

# CAPITULO VI

## ASPECTOS GEOQUIMICOS Y DE IMPACTO ATMOSFERICO

*EMISIONES DE BIOXIDO DE AZUFRE DEL VOLCAN  
POPOCATEPETL, MEXICO, DURANTE LA ERUPCION  
DE DICIEMBRE 1994-ENERO 1995*

*ESTUDIO DE AEROSOLES Y CENIZAS DISPERSADOS  
DURANTE LA ERUPCION DEL VOLCAN  
POPOCATEPETL DEL 21 DE DICIEMBRE DE  
1994-RESULTADOS PRELIMINARES*

*LA EMISION DE CENIZAS Y VARIACIONES  
GEOQUIMICAS DURANTE DICIEMBRE-MARZO EN EL  
VOLCAN POPOCATEPETL*

*PATRONES DE VIENTO EN LA REGION DEL VOLCAN  
POPOCATEPETL Y CIUDAD DE MEXICO*

# EMISIONES DE BIOXIDO DE AZUFRE DEL VOLCAN POPOCATEPETL, MEXICO DURANTE LA ERUPCION DE DICIEMBRE 1994-ENERO 1995\*

I. Galindo<sup>1</sup>, A. González<sup>2</sup> y R. Ayala<sup>2</sup>

## RESUMEN

Se presenta un análisis de las mediciones de flujo de bióxido de azufre proveniente del volcán Popocatépetl durante febrero de 1994-enero 1995. Los métodos utilizados y las incertidumbres en las mediciones son descritos objetivamente. Los resultados indican que las emisiones máximas de gas (SO<sub>2</sub>) y posiblemente de partículas (cenizas) ocurrieron 72 horas después de iniciado el proceso eruptivo, alcanzando valores máximos absolutos cercanos a las 5,000 toneladas/día. Esta máxima emisión está estrechamente asociada a la amplitud máxima del tremor y del número de eventos tipo B de acuerdo a los reportes de sismología presentados independientemente. Se puede considerar que la línea base de emisión de SO<sub>2</sub> durante el periodo mencionado es de 1,000 toneladas/día. Finalmente, se recomienda determinar regularmente al bióxido de azufre junto con la sismicidad y la deformación en volcanes activos para la mejor estimación del peligro volcánico.

## ABSTRACT

An analysis is presented on SO<sub>2</sub> flux measurements made on the plume of Popocatépetl volcano between February 1994 and January 1995. The methods and uncertainties are discussed. The results show that the maximum gas (SO<sub>2</sub>) and particles (ash) emission occurred 72 hours after the eruption onset. These values were near to 5,000 tons/day. The maximum rate of emission is narrowly associated with the maximum tremor amplitude and the maximum number of seismic type B events according with seismology reports independently presented. It can be considered that the SO<sub>2</sub> baseline for the given period is about 1,000 tons/day. Finally, it is recommended to regularly determine sulfur dioxide together with seismicity and deformation monitoring in active volcanoes in order to have a better volcanic risk assessment.

## 1. INTRODUCCION

El 21 de diciembre de 1994, después de varias décadas de relativo reposo (GVN 18,2, 1993; 19,12, 1994), el volcán Popocatépetl (19.02°N, 98 62°W) comenzó una nueva actividad explosiva que se inició en la madrugada del día 21. La erupción siguió a aumentos en la sismicidad, en la actividad fumarólica y en el flujo de SO<sub>2</sub> (GVN, 19, 11, 1994).

Los aumentos en la actividad fumarólica relacionados con la reactivación actual del Popocatépetl se remontan probablemente al mes de agosto de 1988 (GVN, 18,2, 1993). Por otra parte, la sismicidad del volcán se comenzó

---

\* Con el apoyo parcial de CENAPRED

<sup>1</sup> Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad de Colima

<sup>2</sup> Coordinación General de la Investigación Científica, Universidad de Colima 25 de Julio No 965, 28045 Colima, Col., México

a monitorear en Noviembre de 1989.

Los primeros nueve meses de registros indicaban que la sismicidad de fondo se encontraba conformada por eventos regionales pequeños dentro de un radio no mayor a 40 km.

Una revisión exhaustiva de la bibliografía indica que al parecer las primeras determinaciones de bióxido de azufre de la fumarola del Popocatepetl se efectuaron el 10. de febrero de 1994 Fisher y Williams de la Universidad Estatal de Arizona (ASU) usaron el espectrómetro UV de correlacion COSPEC de ASU, siendo acompañados en el vuelo por Delgado y Siebe del Instituto de Geofísica de la UNAM. Después de efectuar nueve transectos perpendiculares a la fumarola y utilizando una velocidad de viento de 10 m/s obtenida con el sistema de posicionamiento global (GPS) de navegación del avión, reportaron  $1,200 \pm 400$  toneladas métricas/día. Estos autores consideraron en esa ocasión "...que el alto nivel de emisión del gas encontrado es una manifestación de reactivación asociado a un riesgo significativo de actividad magmática.." (GVN, 19,1, 1994).

