuerte. El principio de separación es el mismo que para el caso del ion amonio, la única diferencia es que la columna de separación contiene grupos funcionales con carga positiva generalmente de sales cuaternarias de amonio. La estructura de la columna de separación se puede representar como: $\text{R-N}-(\text{CH}_3)_3^+\text{OH}^-$. La técnica en particular que se aplicó (publicada por la empresa suiza Metrohm, 1990) utiliza una columna de intercambio aniónico marca Hamilton PRP-X100 con grupos del ácido sulfónico sobre una base de copolímeros de estireno y divinilbenceno; la fase móvil es una solución 2 mM de ácido ftálico/10% de acetona ajustada a un pH de 5 con hidróxido de sodio a un flujo de 2 ml/min. La detección de estos iones se hizo por conductividad. El orden de elución es cloruros, nitratos y finalmente sulfatos. La detección se realizó en forma idéntica a la del ion amonio. Los límites de detección fueron 0.04, 0.09 y 0.22 mg/L para los cloruros, nitratos y sulfatos respectivamente. Como ejemplos se presentan un cromatograma y una curva de calibración en el Anexo I.

Alcalinidad (HCO_3^-).- Titulación mediante la técnica de Gran (Stumm y Morgan 1981), que es la más adecuada para las muestras de lluvia o de agua de nube cuyas alcalinidades (en el caso de que estas muestras sean básicas) son muy inferiores a las de las aguas superficiales. La determinación de la alcalinidad por los métodos convencionales con indicadores introduce gran inexactitud cuando se aplica a muestras con alcalinidades extremadamente bajas, entre las cuales lógicamente se encuentran las del agua de nube y de lluvia.

El procedimiento global para el análisis químico de las muestras de agua de nube y de lluvia consiste en los siguientes pasos:

- 1.- Filtración de las muestras a su llegada al laboratorio o tan pronto como sea posible.
- 2.- Análisis, en primer lugar, de los iones amonio, hidrógeno y bicarbonato, debido a que estos iones presentan menor estabilidad (Peden y Skowson 1978).

3.- Análisis de los iones calcio, magnesio, sodio y potasio de ser posible en el mismo posible que el análisis de hidrógeno y bicarbonato. Esto es importante debido a que, con el tiempo, la concentración del ion hidrógeno tiende a disminuir y mientras que la de los metales alcalinotérreos y del ion bicarbonato tienden a aumentar.

4.- Análisis de los iones cloruro, nitrato y sulfato (llamados aniones).

Alternativamente, la cromatografía de líquidos puede ser reemplazada por los métodos convencionales de vía húmeda. De esta manera, los iones cloruro y sulfato pueden analizarse por métodos turbidimétricos, el ion nitrato por el método del salicilato de sodio y el ion amonio por el método del fenato (Mészáros 1978, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Ed 16). Esta opción es una precaución que permite seguir con el desarrollo del plan de trabajo en caso de que se presente una falla en cualquier componente del sistema de cromatografía de líquidos.

La parte medular en la cromatografía de líquidos es que los cromatogramas tengan resolución (cuando ningún pico eluye al mismo tiempo que otro) mediante las condiciones óptimas de operación (flujo, fase móvil, etc.) para una columna de separación en particular, en función de los iones que se quiera separar. Además, los detectores deben tener la sensibilidad necesaria para lograr los límites de detección de los diferentes iones, mostrados en las páginas anteriores.

Los principios de la cromatografía de líquidos o de iones (como un caso particular de la cromatografía de líquidos) están expuestos en detalle por Snyder y Kirkland (1979) y por Firpo (sin fecha). Se recomienda referirse al anexo de esta tesis (mencionado al principio de esta sección).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo, se presentan los resultados del análisis químico de las muestras de agua de nube y de lluvia y de parámetros físicos de las nubes muestreadas. Primeramente, se expondrán las características físicas de las diferentes superficies de colección empleadas en los colectores de agua de nube y, finalmente, la discusión de los resultados obtenidos.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS COLECTORES

3.1.1 Características del colector pasivo cilíndrico

A este colector se le conoce con las iniciales ASRC que significan "Atmospheric Sciences Research Center Collector". Este colector tiene un diámetro de 25.7 cm y una altura de 52 cm y está constituido por una doble pantalla formada por hilos de 0.025 cm de diámetro separados por espacios de 0.3 cm.

3.1.2 Características del colector activo

Este colector consta de una doble pantalla rectangular con hilos de 0.025 cm de diámetro. Las dimensiones de la pantalla son 17.6 por 20 cm. Según el diseño de Jacob *et al.* (1985) consta de 32 hilos por cada pulgada.

3.1.3 Características de la malla metálica

Esta es una pantalla de acero inoxidable constituida por filamentos entretejidos de manera similar a una raqueta de tenis. Consta de hilos de 0.041 cm de diámetro con espacios de 0.086 cm.

A continuación se presentan las áreas efectivas y transversales de los colectores (ver Sección 2.2.2).

	Area efectiva (cm ²)	Area total transversal (cm ²)
Colector pasivo cilíndrico	645.9	1336.4
Colector activo	221.7	352.0
Colector pasivo de malla	3344.0	5400.0

Posteriormente se explicará la importancia de incluir también las áreas transversales totales en el cálculo de parámetros físicos de las nubes y de las eficiencias de colección del agua de nube.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los muestreos de agua de nube y de lluvia, ordenados por sitio y por orden cronológico. Pero antes es importante remarcar que 3 clases de muestras se pueden coleccionar con cualquier colector pasivo:

- a.- Agua de nube cuando obviamente sólo se presenta la niebla en ausencia de lluvia.
- b.- Agua de nube mezclada con agua de lluvia, cuando se presentan niebla y lluvia al mismo tiempo.
- c.- Agua de lluvia, cuando sólo se presenta lluvia.

Resultó ser una práctica útil analizar estas clases de muestras para evaluar los efectos que cada material tiene en la composición química del agua de nube (ver muestreo Tlamacas, en julio de 1994).

3.2 RESULTADOS DE LOS MUESTREOS

3.2.1 Tlamacas, septiembre de 1992 [TL-1]

Consistió en dos campañas de muestreo: del 9 al 11 y del 29 al 30 de septiembre.

Muestreo del 9 al 11.- En este muestreo se utilizó únicamente el colector pasivo cilíndrico. Una desventaja de los colectores pasivos es que si llueve cuando se está coleccionando el agua de nube, ésta se mezclará con la lluvia, impidiendo obtener datos verdaderos de la composición química del agua de nube. Sin embargo, puesto que los

tiempos de muestreo fueron registrados, así como las horas de comienzo y final de cada evento de nube y de lluvia, sí fue posible distinguir entre muestras de lluvia, de agua de nube y de agua de nube mezcladas con lluvia. En la figura 3 mostrada más adelante se muestran los diagramas de los vientos de acuerdo a los datos de radiosondeos. Estos datos ayudan en la interpretación de los resultados presentados en la tabla 1 y en las figuras 4 y 5 de la composición química del agua de nube y de lluvia para el 9-11 de septiembre.

Las nubes muestreadas en éste y los siguientes muestreos en Tlamacas, excepto del 29 al 30 de septiembre de 1992, son de desarrollo vertical o convectivas. Evidentemente, sólo es posible muestrear la parte baja o las bases de estas nubes, de aquí que los resultados presentados son solamente representativos de esta sección de las nubes y no de las nubes enteras.

Un resultado interesante es que el agua de lluvia presentó una contaminación considerablemente mayor que el agua de nube en los días 9 y 30 de septiembre. Esto es contrario a los resultados obtenidos en la mayoría de las investigaciones realizadas en el resto del mundo.

El muestreo del 9 de septiembre fue el más significativo debido a que el agua de nube y de lluvia fueron obtenidas casi simultáneamente, 1900 a 1940 y 1940 a 2030 HL (hora local) respectivamente (tabla 1 y fig 4). Una posible explicación es que el Popocatépetl aumentó su actividad en 1991. Desde entonces ha estado emitiendo constantemente fumarolas visibles desde varias decenas de kilómetros de distancia. Esta explicación está apoyada por el hecho de que durante los sondeos entre 550 y 500 mb (el cráter del Popocatépetl está situado entre estas dos superficies isobáricas, más próximo a 500 mb), los vientos soplaron del norte a las 1800 del 9 de septiembre y del sudeste a las 0600 HL del 10 de septiembre, según los radiosondeos realizados en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México a las 0000 y 1200 Z horas (1800 y 0600 HL, respectivamente). Aunque no se cuenta con una buena resolución en el tiempo y, por consiguiente, no es posible rastrear la variabilidad del viento en terreno montañoso, es

razonable interpolar la dirección del viento entre las 1800 del 9 de septiembre y las 0600 HL del día 10, debido a que los muestreos fueron realizados dentro de este intervalo de tiempo.

Los sondeos sugieren un posible cambio en la dirección de los vientos en el sentido de las manecillas del reloj del norte al sudeste. De esta manera, existe la posibilidad de que durante la colección de la lluvia los vientos estuvieron soplando del sudeste aproximadamente. De acuerdo a su localización, el cráter está situado más o menos al sur-sudeste de Tlamacas, siendo factible que las fumarolas del cráter pudieran haber sido transportadas sobre Tlamacas, junto con las nubes de lluvia, por los vientos. En esta situación, los componentes de las fumarolas solubles en agua pudieron haber sido incorporados a las nubes como núcleos de condensación y también haber sido disueltos directamente dentro de las gotitas de nube preexistentes para, de esta manera, haber sido precipitados sobre Tlamacas. Esto produciría una lluvia rica en compuestos solubles en agua tales como los nitratos y sulfatos. A continuación se muestra la figura 3 con los diagramas de los vientos de acuerdo a los datos de los radiosondeos.

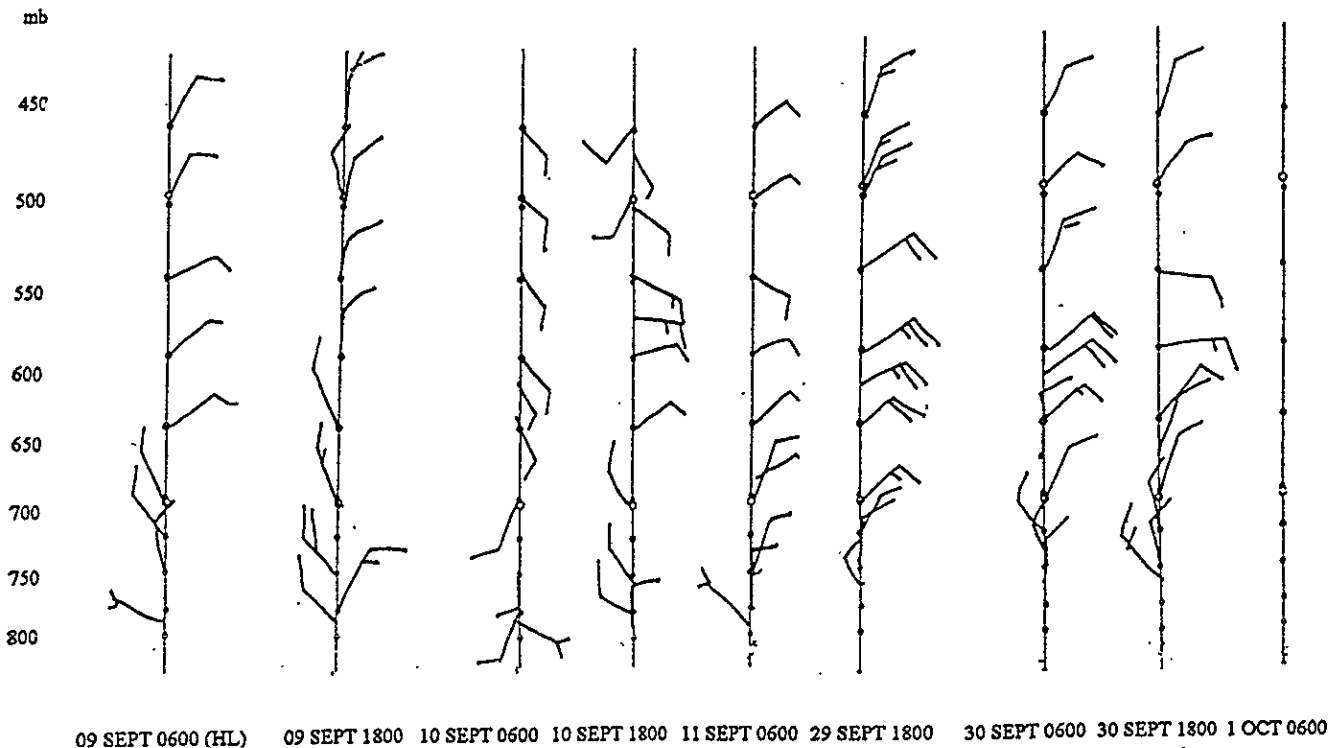


Fig 3. Cizallamiento vertical de los vientos en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, sept. 1992

Se debe tener en cuenta que el agua de nube fue muestreada a casi 4000 metros sobre el nivel del mar (cerca de los 600 mb). De nuevo, según los sondeos de las 1800 HL del 9 de septiembre, en este nivel los vientos soplaron del norte. Las trayectorias viento arriba de los vientos no revelan fuentes importantes de contaminantes atmosféricos. Por el contrario, es interesante notar que el agua de lluvia presentó menor contaminación el día 10 de septiembre. De acuerdo a los sondeos de las 1800 HL de este día (el agua de lluvia se colectó de las 1740 a las 1900 HL), los vientos soplaron del este-sudeste entre 550 y 500 mb. Los vientos con una componente del este más importante probablemente llevaron las fumarolas al sur de Tlamanca y no sobre Tlamanca. Esto no puede ser probado en forma rigurosa, pero es concebible debido a que el cráter está tan cerca de Tlamanca que un pequeño cambio en la dirección del viento, puede producir grandes variaciones en la composición química del agua de nube. Incluso, puesto que las fumarolas no afectaron a las nubes sobre Tlamanca, el agua de nube estuvo de hecho más contaminada que la de la lluvia durante el 10 de septiembre.

Se tiene que remarcar que se debe tomar con precaución la interpretación de la composición química de la lluvia y de las nubes en función de la dirección de los vientos, debido a que los radiosondeos fueron realizados en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Se debe tener presente que en regiones montañosas existen variaciones considerables en la dirección de los vientos en distancias relativamente pequeñas. En nuestro caso, estas variaciones se presentan incluso en el nivel isobárico de los 500 mb en virtud de la magnitud de las montañas en donde se realizaron los muestreos. A lo anterior se debe añadir el efecto convectivo asociado a las brisas de valle. Otro problema es que los radiosondeos y los muestreos de agua de nube y de lluvia lógicamente no fueron simultáneos. Sin embargo, a pesar de estas restricciones se incluyeron los datos de los radiosondeos del aeropuerto de la Ciudad de México por las siguientes razones: 1.- este sitio es el más cercano a Tlamanca en donde se genera este tipo de información y, 2.- en Tlamanca es imposible utilizar globos piloto debido a la falta de visibilidad producida por las nubes. Tampoco se contó con un sistema de rastreo por radar con el cual sí habría sido posible realizar radiosondeos en Tlamanca. Incluso aunque el aeropuerto de la Ciudad de México hubiera estado muy próximo a Tlamanca, los datos de los radiosondeos no habrían sido muy útiles debido a que no presentan resolución en el tiempo (solamente se efectúan cada 12 horas), mientras que se presentan variaciones considerables en la dirección de los vientos en cuestión de pocos minutos como resultado de las brisas y actividad convectiva en las regiones montañosas.

Finalmente, no se observaron variaciones en la composición química del agua de nube tan grandes como las del agua de lluvia. Esto puede deberse al hecho de que las nubes, a la altura de Tlamanca, no fueron afectadas por las fumarolas del cráter.

Muestreo del 29 al 30.- En la tabla 1 y fig 6 se muestran los resultados de este periodo de muestreo. Las muestras de agua de nube colectadas en este periodo presentaron menor contaminación que las del periodo anterior. Esto se explica fácilmente por la velocidad del viento, la cual aumentó en este período de muestreo. Nuevamente, debido a la dirección del viento, no parece posible que las fumarolas hayan interferido con las nubes a la altura de Tlamanca.

El muestreo del día 30 de septiembre (tabla 1 y fig 6) es más difícil de discutir puesto que las colecciones de agua de nube y de lluvia estuvieron separadas por 7 horas aproximadamente. Lo que es importante señalar, es que el agua de lluvia presentó otra vez más contaminación que el agua de nube, sugiriendo condiciones similares a las observadas el 9 de septiembre. Desafortunadamente, esto no pudo ser demostrado al no existir datos del radiosondeo de las 0600 HL, del primero de octubre de 1992. Este dato era clave en la explicación de las causas de una mayor contaminación en el agua de lluvia en virtud de que la lluvia se presentó entre las 1750 del 30 de septiembre y las 0610 HL del primero de octubre de 1992.

Los diámetros de corte y contenidos de agua líquida (CAL) fueron calculados de acuerdo a las características del colector pasivo cilíndrico. En la tabla 2 se encuentran estos parámetros para las dos campañas de muestreo realizadas en septiembre de 1992.

Como puede apreciarse, tanto en esta tabla como en la tabla 4 (ver Sección 3.6) hay dos columnas del contenido de agua líquida estimado de las nubes (CAL). La columna con los valores más bajos corresponde a los CAL calculados a partir del área total transversal del colector de agua de nube.

Como ya se dijo en la Sección 2.2.2 existen dos enfoques para calcular la eficiencia de colección: el que considera el área transversal o efectiva de los hilos y el que considera el área total transversal de toda la superficie de colección. Aunque en nuestro caso no fue posible calcular las eficiencias de colección, por no tener datos del CAL real de las nubes durante los periodos de colección, sí es posible estimar los CAL a partir del volumen de muestra de agua de nube y de las características del colector (Sección 2.2.2). Al comparar las dos columnas del CAL es fácil darse cuenta que si aplicamos el área total transversal de la superficie colectora, el CAL estimado disminuye debido a que el volumen estimado del aire muestreado aumenta (denominador de la ecuación 4). En virtud de que se obtienen dos estimaciones del CAL según el enfoque que se considere, evidentemente surge un dilema; ¿cuál de los dos enfoques es el más correcto, o cuando menos el más realista?

Si se considera el área transversal de los hilos únicamente, se está suponiendo que las gotitas de nube se van a depositar o impactar solamente en la mitad del hilo que queda frente al viento. Cuando en realidad, debido al efecto combinado de la disminución en la velocidad del viento en la parte posterior del hilo y de posibles efectos eléctricos, sí existe impactación de gotitas en la cara del hilo opuesta al viento. Por otro lado, no se están tomando en cuenta los efectos que la primera pantalla de hilos tiene sobre las líneas de flujo de la corriente de aire que transporta a las gotitas que van a impactarse en la segunda pantalla. No es lo mismo colocar un determinado número de pantallas de hilos, idénticas entre sí, en paralelo que en serie (una detrás de la otra). El arreglo en serie es el que presenta menor eficiencia y precisamente es el que presentan el colector pasivo cilíndrico y el activo.

De lo anterior queda claro que el considerar el área transversal de los hilos podría sobrestimar el CAL calculado a partir del colector (de hecho, se han llegado a reportar eficiencias $>100\%$, (Kim y Boatman, 1992). La impactación de las gotitas de nube en la parte posterior de los hilos es un efecto que puede ser responsable de eficiencias tan altas. Igualmente, este enfoque es muy simplista pues, al ignorar aspectos de dinámica de fluidos, se están reportando con gran incertidumbre las eficiencias de colección o, en nuestro caso, los contenidos de agua líquida. Por el contrario, si aplicamos el segundo enfoque (considerando el área total transversal de la superficie colectora), estamos considerando implícitamente todos los fenómenos de dinámica de fluidos en su conjunto, los cuales son imposibles de evaluar cuantitativamente por separado. Dicho de otra manera en términos prácticos, al considerar el segundo enfoque, lo que se hace en realidad es imaginar que la superficie colectora equivale a otra superficie colectora a la cual se le hace pasar un volumen dado de nube, con un cierto contenido de agua líquida, obteniéndose un cierto volumen de muestra de agua de nube. Lo anterior queda más claro si consideramos la superficie de colección del colector pasivo cilíndrico, cuya geometría es la más complicada. Esta superficie presenta 3 problemas fundamentales:

- 1.- Dos pantallas concéntricas.
- 2.- Como es circular, el aire que pasó las primeras dos capas se encuentra nuevamente con otras dos capas en su parte posterior.
- 3.- En ambos lados del colector, esto es, en donde la dirección del viento tiende a ser tangencial a la superficie de colección, la cantidad de hilos que quedan unos detrás de otros aumenta considerablemente.

Estos 3 problemas en conjunto causan un flujo del aire más perturbado alrededor de los hilos, aunado con un aumento de la cantidad de hilos que quedan en serie con respecto a la dirección del viento.

Si ahora imaginamos una superficie colectora rectangular plana normal a la dirección del viento (lo que equivale al área transversal total del colector), entonces estamos considerando que esta superficie rectangular equivale a toda la superficie de colección original. Ahora bien, sólo resta considerar que, a través de la superficie rectangular, va a pasar parte de una nube con un cierto contenido de gotitas por metro cúbico de aire o contenido real de agua líquida. Después del muestreo, habrá pasado una cantidad determinada de agua y se habrá obtenido otra cantidad determinada de muestra de agua de nube. Si se conociera el contenido de agua líquida de la nube sería posible calcular de inmediato la eficiencia de colección del agua de nube. En nuestro caso sólo nos limitamos a estimar el contenido de agua líquida de la nube a partir del volumen de aire que pasó a través del área total transversal del colector y del volumen de muestra de agua de nube.

En resumen, el considerar el área total transversal del colector es una manera más conservadora para calcular las eficiencias de colección o los contenidos de agua líquida de las nubes. La aplicación práctica de esto es que por lo menos estamos seguros de que ni la eficiencia de colección ni el contenido de agua líquida reales van a ser inferiores a los calculados. Así la aplicación del área total transversalste es enfoque más conservador y con mayor sentido físico cuando por ejemplo, queremos obtener una cantidad determinada de agua de nube como agua potable para comunidades

pequeñas. De esta manera, podremos calcular las dimensiones que debe de tener un colector de nieblas para garantizar el abasto de agua potable al saber de antemano que la eficiencia real del colector no puede caer por debajo de lo calculado. Más aún, se estaría en la posibilidad de que la cantidad de agua obtenida fuera mayor que lo esperado, en el caso de que la eficiencia real del colector sea mayor que la calculada.

Regresando al muestreo en Tlamacas, debe de aseverarse que el agua de nube colectada en este sitio no es muy representativa de las nubes libres. Esto es debido al hecho de que el bosque está entre 100 y 200 metros de Tlamacas, existiendo una gran posibilidad de que la interceptación de las gotitas de las nubes por el bosque afecte el espectro original de éstas y por consiguiente su composición química original al pasar sobre la montaña. Sin embargo, debido a que los vientos no fueron fuertes (tabla 3) es improbable que la resuspensión de gotas del bosque afecte la química de las muestras de agua de nube.

3.2.2 Tlamacas, julio de 1994 [TL-2]

A diferencia del muestreo TL-1, el agua de nube colectada entre el 19 y 21 de julio de 1994 contiene mayor concentración de contaminantes que el agua de lluvia, como puede apreciarse en la tabla 1 y en las figs 7, 8a, 8b, 9a y 9b.

Se ensayaron dos tipos de colectores: el activo, cuyas características están descritas en el capítulo 2, y el pasivo que, en esta única ocasión, consistió en una pantalla rectangular de la tela conocida con el nombre de "tul" expuesta perpendicularmente al viento. La razón de haber ensayado la colección de agua de nube con esta tela fue la de probar el desempeño de materiales más económicos. Al mismo tiempo, también se intentó aumentar la cantidad de muestra de agua de nube en un tiempo de colección menor y así llegar a lo óptimo que consiste en obtener varias fracciones en el menor tiempo posible. Para lograr esto, se tiene que ensayar con diferentes diseños de colectores. Debido a la complejidad del lavado de estas telas por su complicada trama, se decidió utilizar tela nueva para cada muestreo (García, comunicación personal). Así, justo antes

de los muestreos realizados en Tlamacas del 19 al 21 de julio de 1994, se cortaron varias telas a la medida dejándolas sumergidas dos días en agua desionizada. Además, durante el muestreo se colocaron las telas con guantes de hule para evitar cualquier contacto con los dedos y prevenir así alguna contaminación por descuido.

Analizando los resultados de la concentración de cloruros junto con los de la cantidad de lluvia, presentados en la tabla 1, se puede observar que, en efecto, la tela de tul aporta una contaminación por cloruros muy difícil de eliminar. Esta contaminación se detectó fácilmente al comparar la composición química de la lluvia colectada mediante la tela (en ausencia de niebla por supuesto) con la composición química de la lluvia colectada mediante un embudo de polietileno, el cual es destapado justo antes de empezar la lluvia. La comparación directa entre el colector pasivo (tela) y el activo no fue posible debido a que la niebla se presentó simultáneamente con la lluvia, mezclándose el agua de nube con la de la lluvia en el colector pasivo.

Los diámetros de corte y los contenidos de agua líquida para este muestreo, calculados a partir de las características de operación del colector activo, están en la tabla 2.

Como conclusión final, en relación al material del colector en esta serie de muestreos, se demostró que la tela de tul no es de ninguna manera un material apropiado para realizar investigaciones sobre la composición química del agua de nube colectar agua de nube. Sin embargo, su bajo costo permite pensar en la posibilidad de usarla para colectar agua de nube para otros usos.

