

Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del Volcán de Colima y perspectivas futuras

¹José Luis Macías, ²Ricardo Saucedo, ³Juan Carlos Gavilanes, ⁴Nick Varley, ⁵Sergio Velasco García, ⁶Marcus Bursik, ⁷Víctor Vargas Gutiérrez y ⁸Abel Cortés

¹Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán 04510, México D.F.
macias@geofisica.unam.mx

²Instituto de Geología /Fac. Ingeniería UASLP

³Centro Universitario de Ciencias del Ambiente, Universidad de Colima

⁴Facultad de Ciencias, Universidad de Colima

⁵www.volcandecolima.com <<http://www.volcandecolima.com>>

⁶Geology Department, SUNY at Buffalo

⁷Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México

⁸Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima

INTRODUCCIÓN

El Volcán de Colima o Fuego de Colima (19°30'45"; 103°37') tiene una elevación sobre el nivel del mar de 3,860 m (Fig. 1). Está ubicado a unos 100 km al sur de Guadalajara y a 30 km al norte de Colima. Forma parte de una cadena volcánica con orientación N-S, constituida por los volcanes Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima. Tiene un volumen aproximado de 10 km³ y ha crecido a razón de 0.002 km³/año (Luhr y Carmichael, 1990). Durante los últimos 430 años, ha presentado alrededor de 50 erupciones que lo colocan como el más activo de Norteamérica (De la Cruz, 1993). Como consecuencia de su actividad, cuenta con el registro histórico más completo de los volcanes mexicanos.

Los trabajos más detallados sobre la actividad histórica del Colima son aquellos publicados por Bárcena (1887), Waitz (1915; 1935), Arreola (1915), Medina-Martínez (1983), De la Cruz-Reyna (1993), Saucedo y Macías (1999) y Bretón *et al.* (2002). En estos trabajos se mencionan erupciones ocurridas en los siglos XVI y XVII (Tello, 1651), el 13 de diciembre de 1606 (Arreola, 1915), el 15 de abril de 1611 (Bárcena, 1887), en 1690 (De la Cruz-Reyna, 1993), en 1771 (Bárcena, 1887) y muchos eventos menores. El registro más detallado de las erupciones comienza con la ocurrida el 15 de febrero de 1818 (Sartorius, 1869), que destruyó un domo de lava (Dollfus y

Monserrat, 1866) y arrojó escoria y ceniza hasta las ciudades de Guadalajara, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí y México (Bárcena, 1887; Arreola, 1915). Después de la erupción quedó un cráter abierto de alrededor de 450 m de diámetro, con paredes que variaban de 50 a 230 m. Posteriormente, inició la formación del domo adventicio "El Volcancito" el 12 de junio de 1869 que concluyó en 1872 (Sartorius, 1869; Bárcena, 1887). El 21 de agosto de 1869, Orozco y colaboradores reportaron que "El Volcancito" estaba localizado a una altura de 3500 m y que había alcanzado una altura de 300 metros. La etapa comprendida entre 1893 y 1903 es especialmente importante en el estudio del Volcán de Colima, ya que tanto el padre Arreola en Colima, Col. como su colega Castellanos, en Zapotlán, Jal. (hoy Ciudad Guzmán), instalaron observatorios para vigilarlo. A partir de esta fecha se hicieron observaciones sistemáticas que duraron hasta 1906, y que eran publicadas en el *boletín del Observatorio Meteorológico Central de México* (Arreola, 1915).

La erupción explosiva mejor documentada del Volcán de Colima ocurrió en 1913. Antes de ella, la cima del volcán tenía un cráter cubierto por un domo de lava. La erupción comenzó el 17 de enero (Ortiz, 1944) con una serie de explosiones que generaron nubes de vapor y arena. El 20 de enero, la erupción

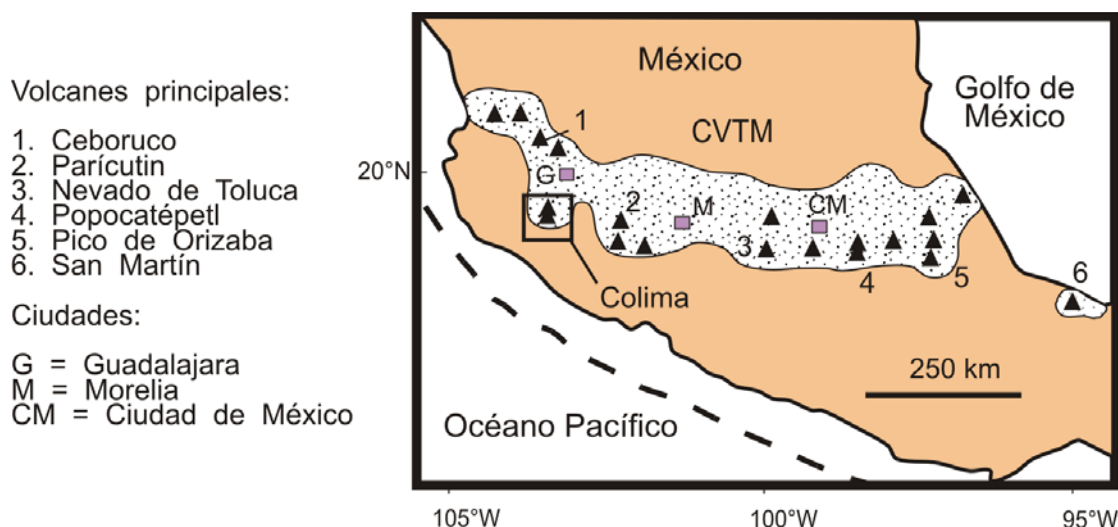


Figura 1. Localización del Volcán de Colima en la parte occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano.