En el presente artículo se describen y analizan las determinaciones de flujo de bióxido de azufre de la fumarola del volcán Popocatepetl efectuadas entre febrero de 1994 a enero de 1995, utilizando dos espectrómetros de correlación UV COSPEC (ASU y Universidad de Colima, UC) Es decir, el periodo de mediciones incluye la erupción del 21 de diciembre de 1994.

## 2. INSTRUMENTACION Y ESTRATEGIA DE MUESTREO

En las mediciones de  $SO_2$  durante el periodo considerado se han utilizado independientemente dos espectrómetros de correlación fabricados por Barringer Research de Toronto: COSPEC IV de la Universidad de Arizona, ASU y COSPEC V de la Universidad de Colima, UC, respectivamente

El instrumento COSPEC está diseñado para recibir selectivamente radiación correspondiente al ultravioleta cercano ( $290 \leq \lambda \leq 320$  nm). El COSPEC utiliza a la radiación ultravioleta dispersada por la atmósfera como fuente de radiación La radiación incidente se separa, mediante un prisma en dos longitudes de onda. La concentración en la columna de  $SO_2$  se mide remotamente al comparar la absorción espectral por el  $SO_2$  con regiones espectrales en donde la absorción por este gas es mínima. (Hoff y Millán, 1981).

La estrategia de muestreo que a continuación se detalla, es la utilizada por el grupo de la Universidad de Colima.

El instrumento COSPEC UC se monta normalmente en el compartimiento de equipajes de aviones pequeños tipo Cessna, a tal efecto se retira la puerta exterior del compartimiento. El instrumento y la batería de 12.5 V C.D. se fijan con amarras a la base metálica del fuselaje permitiendo que se exteriorice únicamente el telescopio por donde incide la radiación UV difusa El registrador se coloca a un lado del asiento del operador.

Una vez en vuelo, se localiza la pluma y se realizan uno ó dos transectos de prueba para asegurar la perpendicularidad del transecto, un indicador de ésto último lo da la inspección del registro en donde se nota la amplitud máxima, la cual debe coincidir cuando se observa un ángulo a  $90^\circ$  de la fuente (volcán) con respecto al rumbo que guarda el avión; en el transecto de retorno se verifica esta condición, por otra parte, los trazos ascendente y descendente de ambas curvas del registro deben mostrar simetría.

Se fijan dos puntos geográficos de referencia, por ej. Atlixco y San Nicolás de los Ranchos. Sus coordenadas son almacenadas en la memoria del GPS Estos puntos son externos a los bordes de la pluma. La velocidad del avión debe permanecer constante respecto a los puntos marcados Esto último se verifica midiendo el tiempo entre las dos marcas con un cronómetro y el registro del trazo de  $SO_2$  que se desplaza a velocidad constante.

Una vez que el trazo inscrito en el registrador indica el ingreso al borde de la pluma, se inician mediciones de la

intensidad y dirección del viento cada 15 segundos por medio del GPS. El instrumento COSPEC se calibra después de cada salida y entrada a la fumarola. El número de transectos depende de las condiciones meteorológicas prevalecientes y de la calidad del registro, normalmente efectuamos entre 6 y 12 transectos. De esta forma se asegura la repetibilidad de la medición y con ello la calidad de la medición.

Al término de los transectos se efectúan vuelos por arriba de la pluma siguiendo su trayecto (Casavedall, et al. 1994), el viento es nuevamente medido cada 15 segundos. La altura de cada transecto y del vuelo paralelo son anotadas, al final del vuelo se recuperan de la memoria del GPS las coordenadas de los puntos de referencia para su posterior vaciamiento en un mapa topográfico. Esto último sirve asimismo para corroborar la distancia determinada de cada transecto.

### 3. METODOS E INCERTIDUMBRES

El método espectrométrico de correlación utiliza como fuente de iluminación a la irradiación ultravioleta difusa de la atmósfera. Esta irradiación ha sido absorbida por la concentración presente de SO<sub>2</sub> en la pluma, por lo tanto, la concentración C<sub>SO<sub>2</sub></sub> [partes por millón, ppm] del bióxido de azufre de la pluma debe corregirse por el camino óptico CM [m] (figura 1), obteniéndose el producto P<sub>SO<sub>2</sub></sub> [ppm · m] = C<sub>SO<sub>2</sub></sub> · CM

Asimismo, obtenemos la sección transversal S del SO<sub>2</sub> [ppm · m<sup>2</sup>] multiplicando el producto P<sub>SO<sub>2</sub></sub> por el ancho de la pluma d [m].

Para conocer el flujo F<sub>SO<sub>2</sub></sub> en un volumen unitario es necesario determinar la velocidad a la que la pluma cruza la sección transversal S, esto último se puede obtener conociendo la velocidad del viento v [m/s] al cruzar la fumarola. Es decir [F<sub>SO<sub>2</sub></sub>] = S · v [ppm · m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>].

