

a las faldas del volcán **POPOCATÉPETL**

Gulllermo J. González Pomposo

Carlos Valdés González

Alejandra Arciniega

Antonio Pérez Soto

*Los volcanes brotaron del fondo de la tierra para consuelo y joya,
para sombra y cobijo de quienes nunca entienden. Hace millones
de años que están ahí mirándose y el tiempo es un juego para su
juramento y nuestro juramento es otra pena para su largo tiempo de
escuchar juramentos.*

Ángeles Mastretta, *Puerto Libre*



INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas se encuentran entre los desastres naturales más espectaculares y también entre los más temidos. Otras formas de violencia natural tales como las inundaciones, los huracanes, los incendios, las tormentas y los sismos, han sido responsables de grandes pérdidas económicas y de vidas humanas, pero los volcanes se encuentran entre los más preocupantes debido a los efectos cataclísmicos y a varias erupciones muy notables ocurridas en el curso de la historia. Aún así, mucha gente piensa que éstos son fenómenos que ocurren sólo en lugares distantes y remotos.

En un volcán, la roca fundida proveniente del interior de la Tierra, a la cual se le da el nombre de magma, llega a la superficie. El núcleo de nuestro planeta está compuesto por este material magmático a varios miles de grados centígrados de temperatura. Aunque parezca ilógico, el calor que este material genera contribuye a que haya vida en la Tierra, pero también es responsable de que ocurran sismos y erupciones volcánicas. Podemos decir que toda la roca que hay en la superficie de la Tierra, incluyendo la del fondo de los océanos es de origen volcánico. Pero no todas han permanecido intactas desde su aparición en la superficie. Algunas fueron erosionadas y depositadas en cuencas y valles terrestres o marinos y, después de muchos miles de años se litificaron y se convirtieron en rocas sedimentarias. Otras fueron alteradas por la fricción y por el calor debido a desplazamientos y movimientos en la corteza terrestre convirtiéndose así en rocas metamórficas.

Cada año entran en actividad entre cincuenta y sesenta y cinco volcanes,¹ pero sólo unos cuantos son responsables de daños y pérdida de vidas humanas. Durante un siglo ocurren unas cuantas erupciones que tienen proporciones desastrosas, pero su efecto en la sociedad no es necesariamente proporcional al tamaño o violencia del fenómeno, sino más bien a la proximidad con el volcán de asentamientos humanos. Por ejemplo, la erupción del volcán Katmai (ubicado en Novarupta, Alaska), en 1912, fue un cataclismo de gran magnitud, pero que no provocó pérdida de vidas humanas debido fundamentalmente a su localización remota, mientras que erupciones más pequeñas, como la del volcán Pelée, ocurrida en 1902, y la del Nevado del Ruiz, en 1985, causaron la muerte a miles de personas.

A medida que se progresa en el entendimiento de estas actividades volcánicas también se mejoran las técnicas de monitoreo volcánico. Por ejemplo, los estudios geológicos de erupciones anteriores revelan cuál fue el comportamiento de un volcán proporcionando claves de los tipos y frecuencia de posibles erupciones futuras.² La determinación del riesgo volcánico, basado en estos estudios, debe ser usada para hacer mapas que determinen o restrinjan el desarrollo urbano o actividades industriales cerca de volcanes potencialmente activos. Investigaciones y monitoreos sistemáticos a menudo permiten predecir o pronosticar los fenómenos.^{3,4,5}

En ocasiones, aun volcanes que son bien monitoreados pueden presentar un comportamiento "normal" antes de una erupción cataclísmica, mientras que otros pueden mostrar un comportamiento del tipo que precede a esa actividad, para regresar a un periodo de tranquilidad. Estos fenómenos se encuentran en el rango de variaciones anticipadas por los investigadores, pero en general producen incertidumbre y son motivo de perplejidad y temor.

A menudo los vulcanólogos tienen que explicar al público en qué consisten los riesgos volcánicos; esta tarea no es fácil debido a las incertidumbres que implican estos riesgos. Frecuentemente se producen confusiones y malentendidos que tensan las relaciones entre los investigadores y las personas a cargo de la seguridad de la comunidad.