continuó con la formación de una columna pliniana que alcanzó 21 km de altura (Saucedo, 1997). Esta columna provocó una lluvia de ceniza que en Zapotlán, Jalisco, alcanzó 15 cm de espesor y en Guadalajara alrededor de 0.5 mm (Waitz, 1915), y llegó hasta Saltillo, Coahuila, a más de 700 km del volcán. El volumen total de la erupción de 1913 se estimó en 0.9 km³ (Saucedo, 1997). Durante la erupción también se produjeron flujos piroclásticos que avanzaron 15 km por el flanco sur del volcán, dejando depósitos de ceniza y rocas de 40 m de espesor (Waitz, 1915, Saucedo 1997). La morfología de la cima del volcán cambió drásticamente; el edificio perdió 100 m de altura y se formó un cráter con un diámetro cercano a los 400 m y profundidad desconocida. Para 1931, la profundidad del cráter oscilaba entre 50 y 100 m (Waitz, 1935; Arreola, 1915); para 1958, el cráter estaba casi completamente ocupado por un tapón de lava en bloques (Mooser, 1961), que entre 1961 y 1962, comenzó a derramarse por la ladera norte del Volcán de Colima formando una lengua de lava que llegó hasta la base norte del volcán en el sitio denominado El Playón. En 1975-1976 comenzó la generación de flujos de lava acompañados por primera vez de flujos piroclásticos, los cuales fueron documentados por Thorpe *et al.* (1977). Esta clase de actividad inicia con la intrusión de magma que empuja el domo generando derrames andesíticos como en 1982 (Luhr y Carmichael, 1990) y flujos piroclásticos producidos por el colapso gravitacional de las partes externas del domo, como en 1991 (Martín del Pozzo *et*

al., 1987; Rodríguez-Elizarrarás *et al.*, 1991) o de la parte frontal de los flujos de lava, como en 1998 (Saucedo *et al.*, 2002) o por la destrucción de un domo central por explosiones violentas, como las ocurridas en julio de 1999 (Saucedo *et al.*, 2002) y durante los primeros meses del año 2005. La erupción del 16 de abril de 1991, que originó flujos piroclásticos que rellenaron las barrancas del Cordobán, incentivó la elaboración de mapas de peligros del volcán de Colima (Sheridan y Macias, 1995; Martín del Pozzo *et al.*, 1995; Navarro *et al.*, 2003). Es indudable que la actividad explosiva del Volcán de Colima se ha incrementado durante los últimos 15 años con un incremento paralelo en el número y alcance de los flujos piroclásticos. En este trabajo resumimos la erupción de 1998-2000, presentamos la erupción más reciente de 2004-2005 y comparamos los flujos piroclásticos producidos. Finalmente, confrontamos estos flujos piroclásticos con el mapa de peligros propuesto por Saucedo *et al.* (2004) y presentamos una perspectiva de los riesgos futuros del Volcán del Colima.

ERUPCIÓN DE NOVIEMBRE 1998-JUNIO 2000

Los primeros indicios de esta erupción comenzaron en noviembre de 1997, al formarse una fractura en dirección N-NO en el domo (Cortés y Gavilanes, 1998), un enjambre sísmico ocurrido el 6 de julio de 1998 (Smithsonian, 1998a) y variaciones químicas detectadas en fumarolas de alta temperatura tres

meses antes de la erupción (Taran *et al.*, 2002). Las mediciones de COSPEC fueron muy bajas hasta el 30 de octubre, cuando se midieron 408 ton/día, aumentando hasta 1620 ton/día el día 18 de noviembre (Smithsonian, 1998b). El 20 de noviembre, apareció el primer domo en la parte SO del cráter que, el día 21, comenzó a extravasar el borde del cráter y formar los primeros flujos piroclásticos. El día 22 de noviembre, partes del frente del derrame de lava colapsaron, produciendo flujos piroclásticos que viajaron hacia la barranca Cordobán Este (Fig. 2). Ese



Figura 2. Vista hacia el SO del Volcán de Colima. Se aprecia el desprendimiento de los gases de la parte central del domo, el derrame negro de lava y el flujo piroclástico que se dirige hacia la barranca El Cordobán (Fotografía de Abel Cortes).

mismo día, el derrame de lava alcanzó 150 m; tres días después, 370 m, para posteriormente dividirse en tres lóbulos distintos. Otros flujos piroclásticos fueron observados el 8 de diciembre y después estudiados en el campo (Saucedo *et al.*, 2002).