Habiendo analizado los efectos que tiene la tela de tul sobre la composición química de las muestras de agua de nube, ahora se discutirán los resultados obtenidos con el colector activo, el cual, dado el material de los hilos colectores, no modifica la composición química del agua de nube colectada.

Es interesante comparar los resultados obtenidos en este muestreo con los obtenidos en el muestreo TL-1. En julio de 1994, todas las muestras de agua de nube presentaron

mayor contaminación que las muestras de lluvia. Esta situación es la que se observa más frecuentemente alrededor del mundo. Surge la pregunta ¿por qué las fumarolas del cráter no afectaron la composición química de la lluvia en ninguno de los muestreos? A primera vista, estos resultados parecen ilógicos en vista de que el Popocatepetl aumentó aún más su actividad durante 1994, lo que condujo a la emisión de cenizas en diciembre del mismo año. La explicación está de nuevo en el conocimiento conjunto de la dirección del viento y de la posición geográfica de Tlamacas y del cráter del Popocatepetl.

Los radiosondeos muestran vientos con una dirección prácticamente constante del oeste alrededor de los 500 mb a lo largo de todo el periodo de muestreo. Puesto que el cráter está situado aproximadamente al sur-sudeste de Tlamacas, los vientos del oeste acarrearán las fumarolas del cráter en otra dirección con respecto a Tlamacas, haciendo imposible que las nubes de lluvia sobre este sitio hubieran sido contaminadas por las emisiones de las fumarolas. Nótese que esto es lo opuesto a lo que se observó entre el 9 y 10 de septiembre de 1992, cuando sí fue posible que los vientos con componentes del sur y del este, transportaran parte de las fumarolas sobre Tlamacas.

3.2.3 Tlamacas, julio de 1995 [TL-3]

Al igual que en el muestreo TL-2, las muestras de agua de nube presentaron mayor contaminación que las de la lluvia (tabla 1). Durante el periodo de muestreo del 25 y 26 de julio, los vientos a 500 mb soplaron del noreste, transportando las emisiones de la fumarola del cráter hacia el sur de Tlamacas, haciendo improbable que las nubes de lluvia que pasaron sobre este sitio hayan sido contaminadas por las fumarolas. Consecuentemente, la lluvia se originó en nubes no afectadas por las fumarolas. Por el contrario, debido a que las nubes muestreadas en Tlamacas estuvieron evidentemente a una menor altura que las nubes que produjeron la lluvia en el mismo sitio, presentaron mayor contaminación antropogénica por estar más próximas a las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos. Estas fuentes se encuentran en el Valle de Puebla según lo indicó una estimación de la trayectoria pasada de las masas de aire. Esto explica la mayor contaminación observada en las muestras del agua de nube. Desgraciadamente, no existen estaciones meteorológicas viento arriba de Tlamacas (hacia el Valle de

Puebla cuando soplan los alisios) en un número suficiente para trazar trayectorias pasadas de vientos. Sin embargo, sí se puede inferir que el aire en Tlamacas durante los muestreos pasó antes sobre el Valle de Puebla, debido a la dirección dominante de los vientos alisios y al efecto de las brisas de valle que favorecen la formación de nubes. Algo similar ocurrió en el muestreo de julio de 1994, cuando las emisiones de las fumarolas fueron transportadas hacia otra dirección. Nótese que la diferencia con respecto al muestreo de 1994, es que entre el 25 y 26 de julio de 1995 los vientos a 500 mb soplaron del noreste llevándose las emisiones de la fumarola hacia el suroeste. De cualquier manera, estas emisiones no parecen haber contaminado las nubes de lluvia sobre Tlamacas.

Los diámetros de corte y los contenidos de agua líquida para este muestreo, calculados a partir de las características de operación del colector activo, están en la tabla 2.

Con respecto a los muestreos de Tlamacas se puede resumir lo siguiente:

1. Cuando los vientos a 700 mb, en Tlamacas (3900 msnm) y a 500 mb soplaron de cualquier dirección entre el norte y el este, el agua de nube presentó más contaminación que la lluvia. Al parecer, los vientos de estas direcciones traen contaminación antropogénica a Tlamacas desde el Valle de Puebla.
2. Cuando los vientos a 500 mb (nivel cuya altura está próxima al Labio Superior del cráter del Popocatepetl) soplaron desde el cráter hacia Tlamacas, el agua de lluvia presentó más contaminación que la de la nube. Las concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} en el agua de lluvia colectada cuando el material volcánico había sido recogido por las nubes de lluvia que pasaron sobre Tlamacas, fueron significativamente mayores que en el agua de nube colectada de nubes que pasaron solamente sobre el Valle de Puebla.
3. De acuerdo a la dirección de los vientos la contaminación de la Ciudad de México aparentemente no afectó la composición química del agua de nube o de lluvia en Tlamacas durante los periodos de muestreo. Desafortunadamente, no es simple escoger un componente químico en el agua de nube o de lluvia que funcione específicamente como trazador de la contaminación antropogénica. Por ejemplo, en Tlamacas el sulfato

puede ser de origen volcánico y antropogénico y el nitrato y el amonio pueden provenir de los fertilizantes (actividad agrícola) y de la contaminación atmosférica.

4. El acoplamiento de la composición química con el cizallamiento vertical del viento, lo que se intentó hacer por primera vez en este estudio para las zonas montañosas del centro de México, podría ayudar a explicar las diferencias entre la composición química de las nubes y de la lluvia.

3.2.4 Teziutlán, enero de 1993 [TE-1]

Teziutlán es una población que está situada en la Sierra Madre Oriental, en el estado de Puebla, del lado expuesto a los vientos que provienen de las planicies costeras del Golfo de México. Antes de presentar y discutir los datos, se expondrán brevemente las condiciones meteorológicas que prevalecen en esta región, principalmente en invierno. De noviembre a principios de marzo se presenta la mayor parte de los "nortes" que son, como su nombre lo indica, invasiones de aire frío provenientes del norte. En México, las invasiones de aire frío o frentes fríos son características del invierno. Cuando un frente frío recorre las costas del Golfo de México, se favorece la formación de nubosidad cuando la masa de aire polar continental interactúa con la masa de aire marítimo tropical que prevalece sobre las planicies costeras, debido al alto contenido de humedad que existe en el aire marítimo tropical.

Las nubes asociadas a un frente se mueven con él y se agolpan contra las laderas orientales de la Sierra Madre Oriental, en donde el aire es forzado a elevarse, produciendo aún más nubosidad en esta región. Estas nubes son las que precisamente se muestrearon. A pesar de que son verdaderas nubes, se les conoce como nieblas debido a que, por definición, una niebla es una nube al nivel del suelo. Sin embargo, no se debe confundir las nieblas que se presentan en Teziutlán con las que ocurren en un valle entre montañas durante el amanecer, especialmente en invierno. Esto es, las nieblas en Teziutlán son nubes formadas por la interacción entre diferentes masas de aire y entre éstas con factores orográficos, viéndose favorecida su formación en la presencia de vientos. Por su parte, las nieblas en un valle se forman por enfriamiento radiativo en noches despejadas en condiciones de calma (ausencia de vientos).

Las nubes muestreadas en Teziutlán fueron estratiformes o dicho de otra manera, no presentaron desarrollo vertical importante. De lo anterior se desprende que las lluvias muestreadas en Teziutlán no tuvieron un origen convectivo, como las lluvias que se presentaron en el Valle de México y zonas montañosas aledañas, durante los muestreos de verano. Esto quiere decir que las lluvias muestreadas en Teziutlán no provinieron de niveles superiores y por lo tanto, las gotas atravesaron únicamente una capa delgada de aire antes de llegar a la superficie. A pesar de que no se realizaron mediciones directas de la altura del tope de las nubes, sí fue posible inferir que la parte superior de las nubes se encontraba cerca del suelo, como lo demuestra el hecho de que es típico que durante el invierno estas nubes rara vez pasan sobre las cimas de la Sierra Madre Oriental hacia la altiplanicie. Esto está apoyado por mediciones previas del espesor de las nubes (ver Sección 3.8). Esto tiene importancia para la interpretación de los resultados presentados a continuación. Lógicamente, al no haberse presentado corrientes convectivas, la lluvia provino de estratos y por ende fue ligera con gotas pequeñas. La precipitación de gotas pequeñas se conoce con el nombre de llovizna. Debe de quedar claro que la situación en Teziutlán durante el verano es completamente diferente.

El muestreo se realizó del 22 al 26 de enero de 1993, con el mismo colector pasivo utilizado en Tlamacas en el muestreo TL-1. Los resultados de la composición química están presentados en la tabla 3.

En este sitio se presentó consistentemente la misma situación encontrada en otras partes del mundo, esto es, el agua de nube presentó mucha mayor contaminación que el agua de lluvia. En este muestreo no se contó con información meteorológica y por lo tanto no se presenta información acerca de los diámetros de corte y contenidos de agua líquida de las nubes.

Al igual que en Tlamacas, se debe remarcar que el agua de nube colectada en Teziutlán tampoco es del todo representativa de las nubes libres. A pesar de que el bosque no se encuentra tan próximo, (aproximadamente a 1 km viento arriba de Teziutlán, en comparación con 200 metros en Tlamacas) se encuentran grandes extensiones de

bosques pluviales, los cuales son mucho más espesos que los que rodean al Popocatepetl, interceptando así más eficientemente las gotitas de las nubes.

3.2.5 Teziutlán, noviembre de 1993 [TE-2]

En este muestreo se utilizó el colector activo por primera vez, descrito en la Sección 2.2.1. En forma paralela también se utilizó el colector pasivo con el propósito de comparar la composición química de las muestras obtenidas con ambos colectores en forma simultánea. En general, puede observarse un mayor contenido de iones en el agua de nube colectada con el colector activo que en la colectada con el pasivo, especialmente durante el 28/29 de noviembre (tabla 3 y figs. 10, 11 y 12). El sensible aumento en el contenido de iones en la muestra de agua de nube colectada con el colector activo con respecto al pasivo, coincide con un tiempo de muestreo mayor durante este muestreo específico. Lo anterior no es casualidad, debido a que, en otras ocasiones mencionadas más adelante durante las cuales el tiempo de muestreo fue también mayor, se observó de nuevo un incremento notable en la concentración de iones en las muestras colectadas con el activo, de aquí que este fenómeno será discutido en detalle al final.

En cuanto a los volúmenes de colección, sólo se discuten los resultados obtenidos el 28 de noviembre, cuando se colectaron muestras con los dos colectores en forma simultánea y por periodos relativamente cortos. Durante el primer muestreo entre las 1000 y 1400 HL, la velocidad del viento fue de 0.6 m/s en promedio y en el segundo muestreo (entre las 1400 y 1645 HL) fue de 0.3 m/s. El volumen colectado de muestra para el colector activo fue de 203.6 ml y para el pasivo fue de 224.7 ml durante el primer muestreo. Para el segundo muestreo, los volúmenes colectados fueron de 201.5 y 114.4 ml, respectivamente.

En general, con el colector pasivo puede apreciarse una disminución en el volumen de muestra al disminuir la velocidad del viento. Lo que es interesante notar es que, aunque a primera vista las eficiencias de colección parecen ser casi las mismas para el primer muestreo, a juzgar por los volúmenes de muestra casi iguales, éstas no lo son en lo

absoluto. De acuerdo a las características físicas de los colectores, el área efectiva de colección del colector activo es de sólo 0.022 m^2 , mientras que la del colector pasivo es de 0.065 m^2 . Si los volúmenes de muestra son casi iguales pero el área efectiva de colección del colector pasivo es el triple de la del activo, entonces la eficiencia de colección del colector activo es aproximadamente tres veces mayor que la del pasivo, para las condiciones del 28 de noviembre de 1993.

En esta ocasión sí fue posible calcular los diámetros de corte y los contenidos de agua líquida de las nubes para los dos colectores (tabla 4 y fig. 13). Aunque el funcionamiento del colector activo no depende de la velocidad del viento, sí fue posible calcular estos parámetros debido a que éste succiona aire con una velocidad conocida (3.5 metros por segundo en promedio), la cual fue determinada experimentalmente colocando en la entrada del colector un anemómetro que funciona con el principio del filamento caliente. Este anemómetro está especialmente diseñado para medir la velocidad del viento dentro de ductos. De esta manera, una de las grandes ventajas del colector activo es que es posible estimar los diámetros de corte y los contenidos de agua líquida aún sin contar con información meteorológica alguna. En el caso del colector pasivo para calcular los parámetros mencionados, es imprescindible contar con esta información. Afortunadamente, a partir de este muestreo se contó con una estación meteorológica portátil.

El cálculo de estas variables está basado en las ecuaciones presentadas en la Sección 2.2.2. Los resultados para ambos colectores se presentan en la tabla 10. Nótese cómo los diámetros de corte fueron mucho mayores para el colector pasivo. Esto se debió simplemente a que la velocidad del viento fue muy inferior a la velocidad con la que el colector activo succiona el aire. El colector activo succiona el aire a 3.5 m s^{-1} , mientras que la velocidad del viento varió entre prácticamente cero y 0.6 m s^{-1} en promedio. Regresando a las ecuaciones del diámetro de corte: a mayor velocidad con la cual las gotitas son impactadas en los hilos, menor es el diámetro de corte y viceversa. De una manera análoga, los contenidos de agua líquida estimados a partir de la ecuación 4 son superiores para el colector pasivo debido a que el producto $v \cdot a \cdot \Delta t$ o $v \cdot A \cdot \Delta t$ es menor de

lo que en realidad es cuando se usa este colector, no por el colector en sí, sino por el simple hecho de que la velocidad del viento (v) medida por la estación meteorológica portátil, es menor que la real. La estación meteorológica portátil tiene un umbral de inercia alto (velocidad mínima del viento necesaria para poner en movimiento las copas del anemómetro). Esto se apreció mediante observaciones directas; el fabricante no proporcionó información al respecto. Como consecuencia, la velocidad medida del viento siempre fue menor que la real, especialmente para velocidades bajas, dando como resultado que la estimación de los contenidos de agua líquida fueran superiores a los reales. Lo ideal sería que los contenidos de agua líquida, estimados a partir de ambos equipos, fueran similares, debido al fundamental hecho de que el contenido de agua líquida en una nube es una variable física de ésta, que no depende ni de las características del colector ni de las mediciones obtenidas por cualquier estación meteorológica. Lógicamente, en cuanto a los diámetros de corte se refiere, los resultados nunca pueden ser iguales debido a que éstos sí dependen del tipo de colector. Para concluir, si se hubiera medido la velocidad del viento con una estación meteorológica más sensible, se habrían obtenido diámetros de corte más pequeños para el colector pasivo y por tanto más parecidos a los calculados a partir del colector activo. De igual modo, los contenidos de agua líquida de las nubes, estimados con ambos colectores, también habrían sido más parecidos entre sí.

Se debe de mencionar que los colectores activos presentan serias desventajas para calcular los contenidos de agua líquida de las nubes, debido a que pequeños cambios en el equilibrio del vapor en estos muestreadores, inducidos por una expansión o compresión adiabáticas del aire muestreado, pueden causar un cambio grande en el contenido de agua líquida observado (Hering *et al*, 1987). Esto se comprende mejor si se tiene en cuenta que, aun en una niebla densa, la mayor parte del agua presente se encuentra en fase gaseosa. Por ejemplo, para temperaturas entre 10 y 13 °C, muy comunes en las zonas montañosas muestreadas, la presión de equilibrio del vapor de agua equivale a alrededor de 10 g de vapor de agua por metro cúbico de aire. Incluso un contenido de agua líquida tan elevado como 2 g m⁻³, representaría sólo alrededor del 20% del agua presente como vapor. Para los contenidos de agua líquida estimados

durante este estudio, la situación es mucho más crítica debido a que los valores obtenidos fueron de tan sólo pocas décimas de gramo por metro cúbico, o sea, valores que representaron menos del 5% del agua presente como vapor.

3.2.6 Teziutlán, enero de 1995 [TE-3]

Este fue un muestreo intensivo realizado durante los días 18 y 19 de enero en el cual se comparó el funcionamiento de tres colectores diferentes de agua de nube: el colector cilíndrico pasivo (utilizado en los muestreos TL-1, TE-1 y TE-2); el colector de malla metálica pasivo, cuyas características están descritas en el principio de este capítulo; y el mismo colector activo empleado en los muestreos anteriores. En la tabla 3 y figs. 14, 15, 16 y 17 se puede observar que las muestras de agua de nube colectadas por el colector activo fueron las que presentaron mayor contaminación. Esto concuerda con los resultados obtenidos en Teziutlán en noviembre de 1993. Las diferencias entre los colectores pasivos fueron mucho menores. En las tablas 4 y 5 se presentan los diámetros de corte y la capacidad de colección de los colectores (ver Sección 2.3), y en la fig 18 están los CAL de las nubes para cada tipo de colector. Como información general en la tabla 6 se presenta la composición química de las muestras en función de su origen (agua de nube y lluvia) promediada para todas las estaciones juntas, para Tlamacas y para Teziutlán. Las figs. 19, 20 y 21 presentan también dicha información.

FIG. 4. Composición química del agua de nube (colector pasivo-cilíndrico) y de lluvia en Tlamacas, 9 sep. 1992

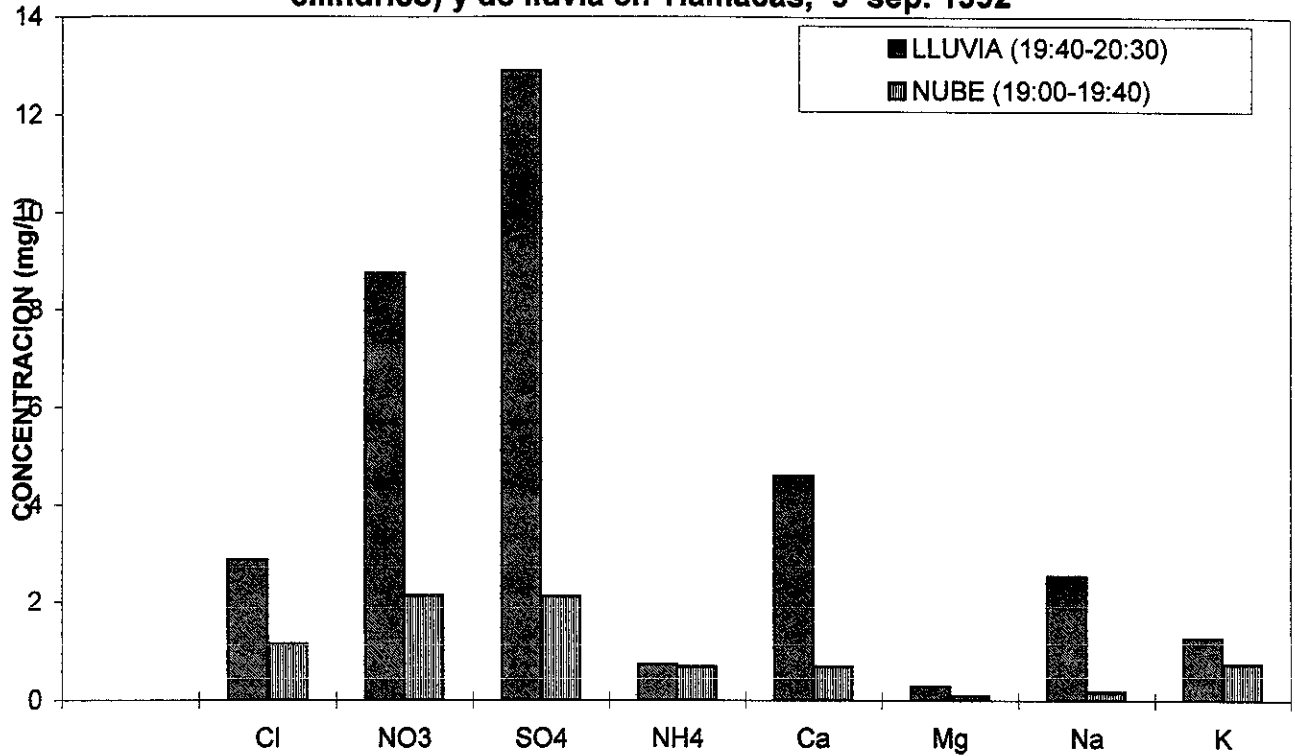


FIG. 5. Composición química secuencial del agua de nube (colector pasivo-cilíndrico) en Tlamacas, 10-11 sep. 1992

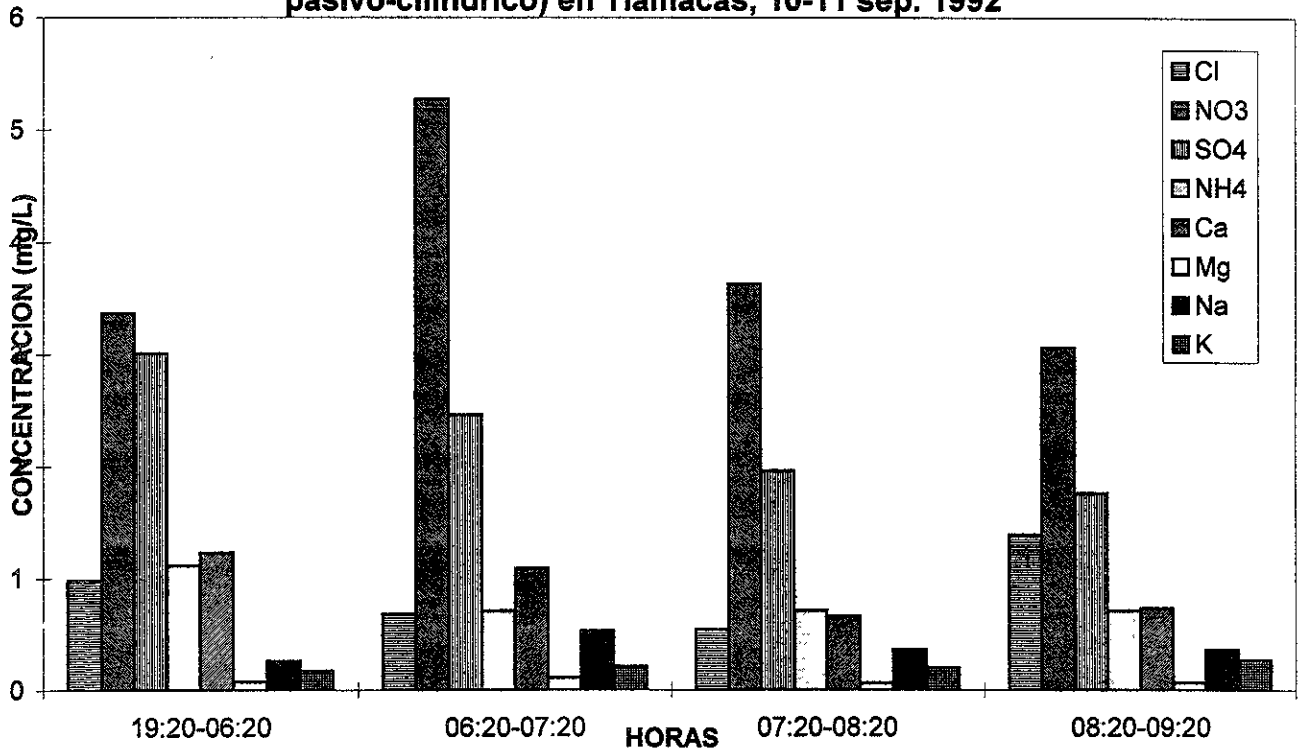


FIG. 6. Composición química secuencial del agua de nube (colector pasivo-cilíndrico) en Tlamacas, 29-30 sep. 1992