Sin embargo, la expresión más utilizada es de toneladas métricas por día (Stoiber et al., 1983). Con este fin se utiliza la densidad del SO<sub>2</sub> gas y se introduce un factor de corrección para expresar los resultados en condiciones normales de temperatura y presión (STP). Los productos anteriores obedecen a la siguiente ecuación lineal:

$$T_{SO_2} = F_{SO_2} \cdot K \cdot c(t) \quad (1)$$

donde

[T<sub>SO<sub>2</sub></sub>] = [toneladas/día],

K = δ<sub>SO<sub>2</sub></sub> · STP, c(t)

δ<sub>SO<sub>2</sub></sub> = densidad gas SO<sub>2</sub> [2.86x10<sup>-3</sup>g · ppm<sup>-1</sup> · m<sup>3</sup>]

STP = 273/293.

c(t) = 86 400 seg/día

Las incertidumbres en la determinación aérea del bióxido de azufre que se han encontrado son de dos causas: instrumentales y externas (Casadevall, et. al., 1981)

Las incertidumbres instrumentales pueden a su vez dividirse en aquellas inherentes a la sensibilidad instrumental y otras originadas durante el procesamiento de la información:

#### *Sensibilidad instrumental.*

1. Calibración del instrumento ± 5% (Casadevall et al., 1981).

2. Variaciones en la velocidad del avión  $\pm 2\%$  (Casadevall et al , 1981) Sin embargo, manteniendo la velocidad constante como se manifiesta en este trabajo, el error tiende a cero y en consecuencia en el presente trabajo no se ha tomado en consideración..

3. Procesamiento manual de la información versus digitalización de los datos  $\pm 2.4\%$ . (GVN, 19. 10. 10, 1994), sin embargo Casadevall et al.. 1981 reportan  $\pm 5\%$ .

Aunque el error es relativamente pequeño, el tiempo utilizado en evaluar manualmente las gráficas es varios órdenes de magnitud mayor. El procesamiento electrónico y análisis de la información de 10 transectos es de aproximadamente 2 horas. Por otro lado, el procesamiento manual para la misma cantidad de información puede llevarse alrededor de 20 horas, es decir una gráfica es evaluada en 2 horas aproximadamente.

4. El parámetro más crítico se produce en la determinación de la velocidad de la pluma, éste último se logra haciendo la suposición razonable de que la pluma se mueve, *paralela* al campo de vientos de su entorno, bajo esta hipótesis, Casadevall et al., 1981 consideran que bajo cielo despejado, la precisión es de  $\pm 10\%$ , mientras que en días con vientos intensos, puede reducirse a  $\pm 50\%$ .

En nuestra experiencia, hemos aprendido que para obtener vientos representativos del entorno de la pluma, es necesario identificar el efecto de "sombra" del volcán y encontrar una zona en donde este efecto no genere vientos turbulentos. Entendiéndose por efecto de sombra el efecto aerodinámico que presenta el volcán o topografía montañosa al paso del viento, es decir, dependiendo de la geometría se generarán desde movimientos turbulentos hasta ondas de montaña, en consecuencia la velocidad del viento se intensifica y su dirección cambia del patrón paralelo a la pluma.

En el entorno del Popocatepétl, el efecto de sombra cubre una gran área pues éste se genera tanto por el Iztaccihuatl como por el Popocatepétl. En la figura 3 se muestra una serie de mediciones del viento obtenidas con GPS para estudiar este efecto.

En las mediciones de SO<sub>2</sub> efectuadas durante diciembre de 1994 y enero de 1995 en el volcán Popocatepétl se pudo determinar con certidumbre el entorno atmosférico en donde el viento es representativo a la velocidad de la pluma.

*Las variaciones principales debidas a factores externos son:*

1. Variaciones reales en la emisión del SO<sub>2</sub>. Durante los vuelos efectuados se han observado emisiones súbitas del SO<sub>2</sub> del volcán, las cuales se conocen con el nombre de "puffs". Estas emisiones súbitas se caracterizan por ser variables en: Intensidad, frecuencia y duración. En la figura 2 se ilustran varios puffs. Por ej , durante el vuelo efectuado el 21 de enero de 1995 (fig. 2a), se observó la emisión súbita (puff) de SO<sub>2</sub> acompañado de ceniza, este "puff" fue de larga duración registrándose durante los transectos 4, 5 y 6, el máximo se alcanzó durante el transecto 5 con 1,895 toneladas/día, es decir, el flujo de bióxido de azufre se incrementó en 245% con respecto al promedio de 10 transectos. Por otra parte, el 28 de enero de 1995, se registraron dos aumentos súbitos en las emisiones volcánicas (SO<sub>2</sub>, cenizas, vapor de agua), aunque éstos fueron de menor duración, ver transectos 6 (2,919 toneladas/día, 201%) y 11 (3,055 toneladas/día, 211%).