La actividad explosiva del Volcán de Colima aumentó significativamente con el tiempo. Las explosiones ocurridas el 9 y 10 de febrero de 1999 fueron registradas por la red sísmica y escuchadas en la ciudad de Colima a 35 km de distancia. Estas explosiones lanzaron proyectiles que llegaron hasta 4 km de la cima (Smithsonian, 1999). Después de 13 horas de tremor volcánico, el 17 de julio de 1999, tuvo lugar la explosión más violenta, que formó una columna eruptiva de 10 km de altura. Parte del material colapsó para formar un flujo piroclástico tipo Soufriere que se dirigió a las barrancas de Montegrande y San Antonio rellenándolas casi completamente con más de 6 m de material y

arrasando con la vegetación de las partes altas de la barranca. En donde existían dos barrancas quedó una superficie accidentada compuesta por bloques (Fig., 3). Después de esta explosión, la actividad del Volcán de Colima disminuyó drásticamente y regresó a los



Figura 3. Panorámica hacia el sur del área donde existían las barrancas Montegrande y San Antonio en julio de 1999. (Fotografía de Ricardo Saucedo).



Figura 4. Vista hacia el sur de una nueva barranca formada en el depósito de flujo piroclástico del 17 de julio de 1999. Las paredes tienen una profundidad variable de 10-15 m.

niveles que tenía antes de la erupción. Debido a que el material piroclástico es deleznable, puede ser fácilmente removido por las lluvias, dando lugar a la formación de lahares y nuevas barrancas (Fig. 4). Estos cortes recientes permitieron, en febrero de 2002, el estudio del depósito de flujo piroclástico en paredes verticales de hasta 15 m de espesor.

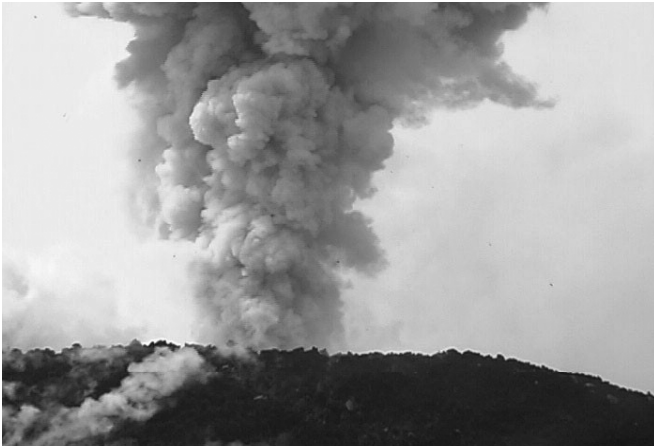


Figura 5. Fotografía de la sima del Volcán de Colima tomada el 3 de octubre de 2004 por Carlos Martínez Durán. Los puntos negros son bloques emitidos durante la explosión.

ERUPCIÓN DE 2004-2005

Un nuevo episodio eruptivo inició a finales de septiembre de 2004, cuando un domo de lava en bloques comenzó a formarse en la cima del volcán. Los primeros derrumbes descendieron hacia el N y al W y fueron reportados el 29 del mismo mes. Pocos días después, dos flujos de lava descendieron hacia el N y el WNW. Para el 3 de octubre de 2004, el flujo de lava N tenía ya más de 300 m de longitud, un espesor aproximado de 10 m y una anchura de 150 m. Ese día se escucharon fuertes sonidos de jet con duraciones de 10 a 30 segundos, percibiéndose uno a 7 km de distancia por más de 5 minutos. A partir de esa fecha, se inició la ocurrencia de explosiones pequeñas con



Figura 6. Imagen de la barranca La Lumbre y la superficie de afectación de un flujo piroclástico ocurrido el 6 o 7 de octubre de 2004. Este es el flujo más extenso registrado desde la erupción de 1913.

poco contenido de ceniza que formaron columnas eruptivas menores a 700 m de altura (Figura 5).

También se presentaban, con menor frecuencia, explosiones con columnas eruptivas que superaban los 1,500 m de altura sobre el domo. A diferencia de las erupciones registradas desde 1998, en esta ocasión, era la primera vez que la fase explosiva se iniciaba a solo unos días de iniciada la fase extrusiva. El día 6 o 7 de octubre se colapsó una parte del domo, produciendo un flujo piroclástico que alcanzó 6.14 km



Figura 7. Vista del flujo de lava N, el cual descende por los flancos del Volcán de Colima; a la izquierda se aprecia El Volcancito (Fotografía de Carlos Martínez D.).

de distancia (el de mayor alcance desde 1913) y se encauzó en la barranca La Lumbre (Figura 6). Para el 31 de octubre, el flujo de lava N tenía una longitud aproximada de 2.3 km, con una anchura en el frente de 330 m y un espesor aproximado de 20 m (Figura 7). Hasta esa fecha, la velocidad promedio de avance del flujo era de 76 m/día. Ese día se efectuaron observaciones a 2 km del domo, registrándose 22 sonidos de jet, 3 de ellos fuertes y uno tipo locomotora, así como 2 explosiones pequeñas en un período de tres horas. En diciembre de 2004, el flujo de lava ya se había detenido y, para entonces, las explosiones comenzaban a aumentar en contenido de ceniza y en altura, observándose varias columnas de más de 2,000 m de altura sobre el cráter.

Durante observaciones realizadas a principios de enero de 2005 a distancias menores de 5 km del cráter, se apreció que algunas explosiones que duraban 30 segundos o más lanzaban proyectiles



Figura 8. Explosión registrada el 8 de enero de 2005 en donde se aprecian proyectiles balísticos (Fotografía de Sergio Velasco).