En algunos casos, la dificultad para interpretar los cambios de los parámetros que muestra un volcán en reactivación ha causado daños cuando dichas alteraciones no han sido

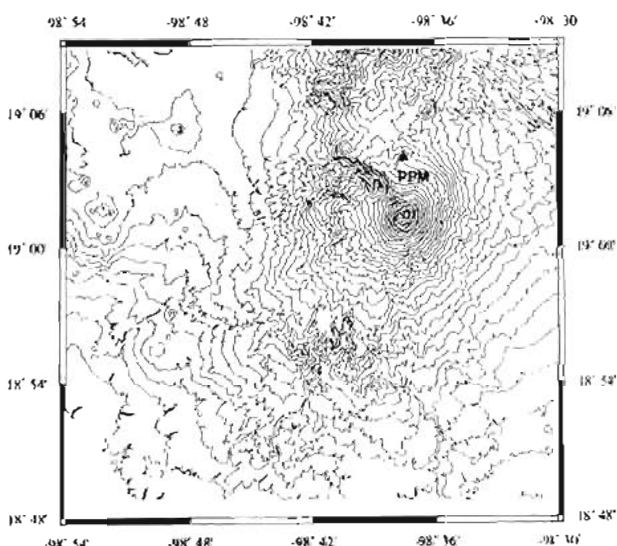


Figura 1. Localización de la estación PPM.

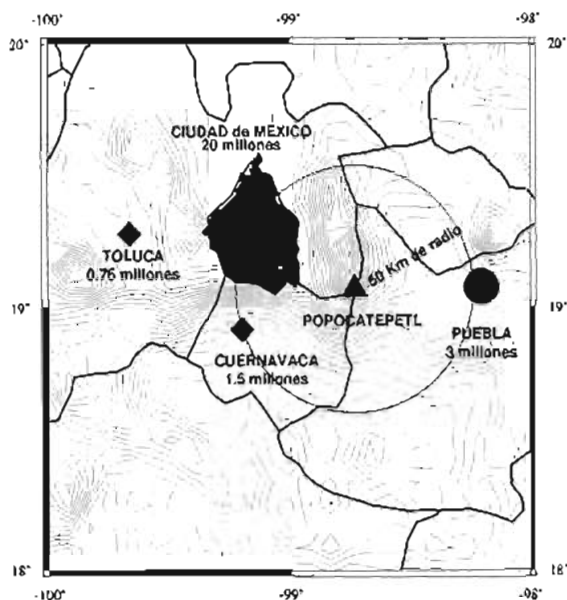


Figura 2. Situación geográfica del Popocatépetl y poblaciones colindantes.

atendidas cuidadosamente. Esto provoca, en muchas ocasiones, malentendidos entre los investigadores, las autoridades civiles y la población afectada.

EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Hablando en particular sobre nuestro país, éste se encuentra en una zona altamente sísmica y también volcánica. Un ejemplo de este riesgo lo representa el volcán Popocatépetl, estratovolcán que se encuentra localizado en las coordenadas 19° 03' N; 98° 35' W, con una altura de 5,420 msnm (Figura 1). Es un gran cono truncado que define un cráter externo elíptico, cuyos ejes miden 450 y 650 m respectivamente. Además cuenta con un cráter interno que produce emisiones fumarólicas, en cuyo interior se encuentra un lago.⁶

El Popocatépetl ha presentado una actividad continua, con erupciones recientes en 1519, 1539, 1664, 1697, 1720, 1802 y 1919-27-38,⁸ inclusive, en 1663 y 1665, se produjo caída de ceniza en la ciudad de Puebla por varios días. Recientemente se ha reportado actividad fumarólica sísmica⁸ acompañada de una serie de explosiones sísmicas con emisión de ceniza alrededor de la 1:30 (hora local) del día 21 de diciembre de 1994.

Este volcán representa una de las zonas de mayor riesgo del país debido a los numerosos asentamientos humanos e industriales que se encuentran en sus alrededores. Tres estados colindan con él: México, Morelos y Puebla (Figura 2). El

Distrito Federal se localiza a una distancia de 65 km, la ciudad de Puebla a 45 km y Cuautla, Morelos, a 41 km. Por lo tanto, una erupción proveniente del Popocatépetl puede afectar, potencialmente, a unos veinte millones de personas, las que representan una cuarta parte de la población total del país, y provocar un fuerte impacto económico.