2. Variaciones en la velocidad de la pluma. Se originan principalmente por movimientos turbulentos y son difíciles de cuantificar

3. Nubosidad cambiante, la cual puede obscurecer parte de la pluma, por ej., la presencia de nubes cumuliformes de densidad variable, ó nublados de Cirrus los cuales por su homogeneidad se comportan como un filtro cuyo efecto neto es reducir la intensidad de la radiación directa aumentando los niveles de irradiación difusa.

4. Opacidad de la pluma debido a la presencia de cenizas, ya sean de erupción o suspendidas en al aire (Casadevall et al., 1981).

Los puntos 3 y 4 formalmente definen niveles de menor intensidad de radiación directa y mayor irradiación dispersada, obviamente la "pantalla" difusora constituida por nubes ó cenizas (ó ambas) dependerá de la homogeneidad de la capa que subtienda, es decir, de su densidad y de la estabilidad atmosférica. Afortunadamente el modelo COSPEC V tiene control gráfico de la ganancia con ajuste automático a condiciones cambiantes de irradiación ultravioleta (ver por ej fig 1 de Casadevall, et al , 1994).

5. Altura solar, para ángulos pequeños o muy grandes, el camino óptico de la radiación tiende a infinito definiendo niveles de irradiación ultravioleta muy bajos y aunque la sensibilidad del COSPEC es considerable, sin embargo, es recomendable evitar mediciones tanto en las primeras como en las últimas horas del día.

Por otra parte, debe tenerse también en consideración que los procesos convectivos se incrementan a medida que el sol tiende a su culminación generando una mayor nubosidad. En consecuencia, se puede decir que existe un compromiso entre la hora de la medición y la actividad convectiva. El problema se minimiza alejándose lo mas posible del entorno volcánico.

Las mediciones aquí reportadas se efectuaron entre las 11 y las 14 horas, a una distancia horizontal media de unos 20 Km. del volcán.

#### *Adquisición y Procesamiento de la información*

Con objeto de hacer más expedita la evaluación de las mediciones del SO<sub>2</sub> de la pluma, hemos desarrollado dos procedimientos:

- a) Adquisición analógica de los datos de SO<sub>2</sub>. Este es el método normal que utiliza el registrador gráfico del instrumento. Sin embargo, una vez adquirida la información, las gráficas son pasadas por un "scanner" y digitalizadas en pixels/pulgada,
- b) Adquisición analógica-digital de los datos de SO<sub>2</sub>. Este procedimiento consiste en colocar un "datalogger" en paralelo al registrador analógico, la información se almacena digitalmente, sin embargo, las gráficas se utilizan principalmente como control durante las mediciones

Sean a) ó b) los procedimientos, se integra la base de datos capturando la información de navegación: Viento (velocidad y dirección, rumbo, velocidad constante del avión, altura vertical del transecto, coordenadas de los puntos de referencia y reporte sobre las condiciones meteorológicas durante los transectos, incluye factores presentes que reducen la visibilidad, por ej. cenizas, nubosidad, polvo, smog, bruma, etc.

Utilizando la base de datos se calcula el SO<sub>2</sub> medido para cada transecto, finalmente se obtiene la media y la desviación estándar ó característica. Todos los programas de cómputo han sido diseñados por uno de nosotros (A. González).

Los productos de salida que se utilizan para el reporte son:  
Lugar, fecha, P<sub>SO<sub>2</sub></sub>, d[Km], v, T<sub>SO<sub>2</sub></sub>(MAX, MEDIA, MIN), STD. n.

## **4. RESULTADOS**

En la tabla 1 y la figura 4 se presentan los valores del flujo medido de SO<sub>2</sub> de la pluma del volcán Popocatepetl de febrero de 1994 a fines de enero de 1995

Tabla 1. Valores promedio de las determinaciones de dióxido de azufre de la pluma del volcán Popocatepetl