Figura 9. Columna eruptiva y flujo piroclástico originados el 12 de febrero de 2005 (Fotografía de Sergio Velasco G.).

balísticos a distancias aproximadas de 1 km (Figura 8) y columnas eruptivas cercanas a los 3,000 m de altura.

El 12 de febrero ocurrió una explosión que desestabilizó los bordes norte y sur del cráter, generó el colapso de al menos 100,000 m³ de material y flujos piroclásticos que alcanzaron alrededor de 2.5 km de distancia hacia al sur (con una velocidad aproximada de 70 km/h), y otros que llegaron 1.2 km hacia el norte, formando una columna eruptiva de más de 2,500 m de altura (Figura 9). Para el 6 de marzo, las observaciones visuales revelaban que las explosiones moderadas lanzaban balísticos de manera continua por periodos de hasta 3 minutos. El 10 de marzo, ocurrió una explosión que formó una columna eruptiva superior a los 2,600 m de altura, que fue la más grande ocurrida hasta entonces en 2005.



Figura 10. Flujos piroclásticos formados por la explosión del 13 de marzo de 2005. En la fotografía tomada en la cabecera de la barranca San Antonio-Montegrande por S. Velasco se aprecia como los flujos piroclásticos descienden en todas direcciones antes de ramificarse al sobrepasar un obstáculo. Este flujo piroclástico tenía una velocidad aproximada de 198 km/hr.



Figura 11. Columna de ceniza de más de 2400 m de altura ocurrida el 1 de mayo de 2005 (Fotografía de Ana García Semperes).

Todos estos eventos presentaban precursores sísmicos que fueron registrados horas antes por la Red Sismológica Telemétrica de Colima y por el Observatorio Vulcanológico de la U. de C., quienes alertaron a las autoridades de protección civil de Colima y de Jalisco sobre la posible ocurrencia de estos eventos horas antes. De esta forma las autoridades correspondientes informaron oportunamente a las comunidades más amenazadas e implementaron los respectivos planes operativos. El tiempo más corto entre el aviso y la ocurrencia de la explosión fue de 45 minutos (10 de marzo de 2005) y el más largo, aproximadamente 60 horas (5 de julio de 2005). Una explosión mayor ocurrió el 13 de marzo de 2005. Esta explosión formó una columna eruptiva de más de 3,000 m de altura, lanzó balísticos a distancias inferiores a 2 km y generó flujos piroclásticos hacia el sur con una velocidad promedio de 200 km/h, que alcanzaron cerca de 3.4 km desde el cráter (Figura 10). Otra explosión menor, ocurrió el 25 de marzo.

Otras observaciones visuales de campo indicaban que durante el mes de abril y principios de mayo seguían presentándose explosiones, con emisión de balísticos y ceniza a alta presión, algunas duraban 6.5 o 10 minutos continuos, con alturas de columnas eruptivas de hasta 3,300 m., eventos que tenían lugar varias veces en un solo día (Figura 11).

El 16 de mayo ocurrió una explosión que fue muy superior a las presentadas en este año, dado que produjo flujos piroclásticos hacia todos los flancos del volcán. La actividad explosiva continuó y, el 23 de mayo, sobrevino una explosión que superó en tamaño a todas las registradas hasta entonces por el sistema de monitoreo. La columna eruptiva se elevó a más de 3,000 m sobre el cráter, lanzando balísticos a distancias inferiores a los 2.5 km y los flujos piroclásticos más grandes se encauzaron por las barrancas de San Antonio y Montegrande, al S y S-SE del volcán originando algunos incendios forestales. Una hora después, el Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias del Ambiente (CUICA) de la U. de C. detectó por medio de satélite que la nube de ceniza tenía un área de 46 por 28 km, al SO del volcán (Galindo *et al.*, 2006).

La magnitud de las explosiones creció paulatinamente, ya que pocos días después, el 30 de mayo, se presentó una explosión que se convirtió en la más grande registrada en los 20 años de existencia del monitoreo sísmico. Con base en el registro sísmico, la Red Sismológica Telemétrica de Colima (RESCO) calculó los tamaños de las explosiones comparándolas con la explosión del 17 de julio de 1999). Dicha red estimó que esta explosión tuvo un tamaño 2.6 veces mayor que la del 17 de julio de 1999 y más de una vez mayor a la del 23 de mayo de 2005. Los datos de satélite mostraron que la nube de ceniza se dirigió al ESE por arriba de los 8,500 metros sobre el nivel del mar (msnm) y al ENE por debajo de los 5,500 msnm, alcanzando una altura de 4,700 m sobre el cráter (Galindo *et al.*, 2006).

El CUICA de la U. de C. detectó, 3 horas después, la nube de ceniza a 100 km al SE. Asimismo, se produjeron flujos piroclásticos hacia el oeste. Durante la noche del 1 de junio y la madrugada del día 2 ocurrieron explosiones con tamaño un poco menor a la del 30 de mayo, pero que causaron lluvia de ceniza al S y SO del volcán, afectando a las ciudades de Colima y Villa de Álvarez, así como poblaciones aledañas. Cinco horas después, el CUICA detectó por medio de imágenes de satélite la nube de ceniza a 62 km al SSO del volcán, sobre la laguna de Cuyutlán cubriendo un área de 40 por 29 km.