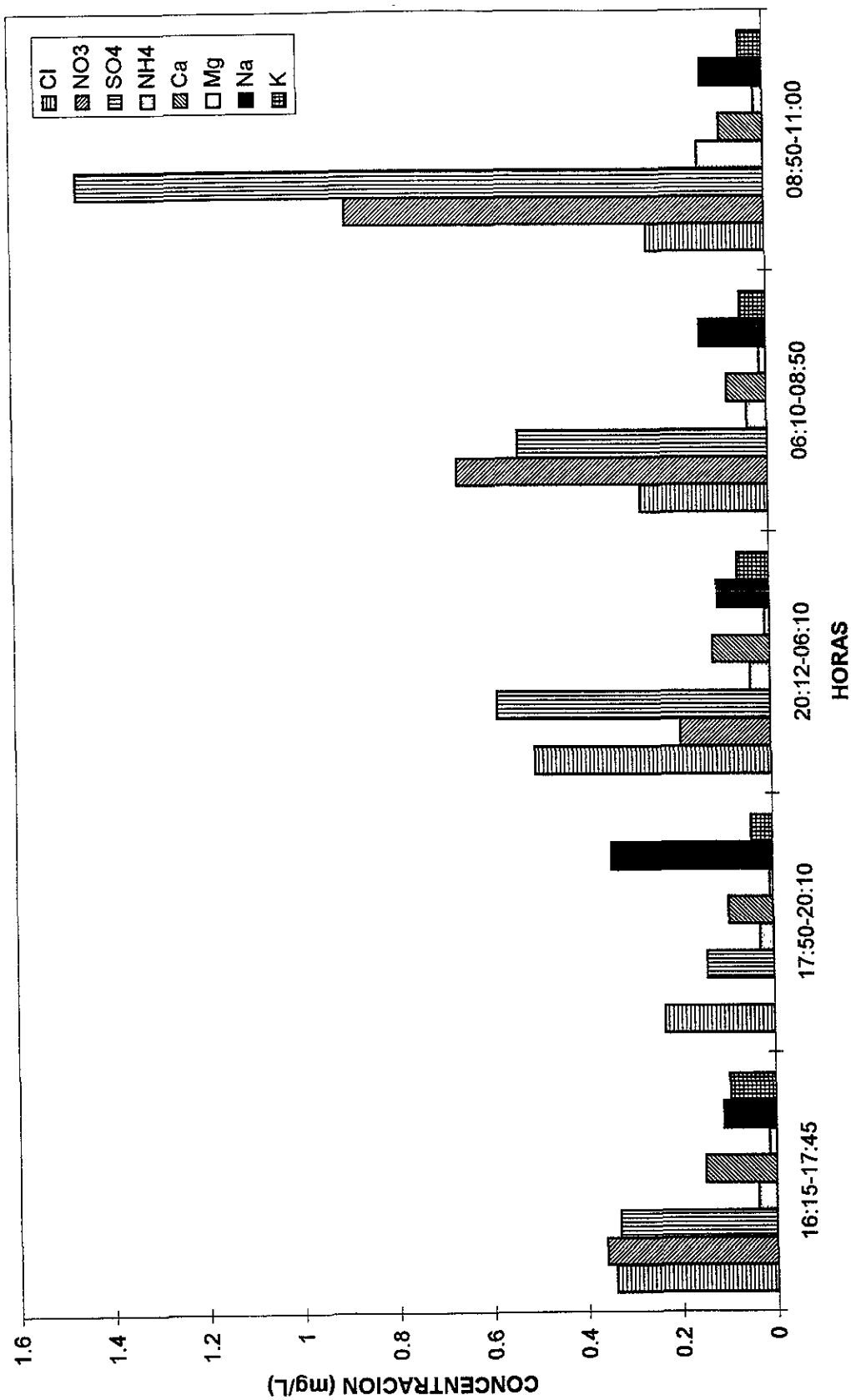


FIG. 7. Comparación simultánea de la composición química del agua de nube (colector activo) y de lluvia en Tlamacas, 19 jul. 1994

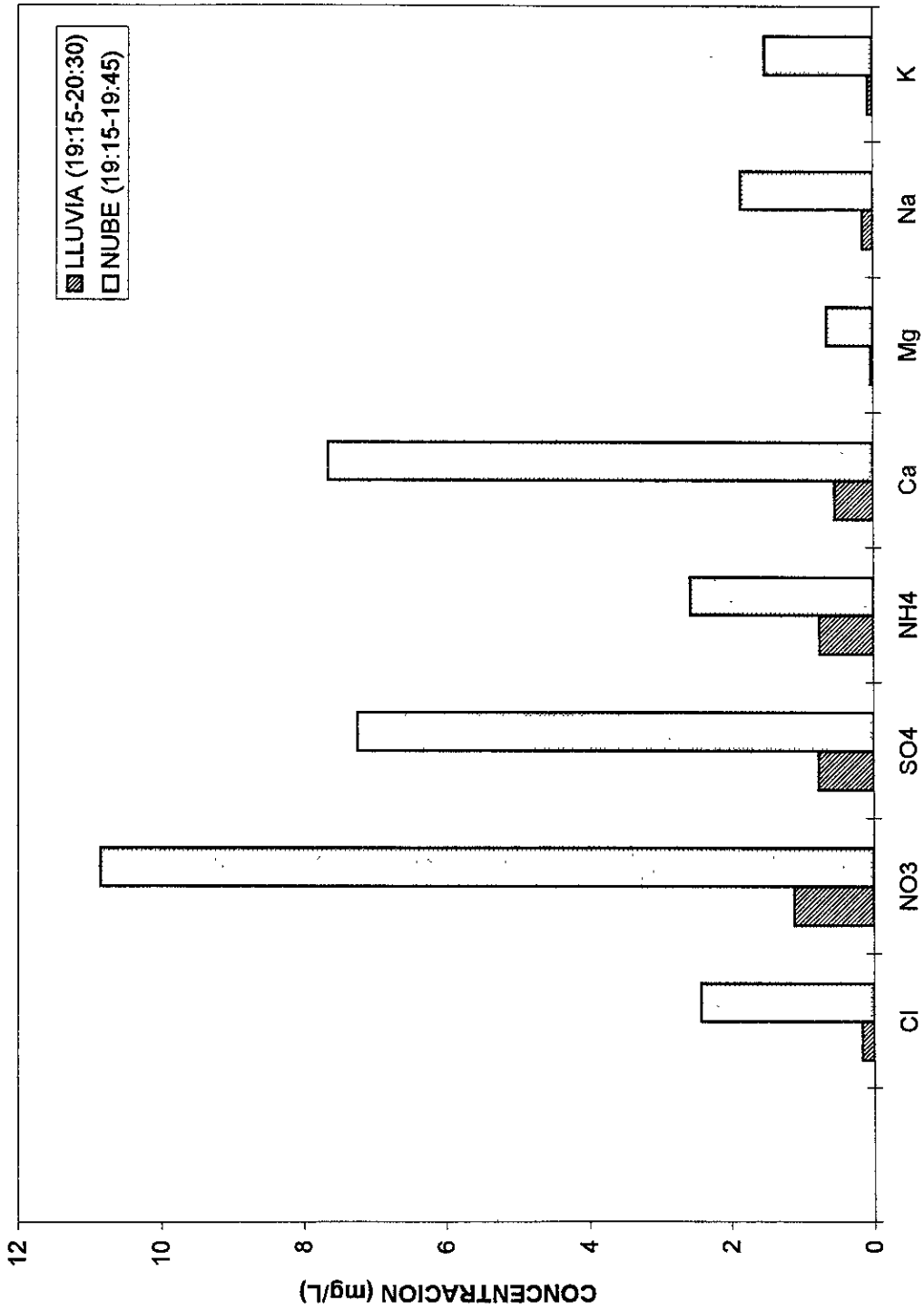


FIG. 8a. Comparación simultánea de la composición química del agua de nube (colector activo) y de lluvia en Tlamanca, 20 jul. 1994

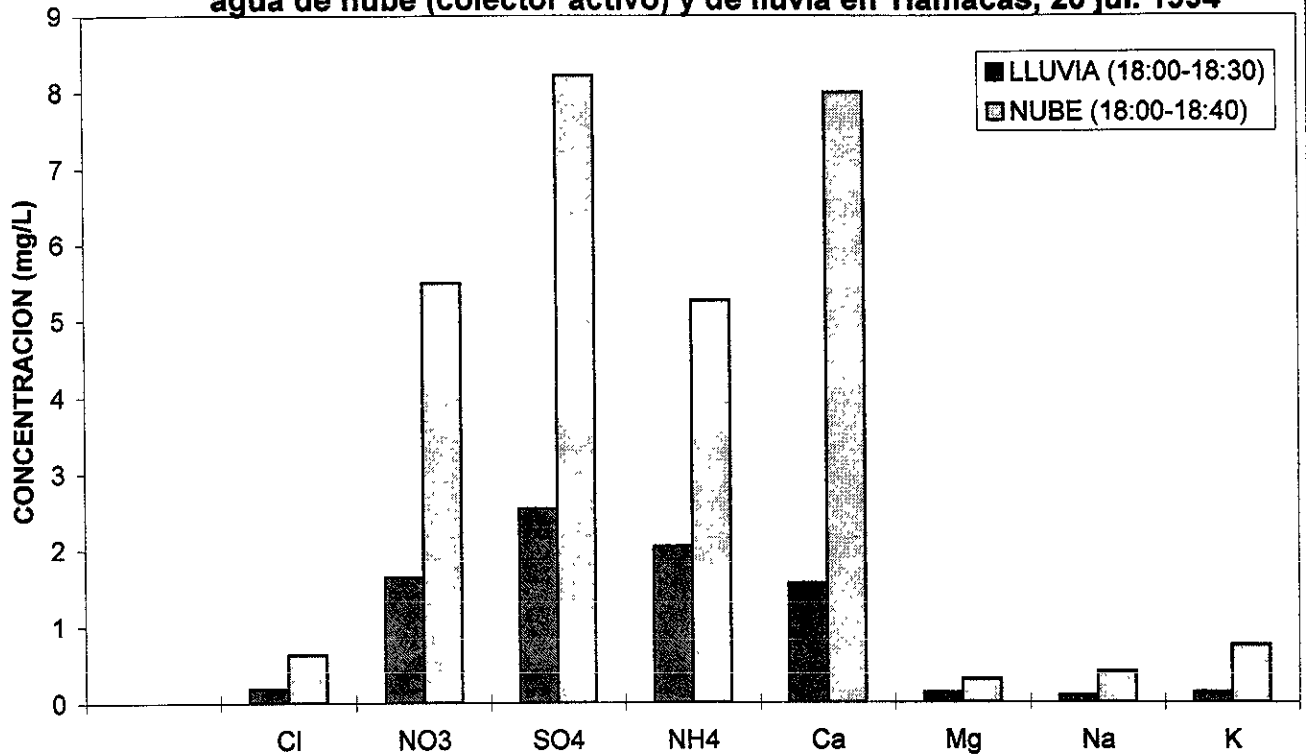


FIG. 8b. Comparación simultánea de la composición química del agua de nube (colector activo) y de lluvia en Tlamanca, 20 jul. 1994

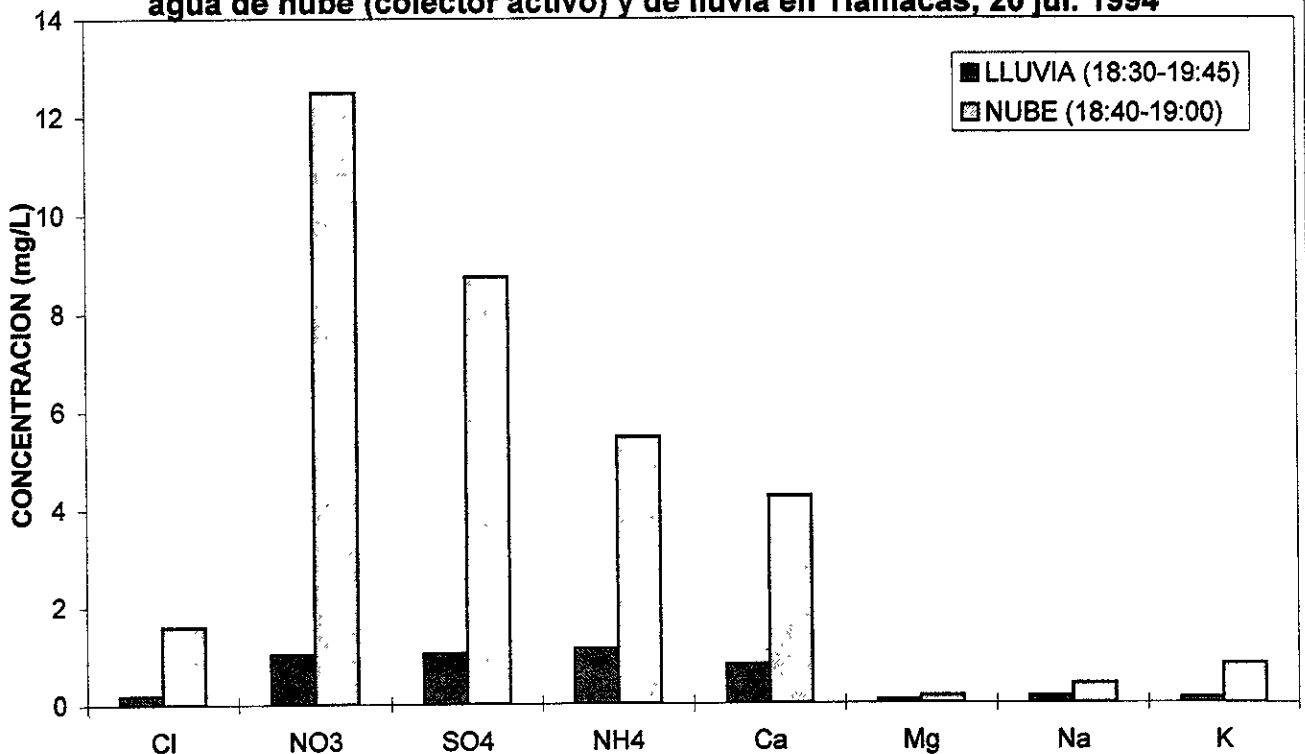


FIG. 9a. Comparación simultánea de la composición química del agua de nube (colector activo) y de lluvia en Tlamacas, 21 jul. 1994

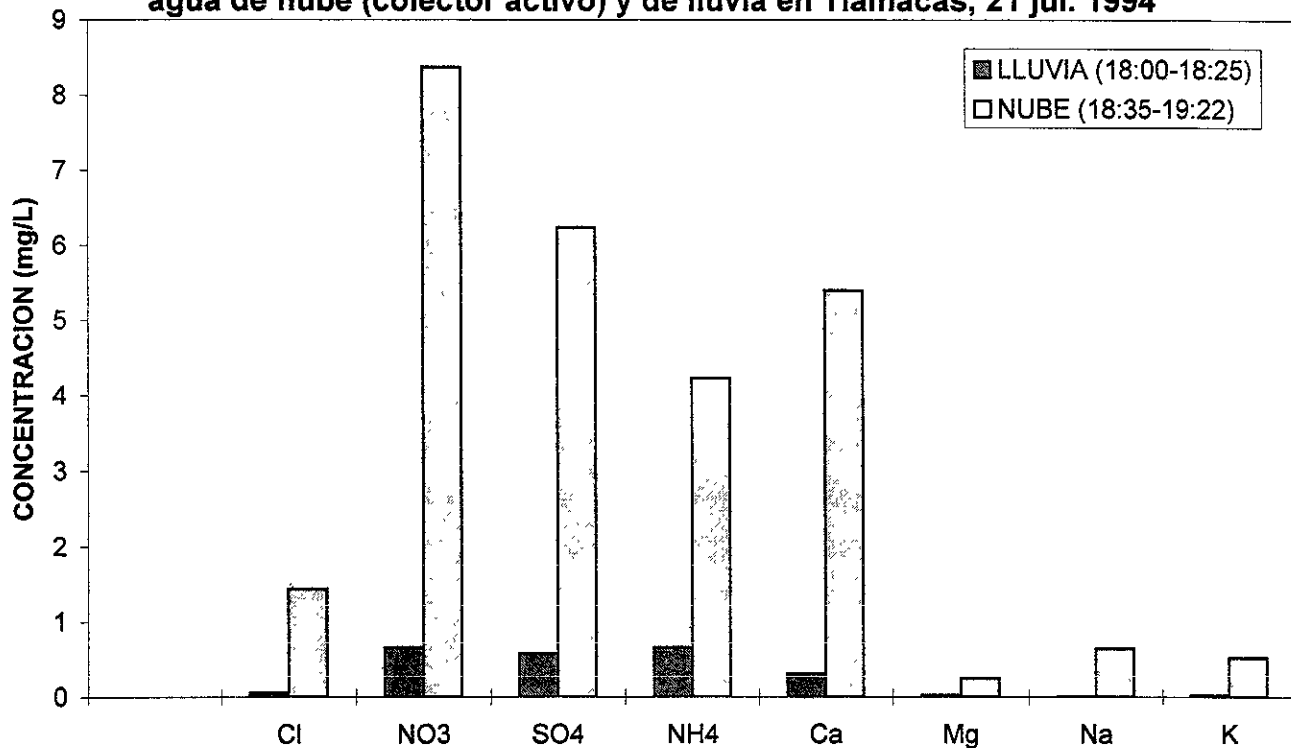


FIG. 9b. Comparación simultánea de la composición química del agua de nube (colector activo) y de lluvia en Tlamacas, 21 jul. 1994

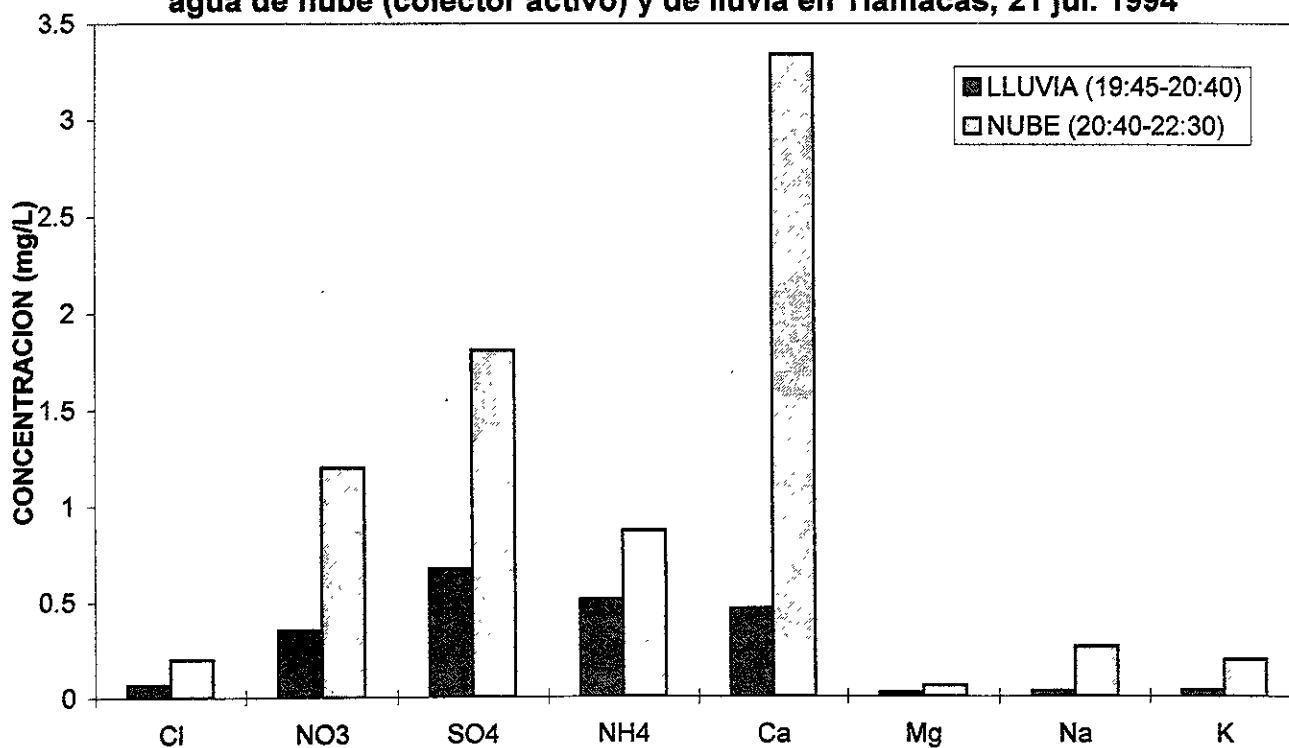


FIG. 10. Composición química secuencial del agua de nube (colector pasivo-cilíndrico) en Teziutlán, 26-27 nov. 1993

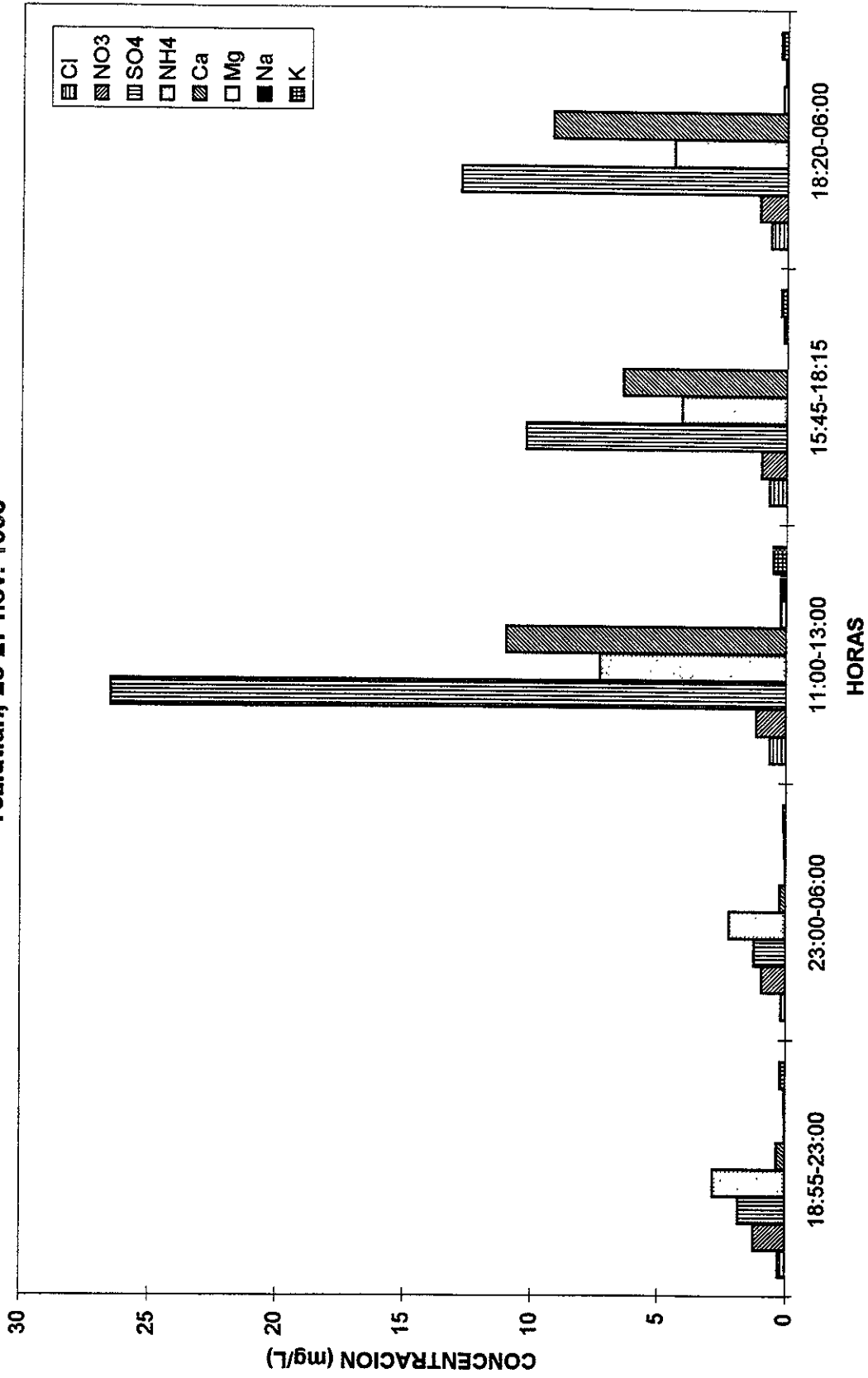


FIG. 11. Composición química secuencial del agua de nube (colector activo) en Teziutlán, 28 nov. 1993

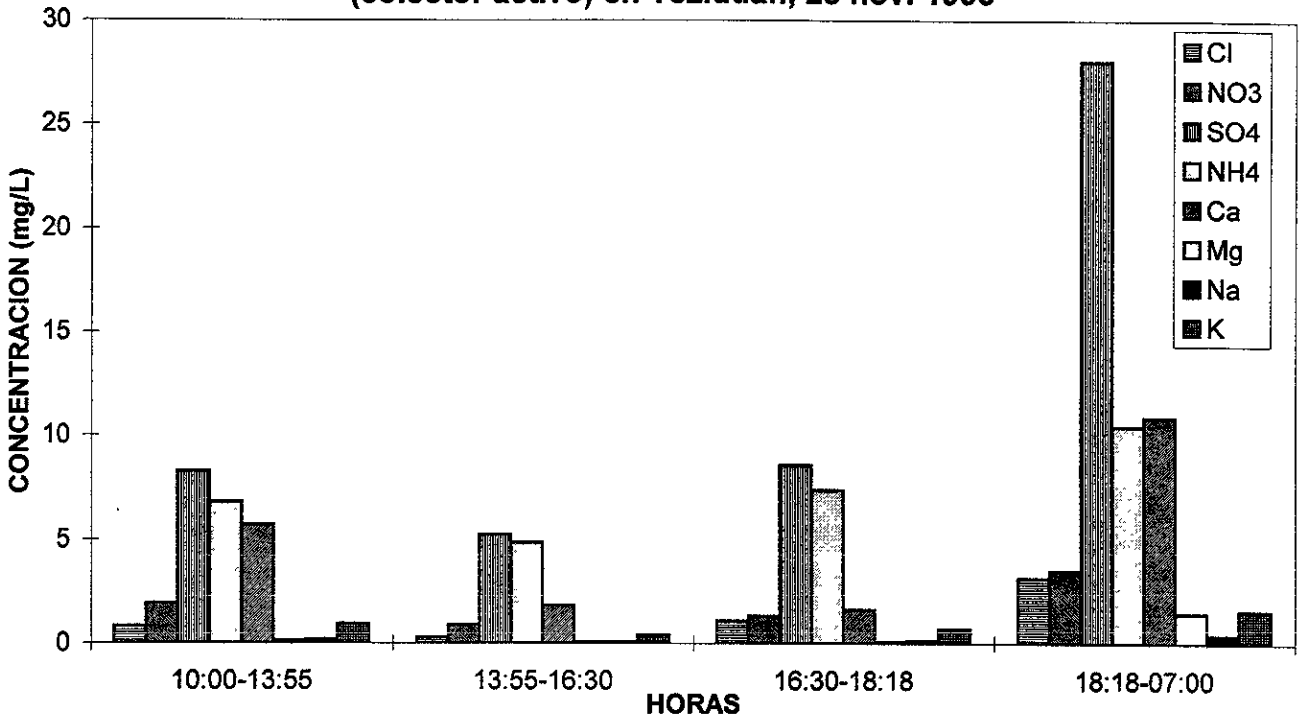


FIG. 12. Composición química secuencial del agua de nube (colector pasivo-cilíndrico) en Teziutlán, 28 nov. 1993