| Fecha                 | P <sub>SO<sub>2</sub></sub> | d    | v    | MAX   | MEDIA | MIN   | STD | n  |
|-----------------------|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-----|----|
| 01/02/94 <sup>1</sup> |                             |      |      | 1,200 | 800   | 400   |     | 9  |
| 04/05/94 <sup>2</sup> | 66.5                        | 12.9 | 5.2  | 1,462 | 900   | 485   | 232 | 20 |
| 01/07/94 <sup>3</sup> |                             |      |      | 2,900 |       |       |     |    |
| 01/07/94 <sup>3</sup> |                             |      | 5.0  | 3,500 | 3,100 | 2,700 |     | 5  |
| 05/11/94 <sup>4</sup> | 45.3                        | 11.5 | 11.0 | 1,877 | 1,261 | 924   | 285 | 12 |
| 23/12/94              | 80.5                        | 13.8 | 8.0  | 2,488 | 2,169 | 1,617 | 244 | 8  |
| 24/12/94              | 95.5                        | 17.6 | 10.4 | 4,555 | 3,961 | 3,402 | 444 | 5  |
| 27/12/94              | 113.0                       | 7.8  | 6.3  | 1,513 | 1,167 | 987   | 140 | 13 |
| 29/12/94              | 54.2                        | 11.9 | 7.5  | 1,616 | 1,237 | 935   | 194 | 11 |
| 06/01/95              | 39.0                        | 14.3 | 8.4  | 1,054 | 836   | 716   | 123 | 12 |
| 14/01/95              | 51.5                        | 10.5 | 4.3  | 652   | 533   | 462   | 117 | 10 |
| 21/01/95              | 55.8                        | 9.1  | 6.9  | 1,586 | 749   | 492   | 310 | 11 |
| 28/01/95              | 72.0                        | 11.0 | 6.4  | 3,055 | 1,450 | 876   | 737 |    |
| 28/01/95 <sup>5</sup> |                             |      |      | 3,000 | 2,000 | 1,000 |     |    |

<sup>1</sup> Fisher, Williams, Delgado y Siebe, GVN, 19, 1, 9-10.

<sup>2</sup> González, A., Gavilanes, J.C. y Navarro, C., GVN, 19, 4, 4-6.

<sup>3</sup> Medición terrestre (01/07) y aérea (02/02) Williams, S.N., Fisher, T., Siebe, C. y Delgado, H., GVN, 19, 8, 13-14

<sup>4</sup> González, A., Gavilanes, J.C. y Navarro, C., GVN, 19, 10, 10.

<sup>5</sup> Medición terrestre Williams, S.N., y Delgado, H., Comunic. personal.

## 5. DISCUSION

La reciente erupción del volcán Popocatepetl se inició la madrugada del día 23 de diciembre de 1994 entre las 01.31 y 01:53 a.m. Sin embargo, las determinaciones del flujo de dióxido de azufre se reiniciaron a partir del 23 de diciembre en donde se reportó un valor medio de SO<sub>2</sub> de 2,169 toneladas/día, es decir, 48 horas después de la erupción, la emisión media de SO<sub>2</sub> se incrementó en un 172% con respecto al valor obtenido mes y medio antes (5 de noviembre). Los valores máximos de emisión de masa de dióxido de azufre (3,961 toneladas/día en promedio), se obtuvieron durante el vuelo efectuado entre las 12:38 y 13.44 p.m. del 24 de diciembre. Probablemente la emisión de ceniza también alcanzó su máximo en este momento, ésto último lo inferimos a partir de nuestros registros los cuales indican la máxima reducción en la visibilidad horizontal la cual era menor a 5 Km entre los 3,000 y 4,000 m. de altura donde se encontraba la fumarola, asimismo en las pistas del aeropuerto eran visibles los depósitos de ceniza sobre la superficie.

Durante la presentación de nuestros resultados en la sesión del 28 de diciembre de 1994 del Comité Científico Técnico formado para atender la crisis volcánica por el CENAPRED, el Dr. Carlos Valdés del Instituto de Geofísica mostró una gráfica en donde la amplitud máxima del temblor y el número máximo de sismos tipo B son coincidentes con el máximo del flujo de SO<sub>2</sub> emitido. Ocurriendo la amplitud máxima justamente poco después de mediodía, es decir, cuando efectuábamos las mediciones aéreas de SO<sub>2</sub>.

La correlación positiva entre máximos de emisión de SO<sub>2</sub> con otros parámetros volcánicos fue encontrada durante la erupción del Mount St. Helens, primero durante la actividad precursora conjuntamente con mediciones de la energía sísmica acumulada, la expansión del domo y la deformación (ver fig. 4.25, Banks et al., 1989). Esta información sirvió de base para la exitosa predicción del inicio del episodio eruptivo de marzo-abril, 1982 (Swanson

et al., 1985).

Asimismo, la estrecha correlación entre flujo de  $\text{SO}_2$  y sismicidad observada para la erupción del Popocatépetl, fue reportada una vez más para el Mount St. Helens, ahora entre el 20 y 25 de octubre de 1986 (ver fig. 8.19 en Ewert y Swanson, 1993). Sin embargo, son los procesos físicos que se dan en el interior de la cámara magmática y en el conducto de expulsión los que determinan si hay correlación positiva entre el flujo de  $\text{SO}_2$  y otros parámetros (Stoiber et al., 1983).

Por otra parte, el análisis de las mediciones de  $\text{SO}_2$  durante 1994, previas al episodio eruptivo, parece indicar que la linda base de emisión de dióxido de azufre se encontraba alrededor de las 1,000 toneladas/día. Este alto nivel de flujo de  $\text{SO}_2$ , asociado a los eventos tipo B, reportados previamente a la erupción sugiere que magma fresco se había presentado a una profundidad somera de 2 a 3 Km de la superficie (White, 1995).