El siguiente evento explosivo fuerte ocurrió el 5 de junio; RESCO calculó que fue de tamaño igual a 3,



Figura 12. Explosión ocurrida el 9 de junio de 2005. Se aprecia una columna eruptiva y la formación de flujos piroclásticos en la parte derecha de la imagen (Fotografía de Sergio Velasco G.).

además de ser 1.2 veces mayor al del 30 de mayo de 2005. Este evento levantó una columna eruptiva de más de 5,000 m sobre la cima (Galindo et al., 2006) siendo, hasta hoy (14 de julio de 2005), el mayor ocurrido en la historia del monitoreo del volcán. La onda de choque producida por esta explosión casi derribó a un oficial del Sistema Estatal de Protección Civil de Jalisco que se encontraba destacado en la comunidad Juan Barragán (Francisco Cortina Contreras, com. pers.), a 9 km al SE del Volcán, localidad en la que se reportaron ventanas rotas, así como lesiones en el oído de una persona. En San Marcos, Jal., a 14 km al SE, también se registraron daños materiales similares por la misma causa. El

una base de Protección Civil Jalisco localizada en la parte alta del Nevado de Colima, a 5.6 km del Volcán de Colima, presenció la explosión, describiendo haber sentido la onda de choque como “cuando se está junto a una bocina muy grande en una fiesta”. Tanto en esta explosión como en la previa hubo formación de flujos piroclásticos. La columna de ceniza se elevó a más de 4,500 m sobre el cráter. El viento transportó la nube de ceniza hacia el SO, causando una intensa lluvia de ceniza sobre las ciudades de Colima y Villa de Álvarez (Volcanic Ash Advisory Center, VAAC, <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html>).



Figura 13. Fotografía de la Barranca de la Arena ubicada al SE del volcán y la superficie del flujo piroclástico producido el 6 o el 9 de junio de 2005. La vegetación aparece parcialmente destruida, las ramas están dobladas en la dirección del flujo. Fotografía de J. C. Gavilanes.

aeropuerto nacional de Buenavista, localizado al SSE del volcán, permaneció cerrado por más de 12 horas (La Jornada, 6 de junio de 2005) debido a la lluvia de ceniza.

El volcán volvió a explotar el 6 de junio, aunque el evento fue menor que el del 17 de julio de 1999. Sin embargo, Jaime Romero Valencia, oficial destacado en

El 9 de junio ocurrió otra explosión que se escuchó y sintió en las poblaciones circundantes, incluyendo las ciudades de Colima y Villa de Álvarez (Figura 12). No es muy claro si esta explosión o la del 6 de junio produjo flujos piroclásticos que descendieron por la barranca La Arena (al SE del volcán), alcanzando más de 5 km de distancia (Figura 13). Los sismólogos informaron que el tamaño de este

evento fue reducido (la mitad de la explosión del 17 de julio de 1999) (VAAC, <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html>). Sin embargo, los flujos piroclásticos de este tipo son los de mayor alcance desde 1913.

La más reciente explosión grande tuvo lugar el 5 de julio de 2005 y produjo flujos piroclásticos cuyos depósitos alcanzaron 4.8 km al SE del volcán, por la barranca La Arena. Este evento tuvo un tamaño más bien reducido, del orden del de la explosión del 17 de julio de 1999 (VAAC, <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html>). El estudiante de Ciencias de la Tierra José Guadalupe Landín, presenció el evento desde el Observatorio de Protección Civil Jalisco ubicado a 5.6 km del cráter, describió el avance de la onda de choque, “como si una ola de viento a una velocidad enorme fuera sacudiendo la vegetación de las partes bajas del volcán”. El video del evento grabado por el personal de Protección Civil muestra que gran parte de los flujos piroclásticos descendieron hacia el ESE formando columnas secundarias de ceniza con alturas superiores a 700 m. Se reportó caída de ceniza en La Becerrera y en La

Yerbabuena (a 12 y 8 km al SO del volcán, respectivamente) y, al parecer, se escuchó hasta Ciudad Guzmán, Jalisco (Melchor Ursúa Quiroz, com. pers.).

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD ACTUAL

Algunos autores han sugerido que las erupciones de mayor magnitud (plinianas) del Volcán de Colima tienen una recurrencia aproximada de 100 años (Luhrr y Carmichael, 1990). Si consideramos el aumento en la explosividad de las erupciones del Volcán de Colima a partir de 1998 y alcanzando su clímax durante los meses de mayo y junio del 2005, no podemos descartar la posibilidad de que en el corto o mediano plazo pueda presentarse una erupción de mayor magnitud, como las ocurridas en 1818 y 1913. Un análisis de la frecuencia en la explosiones del Volcán de Colima, claramente muestra cómo, a partir de 1991, la generación de flujos piroclásticos ha venido transformándose de tipo Merapi a uno más explosivo de tipo Soufriere. La Tabla 2 muestra un claro aumento en la explosividad y frecuencia de las erupciones a partir de 1998. Estas últimas