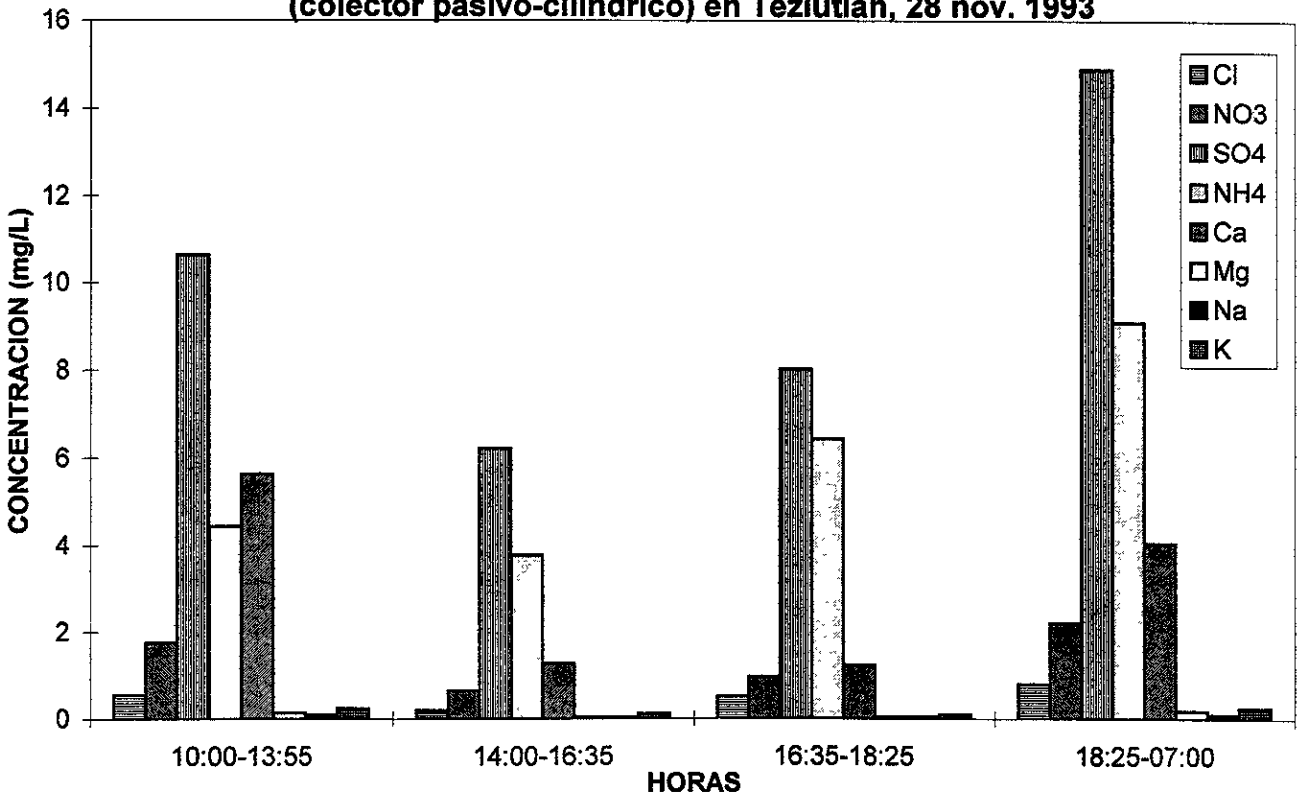


FIG. 13. Contenido de agua líquida secuencial de la nube en función del tipo de colector en Teziutlán. 28 Nov. 1993

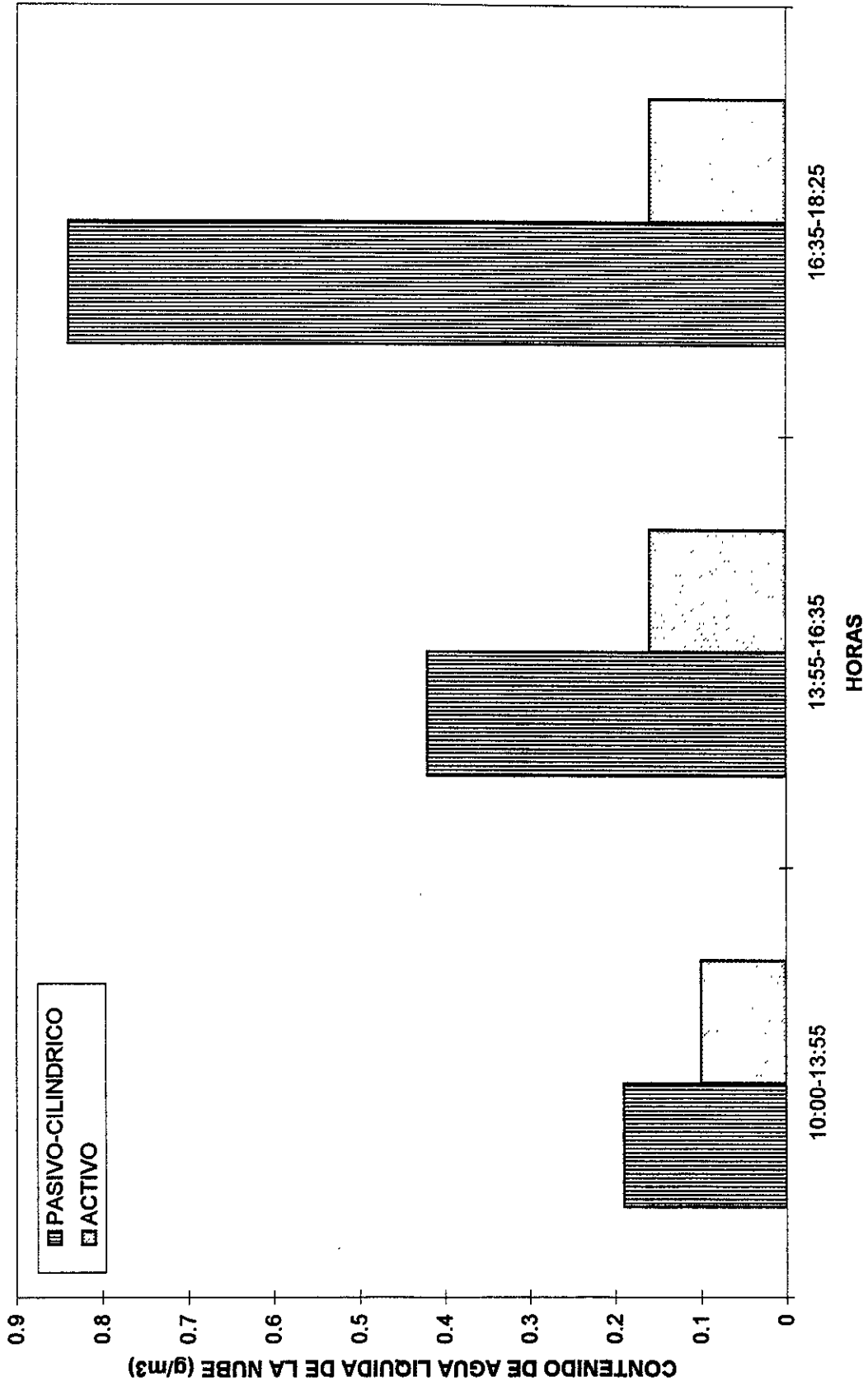


FIG. 14. Composición química secuencial del agua de nube (colector activo) en Teziutlán, 18-19 ene. 1995

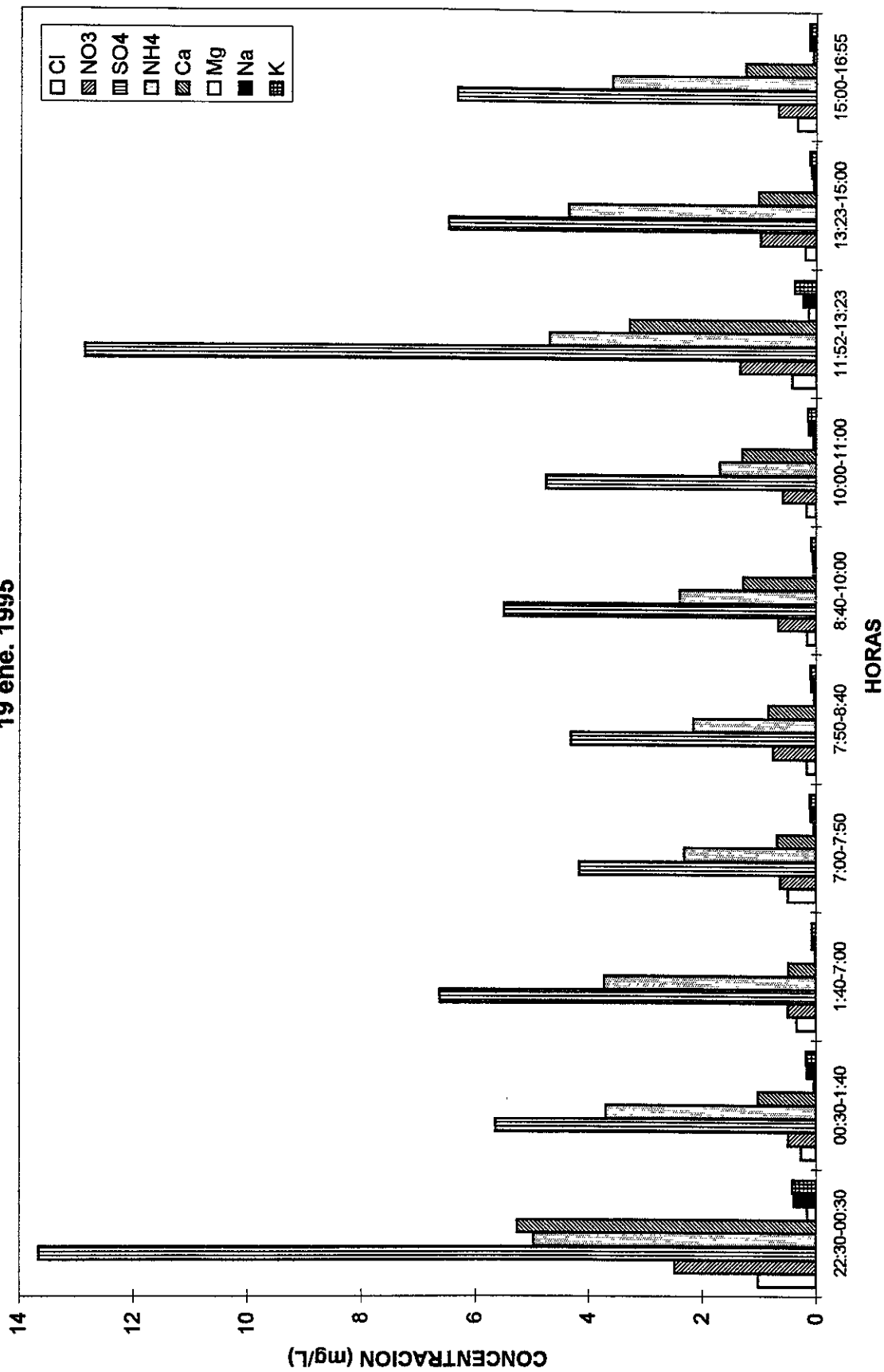


FIG. 15. Composición química secuencial del agua de nube (colector pasivo de malla) en Teziutlán, 18-19 ene. 1995

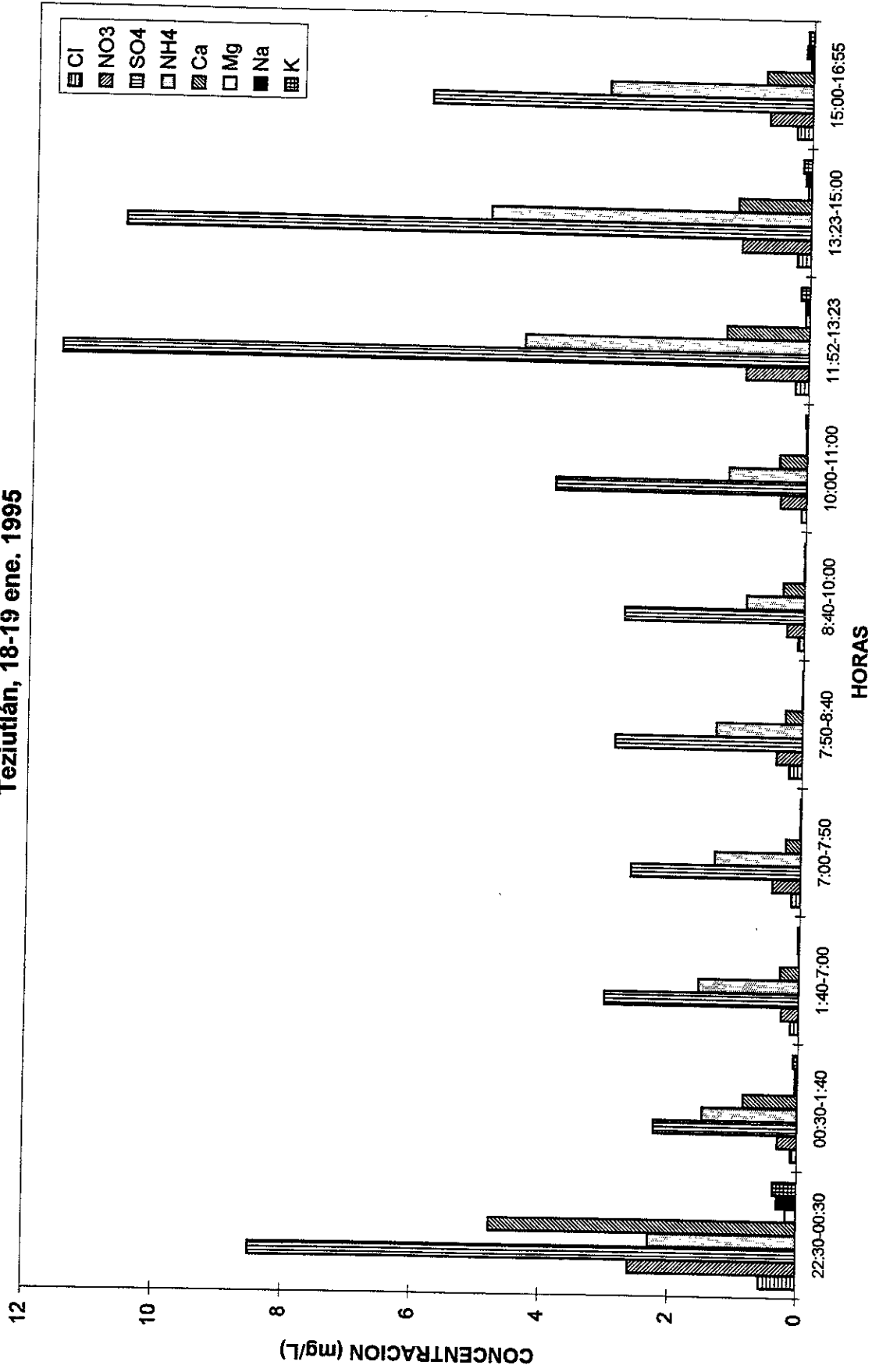


FIG. 16. Composición química secuencial del agua de nube (colector pasivo-cilíndrico) en Teziutlán, 18-19 ene. 1995

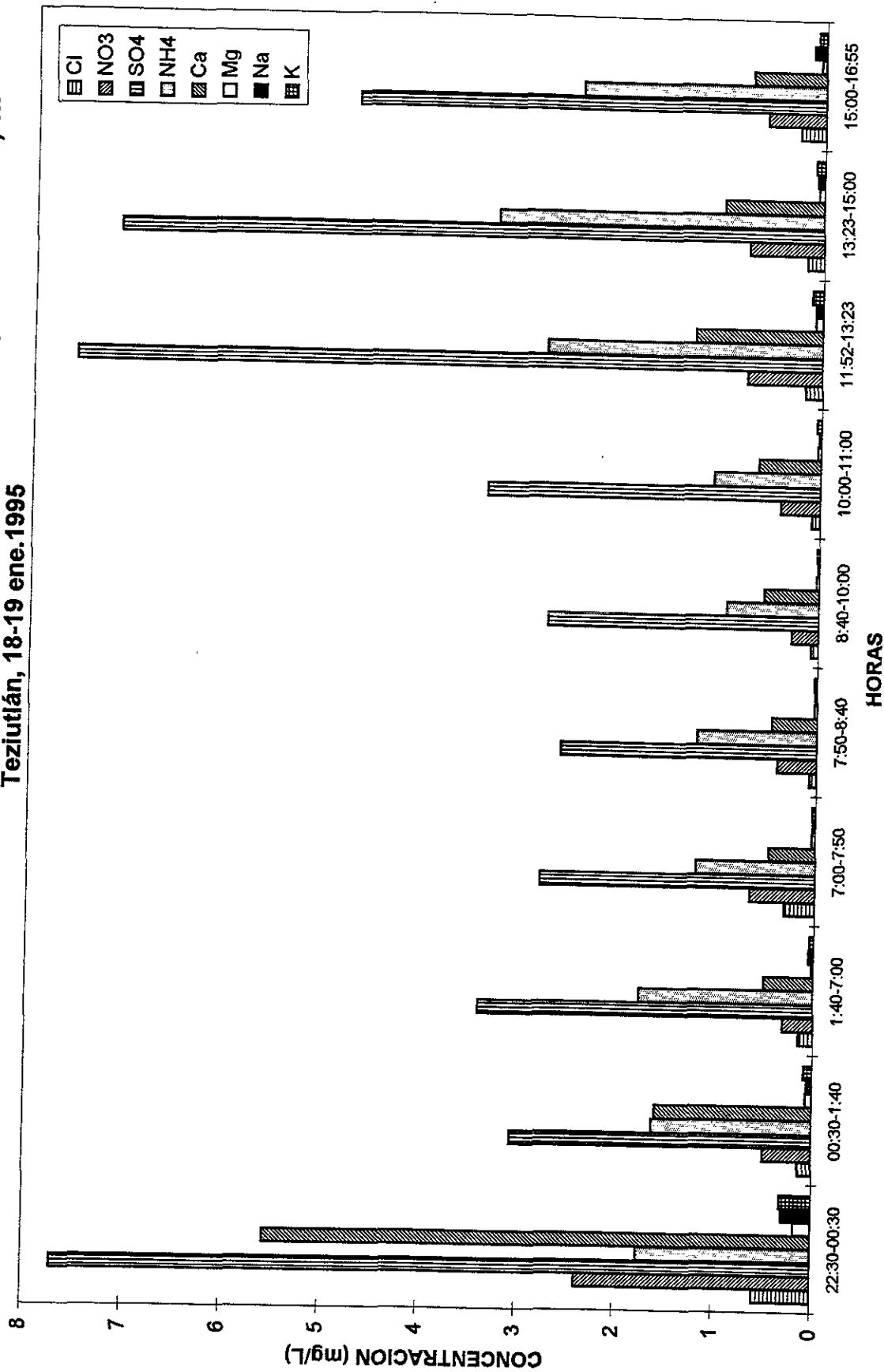


FIG. 17. Composición química secuencial del agua de lluvia en Teziutlán, 18-19 ene.1995

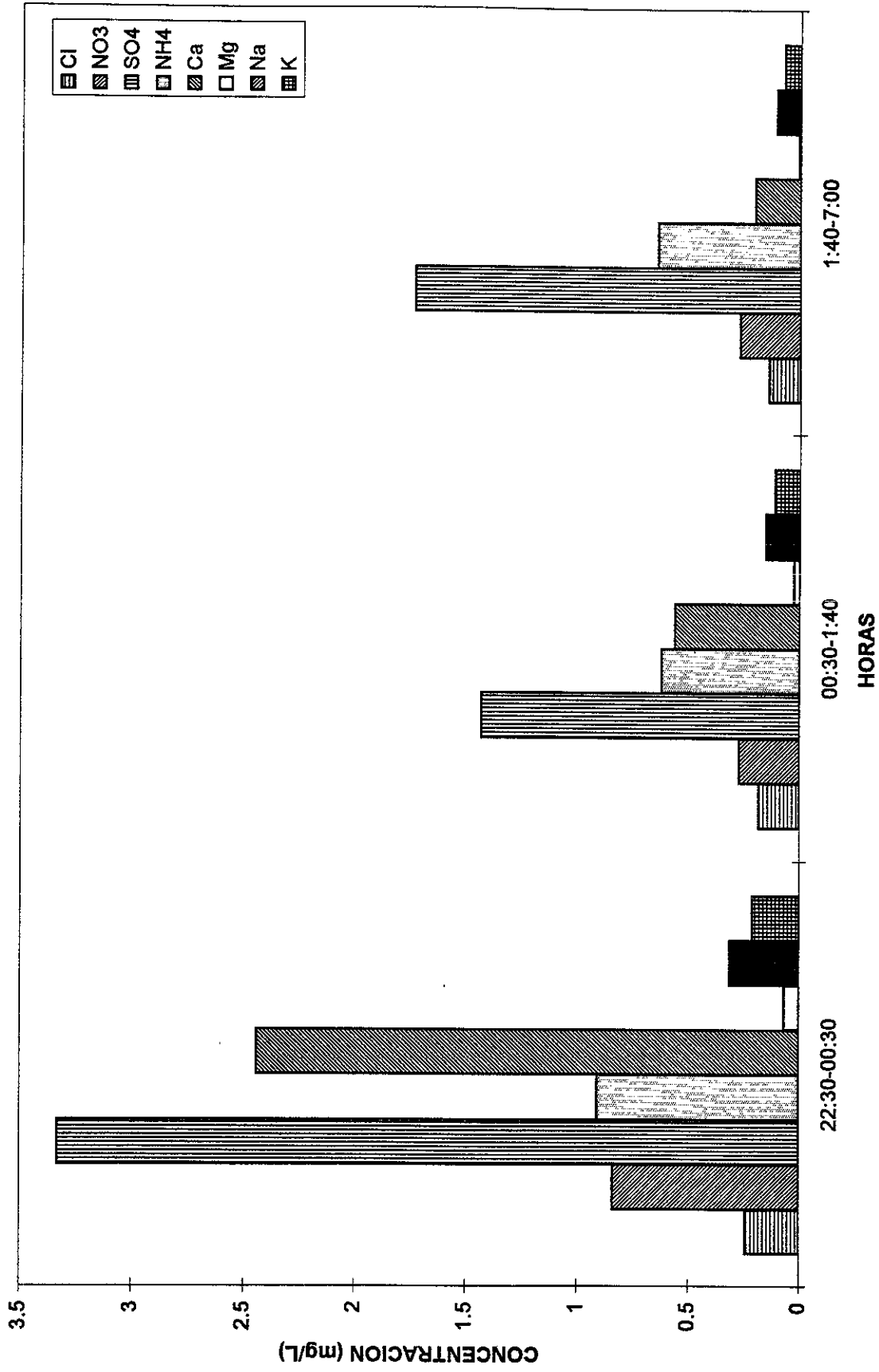


FIG. 18. Contenido de agua líquida secuencial de la nube en función del tipo de colector en Teziutlán, 18-19 ene. 1995

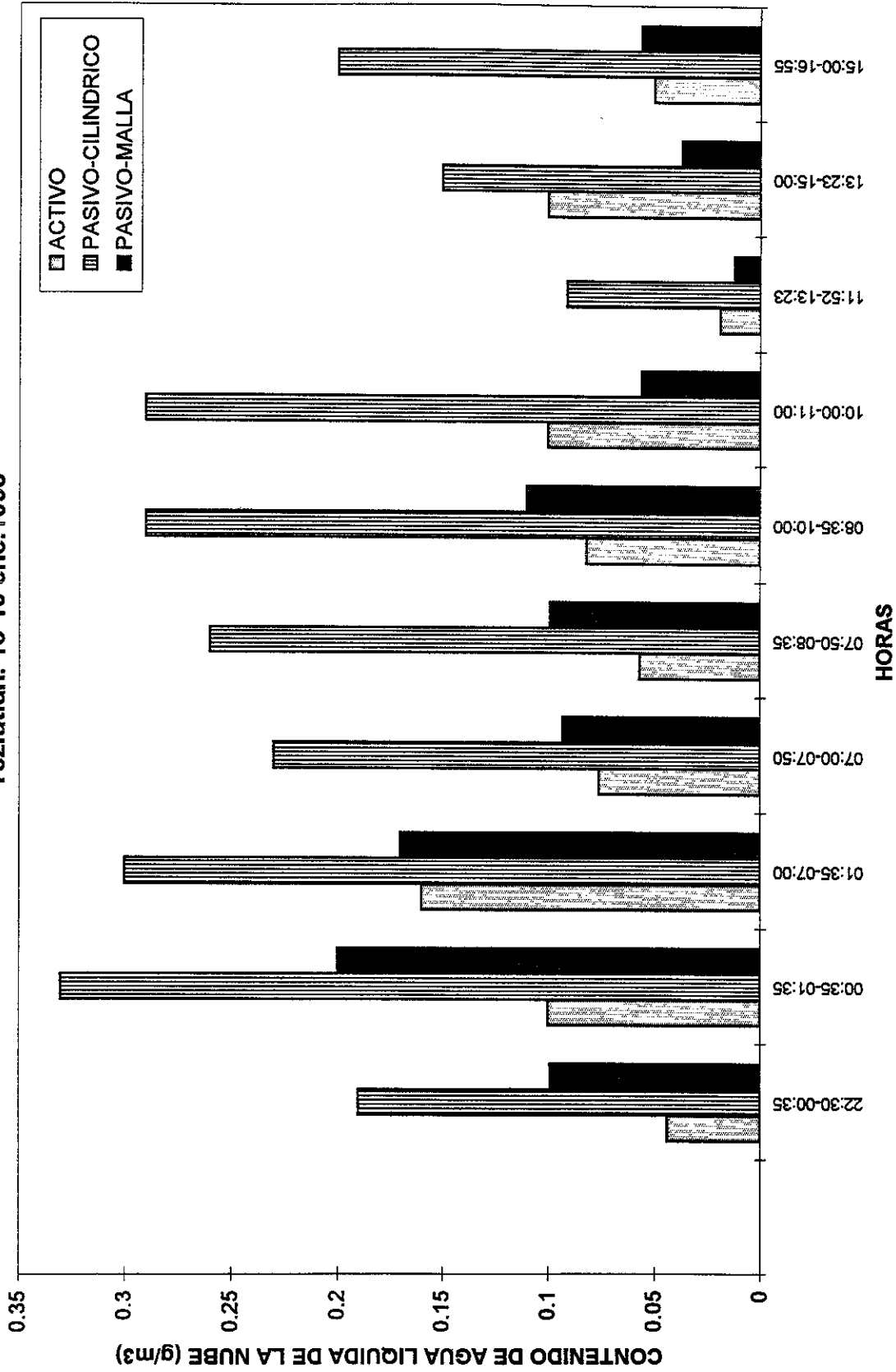


FIG. 19. Composición química promedio en función del tipo de muestra para todas las estaciones