Las mediciones durante la emisión intermitente de  $\text{SO}_2$  ("puffs") no deben tomarse en cuenta al estimar el flujo medio del gas por día (Stoiber et al., 1983), la inspección de las figuras 2A y 2B muestra claramente que los promedios así calculados son exagerados y poco representativos del flujo real en la unidad de tiempo.

## 6. CONCLUSIONES

Las mediciones del flujo de  $\text{SO}_2$  efectuadas por medio de los espectrómetros COSPEC ASU y UC de correlación durante el periodo febrero 1994 a enero de 1995 de la pluma del volcán Popocatépetl indican

1. Que la emisión máxima del  $\text{SO}_2$  se obtuvo 72 horas después de la erupción del 21 de diciembre de 1994, es decir el 24 de diciembre, alcanzando valores promedio de 3,961 toneladas/día y un máximo maximumum de 4,555 toneladas/día
2. Estos valores máximos del gas ocurrieron en coincidencia con el máximo de emisión de cenizas, con la amplitud máxima del tremor y con el número de eventos sismovolcánicos tipo B
3. La linda base de emisión de  $\text{SO}_2$  durante 1994 puede considerarse alrededor de 1,000 toneladas/día.
4. Las emisiones intermitentes de  $\text{SO}_2$  no deben tomarse en consideración durante la determinación de la emisión media del gas.
5. La determinación regular del  $\text{SO}_2$  en volcanes activos formar parte del monitoreo volcánico junto con la sismicidad y la deformación. Esta información es básica para la estimación del peligro volcánico.