Para predecir erupciones volcánicas se ha utilizado la cuantificación de los diferentes eventos sismo-volcánicos y sus cambios temporales tanto en número como en la energía total liberada.^{9,10,11} El objetivo de este trabajo consiste en clasificar y cuantificar los fenómenos asociados al Popocatépetl de enero de 1994 a diciembre de 1996, para determinar si han ocurrido variaciones temporales en su sísmica.

ANÁLISIS DE DATOS SÍSMICOS

Con la estación PPM (Tlamacas) localizada en el flanco norte del volcán Popocatépetl con coordenadas 19.02° N, 98.63° W, a una altura de 3,950 msnm, se monitoreó la actividad sísmica de enero de 1994 a diciembre de 1996. La estación PPM cuenta con un sismómetro Mark-L-4 de tres componentes con periodo natural de 1 seg. Únicamente se analizaron los registros analógicos de la componente vertical. Con el análisis obtenido de esta estación se identificaron tres tipos de eventos: VT, LP y H, cuyas características son las siguientes:

- Tipo VT (volcano-lectónico): éstos son similares a los lectónicos, con frecuencias típicas de 5 Hz y las fases de las ondas P y S claramente definidas con tiempos de fase S-P de 1.5 a 3.0 seg.; la duración de coda es menor a los 40 seg. (Figura 3a). Estos eventos representan fallamientos o fracturamientos de corte muy similares a los que generan los tectónicos. Los esfuerzos que producen pueden ser de origen regional o producirse localmente por el sistema volcánico.¹⁰ Se registraron doscientos veinticuatro eventos de este tipo en el periodo de registro del presente estudio.

- Tipo LP (*long period*): las frecuencias características de estos eventos fueron de 1.0 a 1.6 Hz. La fase de la onda P es emergente y no es posible identificar la fase de la onda S; la duración de la coda es menor a los 125 seg. (Figura 3b). Chouet (1985, 1988) modeló teóricamente este tipo de eventos y sugiere que son causados por resonancia iniciada por presiones transitorias en un conducto o fractura saturada con fluido.^{12,13} En nuestro estudio se identificaron 31,828 eventos tipo LP.

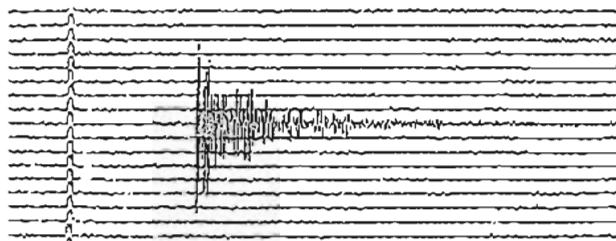


Figura 3a. Ejemplo de sismograma de eventos tipo VT.

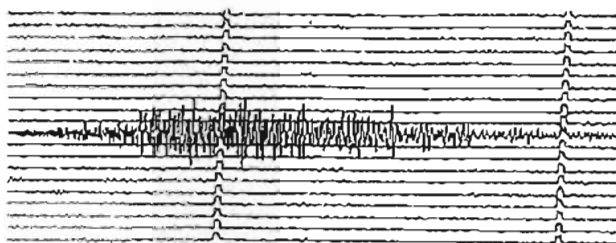


Figura 3b. Ejemplo de sismograma de eventos tipo LP.

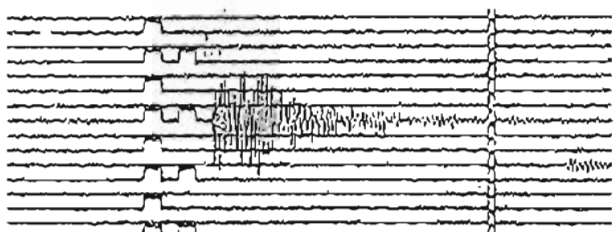


Figura 3c. Ejemplo de sismograma de eventos tipo H.

• Tipo H (*hybrid*): estos eventos se caracterizan por tener componentes de altas y bajas frecuencias. Las altas frecuencias incluyen fases impulsivas de ondas P y S, con un tiempo S-P de 1.5 a 2.0 segundos; la duración de este componente es de 5.5 segundos aproximadamente y las amplitudes de las ondas P y S son más pequeñas que las de los eventos tipo VT. Los periodos característicos del componente de baja frecuencia son de 0.8 a 1.1 segundos y la duración de coda de todo el evento es menor a los 150 segundos (Figura 3c). El mecanismo que genera estos eventos puede ser una mezcla de los que generan los tipos VT y LP. Se identificaron 108 actividades de este tipo.