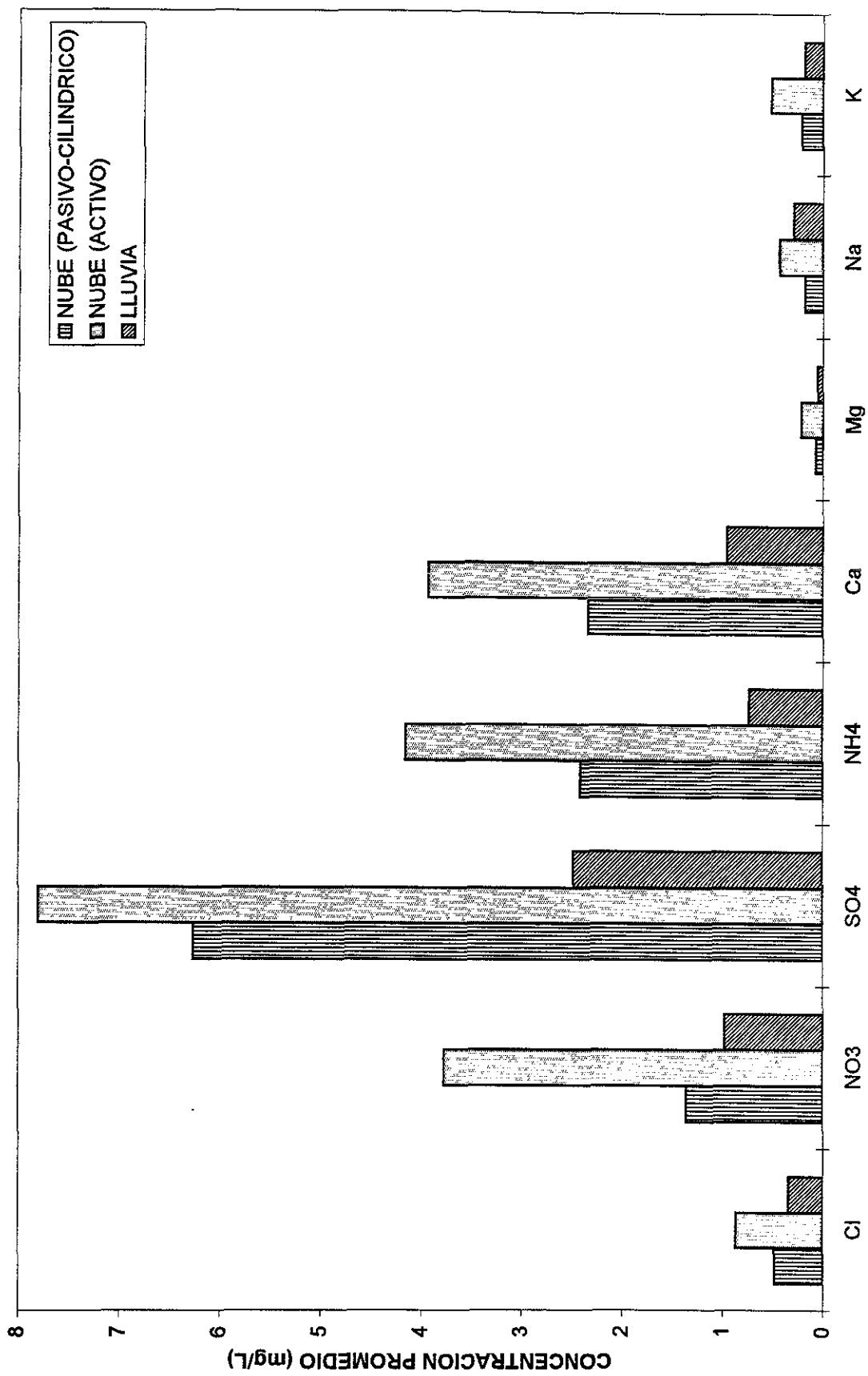


FIG. 20. Composición química promedio en función del tipo de muestra para Tlaxiaco

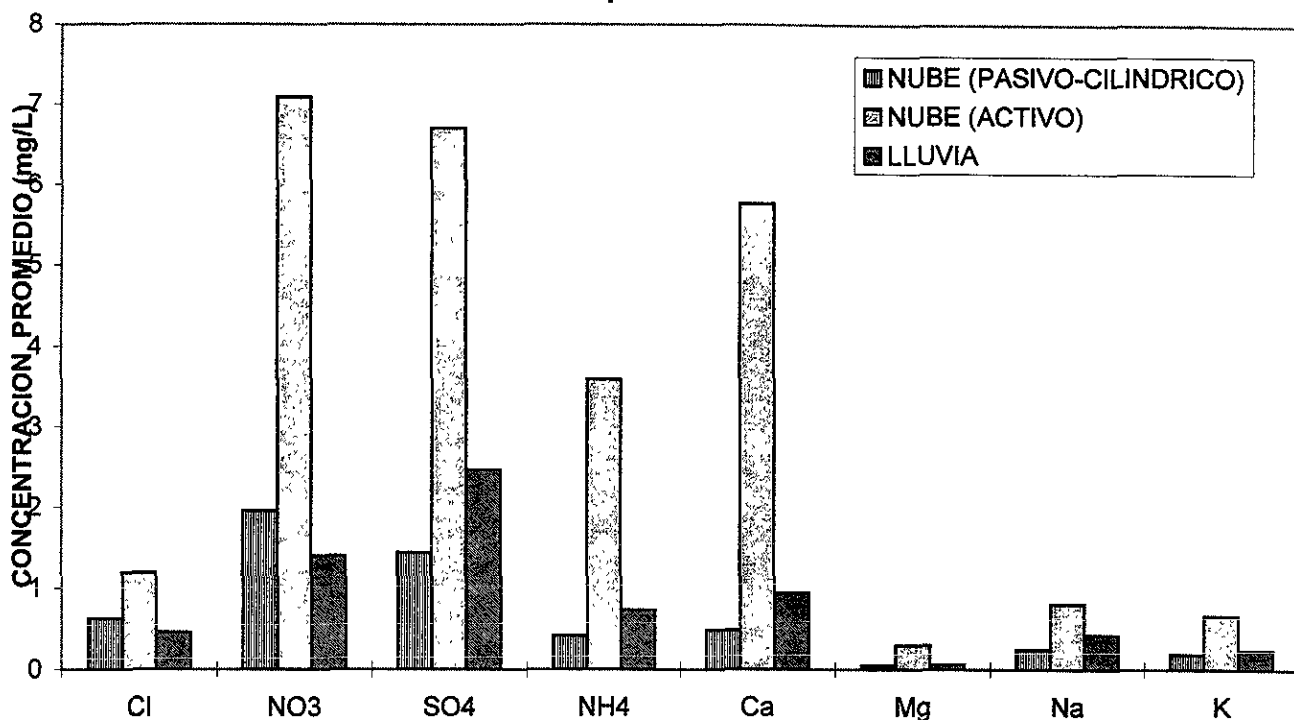
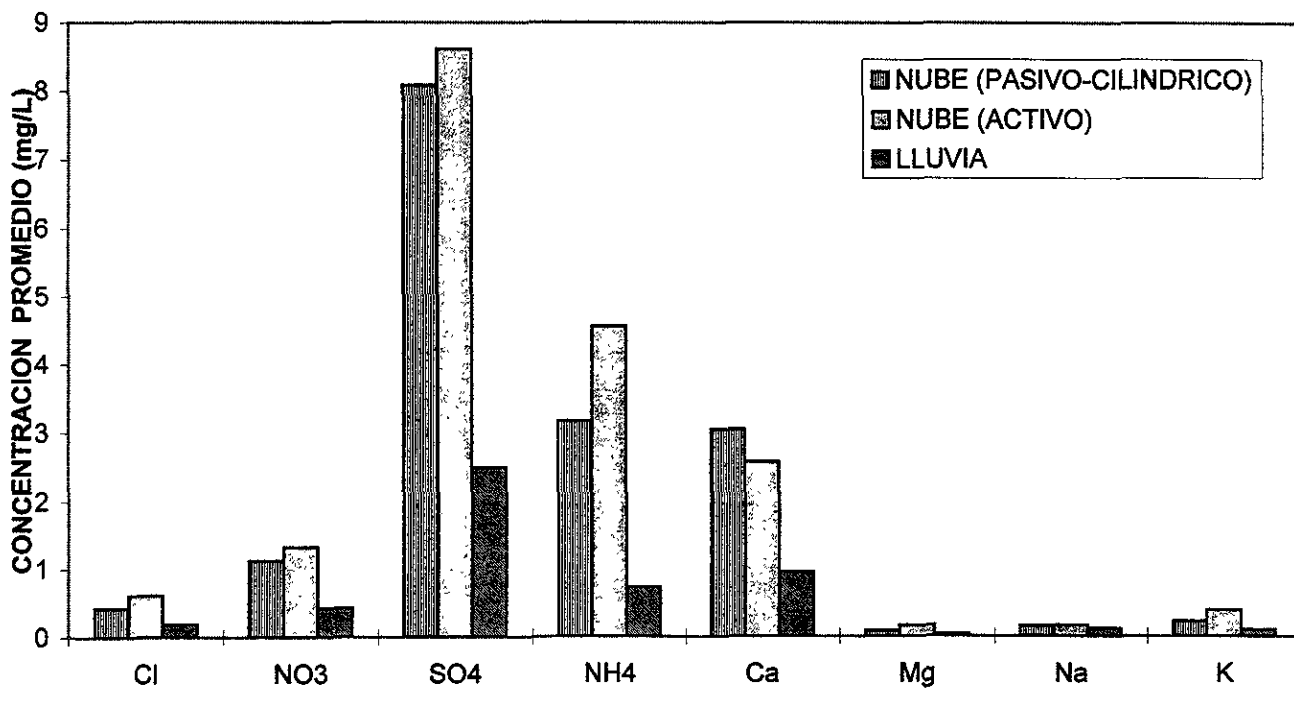


FIG. 21. Composición química promedio en función del tipo de muestra para Teziutlán



3.3 DISCUSIÓN GENERAL

En lo que sigue, se enfocará la discusión a todos los resultados en conjunto para cada tipo de colector y sitio de muestreo.

En la tabla 7 están los resultados de las pruebas estadísticas no paramétricas de Mann-Whitney para encontrar diferencias significativas en los niveles de contaminación, entre las muestras de agua de nube colectadas por el colector activo y pasivo, entre las muestras de agua de nube y de precipitación pluvial y entre los dos sitios de muestreo. Con estas pruebas se demuestra que para los dos sitios de muestreo (información conjunta, ver tabla 7) con el colector activo se obtuvieron niveles significativamente más altos de nitratos, amonio, calcio, magnesio y potasio que con el pasivo. Para cada lugar por separado, tanto en Tlamacas como en Teziutlán, el agua de nube colectada con el colector activo presentó niveles de contaminación más elevados que en la colectada con el pasivo. En Tlamacas, con el activo el agua de nube presentó mayor contenido de nitratos, sulfatos, amonio, calcio y magnesio, mientras que en Teziutlán sólo el amonio estuvo presente en mayor concentración en las muestras de agua de nube colectadas con el activo.

Las diferentes condiciones meteorológicas que imperan en cada sitio son la causa de que en Teziutlán las diferencias en la composición química de las muestras de agua de nube encontradas entre los dos colectores, fueran menores que las encontradas en Tlamacas. Teziutlán se encuentra en una región donde las nubes frecuentemente cubren grandes extensiones de tal manera que hubo suficiente tiempo para que interactuaran las partículas y gases intersticiales (entre las gotitas de las nubes) y las gotitas de las nubes. Esto es, hubo más tiempo para que los gases y componentes solubles en agua de estas partículas se incorporaran a las gotitas ya sea por colisión o por difusión antes de que las gotitas fueran impactadas en los colectores. Por el contrario, las partículas que llegaron a Tlamacas desde las zonas semiáridas de los estados de Puebla y Tlaxcala que circundan a La Malinche, no tuvieron tiempo suficiente para interactuar en forma apreciable con las gotitas de las nubes, así, las partículas que no llegaron a estar

en contacto con las gotitas lo hicieron sobre los hilos de los colectores. Esta explicación está apoyada por el hecho de que a diferencia de Teziutlán, en Tlamacas las nubes que se presentaron durante las campañas de muestreo fueron aisladas, principalmente del tipo convectivo, cubriendo como consecuencia menor extensión que las nubes del tipo estratocúmulos, típicamente observadas en Teziutlan en invierno. De esta manera, la composición química original de las gotitas de las nubes fue igualmente modificada por las partículas pero no en la atmósfera sino principalmente sobre los hilos de los colectores. Consecuentemente, como el colector activo captura más eficientemente dichas partículas que el pasivo, la composición química final de las muestras de agua de nube varió significativamente entre los dos colectores. Para remarcar nótese la gran diferencia que existió entre esta situación y la que se presentó cuando las gotitas de las nubes y las partículas ya habían interactuado antes de que la colección de las gotitas de las nubes se llevara a cabo. Esto explica por qué no se presentaron tantas diferencias significativas entre los dos tipos de colectores en Teziutlán como en Tlamacas.

Al comparar la composición química del agua de nube con la de la lluvia, para Teziutlán se observó que el agua de nube colectada con el colector activo tuvo concentraciones significativamente mayores de todos los iones menos de sodio. En el caso del colector pasivo, las muestras de agua de nube tuvieron concentraciones mayores de todos los iones menos de cloruros, calcio, sodio y potasio. Esto se debió a que el colector activo colecta más eficientemente las partículas, ricas en metales alcalinos. Para Tlamacas, el agua de nube colectada con el activo tuvo concentraciones significativamente mayores de todos los iones. Por el contrario, con el colector pasivo no hubo diferencias significativas excepto para el cloruro. Esto es debido a los casos en los que la lluvia provino de nubes contaminadas por las fumarolas del cráter del Popocatépetl. Se debe remarcar que lo anterior no debe de tomarse como algo general sino como un caso particular que no modifica el hecho de que las muestras de agua de nube presentan mayor concentración de contaminantes que las del agua de lluvia.

Las concentraciones promedio de sulfatos, amonio y calcio en el agua de nube colectada con el colector pasivo fueron mayores en Teziutlán que en Tlamacas, mientras que las

concentraciones de los mismos iones en el agua de nube colectada con el colector activo no fueron estadísticamente diferentes entre ambos lugares. No se tiene una explicación satisfactoria para esto. Aunque es difícil establecer esta comparación debido a que las nubes en Tlamacas fueron convectivas mientras que en Teziutlán fueron estratiformes. No olvidar que los muestreos en estos dos sitios se realizaron en diferentes estaciones del año. Otro problema es que parte de la lluvia colectada en Tlamacas se formó a partir del derretimiento de cristales de hielo, en cambio en Teziutlán toda la lluvia provino de gotitas por tratarse de nubes "calientes". En cuanto a la composición química de la lluvia, no se encontraron diferencias significativas entre Teziutlán y Tlamacas.

En la tabla 8 están los resultados de la prueba de Mann-Whitney (valores de U). Esta prueba consiste esencialmente en lo mismo que la descrita en la tabla 7, con la única diferencia de que se aplica para números de muestra pequeños. Como puede observarse, los resultados concordaron perfectamente con los de la tabla 7, lo que refuerza la validez de la prueba estadística. Sin embargo, se debe de reconocer que a mayor número de muestras más seguras son las conclusiones basadas en los resultados de comparaciones estadísticas.

Otro problema que surge al establecer este tipo de comparaciones, es que pueden existir nubes en un ambiente limpio y, por lo tanto, tener menor contaminación que una lluvia que cae de una nube que se formó en una atmósfera contaminada, como es el caso mencionado arriba. Finalmente, lo idóneo es muestrear en forma simultánea el agua de nube y de lluvia el mayor número de veces que permitan las condiciones meteorológicas.

Antes de presentar la discusión general de los resultados de todos los muestreos, se expondrán aquí los argumentos dados por Mohnen y Kadlec (1989) para explicar las razones por las cuales las concentraciones de contaminantes en el agua de nube es mayor que en la lluvia. Estos investigadores proponen las siguientes razones:

- 1.- La formación de la lluvia en un medio ambiente más limpio a niveles altos, junto con la adición de más agua que diluye aún más la concentración de iones,

2.- La formación de hidrometeoros de hielo los cuales son generalmente más limpios que los hidrometeoros líquidos.

Para las muestras del Popocatepetl en las que el agua de lluvia resultó ser más limpia (julio de 1994), estos fenómenos pudieron en parte, ser las causas, junto con las que se proponen en este trabajo. Sin embargo, para el caso de las muestras de Teziutlán, los mecanismos propuestos por Mohnen y Kadlecek no pueden ser aplicados debido a que las nubes muestreadas en este sitio sólo estaban constituidas por hidrometeoros líquidos y, por otro lado, la lluvia no provino de niveles altos. La altura de las nubes observada en este estudio (aproximadamente 400 metros sobre el nivel del suelo) concuerda con la climatología típica de toda la región que comprende las laderas orientales de la Sierra Madre Oriental (se recomienda consultar a Llanos y Cervantes (1996) y Tejeda *et al.* (1989)). En este caso, la explicación más plausible es la propuesta más adelante. Los resultados encontrados en la presente investigación apoyaron un argumento adicional a los expuestos por Mohnen y Kadlecek. En seguida se encuentra la secuencia de los razonamientos y experimentos que permitieron formular dicho argumento.

Tanto en Teziutlán como en Tlamacas, las concentraciones de algunos iones fueron más elevadas en las muestras de agua de nube colectadas con el colector activo que las colectadas con el pasivo. Incluso, en Teziutlán las muestras provenientes del colector pasivo presentaron concentraciones sorprendentemente elevadas de sulfatos, calcio y amonio (aún mayores que las observadas en las lluvias en la Ciudad de México). Debido a los valores tan altos de calcio y amonio, las muestras presentaron un exceso de cationes con respecto a los aniones. Dicho exceso, aunque disminuyó sensiblemente después de incluir los bicarbonatos, siguió siendo considerable. Las concentraciones elevadas de estos contaminantes hacen dudar si provinieron únicamente de las gotitas de la nube, existiendo también la posibilidad de una contribución de la disolución del gas amoníaco y de partículas más grandes que contienen calcio y de partículas más finas que contienen sulfatos, los cuales también presentaron concentraciones elevadas. Es razonable suponer que parte de las partículas que estaban presentes en la atmósfera antes de la formación de las nubes, hayan quedado suspendidas entre las gotitas de las

nubes cuando éstas se formaron. Dichas partículas al ser colectadas por los hilos de los colectores aumentaron la concentración iónica de las muestras de agua de nube.

Cabe mencionar que casi todas las muestras fueron alcalinas, indicando que los sulfatos en las muestras no están presentes como ácido sulfúrico. Sin embargo, existe la posibilidad de que este ácido haya sido neutralizado por la presencia de partículas con calcio y magnesio. Es importante señalar que, en Tlamacas, el colector pasivo obtuvo muestras de agua de nube cuya concentración de contaminantes fue muy baja, lo que indica que por lo menos este colector no contamina el agua de las nubes durante su colección. Una demostración técnica de que las altas concentraciones de iones no provinieron de colectores de agua de nube contaminados se obtuvo al analizar blancos de campo como si fueran muestras de agua de nube o de lluvia. Los blancos de campo se obtuvieron lavando los colectores con agua desionizada y recolectando el agua de enjuague en botellas para su posterior análisis químico en el laboratorio, junto con las muestras de agua de nube. Los análisis de estos blancos dieron como resultado concentraciones apenas detectables en el cromatógrafo de iones.

Algunas conclusiones importantes para la interpretación objetiva de la información obtenida son: en zonas con alto contenido de partículas y otros contaminantes, resulta imposible discernir si los contaminantes encontrados en las muestras de agua de nube estaban inicialmente sólo disueltos en las gotitas de la nube, o bien si parte de dichos contaminantes estaba también suspendida en los espacios existentes entre las gotitas. Si esta última posibilidad es lo que realmente ocurrió, lo cual es razonablemente factible en la atmósfera, entonces, durante la colección, las gotitas de nube y los contaminantes suspendidos en forma de partículas o de gases solubles se impactaron o disolvieron conjuntamente en la superficie colectora, mezclándose todo esto para posteriormente acumularse en el recipiente contenedor. No sería de extrañar que la razón por la cual las muestras colectadas con el colector activo estuvieran más contaminadas, es que se facilitó la colección de partículas debido a que la velocidad con la cual este colector succiona el aire es mayor que la velocidad del viento con la que se impactan las gotitas en el colector pasivo.

Los experimentos realizados en la azotea del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, comprueban la posibilidad de que el fenómeno anterior existió y que por ende afectó la composición química original de las gotitas de nube. Estos experimentos consistieron en hacer funcionar el colector activo por un intervalo de cinco horas.

En el primer experimento se colocó, desde un principio, una botella con un volumen de agua desionizada similar al de un gran número de muestras reales de agua de nube. El análisis del agua desionizada no indicó ninguna contaminación lo que sugiere que, si las partículas fueron interceptados por el colector, éstas se quedan en los hilos. Para apoyar esto fue necesario realizar un segundo experimento en el cual, al igual que en el primero, se hizo funcionar el colector activo por otras cinco horas pero en esta ocasión, en lugar de colocar desde un principio una botella con agua desionizada, los hilos colectores se enjuagaron con un volumen de agua desionizada similar al del experimento anterior después de las cinco horas. El enjuague se colectó en una botella vacía, tal como si fuera una muestra de agua de nube. En esta ocasión, el análisis por cromatografía de iones de este enjuague dio concentraciones muy elevadas de cloruros, nitratos y sulfatos (2.01, 6.19 y 30.19 ppm respectivamente).

El experimento anterior fue una prueba más de que el colector activo colecta partículas en forma eficiente. Sin embargo, si el ion sulfato está asociado con aerosoles cuyo diámetro es menor que $1\ \mu\text{m}$, como por ejemplo el sulfato de amonio, ¿por qué este ion fue tan eficientemente colectado por el colector activo cuando se operó en aire seco? De acuerdo a Lazrus *et al* (1983) y Radke *et al* (1980), la colección de este tipo de aerosoles por las gotas de lluvia es extremadamente ineficiente. Similarmente, la eficiencia de colección de estos aerosoles por los colectores de agua de nube también es muy baja. A primera vista lo anterior obviamente es una contradicción. La única explicación física es que los aerosoles más pequeños se adhirieron a las partículas grandes de origen terrestre, favoreciendo indirectamente su colección.

De esta manera se explica el alto contenido de sulfatos y otros iones en las muestras de agua de nube. Afortunadamente se midió la concentración de calcio el cual inequívocamente proviene del suelo (siempre y cuando no esté próxima una planta de cemento o cal). Por lo tanto, el hecho de que en las muestras de agua de nube se encontraran altas concentraciones de sulfatos y de calcio, sugiere fuertemente que los aerosoles pequeños de sulfatos en efecto se adhirieron a las partículas grandes provenientes del suelo que son fácilmente recolectadas por los colectores de agua de nube. Además, resulta poco probable que en la atmósfera existan completamente por separado partículas pequeñas y grandes. Como consecuencia, una explicación del origen de las altas concentraciones de contaminantes en la muestra de agua de nube colectada, por ejemplo, a partir de las 2005 HL del día 20 de julio hasta la madrugada del 21 de julio de 1994 en Tlamacas (tabla 1), se debió a la colección de un gran número de partículas, las cuales eran claramente visibles en la muestra. La colección de tantas partículas se vio favorecida por un tiempo de colección tan largo, durante el cual además no siempre estuvo presente la niebla.