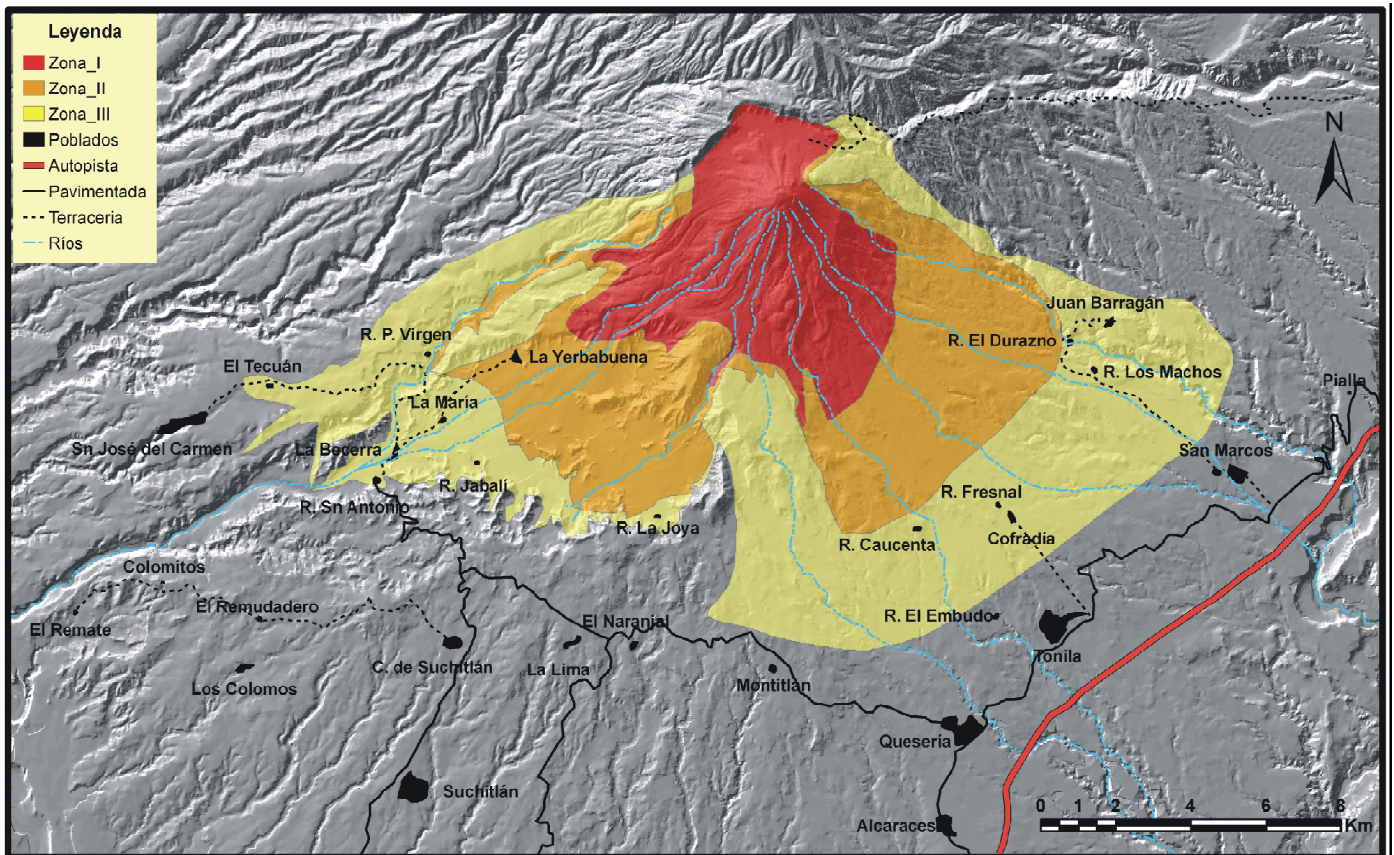


Figura 14. Mapa de peligros para flujos piroclásticos del Volcán de Colima de acuerdo a Saucedo et al. (2004).

Tabla 1. Síntesis de la actividad del Volcán de Colima a partir de 1576 según Saucedo *et al.* (2004)