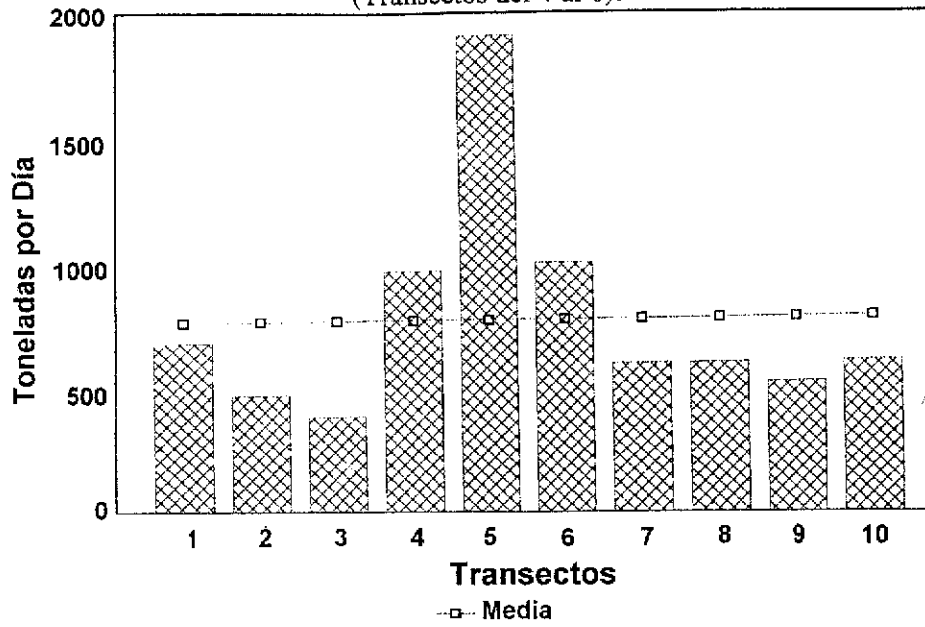
## 7. REFERENCIAS

- Banks, N.G., Tilling, R. I., Harlow, D. H., and Ewert, J.W., 1989: Volcano monitoring and short-term forecasts. In: (R. I Tilling Ed.) *Volcanic Hazards*. Short Course Presented at the 28th International Geological Congress, Washington, D C., 51-80
- Casadevall, T J., Johnston, D.A., Harris, D M., Rose, Jr., W.I., Malinconico, Jr., L.L., Stoiber, R E., Bornhorst, T J., Williams, S.N., Woodruff, L., and Thompson, J.M., 1981. SO<sub>2</sub> emission rates at Mount St. Helens from March 29 through December, 1980. In: P.W. Lipman and D.R. Mullineaux (Eds.), *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, **1250**, 193-200.
- Casadevall, T J., Doukas, M.P., Neal, C.A., McGimsey, R.G., and Gardner, C.A., 1994: Emission rates of sulfur dioxide and carbon dioxide from Redoubt Volcano, Alaska during the 1989-1990 eruptions *J. Volcanol and Geotherm. Res.* **62**, 519-530
- Ewert, J.W. y Swanson, D (Eds.), 1993: *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias Empleadas por el Personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90.* Bol. 166 Serv. Geol. de los Estados Unidos 237 pp.
- Hoff, R.M., and Millán, M.M., 1981. Remote SO<sub>2</sub> mass flux measurements using COSPEC. *J. Air Pollut Control Assoc.*, **31**, 381-384.
- Smithsonian Institution, 1993: **Popocatepetl** (México) Increased fumarolic activity; seismicity remains low *Bull. Global Volcanism Network (GVN)*, **18**, 2, 4-5.
- Smithsonian Institution, 1994 **Popocatepetl** (México) *Bull. Global Volcanism Network (GVN)*, **19**, 1, 9-10.
- Smithsonian Institution, 1994: **Popocatepetl** (México) SO<sub>2</sub> flux increase since May; increase in number of seismic events. *Bull. Global Volcanism Network (GVN)*, **19**, 10, 10.
- Smithsonian Institution, 1994: **Popocatepetl** (México) Small eruption on 21 December ends decades-long slumber. *Bull. Global Volcanism Network (GVN)*, **19**, 11, 2-4.
- Stoiber, R E., Malinconico, Jr., L.L. and Williams, S.N., 1983: Use of the Correlation Spectrometer at Volcanoes. In: E.H. Tarzieff and J.C. Sabroux (Eds.), *Forecasting Volcanic Events, Developments in Volcanology* 1, Elsevier, 425-444
- Sutton, J.A., Kenneth McGee A., Casadevall, T. J. y Stokes B. 1993. *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias Empleadas por el Personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90.* En: Ewert, J. W. y Swanson, D.A. (Eds.), Bol. 166 del Serv. Geol. de los Estados Unidos. 195-202
- Swanson, D.A., Casadevall, T J., Dzurisin, D., Holcomb, R.T., Newhall, C.G., Malone, S.D., and Weaver, C.S., 1985: Forecasts and predictions of eruptive activity at Mount St. Helens, USA: 1975-1984 *J. Geodynamics*, **3**, No. 314, 397-423
- Williams, S N., 1995. Comunicación personal.
- White, R., 1995: Response to increased unrest at Popocatepetl volcano, Mexico, December 1994-January 1995. A Report to the National Disaster Prevention Center (CENAPRED), Government of Mexico. Unpubl. 6 pp.



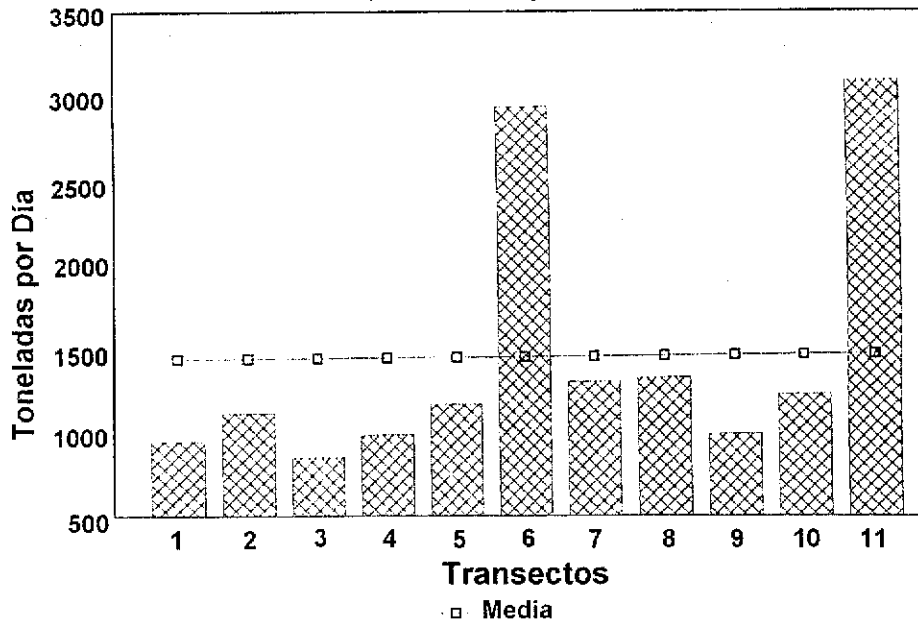
Figura 1. Volcán Popocatepetl visto del lado de Puebla, se ilustra un transecto del avión perpendicular a la pluma; la distancia horizontal con respecto al cráter es simbólica.

Figura 2a. Emisiones súbitas de bióxido de azufre  
(Transectos del 4 al 6).