En las Figuras 4a, 4b y 4c se muestra la variación en el número de eventos registrados mensualmente para cada uno de los tres tipos en el periodo analizado. En la Figura 4a se pueden observar incrementos en enero y febrero de 1994. Posteriormente se alcanzó un máximo en diciembre de 1994 y en enero de 1995, manteniendo un comportamiento estable hasta abril de 1996, cuando se inicia un incremento gradual

hasta llegar a su máximo en septiembre de 1996 con treinta eventos por mes. En la Figura 4b se muestra la variación del número de eventos LP. Se registró un aumento progresivo de los mismos hasta alcanzar su máximo en noviembre y diciembre de 1994, cuando ocurre la primera erupción del volcán. Posteriormente permaneció estable y en marzo de 1996 se dispara la actividad coincidiendo con la aparición de un domo de lava en el interior del cráter.

CONCLUSIONES

Del análisis temporal de los sismos asociados al Popocatepetl durante el periodo comprendido entre enero de 1994 y diciembre de 1996 concluimos que la sismicidad profunda, reflejada por los eventos tipo VT, presentó un decremento constante entre los meses de enero a noviembre, previo a la crisis volcánica del 21 de diciembre.

El análisis temporal de los eventos de tipo LP, indica un incremento en la sismicidad superficial. Dicho incremento ha sido constante y se observaron dos picos en los meses de noviembre y diciembre de 1995, previos a las erupciones del último mes de ese año. Los eventos de tipo H presentaron un comportamiento aleatorio que no reflejó un cambio significativo previo a la actividad del volcán en el periodo que se analiza en el presente trabajo.

Con los datos presentados en este estudio se puede establecer que el conocimiento del comportamiento de la sismicidad es importante como premonitor de una fase crítica del volcán Popocatepetl. Debe destacarse la necesidad de mantener un monitoreo continuo de la actividad sísmica del volcán; ello nos permitirá entender si su comportamiento es estable o si, por el contrario, muestra los signos propios del preámbulo de una erupción.

Parece indispensable que la información recabada por los vulcanólogos sea sintetizada y también transmitida adecuadamente al público. Esta comunicación representa, para los científicos, un reto tan importante como el monitoreo y la comprensión del comportamiento de los volcanes. El mismo grado de creatividad e innovación que se aplica al entendimiento de los procesos volcánicos debe aplicarse al mejoramiento de la manera en que el público entiende el riesgo volcánico. Sólo entonces nuestro compromiso y responsabilidad para con la sociedad serán plenamente cumplidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al doctor Raúl Serrano Lizaola, por su invitación y entusiasmo para realizar esta publicación; asimismo, agradecemos al ingeniero Casiano Jiménez, a la señora Ángeles Gutiérrez y al señor Bernardino Rubí, analistas del Servicio Sismológico Nacional, por compartir los sismogramas.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Nakamura, K., "Volcano-stratigraphic study of Oshima volcano Izu", *Bulletin Earthquake Research Institute, University Tokyo*, 42, 1964, pp. 649-685.
- ² Simkin, T. and L. Siebert, "Explosive eruptions in space and time. Duration, intervals and a comparison of the world's active volcanic belts", in *Explosive volcanism: Inception, evolution and hazards*, Geophysics Study Committee, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 1984, pp. 110-121.
- ³ Fournier D'Albe, E.M., "Objectives of volcanic monitoring and prediction", *Journal Geological Society, London*, 136, 1979, pp. 321-326.
- ⁴ Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Malone, S.D., Newhall, C.G. and Weaver, C.S., "Predicting eruptions at Mount St. Helens, June 1980 through December 1982", *Science*, 221, 1983, pp. 1369-1376.
- ⁵ Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Holcomb, R.T., Newhall, C.G., Malone, S.D. and Weaver, C.S., "Forecasts and predictions of eruptive activity at Mount St. Helens, U.S.A.", *Journal of Geodynamics*, 3, 1985, pp. 397-423.
- ⁶ Carrasco Núñez, G., Silva Mora, L., Delgado Granados, H. y Urrutia Fucugauchi, J., "Geología y paleomagnetismo del Popocatepetl", *Serie de Investigación, Instituto de Geofísica UNAM*, 33, 1986.
- ⁷ Soler, A. and Martín Del Pozo, A.L., "Volcanology of Popocatepetl volcano", *New Mexico Institute of Mining & Technology Bulletin*, 1989, pp. 131, 249.
- ⁸ "Popocatepetl (México), high SO₂ flux on 1 February (1,200+400 metric tons/day)", *Bulletin of the Global Volcanism Network, Smithsonian Institution*, 19:1, 1994, pp. 9-10.
- ⁹ Shimozuru, D., "A seismological approach to the prediction of the volcanic eruption", en *The surveillance and prediction of volcanic activity*, UNESCO, Earth, Science Monograph 8, 1971, pp. 19-45.
- ¹⁰ Tokarev, P.I., "Prediction and characteristics of the 1975 eruption of Tolbachik Volcano", *Bulletin Volcanology, Kamchatka*, 41:3, 1978, pp. 251-258.