Número	Año	Tipo de erupción	Fuente	Características
1	1576	Posible pliniana	Barcena, 1887	Generación de Fp
2	1590	Explosión	Waitz, 1935	Lluvia de ceniza en una amplia zona, posible FBC tipo Soufriere
3	1606	Posible pliniana	Tello, 1650; Arreola, 1915	Explosión y caída de ceniza hasta Mich., posible generación de Fp Soufriere
4	1611	Explosión	Bárcena, 1887	Lluvia de ceniza en una amplia zona, posible FBC tipo Soufriere
5	1690	Posible pliniana	Lurh y Carmichael, 1990	Posible generación de Fp
6	1771	Explosión	Bárcena, 1887	Caída de ceniza en Guadalajara, posible FBC tipo Soufriere*
7	1818	Pliniana	Sartorius, 1871; Bárcena, 1887 y Arreola, 1915	Fp, y caída de ceniza hasta la C. de México
8	1869-1872	Cono adventicio	Bárcena, 1887	Flujos de lava y FBC tipo Merapi y caída de ceniza
9	1880	F. de lava y FBC tipo Merapi, en el flanco SW	Kerber, 1882, Comunicación personal C. Siebe	Flujos de lava y FBC tipo Merapi
10	1885-1886	F. de lava en el flanco SW-W	Bárcena, 1887	Flujo de lava, FBC tipo Merapi
11	1885-1886	Explosiones	Barcena, 1887	FBC tipo Soufriere ?
12	1890	Explosión	Arreola, 1915, De la Cruz, 1993	Caída de ceniza hasta a C. de Guanajuato y FBC tipo Soufriere?
13	1891-1892	Explosión	Arreola, 1915; Starr, 1894	Caída de ceniza en C. Colima y posibles FBC tipo Soufriere?
14	1903	Explosión	Arreola, 1915; Waitz, 1935	Caída de ceniza y FBC tipo Soufriere
15	1908	Explosión	Arreola, 1915; Waitz, 1936	Caída de ceniza y FBC tipo Soufriere
16	1909	Explosión	Arreola, 1915; Waitz, 1937	Caída de ceniza y FBC tipo Soufriere
17	1913	Pliniana	Waitz, 1915 Y1935; Arreola, 1915	Fp Merapi, Soufriere, Fp de columna pliniana y caída de ceniza a 720 km.
18	1962-1961	F. de lava y FBC tipo Merapi, en flanco N	Mooser, 1961	Alcance del flujo de lava aprox. 2 km tipo Merapi
19	1975-1979	F. de lava y FBC tipo Merapi, en flanco SE	Thorpe et al., 1977	Alcance del flujo de lava 4.5 km, tipo Merapi
20	1981-1982	F. de lava y FBC tipo Merapi, en flanco S	Lurh y Carmichael, 1990	Alcances del flujo de lava 1 km, tipo Merapi
21	1987	Explosión	Lurh y Carmichael, 1991	Formó un cráter en la parte E de la cima y FBC tipo Soufriere
22	1991	F. de lava y FBC tipo Merapi, en el flanco SW	Rodríguez-Elizarrarás et al., 1991; Saucedo et al., 2001a	Alcance de los FBC tipo Merapi, 4 km y del F. de lava 2 km
23	1994	Explosión	Saucedo et al., 1995	FBC tipo Soufriere con una alcance de 3.5 km
24	1998-1999	Tres flujos de lava y FBC tipo Merapi y Soufriere	Saucedo et al., 2001b	Alcance de FBC tipo Merapi 4,5 y Soufriere 3.3 de los flujos de la va 3 km
25	2001	Explosión y FBC tipo Soufriere	Comunicación personal Gavilanes, 2001	????
26	2003	Explosión y FBC tipo Soufriere	Comunicación personal Gavilanes, 2003	Alcance de los FBC tipo Soufriere fue 3 km
27	2004	Explosión y FBC tipo Soufriere	Comunicación personal Gavilanes, 2004	Alcance de los FBC tipo Soufriere fue de 2 km
28	2005	Explosiones FBC tipo Soufriere	Comunicación personal Gavilanes, 2005	Alcance de los FBC tipo Soufriere, entre 3 y 5 km

FBC = Flujos piroclásticos de Bloques y Ceniza
Fp = Flujos piroclásticos

Tabla 2. Resumen de la actividad volcánica del Colima que ha generado flujos piroclásticos durante los últimos 100 años según Saucedo *et al.* (2004). El coeficiente de fricción representa la razón entre la distancia máxima recorrida L y la diferencia en altura desde el punto de inicio al termino del flujo piroclástico H (L/H).

Año	Volumen en m ³	Alcance en km	Coefficiente de fricción	Area en km ²	Tipo de erupción
1913 Fase I	130,000.00	4	0.41	0.07	Merapi
1913 Fase II	1' 900,000.00	9.5	0.26	0.23	Soufriere
1913 (fase III)	10' 000,000.00	13 a 15	0.17	0.45	Pliniana
1991	800,000	4.5	0.39	0.01	Merapi
1994	450,000.00	3.5	0.42	0.08	Soufriere
1998 Cordoban W	800,000.00	4.5	0.4	0.14	Merapi
1998 Cordoban E	450,000.00	3	0.44	0.09	Merapi
1999	790,000.00	3.3	0.44	0.23	Soufriere
2003	300,000.00	3	0.42	0.75	Soufriere
2004 La Lumbre	900,00.00	6	0.39	0.1	Merapi
2005	?	5	?	?	Soufriere*

*Sólo se consideró el flujo de mayor alcance

explosiones son cada vez más frecuentes y dan lugar a la generación de flujos piroclásticos de mayor volumen y alcance, que pueden compararse con aquellos producidos durante la segunda fase de la erupción de 1913.

FORMACIÓN DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y MAPA DE PELIGROS

Con base en el registro estratigráfico de la erupción de 1913 (Saucedo, 1997) durante la cual ocurrieron varios flujos piroclásticos y el análisis de la información existente hasta el año de 2004, Saucedo y colaboradores (2004) presentaron un mapa de peligros para flujos piroclásticos del Volcán de Colima (Figura 14). Según estos autores, la erupción de 1913 del Volcán de Colima consistió en tres fases eruptivas que produjeron flujos piroclásticos, depósitos de caída y lahares. La erupción originó un volumen total de 1.1 km^3 (Saucedo, 1997). Los flujos piroclásticos producidos por la erupción de 1913 variaron con el tiempo y de acuerdo con las tres fases eruptivas. La primera fase generó flujos piroclásticos tipo Merapi ($H/L = 0.40$; H = diferencia en elevación entre el punto de emisión y el punto terminal del flujo y L = distancia máxima recorrida por el flujo). La segunda generó flujos piroclásticos tipo Soufriere ($H/L = 0.26$) y la tercera, flujos piroclásticos de escoria debidos al colapso de la columna Pliniana ($H/L = 0.17-0.26$) (Tabla 2). Con esta información y la ayuda de simulaciones con el programa FLOW 3D, Saucedo *et al.* (2004) elaboraron el mapa de peligros para flujos piroclásticos del Volcán de Colima. En este mapa aparecen tres zonas de peligro que podrían ser afectadas por flujos piroclásticos.