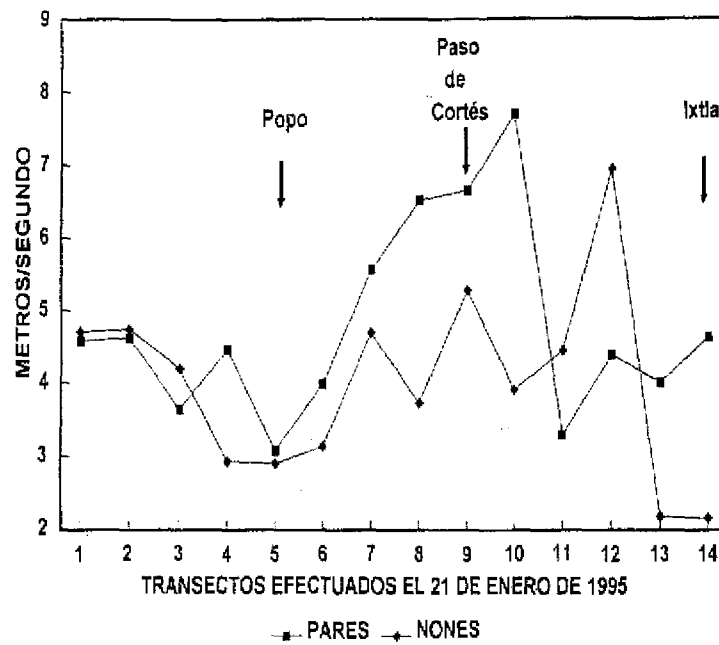
ENERO 21, 1995, 12:22 - 13:35 P.M.

Figura 2b. Emisiones súbitas de bióxido de azufre  
(Transectos 6 y 11).



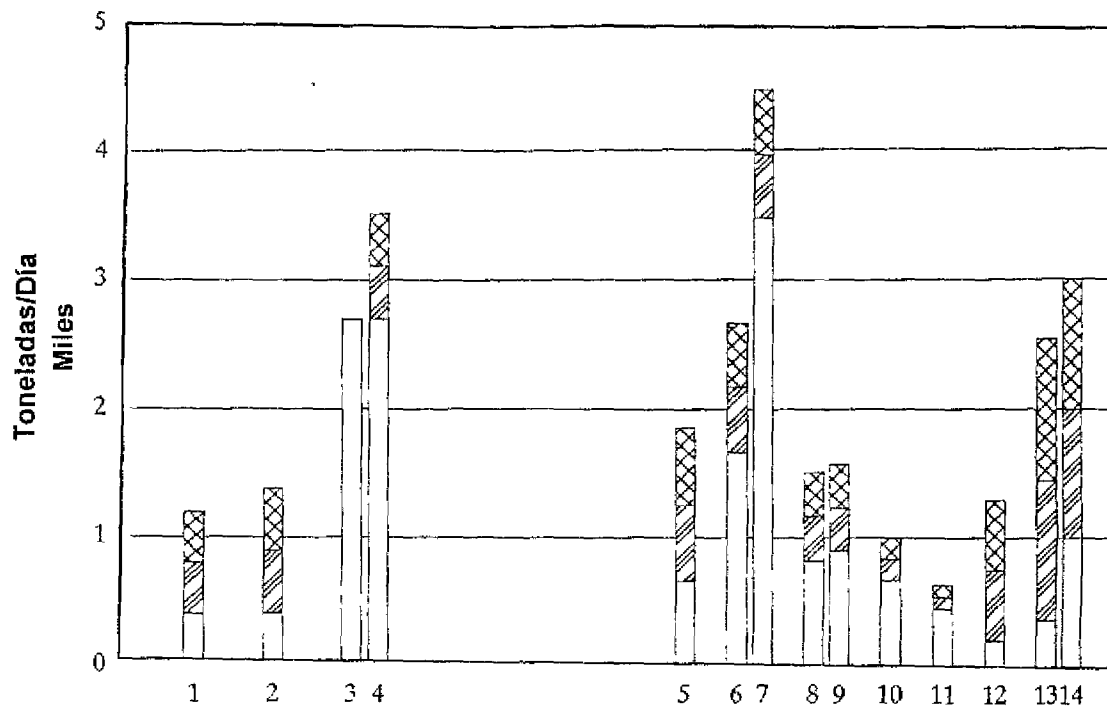
ENERO 28, 1995, 11:22 A.M. - 13:01 P.M.

Figura 2. Determinaciones Aéreas de Bióxido de Azufre del Volcán Popocatepetl con el Espectrómetro UV COSPEC-UC.



TRANSECTOS PARES DE ATLIXCO A SAN NICOLAS DE LOS RANCHOS  
 TRANSECTOS NONES, DIRECCION OPUESTA

Figura 3. Efectos sombra del Volcán Popocatépetl.



Mediciones efectuadas entre 1994-1995

Leyenda:

- 1 = 01/02/94 ASU
- 2 = 04/05/94 UC
- 3 = 01/07/94 ASU, terrestre
- 4 = 02/07/94 ASU
- 5 = 05/11/94 UC
- 6 = 23/12/94 UC
- 7 = 24/12/94 UC
- 8 = 27/12/94 UC
- 9 = 29/12/94 UC
- 10 = 06/01/95 UC
- 11 = 14/01/95 UC
- 12 = 21/01/95 UC
- 13 = 28/01/95 UC
- 14 = 28/01/95 ASU, terrestre

Figura 4. Emisión de Bióxido de Azufre, Volcán Popocatépetl.