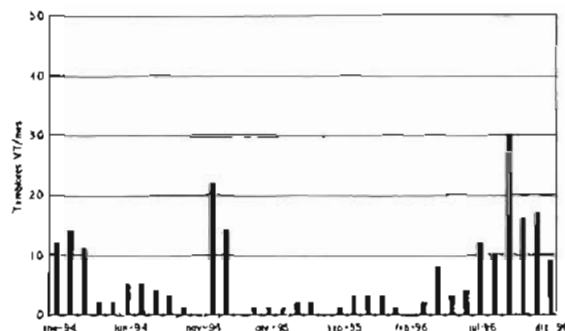


Figura 4a. Sismicidad mensual del Popocatepetl. Eventos volcano-tectónicos VT

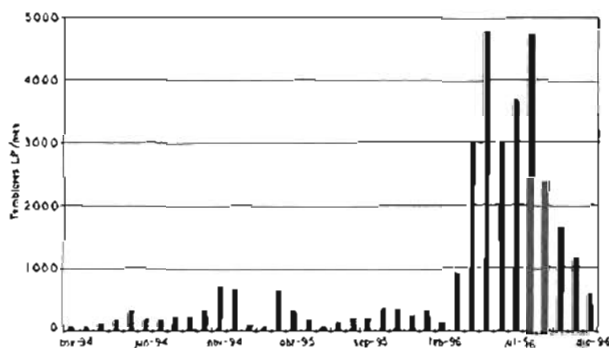


Figura 4b. Sismicidad mensual del Popocatepetl. Eventos de periodo largo LP.

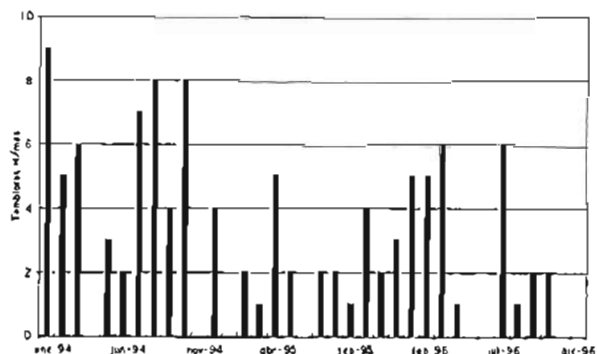


Figura 4c. Sismicidad mensual del Popocatepetl. Eventos híbridos H.

- ¹¹ Malone, S.D., "Earthquakes: Observation, theory and interpretation". Editors: Kanamori, H., Bochi, E., 1982, pp. 436-455.
- ¹² Chouet, B., "Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor", *Journal of Geophysical Research*, 90, 1985, pp. 1881-1893.
- ¹³ Chouet, B., "Resonance of a fluid driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor", *Journal of Geophysical Research*, 93:B5, 1988, pp. 4375-4400.

(Guillermo J. González Pomposo es investigador de la Facultad de Ingeniería Civil y Tecnológicas de la Universidad Autónoma de Puebla; Carlos Valdés González, Antonio Pérez Soto y Alejandra Arciniega son investigadores del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.)