El experimento ya mencionado sugiere que el mecanismo mediante el cual las partículas impactadas en los hilos de la superficie colectora fueron transferidas a la botella en donde se colectó la muestra consistió en una llovizna muy ligera, que cayó horizontalmente en presencia de vientos y/o de alguna nube cuyas gotitas al resbalar por los hilos arrastraron las partículas hacia la botella. Por otro lado, las altas concentraciones obtenidas con el colector pasivo no se debieron a una acumulación progresiva de contaminantes como consecuencia de malos lavados, ya que los enjuagues dieron concentraciones muy inferiores a las obtenidas en las muestras de agua de nube, como ya se mencionó anteriormente.

Lo anterior nos lleva a tener en mente que lo que se obtiene en realidad no es una muestra representativa del agua de nube, sino de ésta junto con partículas y gases que se encuentran suspendidos entre sus gotitas. En física de nubes simplemente se define a una nube como una suspensión de gotitas o de cristales de hielo en la atmósfera. Sin embargo, en la realidad la situación es mucho más compleja existiendo los dos

siguientes fenómenos probables: las nubes muestreadas adquirieron contaminantes (líquidos, sólidos y gases) durante su formación y posteriormente haber sido arrastradas por los vientos sinópticos, o bien los contaminantes se incorporaron a las nubes disolviéndose una parte en las gotitas y la otra quedando suspendida entre éstas cuando nubes, formadas en regiones más limpias, fueron transportadas a regiones con fuentes apreciables de contaminación atmosférica. La proporción de los contaminantes que se disolvió, en relación con lo que quedó en suspensión, depende de la distancia entre el punto de colección y el sitio en el cual los contaminantes son emitidos y de la extensión cubierta por nubes (esto está relacionado con lo expuesto al principio de esta sección).

En algunas ocasiones en zonas viento abajo de las fuentes de contaminación y a cierta distancia, es de esperar que la cantidad de contaminantes dentro de las gotitas de las nubes, en relación con el aire las rodea, sea mayor que cuando la nube muestreada esté muy próxima a fuentes de contaminación. El fundamento de esto reside en el hecho de que la incorporación de los contaminantes a las gotitas de las nubes no es un proceso instantáneo, al igual que la precipitación por gravedad de las partículas susceptibles a ello. Esta incorporación de contaminantes, después de cierto tiempo, a partir de un volumen mucho mayor de aire en relación al ocupado por las gotitas, es la responsable del por qué en las gotitas de las nubes se encuentran concentraciones mayores de contaminantes que en el aire circundante. Esto parece ser apoyado por las investigaciones del contenido de compuestos orgánicos en el agua de nube realizadas por Aneja (1993), los cuales están en el aire en concentraciones tan bajas que es difícil analizarlos siendo en cambio más fácil detectarlos en las muestras de agua de nube.

Con base en las anteriores consideraciones se asume que la colección de agua de nube en atmósferas con un alto contenido de aerosoles es especialmente crítica, simplemente porque bajo estas condiciones se colectan mayor número de partículas, que afectan severamente la composición química de las gotitas en el momento en que éstas y las partículas se ponen en contacto directo sobre los hilos del colector y, naturalmente, dentro de la botella.

Un último factor que también juega un papel importante en la colección de muestras de agua de lluvia más limpias que las del agua de nube, es la baja probabilidad de que las gotas de lluvia se impacten contra aerosoles pequeños debido a fenómenos hidrodinámicos (Lazrus *et al.* 1983). Además, el breve intervalo de tiempo que transcurre desde el momento en que la lluvia precipita hasta el momento en que cae en el embudo, sobre todo en comparación con el tiempo necesario para coleccionar las muestras de agua de nube, disminuye aún más la posibilidad de que las gotas de lluvia se impacten contra estos aerosoles.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se cumplió con el objetivo fundamental de esta investigación que consistió en conocer la composición química del agua de nube y de la lluvia en el Volcán Popocatepetl y en otro punto localizado en la Sierra Madre Oriental, en el Estado de Puebla. Sin embargo, la experiencia obtenida en este trabajo permitió establecer que se debe distinguir entre la composición química del agua de nube y la de la nube en sí (ver siguiente conclusión 2). El trabajo de campo consistió en coleccionar el agua de nube mediante un colector pasivo y otro activo. A pesar de que los colectores de agua de nube empleados en esta investigación ya habían sido utilizados en latitudes medias, donde los estudios de la composición química del agua de nube son relativamente más abundantes, la investigación realizada en esta tesis sobre este campo es una de las pocas hasta donde sabemos, que se han realizado en regiones montañosas en latitudes tropicales a nivel mundial y la primera que se realiza en México. Se aplicaron diversas técnicas de análisis químicos dependiendo del contaminante a determinar. Fue posible efectuar colecciones simultáneas de muestras de agua de nube con los dos colectores y de muestras de agua de nube y de lluvia. Gracias a esto se lograron obtener resultados adicionales que permitieron formular las siguientes conclusiones fundamentales no sólo desde el punto de vista de la química atmosférica sino también de la microfísica de nubes e instrumentación.

1.- Las muestras de agua de nube presentaron mayor contaminación que las de precipitación pluvial. Esto concuerda con lo encontrado a nivel mundial. Sin embargo, el agua de lluvia presentó una contaminación mayor que la de la nube en la vecindad del Popocatepetl (Tlamacas). A pesar de que esto sucedió en sólo dos ocasiones particulares de entre un total de 62 muestreos de agua de nube y 21 de agua de lluvia, es relevante mencionar este hecho debido a que fue una evidencia experimental que no siempre se debe de esperar lo que se encuentra a nivel mundial. En Tlamacas este fenómeno se debió a una combinación particular de las condiciones meteorológicas y de la emisión de fumarolas del cráter del Popocatepetl. Dicho fenómeno tiene una

relevancia significativa debido a la baja frecuencia con la que se presenta a nivel mundial y a la posibilidad de que en efecto sí sea un fenómeno común en regiones con volcanes activos. Para estimar en qué medida los componentes de las fumaroles solubles en agua se incorporan ya sea como núcleos de condensación durante la formación de las nubes, o si se disuelven en las gotitas de las nubes después de su formación, o bien si son lavados por la lluvia, se necesita realizar muestreos simultáneos de agua de lluvia y de nube a diferentes altitudes empezando naturalmente desde el nivel del suelo.

2.- Al menos para atmósferas con alto contenido de partículas, es inexacto o ambiguo hablar de la composición química del agua de las nubes, tal y como se ha estado haciendo alrededor del mundo. La razón es que no es posible conocer únicamente la composición química del agua o de las gotitas de una nube, debido a que es físicamente imposible coleccionar por separado las gotitas de nube y las partículas o aerosoles. Desgraciadamente, al no contar con un término adecuado sencillo que substituya al término "composición química del agua de nube", se propone el término "composición química de la nube", entendiendo como nube a sus gotitas y/o cristales de hielo y a los gases y partículas intersticiales. De esta manera, la composición química de las muestras de agua de nube es el resultado de la disolución en el agua de nube de los componentes solubles de las partículas, que ocurre sobre los hilos del colector y en la botella que contiene la muestra. Dicho de otra manera, la composición química de las muestras de agua de nube dentro de las botellas en donde se almacenan, es diferente a la composición química que originalmente tenían las gotitas de la nube. Lo anterior constituye una de las aportaciones fundamentales de esta investigación.

3.- Las muestras de agua de nube colectadas con el colector activo presentaron mayor contaminación que las muestras colectadas con el pasivo. Esto se debió a que el colector activo capta una mayor cantidad de partículas intersticiales. Dicho de otra manera, la composición química final de las muestras de agua de nube depende del tipo del colector. La modificación de la composición química original de las gotitas de la nube es especialmente crítica en atmósferas con alto contenido de partículas, como sucede en nuestro caso, por las razones expuestas en la conclusión 2. La situación es aún más crítica debido a que ni siquiera existe un criterio unificado para coleccionar muestras de agua de nube.

Las conclusiones 1, 2 y 3 son fundamentales y deben tomarse en cuenta para el estudio de la química de nubes.

4.- Existieron consistentemente fuertes discrepancias en la estimación del contenido de agua líquida de la nube entre el colector pasivo y el activo. El colector pasivo sobrestimó el contenido de agua líquida de la nube al ser operado bajo condiciones de bajas velocidades de viento, típicas en la atmósfera tropical. El colector activo también presenta problemas ya que al provocar compresiones y expansiones del aire, ocasiona errores considerables en la estimación del contenido de agua líquida de las nubes debido a la gran diferencia que existe por metro cúbico de aire, entre la cantidad, en gramos, de agua en fase de vapor y líquida.

5.- Como ningún colector de muestras de agua de nube para analizar su composición química es adecuado para evaluar el contenido de agua líquida de las nubes (CAL), para realizar una investigación más realista de las nubes, se debe determinar su contenido de agua líquida (mediante el uso de los equipos especialmente diseñados para ello mencionados en el Capítulo 2), en forma simultánea y lo más próximo posible al lugar donde se realice la colección de las muestras de agua de nube para determinar su composición química. Conviene aclarar que como el equipo adecuado para medir el CAL es costoso y difícil de usar junto al equipo de colección de agua de nube, es una práctica muy común estimar este parámetro a partir de la cantidad de muestra de agua de nube y del volumen de aire muestreado. En estos casos se recomienda utilizar el área total transversal de la sección del colector por donde entra el aire a muestrear, en lugar del área transversal de los hilos colectores. A pesar de la desventaja del colector activo mencionada en la conclusión 4, este colector presenta menos problemas que el pasivo para estimar el CAL mediante este procedimiento.

6.- A diferencia del caso del estudio de la composición química del agua de nube y de lluvia, para el estudio de los efectos sobre los ecosistemas forestales las tres primeras conclusiones no son en realidad importantes ya que en este caso, lo que importa es conocer la deposición húmeda total de los contaminantes sin diferenciar la composición química de las nubes de la de la precipitación pluvial. Por otro lado, el bosque también capta las partículas intersticiales cuyos componentes solubles se disuelven sobre el

follaje cuando el agua de la nube y/o de lluvia moja la superficie de las hojas. En contraste, debido a que para conocer la deposición húmeda total de contaminantes también es crítico conocer el CAL, las conclusiones 4 y 5 son por el contrario, fundamentales en este caso. Lógicamente, dichas conclusiones son también fundamentales para la microfísica de nubes.

Los proyectos de investigación en el futuro seguirán profundizando en la composición química del agua de nube y de la lluvia. La experiencia adquirida en los trabajos de campo de la presente investigación permite diseñar la metodología a seguir en las próximas investigaciones, sobre la identificación de los fenómenos responsables de la alta contaminación observada en el agua de nube en Teziutlán y en especial, en las primeras fracciones de un evento de niebla. En otras palabras, se intentará demostrar las hipótesis formuladas en este trabajo acerca de los mecanismos de incorporación de contaminantes en general a las gotitas de las nubes.

En resumen, para otros grupos que quieran emprender este tipo de investigaciones básicamente se recomienda lo siguiente:

1.- Para conocer la composición química de las nubes se debe utilizar el colector pasivo omnidireccional de agua de nube consistentemente en todos los sitios de muestreo, debido a que este colector capta una menor cantidad de partículas intersticiales. Si no es posible utilizar este colector, utilizar al menos siempre el mismo tipo de colector (el que sea) para cada sitio de muestreo. Las variaciones en los resultados de la composición química entre muestras de agua de una misma nube colectadas con diferentes colectores, obligan a utilizar sistemáticamente un mismo tipo de colector.

2.- Si se utiliza el colector pasivo, impedir que la lluvia caiga sobre el colector para evitar que ésta se mezcle con la muestra de agua de nube. Se debe tener sumo cuidado en la instalación de esta protección, para que modifique lo menos posible el flujo de aire alrededor del colector y, por ende, para que no varíe sensiblemente la eficiencia de colección de agua de nube del colector pasivo.

- 3.- Realizar la colección de las muestras sólo en el tiempo necesario para obtener un volumen de muestra suficiente para realizar los análisis químicos.
- 4.- Emplear una estación meteorológica completa pero sobre todo, que cuente con sensores de velocidad y dirección del viento lo más sensibles disponibles en el mercado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aneja, V.P. (1993). Organic compounds in cloud water and their deposition at a remote continental site. J. Air Waste Management Assoc., 43, 1239-1244.
- Báez, P.A., Padilla, G.H. y González, G.O. (1986). Acid rain over Mexico City Valley and surrounding rural areas. Geofís. Int., 25, 315-326.
- Báez, P.A., Belmont, D.R., Belmont, P.G. y Padilla, G.H. (1989). Nutrient contribution by bulk precipitation to soils in an agricultural area. Rev. Int. Contam. Ambient., 5, 5-18.
- Báez, P.A., Belmont, D.R. y Padilla, G.H. (1993). Variation of chemical composition of wet precipitation, using a sequential sampling: urban-rural areas comparison. Atmósfera, 6, 163-174.
- Barrie, L.A. y Schemenauer, R.S. (1986). Pollutant Wet deposition mechanisms in precipitation and fog water. Water, Air, Soil Pollut., 30, 91-104.
- Baumgardner, D. (1983). An analysis and comparison of five water droplet measuring instruments. J. Climate Appl. Meteor., 22, 891-910.
- Collett, J. (1989). Cloudwater chemistry in Sequoia National Park. Atmos. Environ., 23, 999-1007.
- Comtois, P. y Schemenauer, R.S. (1991). Tree pollen viability in areas subject to high pollutant deposition. Aerobiologia, 7, 144-151 .
- Dixon, W.J. y Massey, F.J. (1969). Introduction to Statistical Analysis. McGraw Hill, 3rd. edition. 638 pp.
- DeFelice, T.P. y Saxena, V.K. (1990). Mechanism for the operation of three cloudwater collectors: comparison of Mountaintop results. Atmos. Res., 25, 277-292.
- EPA-43011-78-012, AGOSTO 1978. Organic Analyses in Water Quality Control Programs. Training manual. United States Environmental Protection Agency. National Training and Operational Technology Center.
- Erismán, J-W., Vermetten, A.W.M., Asman, W.A.H., Waijers-Ijpelaan, A: y Slanina, J. (1988). Vertical distribution of gases and aerosols. The behaviour of ammonia and related components in the atmosphere. Atmos. Environ., 22, 1153-1160.

- Firpo, G. Apuntes de cromatografía líquida de alta resolución. Colegio Oficial de Química de Barcelona. Perkin Elmer Hispana, S.A. pp 37-103.
- Fowler, D., Cape, J.N., Leith, I.D., Choularton, T.W., Gay, M.J., y Jones, A. (1988). The influence of altitude on rainfall composition at Great Dun Fell. Atmos. Environ., 22, 1355-1362.
- Fowler D., Cape, J.N. y Unsworth, M.H. (1989). Deposition of atmospheric pollutants on forests. Phil. Trans. Ry. Soc. Lond. , B, 324, 247-265.
- Galloway, J.N. y Likens, G.E. (1978). The collection of precipitation for chemical analysis. Tellus, 30, 71-82.
- Galloway, J.N. y Likens, G.E. (1979). Acid precipitation. Measurement of pH and acidity. Limnol. Oceanogr. , 24, 6, 461-465.
- García García, F. y Montañez, R.A. (1991). Warm fog in eastern Mexico: A case study. Atmósfera, 4, 53-64.
- García-García, F. y Montañez, R.A. (1992). Espectros de gotas de niebla en la Sierra Madre Oriental. GEOS (Bol. Unión Geofís. Mex.) Epoca II, 12 (3), 2-4.
- Georgii, H.W., Perseke, C. y Rohbock, E. (1986). Investigation of the wet and dry deposition of acidic and heavy metal components. En Chemistry of Multiphase Atmospheric Systems, W. Jaeschke ed., NATO ASI Series, 227-248.
- Hering, S.V., Blumenthal, D.L., Brewer, R.L., Gertler, A., Hoffmann, M., Kadlecsek, J.A. y Pettus, K. (1987). Field intercomparison of five types of fogwater collectors. Environ. Sci. Technol., 21, 654-663.
- Hileman, B. (1983). Acid fog. Environ. Sci. Technol., 17, 117 A-120 A.
- Hindman, E.E., Carter, E.J., Borys, R.D. y Mitchell, D.L. (1992). Collecting supercooled cloud droplets as a function of droplet size. J. Atmos. Ocean. Tech., 9, 4, 337-353.
- Jacob, D.J., Waldman, J.M., Haghi, M., Hoffmann, M.R. y Flagan, R.C. (1985). Instrument to collect fogwater for chemical analysis. Rev. Sci. Instrum., 56, 1291-1293.
- Jiusto, J.E. (1981). Fog structure. En Clouds, Their Formation, Optical Properties, and Effects, P.V. Hobbs y A. Deepak ed., Academic Press, 187-239.

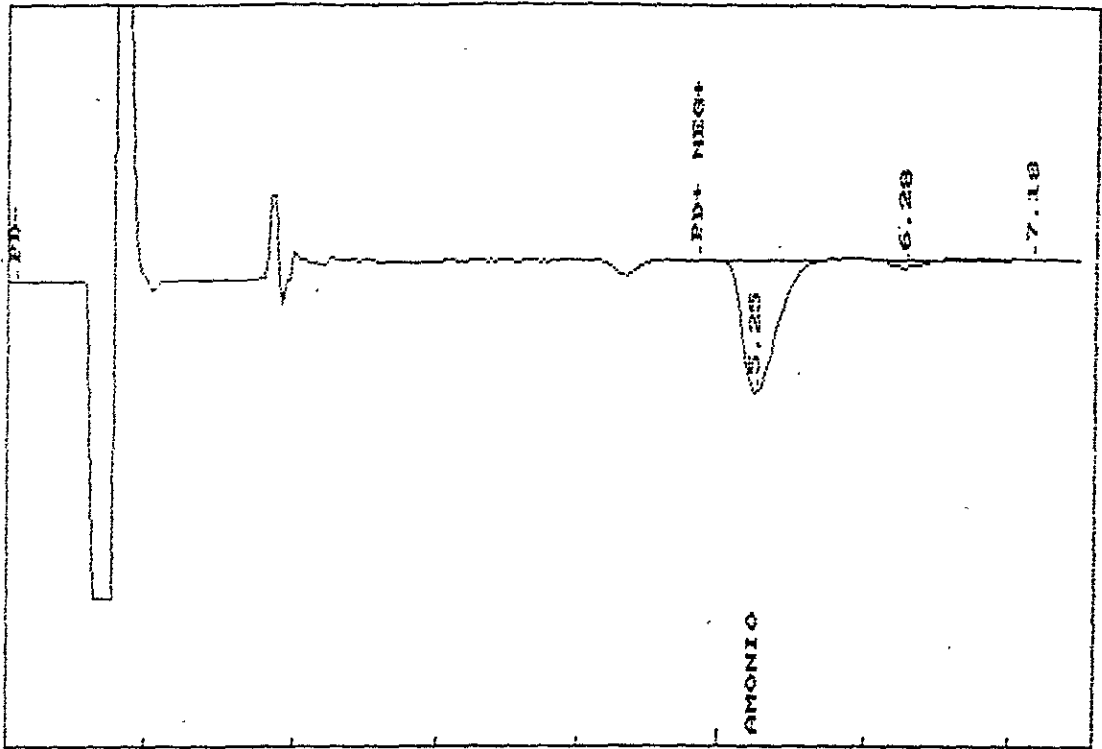
- Joslin, J.D., Mueller, S.F. y Wolfe, M.H. (1990). Tests of models of cloudwater deposition to forest canopies using artificial and living collectors. Atmos. Environ., 24A, 3007-3019.
- Kim, Y.J. y Boatman, J.F. (1992). The collection efficiency of a modified Mohnen slotted-rod cloud-water collector in summer clouds. J. Atmos. Ocean. Tech., 9, 35-41.
- King, W.D., Parkin, D.A. y Handsworth, R.J. (1978). A hot-wire liquid water device having fully calculable response characteristics. J. Appl. Meteor., 17, 1809-1813.
- King, W.D., Dye, J.E., Strapp, J.W., Baumgardner, D. y Huffman, D. (1985). Icing wind tunnel tests on the CSIRO liquid water probe. J. Atmos. Ocean. Tech., 2, 340-352.
- Knollenberg, R.G. (1981). Techniques for probing cloud microstructure. En *Clouds, Their Formation, Optical Properties, and Effects*, P.V. Hobbs y A. Deepak ed., Academic Press, 15-91.
- Langmuir, I. and Blodgett, K.B. (1961). A mathematical investigation of water droplet trajectories. *Collected works of Irving Langmuir*. Pergamon 10, 348-393.
- Lazrus, A.L., Haagenson, P.L., Kok, G.L., Huebert, B.J., Kreitzberg, C.W., Likens, G.E., Mohnen, V.A., Wilson, W.E. y Winchester, J.W. (1983). Acidity in air and water in a case of warm frontal precipitation. Atmos. Environ., 17, 581-591.
- Llanos, J. y Cervantes, J. (1996). Vientos máximos en el estado de Veracruz. La Ciencia y el Hombre, 7, 185-208
- Mészáros, E. (1978). Background air pollution monitoring. Institute for Atmospheric Physics of the Meteorological Service of Hungary. Prepared for the W. M. O. and the United Nations Environment Programme Training Course, Budapest. 60, 62-64.
- Metrohm (1990, empresa suiza). Application Bulletin. Anion analysis of rainwater. Reporte 148/2e IC 2-01.
- Mohnen, V.A. y Kadlecsek, J.A. (1989). Cloud chemistry research at Whiteface Mountain. Tellus, 41B, 79-91.
- Muir, P.S. (1991). Fogwater chemistry in a wood-burning community, Western Oregon. J. Air Waste Manage., 41, 32-38.
- Munger, J.W., Collett, J., Daube, B.Jr. y Hoffmann, M.R. (1990). Fogwater chemistry at Riverside, California. Atmos. Environ., 24B, 185-205.

- Neel, C.B. Measurements of liquid water content with a heated wire. Proc. 19th Int. Aerospace Symp., vol 19, B. Washburn, De., 301 pp, ISBN 0-876-64-212-1, 1973.
- Olszyna, K.J., Meagher, J.F. y Bailey, E.M. (1988). Gas-phase, cloud and rain water measurements of hydrogen peroxide at a high-elevation site. Atmos. Environ., 22, 1699-1706.
- Padilla, G.H. (1989). Estudio analítico de la composición química de la precipitación pluvial en el Valle de México. Tesis de maestría. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Peden, M.E. y Skowson, L.M. (1978). Ionic stability of precipitation samples. Atmos. Environ., 12, 2343-2349.
- Pratt, G.C., Coscio, M.R. y Krupa, S.V. (1984). Regional rainfall chemistry in Minnesota and West Central Wisconsin. Atmos. Environ., 18, 173-182.
- Radke, L.F., Peter, V.M. y Eltgroth, M.W. (1980). Scavenging of aerosol particles by precipitation. J. Appl. Meteor., Junio 1980, 715-722.
- Schemenauer, R.S. (1986). Acidic deposition to forests: The 1985 Chemistry of High Elevation Fog (CHEF) Project. Atmosphere-Ocean, 24, 303-328.
- Schemenauer, R.S. y Joe, P.I. (1989). The collection efficiency of a massive fog collector. Atmos. Res., 24, 53-69.
- Schemenauer, R.S., Cereceda, P. y Carvajal, N. (1987). Measurements of fog water deposition and their relationship to terrain features. J. Clim Appl. Meteor., 26, 1285-1291.
- Scott, W.D. (1978). The pH of cloud water and the production of sulphate. Atmos. Environ., 12, 917-921.
- Snyder, L.R. y Kirkland, J.J. (1979). Introduction to Modern Liquid Chromatography. John Wiley and Sons Inc. 2 edición.
- Sprent, P. (1989). Applied Nonparametric Statistical Methods. Chapman y Hall, Nueva York. 259 pp.
- Stallabrass, J.R. (1978). An appraisal of the single rotating cylinder method of liquid water content measurement. Division de Génie Mécanique. Conseil National de Recherches, Canada. Rapport LTR-LT-92.

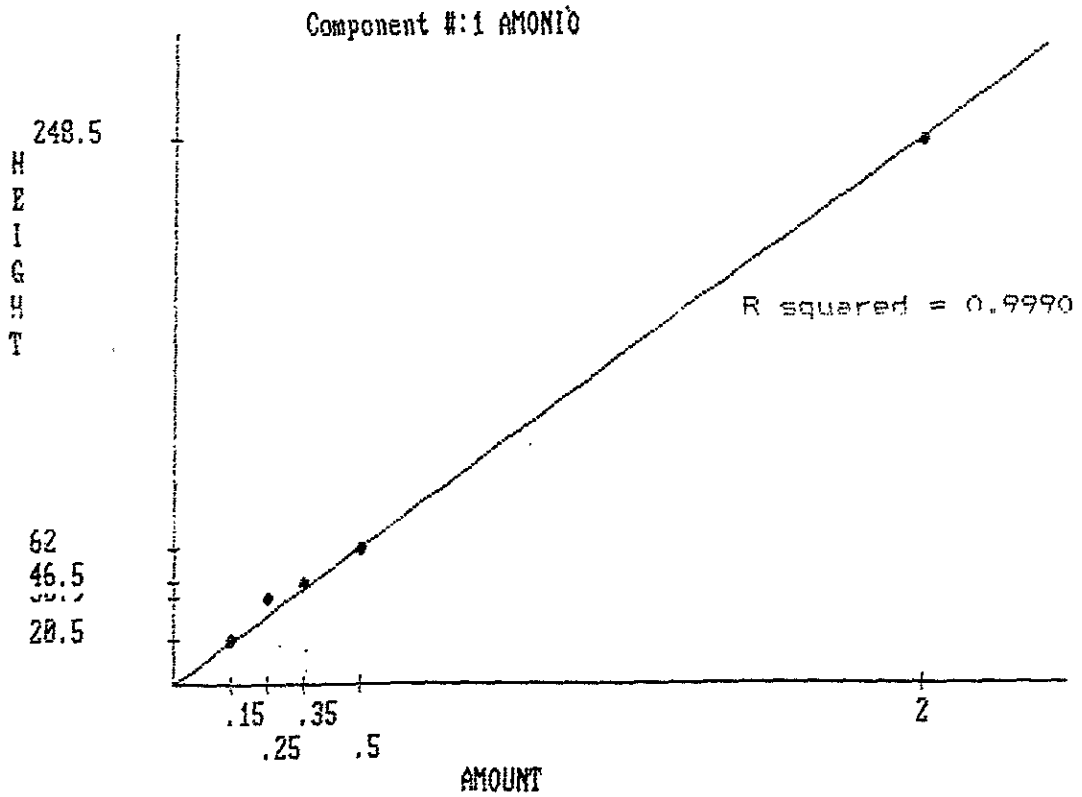
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, 16th. Ed. 1985.
- Stensland, G.J. y Semonin, R.G. (1982). Another interpretation of the pH trend in the United States. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 63, 1277-1284.
- Strapp, J.W. y Schemenauer, R.S. (1982). Calibrations of Johnson-Williams liquid water content meters in a high-speed icing tunnel. J. Appl. Meteor., 21, 98-108.
- Stumm, W. y Morgan, J.J. (1981). Aquatic Chemistry: An introduction emphasizing chemical equilibria in natural water. John Wiley and Sons. New York, 2nd. edition. pp 226-229.
- Tejeda, A.F., Acevedo, F. y Jáuregui, E. (1989). Atlas Climático del estado de Veracruz. Colec. Tex. Univ. Universidad Veracruzana.
- Vogelmann, H.VV. (1973). Fog precipitation in the cloud forests of eastern Mexico. Biosci., 23, 96-100.
- Weathers, K.C., Likens, G.E., Bormann, F.H., Bicknell, S.H., Bormann, B.T., Daube, B.C. Jr., Eaton, J.S., Galloway, J.N., Keene, W.C., Kimball, K.D., McDowell, W.H., Siccama, T.G., Smiley, D. y Tarrant, R.A. (1988). Cloudwater chemistry from ten sites in North America. Environ. Sci. Technol., 22, 1018-1026.
- Winters, W., Hogan, A., Mohnen, V.A. y Barnard, S. (1979). ASRC airborne cloud water collection system. Atmospheric Sciences Research Center. State University of New York at Albany. Publication No. 728, 1-48.
- W.M.O. International Meteorological Vocabulary. No 182 1992.
- Wright, R.F. y Schindler, D.W. (1995). Interaction of acid rain and global changes: Effects on terrestrial and aquatic ecosystems. Water, Air, Soil Pollut., 85, 89-99.

ANEXO I. CROMATOGRAMAS Y CURVAS DE CALIBRACIÓN

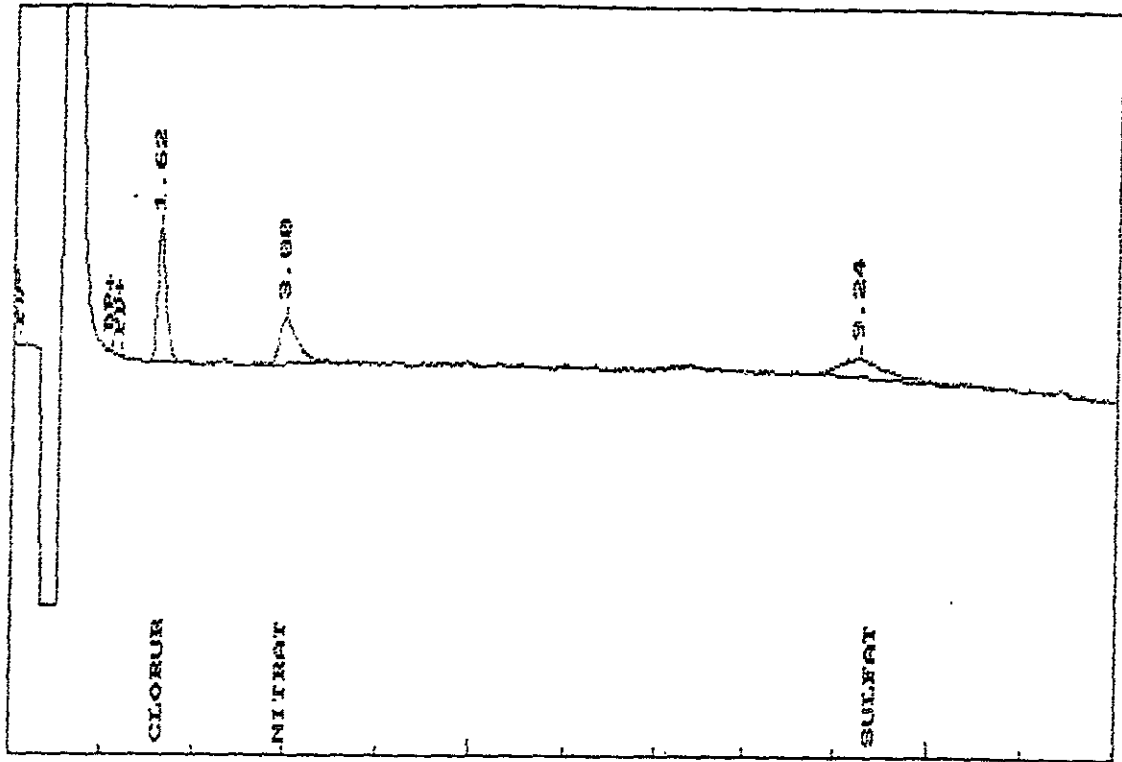
Cromatograma del ion amonio



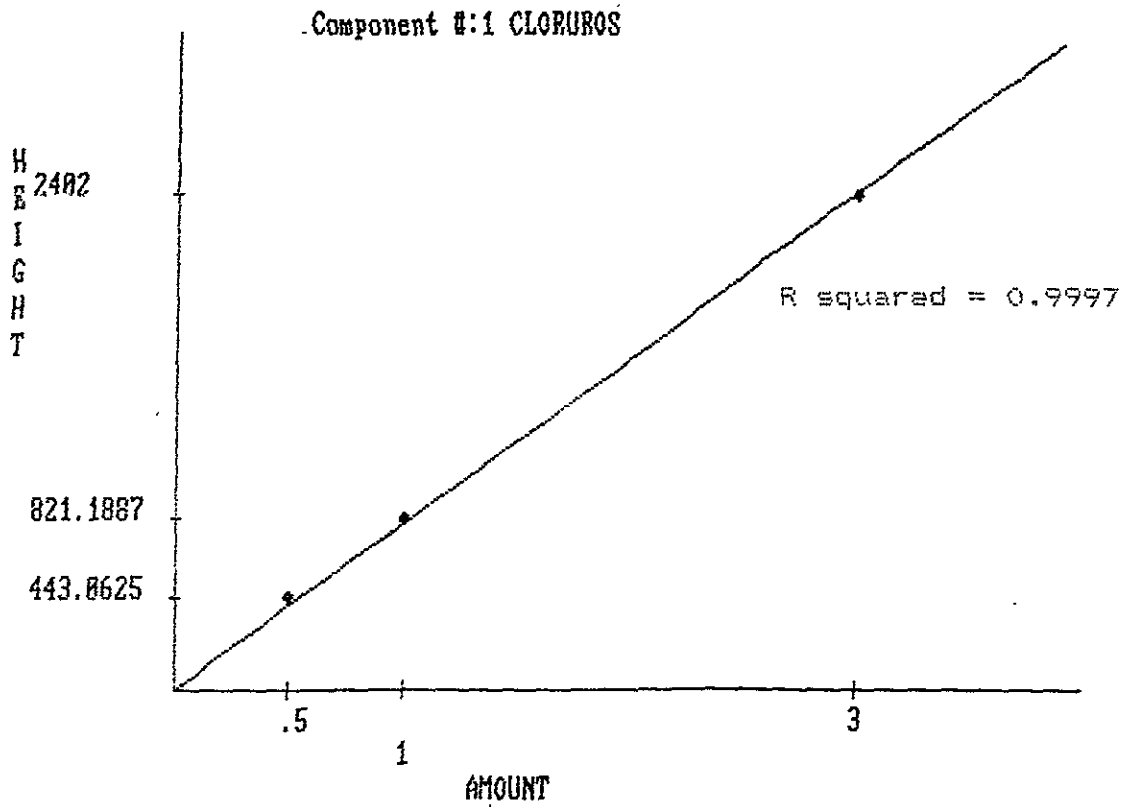
Curva de calibración de las concentraciones (mg/L) del ion amonio



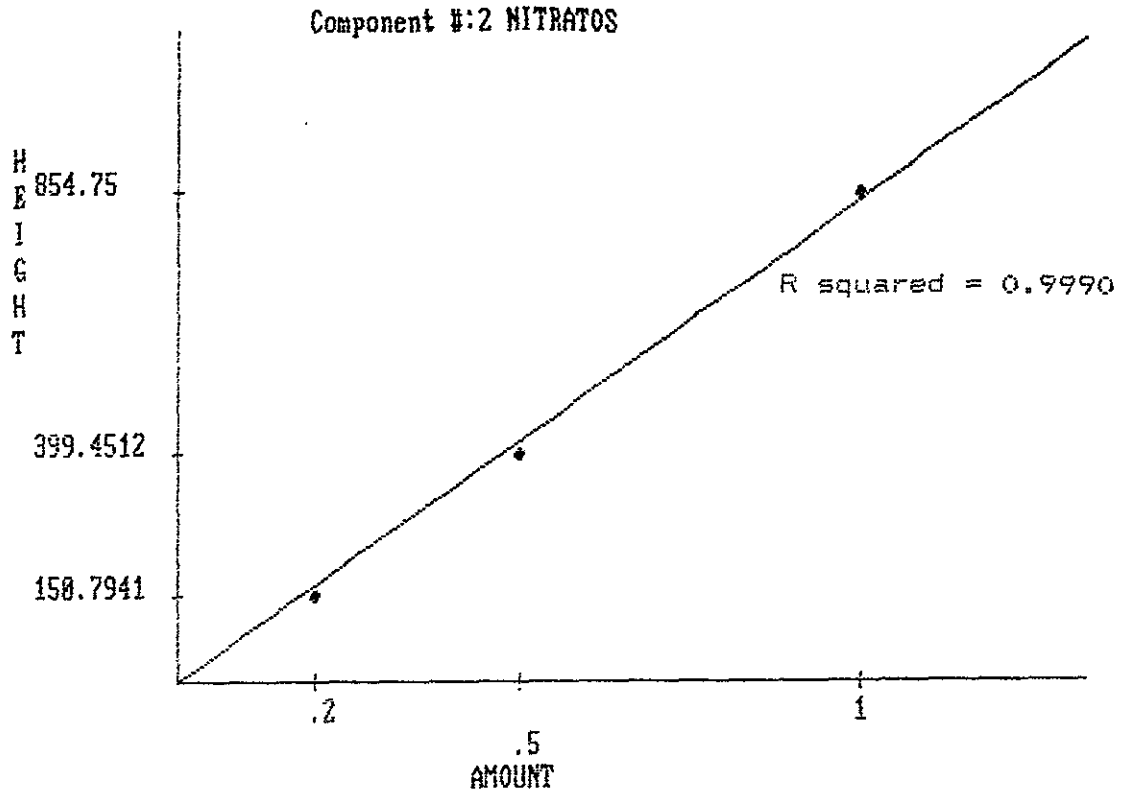
Cromatograma de los iones cloruro, nitrato y sulfato



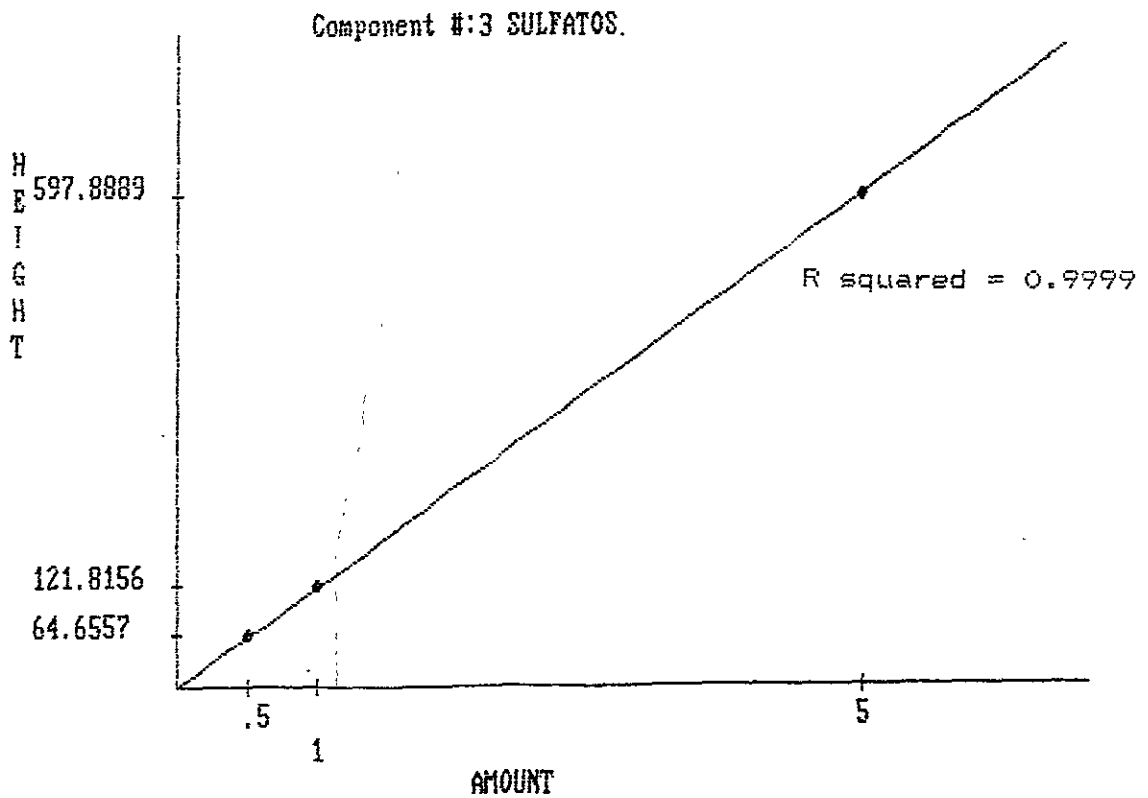
Curva de calibración de las concentraciones (mg/L) del ion cloruro



Curva de calibración de las concentraciones (mg/L) del ion nitrato



Curva de calibración de las concentraciones (mg/L) del ion sulfato



ANEXO II. TABLAS

COMPOSICION QUIMICA DE AGUA DE NUBE Y LLUVIA (mg/L) EN TLAMACAS EDO. DE MEXICO

TABLA 1

FECHA	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HORA	VOL ³	IB ⁴	CD ⁵
<u>NUBE</u>														
<u>PASIVO¹</u>														
9-IX-92	1.14	2.13	2.12	---	5.83	0.68	0.68	0.084	0.17	0.74	19:00-19:40	41.2	-1.85	-22.13
10-IX-92	0.98	3.37	3.01	---	5.47	1.12	1.23	0.077	0.26	0.17	19:20-06:20	125.9	1.46	0.57
11-IX-92	0.68	5.27	2.46	---	5.03	0.71	1.09	0.11	0.53	0.21	06:20-07:20	34.2	-4.99	-1.52
11-IX-92	0.54	3.63	1.96	---	4.89	0.71	0.66	0.061	0.36	0.20	07:20-08:20	19.9	-1.60	23.51
11-IX-92	1.39	3.06	1.76	---	4.92	0.71	0.73	0.067	0.36	0.27	08:20-09:20	22.9	-3.81	---
<u>LLUVIA</u>														
9 IX 92	2.87	8.73	12.90	---	5.61	0.73	4.60	0.28	2.54	1.27	19:40-20:30	---	-5.62	-7.97
10-IX-92	0.21	0.84	0.63	---	5.76	0.50	0.17	0.011	0.04	0.04	17:40-19:00	---	12.29	-4.91
<u>NUBE</u>														
<u>PASIVO¹</u>														
29 IX 92	0.34	0.36	0.33	---	5.98	0.038	0.15	0.015	0.11	0.095	16:15-17:45	191.1	7.41	-7.85
29 IX 92	0.23	N.D.	0.14	---	6.01	0.029	0.093	0.007	0.34	0.045	17:50-20:10	381.7	43.51	1.29
29 IX 92	0.50	0.19	0.58	---	6.05	0.043	0.12	0.011	0.11	0.066	20:12-06:10	588.9	-27.42	-25.84
30 IX 92	0.27	0.66	0.53	---	5.41	0.043	0.083	0.015	0.14	0.055	06:10-08:50	180.1	-21.10	-13.89
30 IX 92	0.25	0.89	1.46	---	4.68	0.14	0.093	0.019	0.13	0.049	08:50-11:00	99.4	-10.36	7.81
<u>LLUVIA</u>														
30-IX-92	0.96	0.93	6.55	---	5.76	0.22	1.06	0.065	1.60	0.83	17:50-06:10	---	-4.42	---
<u>NUBE</u>														
<u>ACTIVO²</u>														
19-VII-94	2.42	10.85	7.24	6.71	6.81	2.57	7.65	0.65	1.85	1.51	19:15-19:45	10.4	16.13	---
20-VII-94	0.63	5.49	8.22	24.64	7.28	5.26	8.00	0.30	0.40	0.75	18:00-18:40	34.3	5.00	-3.00
20-VII-94	1.59	12.49	8.73	16.84	7.11	5.46	4.25	0.15	0.40	0.81	18:40-19:00	30.5	-10.82	---
20-VII-94	3.36	25.34	23.09	54.96	7.37	8.38	27.00	1.50	3.50	2.81	---	64.5	6.85	-4.63
21-VII-94	1.44	8.37	6.24	15.43	7.10	4.23	5.40	0.25	0.65	0.53	18:35-19:22	24.8	0.78	---
21-VII-94	1.77	2.44	3.66	18.61	7.16	2.65	4.65	0.11	0.96	0.303	19:22-20:15	40.6	-3.54	---
21-VII-94	0.20	1.20	1.81	8.36	6.53	0.87	3.34	0.06	0.26	0.194	20:40-22:30	60.8	8.57	-3.82
21-VII-94	0.21	1.24	1.39	3.17	6.28	1.03	1.19	0.04	0.21	0.101	---	---	10.39	7.80
20* "	6.12	1.02	3.37	---	---	3.09	---	---	---	---	---	---	---	---
20† "	1.78	1.28	2.72	---	---	2.60	---	---	---	---	18:00-18:30	---	---	---
21† "	2.37	0.27	0.71	---	---	0.96	---	---	---	---	---	---	---	---

TABLA 1
CONTINUACION

FECHA	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HORA	VOL ³	IB ⁴	CD ⁵
LLUVIA														
19-VII-94	0.16	1.11	0.77	2.03	6.28	0.76	0.54	0.03	0.15	0.064	19:15-20:30	0.06	5.62	-2.06
20-VII-94	0.18	1.64	2.54	6.28	6.75	2.04	1.56	0.12	0.09	0.13	18:00-18:30	0.12	5.40	-6.77
20-VII-94	0.18	1.02	1.04	3.44	6.42	1.12	0.80	0.07	0.14	0.101	18:30-19:45	0.04	8.05	-11.30
21-VII-94	0.052	0.66	0.58	2.00	6.38	0.66	0.31	0.02	0.01	0.023	18:00-18:25	0.12	-1.88	-16.84
21-VII-94	0.068	0.35	0.67	2.12	6.69	0.51	0.46	0.02	0.03	0.034	19:45-20:40	0.38	-0.10	-7.99
21-VII-94	0.21	0.53	0.69	2.82	6.31	0.41	1.04	0.05	0.21	0.134	-----	0.02	10.15	-13.82
20† "	4.10	1.06	2.76	-----	-----	2.75	-----	-----	-----	-----	18:30-19:45	-----	-----	-----
21† "	1.37	0.58	0.70	-----	-----	0.75	-----	-----	-----	-----	18:00-18:25	-----	-----	-----
NUBE														
ACTIVO ²														
25-VII-95	0.28	1.33	1.94	4.67	6.54	1.54	0.41	0.03	0.13	0.09	-----	203.2	-11.14	30.27
26-VII-95	0.50	2.26	6.44	4.21	6.64	3.02	1.24	0.08	0.21	0.10	14:39-16:58	72.7	-1.06	-5.71
26-VII-95	0.72	7.00	4.91	3.35	6.55	4.59	0.35	0.08	0.32	0.16	-----	67.1	1.19	-14.10
LLUVIA														
25-VII-95	0.23	0.16	1.08	1.20	6.11	0.49	0.22	0.02	0.07	0.04	16:15-16:30	0.03	-6.97	-16.43
26-VII-95	0.24	0.66	0.82	-----	6.56	0.73	0.34	0.02	0.18	0.11	-----	-----	-----	-27.65
26-VII-95	0.13	0.15	1.31	2.01	6.36	0.66	0.21	0.02	0.08	0.05	15:00-16:30	0.095	-10.49	-10.09

* COLECCION DE AGUA DE NUBE CON TELA DE TUL.

† COLECCION DE AGUA DE NUBE CON TELA DE TUL MEZCLADA CON LLUVIA.

‡ COLECCION DE LLUVIA CON TELA DE TUL.

1 COLECTOR PASIVO CILINDRICO DE AGUA DE NUBE.

2 COLECTOR ACTIVO DE AGUA DE NUBE.

3 SI EL TIPO DE MUESTRA ES NUBE, LOS VOLUMENES SON EN mL; SI ES LLUVIA, SON EN PULGADAS.

4 IB=((ΣCATIONES-ΣANIONES)/(ΣCATIONES+ΣANIONES))x100 (LAS CONCENTRACIONES DEBEN ESTAR EN µeq/L).

5 CD=((CONDUCTIVIDAD CALCULADA-CONDUCTIVIDAD MEDIDA)/(CONDUCTIVIDAD MEDIDA))x100.

TABLA 2
PARAMETROS FISICOS DE NUBES EN TLAMACAS

Fecha	Diámetro de corte μm	Dirección del viento grados	Velocidad del viento m/s	CAL (Area Total) g/m^3	CAL (Area de hilos) g/m^3	Hora	Volumen mL
PASIVO							
9-IX-92	5.6	100	2.0	0.058	0.12	19:00-19:40	41.2
11-IX-92	3.7	110	4.6	0.063	0.03	06:20-07:20	34.2
11-IX-92	3.7	110	4.6	0.010	0.02	07:20-08:20	19.9
11-IX-92	3.7	110	4.6	0.007	0.015	08:20-09:40	22.9
29-IX-92	4.9	100	2.6	0.010	0.20	16:15-17:45	191.1
29-IX-92	4.9	100	2.6	0.12	0.25	17:50-20:10	381.7
30-IX-92	5.4	140	2.1	0.058	0.12	06:10-08:50	180.1
30-IX-92	5.4	140	2.1	0.041	0.085	08:50-11:00	99.4
ACTIVO							
19-VII-94	3.8	10	0.9	0.037	0.059	19:15-19:45	10.4
20-VII-94	3.4	10	1.9	0.076	0.12	18:00-18:40	34.3
20-VII-94	3.5	10	1.6	0.14	0.22	18:40-19:00	30.5
21-VII-94	3.6	10	1.5	0.05	0.079	18:35-19:22	24.8
21-VII-94	3.3	10	2.1	0.063	0.10	19:22-20:15	40.6
21-VII-94	3.7	10	1.0	0.057	0.091	20:40-22:30	60.8
26-VII-95	3.3	80	2.3	0.044	0.07	14:39-16:58	72.7

1 COLECTOR PASIVO CILINDRICO DE AGUA DE NUBE.

TABLA 3
COMPOSICION QUIMICA DE AGUA DE NUBE Y LLUVIA (mg/L) EN TEZIUTLAN, PUEBLA

FECHA	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HORA	VOL ⁴	IB ⁵	CD ⁶
<u>NUBE</u>														
<u>PASIVO¹</u>														
24-1-93	1.34	1.24	14.96	---	6.74	4.82	7.60	0.16	0.98	1.19	22:30-00:30	12.3	33.01	-----
25-1-93	1.36	4.25	28.49	---	7.10	2.91	14.50	0.33	0.72	0.92	-----	-----	16.03	-10.91
26-1-93	0.31	1.02	7.47	---	5.95	2.60	1.60	0.039	0.08	0.12	17:00-19:15	311.1	13.07	-8.10
26-1-93	0.36	0.84	5.90	---	6.33	2.24	1.20	0.048	0.18	0.20	19:15-20:45	68.5	15.77	-31.71
27-1-93	0.65	1.73	5.47	2.29	5.58	2.29	0.51	0.033	0.11	0.17	13:22-15:05	170.8	-8.38	1.53
27-1-93	0.47	1.68	4.67	0.59	5.44	2.06	0.48	0.033	0.10	0.14	-----	80.4	1.72	-6.87
<u>LLUVIA</u>														
22-1-93	0.18	0.23	0.89	3.93	5.88	0.28	0.64	0.025	0.04	0.082	-----	-----	-25.08	-16.61
24-1-93	0.14	0.26	1.41	2.76	5.63	0.21	0.63	0.023	0.03	0.051	-----	-----	-24.89	-20.28
25-1-93	0.34	0.84	5.38	10.87	6.52	1.48	3.13	0.072	0.11	0.21	-----	-----	-10.29	-17.51
<u>NUBE</u>														
<u>PASIVO¹</u>														
26-XI-93	0.27	1.24	1.84	5.78	6.33	2.83	0.32	0.02	0.04	0.20	18:55-23:00	93.2	6.29	-50.15
26-XI-93	0.17	0.93	1.24	5.52	6.34	2.21	0.23	0.015	0.03	0.075	23:00-06:00	78.2	1.13	-61.77
27-XI-93	0.62	1.15	26.47	4.92	5.86	7.29	11.0	0.20	0.21	0.50	11:00-13:00	77.4	19.63	-43.04
27-XI-93	0.67	0.97	10.24	8.61	6.33	4.08	6.40	0.01	0.12	0.23	15:45-18:15	118.9	17.89	-40.54
27-XI-93	0.61	1.06	12.81	6.43	6.40	4.41	9.20	0.17	0.08	0.24	18:20-06:00	255.7	28.38	-35.73
28-XI-93	0.56	1.77	10.64	8.80	6.18	4.44	5.64	0.15	0.10	0.24	10:00-13:55	224.7	14.70	-18.90
28-XI-93	0.20	0.66	6.22	4.62	6.21	3.78	1.28	0.047	0.04	0.11	14:00-16:35	114.4	12.13	-36.82
28-XI-93	0.51	0.97	8.03	5.60	6.26	6.44	1.24	0.051	0.04	0.098	16:35-18:25	66.0	19.46	-65.84
28-XI-93	0.80	2.21	14.89	6.58	6.38	9.09	4.05	0.18	0.10	0.25	18:25-07:00	34.5	21.24	-----
<u>NUBE</u>														
<u>ACTIVO²</u>														
28-XI-93	0.83	1.95	8.28	7.34	6.47	6.81	5.72	0.13	0.19	0.94	10:00-13:55	203.6	34.10	-33.74
28-XI-93	0.28	0.89	5.25	7.07	6.25	4.87	1.84	0.059	0.08	0.40	13:55-16:30	201.5	21.30	-41.36
28-XI-93	1.09	1.33	8.59	6.14	6.33	7.39	1.63	0.084	0.12	0.69	16:30-18:18	127.0	22.27	-47.81
28-XI-93	3.17	3.54	28.02	6.60	6.46	10.46	10.90	1.46	0.40	1.59	18:18-07:00	170.6	21.65	-31.64

TABLA 3
CONTINUACION

FECHA	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HORA	VOL ⁴	IB ⁵	CD ⁶
NUBE PASIVO¹														
18-I-95	0.58	2.39	7.71	8.57	6.33	1.76	5.56	0.18	0.30	0.32	22:30-00:35	238.0	7.37	-10.60
19-I-95	0.14	0.49	3.06	4.97	6.39	1.67	1.59	0.066	0.06	0.055	00:35-01:35	207.8	6.76	-24.47
19-I-95	0.15	0.31	3.40	1.48	5.88	1.76	0.50	0.020	0.05	0.040	01:35-07:00	981.8	10.64	-15.17
19-I-95	0.31	0.66	2.79	1.55	6.06	1.21	0.47	0.038	0.02	0.029	07:00-07:50	83.2	-3.29	-13.46
19-I-95	0.07	0.40	2.59	0.00	5.73	1.21	0.46	0.032	0.02	0.025	07:50-08:35	163.4	21.14	-16.42
19-I-95	0.07	0.27	2.74	0.00	5.52	0.93	0.55	0.032	0.02	0.024	08:35-10:00	385.2	14.94	-21.89
19-I-95	0.08	0.40	3.37	0.00	5.74	1.07	0.62	0.037	0.03	0.046	10:00-11:00	181.4	10.55	-23.36
19-I-95	0.17	0.75	7.55	1.21	6.07	2.78	1.28	0.074	0.08	0.11	11:52-13:23	73.9	8.80	-5.93
19-I-95	0.17	0.75	7.12	2.86	6.51	3.29	1.00	0.055	0.07	0.086	13:23-15:00	174.7	6.73	-5.64
19-I-95	0.25	0.58	4.73	3.03	6.53	2.45	0.73	0.046	0.12	0.078	15:00-16:55	196.2	5.58	-11.43
19-I-95	0.23	0.62	5.73	2.20	6.48	2.88	1.05	0.068	0.10	0.11			13.51	-8.12
NUBE ACTIVO²														
18-I-95	1.02	2.57	13.65			4.96	5.26	0.16	0.39	0.42	22:55-00:25	39.0		
19-I-95	0.27	0.49	5.64	7.29	6.87	3.69	1.02	0.034	0.16	0.18	00:25-01:35	69.5	3.45	-13.76
19-I-95	0.34	0.49	6.62	1.94	5.86	3.71	0.48	0.018	0.07	0.073	01:35-06:55	487.0	12.06	-9.85
19-I-95	0.49	0.62	4.15	0.00	5.40	2.31	0.68	0.036	0.09	0.11	07:00-07:50	36.5	23.07	
19-I-95	0.16	0.75	4.30	2.15	6.18	2.04	0.83	0.035	0.08	0.10	07:50-08:35	45.0	7.64	-8.70
19-I-95	0.16	0.66	5.49	0.00	5.34	2.39	1.27	0.045	0.05	0.083	08:35-09:10	59.9	23.47	
19-I-95	0.17	0.58	4.74	1.06	6.09	1.68	1.29	0.048	0.13	0.14	10:00-11:00	62.5	13.84	-16.29
19-I-95	0.42	1.33	12.87	3.33	6.03	4.69	3.27	0.13	0.23	0.37	11:52-13:15	24.4	12.26	
19-I-95	0.20	0.97	6.47	6.03	6.80	4.35	1.01	0.044	0.08	0.12	13:15-15:00	136.9	8.48	-11.07
19-I-95	0.33	0.66	6.32	5.07	6.77	3.57	1.23	0.056	0.12	0.12	15:00-18:42	103.0	7.53	-29.78
19-I-95	0.33	3.15	8.74	15.13	6.66	5.45	2.08	0.11	0.15	0.53			-5.85	

TABLA 3
CONTINUACION

FECHA	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HORA	VOL ⁴	IB ⁵	CD ⁶
NUBE PASIVO³														
18-I-95	0.57	2.61	8.50	6.16	6.05	2.31	4.77	0.17	0.31	0.37	22:30-00:40	525.4	9.30	-9.74
19-I-95	0.10	0.31	2.24	4.25	6.38	1.48	0.85	0.035	0.04	0.068	00:40-01:40	516.7	2.80	-22.93
19-I-95	0.13	0.27	3.02	0.00	5.70	1.55	0.29	0.011	0.03	0.026	01:40-07:10	2216.9	19.61	-22.75
19-I-95	0.14	0.44	2.64	1.58	6.10	1.34	0.24	0.017	0.01	0.016	07:15-07:55	106.7	-1.51	-18.74
19-I-95	0.21	0.40	2.91	0.00	5.69	1.34	0.27	0.017	0.01	0.009	07:55-08:40	248.4	11.53	-9.12
19-I-95	0.09	0.27	2.79	0.00	5.67	0.90	0.33	0.015	0.01	0.015	08:40-10:05	575.8	4.24	-25.26
19-I-95	0.08	0.40	3.89	0.00	5.24	1.21	0.42	0.019	0.02	0.032	10:05-11:00	234.7	3.98	-12.81
19-I-95	0.21	0.97	11.56	0.00	5.61	4.41	1.28	0.059	0.07	0.14	11:52-13:23	40.8	10.37	-----
19-I-95	0.21	1.06	10.61	2.90	6.45	4.96	1.13	0.052	0.10	0.13	13:23-15:05	190.1	8.24	-5.83
19-I-95	0.24	0.66	5.90	3.09	6.58	3.15	0.72	0.040	0.11	0.081	15:05-16:55	219.1	7.30	-8.87
19-I-95	0.21	0.49	6.33	2.34	6.40	3.09	0.89	0.050	0.11	0.096	-----	-----	10.59	-35.06
LLUVIA														
18-I-95	0.24	0.84	3.33	5.74	6.66	0.91	2.44	0.067	0.31	0.21	22:30-00:40	-----	3.47	-----
19-I-95	0.18	0.27	1.43	3.60	6.47	0.62	0.56	0.026	0.15	0.11	00:40-01:40	-----	-14.29	-34.83
19-I-95	0.14	0.27	1.73	0.00	5.74	0.64	0.20	0.006	0.10	0.070	01:40-07:00	-----	10.07	-24.55
19-I-95	0.10	0.31	1.83	0.00	5.34	0.30	0.16	0.010	0.05	0.027	07:00-10:05	-----	-16.76	-32.21
19-I-95	0.18	0.31	2.49	0.00	4.66	0.53	0.22	0.025	0.09	0.037	10:05-11:00	-----	5.17	-----
19-I-95	0.20	0.53	3.93	2.00	6.30	1.62	0.58	0.041	0.15	0.10	11:52-18:42	-----	1.15	-3.89

1 COLECTOR PASIVO CILINDRICO DE AGUA DE NUBE.

2 COLECTOR ACTIVO DE AGUA DE NUBE.

3 COLECTOR PASIVO DE MALLA DE AGUA DE NUBE

4 SI EL TIPO DE MUESTRA ES NUBE, LOS VOLUMENES SON EN mL; SI ES LLUVIA, SON EN PULGADAS.

5 IB=((ΣCATIONES-ΣANIONES)/ΣCATIONES+ΣANIONES)x100 (LAS CONCENTRACIONES DEBEN ESTAR EN µeq/L).

6 CD=((CONDUCTIVIDAD CALCULADA-CONDUCTIVIDAD MEDIDA)/(CONDUCTIVIDAD MEDIDA)x100.

TABLA 4
PARAMETROS FISICOS DE NUBES EN TEZIUTLAN, PUEBLA

Fecha	Diámetro de corte μm	Dirección del viento grados	Velocidad del viento m/s	CAL (Area Total) g/m^3	CAL (Area de hilos) g/m^3	Hora	Volumen mL
PASIVO¹							
27-XI-93	11.58	10	0.5	0.17	0.35	11:00-13:00	77.4
27-XI-93	12.92	10	0.4	0.26	0.54	15:45-18:15	118.9
28-XI-93	10.21	10	0.6	0.19	0.40	10:00-13:55	224.7
28-XI-93	17.09	10	0.2	0.42	0.87	14:00-16:35	114.4
28-XI-93	26.74	10	0.1	0.84	1.74	16:35-18:25	66.0
ACTIVO²							
28-XI-93	3.94	10	0.6	0.10	0.16	10:00-13:55	203.6
28-XI-93	4.11	10	0.3	0.16	0.26	13:55-16:30	201.5
28-XI-93	4.20	10	0.1	0.16	0.25	16:30-18:18	127.0
ACTIVO²							
18-I-95	3.6	20	1.3	0.044	0.07	22:55-00:25	39.0
19-I-95	3.7	18	1.3	0.10	0.16	00:25-01:35	69.5
19-I-95	3.7	10	1.1	0.16	0.25	01:35-06:55	487.0
19-I-95	3.8	10	0.9	0.076	0.12	07:00-07:50	36.5
19-I-95	3.8	10	0.9	0.057	0.09	07:50-08:35	45.0
19-I-95	3.7	10	1.1	0.082	0.13	08:35-09:10	59.9
19-I-95	3.6	10	1.3	0.10	0.16	10:00-11:00	62.5
19-I-95	3.8	10	1.9	0.019	0.03	11:52-13:15	24.4
19-I-95	3.7	10	1.1	0.10	0.16	13:15-15:00	136.9
19-I-95	3.7	10	1.0	0.05	0.08	15:00-18:42	103.0
PASIVO¹							
18-I-95	7.2	20	1.2	0.19	0.40	22:30-00:35	238.0
19-I-95	7.0	20	1.3	0.33	0.69	00:35-01:35	207.8
19-I-95	7.6	10	1.1	0.30	0.63	01:35-07:00	981.8
19-I-95	8.4	10	0.9	0.23	0.48	07:00-07:50	83.2
19-I-95	8.4	10	0.9	0.26	0.55	07:50-08:35	163.4
19-I-95	6.9	10	1.3	0.29	0.60	08:35-10:00	385.2
19-I-95	7.0	10	1.3	0.29	0.60	10:00-11:00	181.4
19-I-95	9.1	10	0.8	0.091	0.19	11:52-13:23	73.9
19-I-95	7.7	10	1.1	0.15	0.31	13:23-15:00	174.7
19-I-95	7.7	10	1.1	0.20	0.41	15:00-16:55	196.2

TABLA 4
CONTINUACION

Fecha	Diámetro de corte μm	Dirección del viento grados	Velocidad del viento m/s	CAL (Area Total) g/m^3	CAL (Area de hilos) g/m^3	Hora	Volumen mL
<u>PASIVO³</u>							
18-I-95	9.2	20	1.2	0.099	0.16	22:30-00:40	525.4
19-I-95	9.0	20	1.3	0.20	0.33	00:40-01:40	516.7
19-I-95	9.7	10	1.1	0.17	0.27	01:40-07:10	2216.9
19-I-95	10.8	10	0.9	0.093	0.15	07:15-07:55	106.7
19-I-95	10.8	10	0.9	0.099	0.16	07:55-08:40	248.4
19-I-95	8.9	10	1.3	0.11	0.17	08:40-10:05	575.8
19-I-95	8.9	10	1.3	0.056	0.09	10:05-11:00	234.7
19-I-95	11.6	10	0.8	0.012	0.02	11:52-13:23	40.8
19-I-95	9.9	10	1.1	0.037	0.06	13:23-15:05	190.1
19-I-95	9.8	10	1.1	0.056	0.09	15:05-16:55	219.1

1 COLECTOR PASIVO CILINDRICO DE AGUA DE NUBE.

2 COLECTOR ACTIVO DE AGUA DE NUBE.

3 COLECTOR PASIVO DE MALLA DE AGUA DE NUBE

TABLA 5
 CAPACIDAD DE COLECCION DE LOS COLECTORES DE AGUA DE NUBE (CC) EN g/m²/h
 EN TEZIUTLAN, PUEBLA

Fecha	ACTIVO			PASIVO CILINDRICO			PASIVO MALLA		
	Hora	Area Total	CC	Hora	Area Total	CC	Hora	Area Total	CC
18-I-95	22:55-00:25	736.6	1171.2	22:30-00:35	855.7	1771.3	22:30-00:40	449.7	724.0
19-I-95	00:25-01:35	1682.9	2675.8	00:35-01:35	1554.0	3216.7	00:40-01:40	959.8	1545.2
19-I-95	01:35-06:55	2588.6	4115.8	01:35-07:00	1207.6	2499.7	01:40-07:10	667.4	1074.5
19-I-95	07:00-07:50	1245.8	1980.9	07:00-07:50	749.6	1551.7	07:15-07:55	295.8	476.2
19-I-95	07:50-08:35	897.8	1427.5	07:50-08:35	860.5	1781.3	07:55-08:40	324.9	523.1
19-I-95	08:35-09:10	1357.6	2158.6	08:35-10:00	1384.9	2866.8	08:40-10:05	514.2	827.8
19-I-95	10:00-11:00	1770.6	2815.3	10:00-11:00	1356.6	2808.1	10:05-11:00	275.9	444.2
19-I-95	11:52-13:15	337.2	536.2	11:52-13:23	253.5	524.8	11:52-13:23	34.8	56.0
19-I-95	13:15-15:00	1602.6	2548.2	13:23-15:00	539.9	1117.5	13:23-15:05	141.2	227.4
19-I-95	15:00-18:42	788.7	1254.0	15:00-16:55	764.2	1581.9	15:05-16:55	222.4	358.0

TABLA 6
CONCENTRACIONES PROMEDIO (mg/L)

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
<u>TODAS LAS ESTACIONES</u>								
<u>COLECTOR PASIVO CILINDRICO</u>								
Tamaño de muestra	36	36	36	36	36	36	36	36
Promedio	0.48	1.36	6.24	2.41	2.33	0.072	0.18	0.21
Media Geométrica	0.36	-----	3.69	1.30	0.95	0.048	0.11	0.13
Varianza	0.14	1.49	42.76	4.41	11.94	0.005	0.042	0.064
Desviación Std	0.37	1.22	6.54	2.10	3.46	0.070	0.21	0.25
min	0.07	0	0.14	0.029	0.083	0.007	0.015	0.024
max	1.39	5.27	28.49	9.09	14.5	0.33	0.98	1.19
<u>COLECTOR ACTIVO</u>								
Tamaño de muestra	26	26	26	26	26	26	26	26
Promedio	0.86	3.77	7.8	4.15	3.92	0.22	0.43	0.51
Media Geométrica	0.54	1.93	6.24	3.53	2.16	0.097	0.23	0.29
Varianza	0.84	30.1	36.14	5.31	29.73	0.15	0.53	0.40
Desviación Std	0.92	5.49	6.01	2.30	5.45	0.39	0.73	0.63
min	0.16	0.49	1.39	0.87	0.35	0.018	0.051	0.073
max	3.36	25.34	28.02	10.46	27.0	1.5	3.5	2.81
<u>LLUVIA</u>								
Tamaño de muestra	21	21	21	21	21	21	21	21
Promedio	0.34	0.98	2.48	0.73	0.95	0.049	0.29	0.18
Media Geométrica	0.20	0.55	1.64	0.61	0.58	0.032	0.11	0.09
Varianza	0.37	3.30	8.34	0.23	1.29	0.004	0.38	0.092
Desviación Std	0.61	1.82	2.89	0.47	1.14	0.060	0.61	0.30
min	0.052	0.15	0.58	0.21	0.16	0.006	0.01	0.023
max	2.87	8.73	12.9	2.04	4.60	0.28	2.54	1.27

TABLA 6 (CONTINUACION)

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
<u>POPOCATEPEL</u>								
<u>COLECTOR PASIVO CILINDRICO</u>								
Tamaño de muestra	10	10	10	10	10	10	10	10
Promedio	0.63	1.96	1.44	0.42	0.49	0.047	0.25	0.19
Media Geométrica	0.52	-----	1.01	0.19	0.30	0.031	0.22	0.13
Varianza	0.17	3.26	0.98	0.16	0.20	0.001	0.020	0.044
Desviación Std	0.41	1.81	0.99	0.40	0.44	0.037	0.14	0.21
min	0.23	0	0.14	0.029	0.083	0.007	0.11	0.045
max	1.39	5.27	3.01	1.12	1.23	0.11	0.53	0.74
<u>COLECTOR ACTIVO</u>								
Tamaño de muestra	11	11	11	11	11	11	11	11
Promedio	1.19	7.09	6.70	3.6	5.77	0.30	0.81	0.67
Media Geométrica	0.80	4.40	4.94	2.92	2.91	0.14	0.48	0.36
Varianza	1.06	52.76	36.28	5.10	56.84	0.19	1.04	0.69
Desviación Std	1.03	7.26	6.02	2.26	7.54	0.44	1.02	0.83
min	0.2	1.2	1.39	0.87	0.35	0.03	0.13	0.09
max	3.36	25.34	23.09	8.38	27.0	1.5	3.5	2.81
<u>LLUVIA</u>								
Tamaño de muestra	12	12	12	12	12	12	12	12
Promedio	0.46	1.40	2.47	0.74	0.94	0.061	0.43	0.24
Media Geométrica	0.22	0.73	1.34	0.64	0.57	0.038	0.13	0.098
Varianza	0.63	5.51	13.61	0.22	1.51	0.006	0.63	0.15
Desviación Std	0.80	2.35	3.69	0.47	1.23	0.076	0.79	0.39
min	0.052	0.15	0.58	0.22	0.17	0.011	0.01	0.023
max	2.87	8.73	12.9	2.04	4.60	0.28	2.54	1.27

TABLA 6 (CONTINUACION)

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
<u>TEZIUTLAN</u>								
<u>COLECTOR PASIVO CILINDRICO</u>								
Tamaño de muestra	26	26	26	26	26	26	26	26
Promedio	0.43	1.13	8.08	3.17	3.04	0.082	0.15	0.22
Media Geométrica	0.31	0.91	6.07	2.69	1.48	0.056	0.081	0.13
Varianza	0.12	0.72	46.75	3.93	14.77	0.006	0.048	0.074
Desviación Std	0.35	0.85	6.84	1.98	3.84	0.078	0.22	0.27
min	0.070	0.27	1.24	0.93	0.23	0.01	0.015	0.024
max	1.36	4.25	28.49	9.09	14.5	0.33	0.98	1.19
<u>COLECTOR ACTIVO</u>								
Tamaño de muestra	15	15	15	15	15	15	15	15
Promedio	0.62	1.33	8.61	4.56	2.57	0.16	0.16	0.39
Media Geométrica	0.41	1.06	7.42	4.05	1.73	0.073	0.13	0.25
Varianza	0.59	0.996	36.96	5.42	7.83	0.13	0.012	0.18
Desviación Std	0.77	0.998	6.08	2.33	2.80	0.36	0.11	0.42
min	0.16	0.49	4.15	1.68	0.48	0.018	0.051	0.073
max	3.17	3.54	28.02	10.46	10.90	1.46	0.40	1.59
<u>LLUVIA</u>								
Tamaño de muestra	9	9	9	9	9	9	9	9
Promedio	0.19	0.43	2.49	0.73	0.95	0.033	0.11	0.10
Media Geométrica	0.18	0.38	2.15	0.59	0.58	0.025	0.090	0.08
Varianza	0.00481	0.062	2.12	0.26	1.15	0.001	0.007	0.005
Desviación Std	0.069	0.25	1.46	0.51	1.07	0.023	0.086	0.068
min	0.1	0.23	0.89	0.21	0.16	0.006	0.03	0.027
max	0.34	0.84	5.38	1.62	3.13	0.072	0.31	0.21

TABLA 7

PRUEBA DE MANN-WHITNEY (VALORES DE Z)¹

MUESTRA	LUGAR	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
PASIVO ² ACTIVO (N=36 Y 26)	TODOS	1.38	2.28	1.86	3.19	2.38	2.13	2.64	2.62
PASIVO-ACTIVO (N=10 Y 11)	POPO	1.06	2.22	2.85	3.70	3.06	2.47	1.87	1.94
PASIVO ACTIVO (N=26 Y 15)	TEZ.	0.65	0.42	0.83	2.12	0.79	0.56	1.94	1.72
PASIVO-PASIVO (N=10 Y 26)	POPO-TEZ.	-1.59	-0.55	4.11	4.51	2.72	1.18	-3.13	0.18
ACTIVO-ACTIVO (N=11 Y 15)	POPO-TEZ.	-1.77	-3.07	1.19	0.93	-1.04	-1.53	-3.35	-0.73
PASIVO-LLUVIA (N=36 Y 21)	TODOS	-2.92	-2.46	-3.01	-3.63	-1.54	-1.56	-0.02	-1.63
ACTIVO-LLUVIA (N=26 Y 21)	TODOS	-3.64	-3.74	-4.44	-5.56	-3.80	-3.42	-2.40	-3.42
PASIVO-LLUVIA (N=10 Y 12)	POPO	-2.71	-0.73	0.26	1.39	1.22	0.60	-1.45	-0.96
ACTIVO-LLUVIA (N=11 Y 12)	POPO	-2.62	-3.36	-2.80	-3.73	-2.80	-2.66	-2.56	-2.22
PASIVO-LLUVIA (N=26 Y 9)	TEZ.	-1.89	-3.19	-3.26	-4.08	-1.76	-2.04	0.64	-1.40
ACTIVO-LLUVIA (N=15 Y 9)	TEZ.	-2.51	-3.05	-3.76	-4.00	-2.44	-2.45	-1.07	-2.63
LLUVIA-LLUVIA (N=12 Y 9)	POPO-TEZ.	-0.36	-1.78	1.88	-0.32	0	-0.25	-0.28	0

1 APROXIMACION A LA NORMAL

2 PASIVO CILINDRICO DE AGUA DE NUBE

TABLA 8

PRUEBA DE MANN-WHITNEY (VALORES DE U)¹

MUESTRA	LUGAR	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	VALORES CRITICOS DE U
PASIVO ² ACTIVO (N=10 Y 11)	POPO	39.5	23.0	14.0	2.0	11.0	19.5	28.0	27.0	26
ACTIVO-ACTIVO (N= 11 Y 15)	POPO-TEZ.	48.0	3.0	59.0	64.0	62.0	52.5	17.5	68.0	24
PASIVO ² -LLUVIA (N=10 Y 12)	POPO	18.5	48.5	55.5	38.5	41.0	50.5	37.5	45.0	29
ACTIVO-LLUVIA (N=11 Y 12)	POPO	23.0	11.0	20.0	5.0	20.0	22.5	24.0	29.5	33
ACTIVO-LLUVIA (N=15 Y 9)	TEZ.	25.0	16.0	4.0	0	26.0	26.0	49.0	23.0	34
LLUVIA-LLUVIA (N=12 Y 9)	POPO-TEZ.	48.5	28.5	27.0	49.0	53.5	50.0	49.5	53.5	26

1 ESTA PRUEBA FUE APLICADA CUANDO LOS TAMAÑOS DE LAS MUESTRAS FUERON MENORES QUE 20.
2 COLECTOR PASIVO CILINDRICO DE AGUA DE NUBE