La zona 1, de color rojo y mayor peligro, es aquella que puede ser afectada por flujos piroclásticos tipo Merapi y Soufriere, que pueden alcanzar hasta 5 km desde el cráter, como los producidos durante las erupciones de 1991, 1994 y 1998-1999.

La zona 2, de color naranja y peligro intermedio, es aquella que podría ser alcanzada por flujos tipo Soufriere de hasta 9 km de largo, como los flujos producidos durante la segunda fase de la erupción de 1913, así como los producidos en octubre de 2004 y durante los meses de mayo y junio del año 2005. Es claro, que el alcance de los flujos piroclásticos

producidos durante las últimas explosiones está comprendido dentro de la zona 2 del mapa de peligros, por lo que podemos afirmar que dicho mapa tiene un buen margen de confiabilidad.

La zona 3, de color amarillo y menor peligro en cuanto a probabilidad de ocurrencia, es aquella que podría ser afectada por flujos piroclásticos con una longitud de hasta 15 km, como aquellos producidos durante la tercera fase de la erupción de 1913. Una erupción de esta magnitud afectaría a unos 15,000 habitantes asentados en poblados y rancherías como la Yerbabuena, y la Becerrera en el estado de Colima, y Tonila, San Marcos, Cofradia, y Juan Barragán en el estado de Jalisco.

Otro mapa de peligros para flujos piroclásticos fue elaborado por Gavilanes (2004). Este autor realizó simulaciones por computadora empleando el alcance máximo de los flujos piroclásticos generados por la explosión tipo Soufriere del 17 de julio de 1999. Dichos flujos tuvieron un coeficiente de fricción de 0.33, por lo que los denominó "Soufriere pequeños". Este mapa indica que los flujos no afectarían asentamientos humanos fijos. El mismo autor denominó como "Soufriere Grandes" a los flujos con un coeficiente de fricción de 0.26 estudiados por Saucedo *et al.* (2004).

Con base en los estudios geológicos disponibles (Saucedo, 2001; Saucedo *et al.*, 2002; 2004; Gavilanes, 2004) podemos concluir que los únicos flujos piroclásticos capaces de destruir asentamientos humanos son aquellos que han ocurrido horas antes del desarrollo de una columna pliniana (Soufriere Grandes) y también los producidos por el colapso de una columna similar (Gavilanes, 2004; Gavilanes *et al.*, 2004).

IMPLICACIONES DE RIESGO Y CONCLUSIONES

Durante los últimos 15 años, la actividad del Volcán de Colima ha cambiado drásticamente. Hasta la mitad de la década de los noventa su actividad consistía en la generación de flujos de lava, derrumbes y algunos flujos piroclásticos tipo Merapi. Esta actividad era hasta cierto punto considerada como normal, la generación de flujos piroclásticos tenía una recurrencia aproximada de seis años. Sin embargo, a partir de 1998 el Volcán de Colima entró

en una etapa de mayor actividad cuya explosividad se ha ido incrementando con el tiempo. La recurrencia de los flujos piroclásticos se tornó casi anual y durante los últimos meses inclusive cambió a periodos diarios de actividad. Esto nos indica claramente que la actividad del Volcán de Colima ha venido escalando hacia niveles de mayor explosividad, que se podrían interpretar como las primeras manifestaciones de una erupción de mayor magnitud. Al respecto, es pertinente recordar que el preámbulo de la erupción de 1913 del Volcán de Colima fue la gran explosión de 1890, cuya ceniza fue reportada hasta Silao y Guanajuato (Arreola, 1915; De La Cruz, 1993). Después de ésta se observó un claro aumento en la frecuencia de las explosiones reportadas en 1891-1892, 1903, 1906, 1908 y 1909 hasta concluir con la erupción de 1913.

Una erupción de mayor magnitud, como las acontecidas en 1818 y 1913, pondría en riesgo a cerca de 300,000 habitantes asentados en un radio de 30 km de distancia del cráter, en donde se incluyen las ciudades de Colima y Ciudad Guzmán. La lluvia de ceniza podría afectar ciudades más distantes como Guadalajara, Guanajuato, Aguascalientes, San Luis Potosí y la misma ciudad de México, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios realizados en el Volcán de Colima han sido financiados por PromeP UASLP-PT-56, CO2-FAI-11-29.90, CONACYT (45928 a R. Saucedo y 47226 a J.L. Macías) y DGAPA (IN114206-3 a J.L. Macías). Se agradece el apoyo recibido durante las observaciones de campo a Carlos y Jorge Martínez Durán (Universidad de Colima) y a Ana García Semperes (Universidad de Alicante). Asimismo, deseamos agradecer al Dr. Ignacio Galindo del CUICA por la información que nos facilitó sobre la dispersión de las nubes de ceniza, a Gabriel Reyes D. por la información sismológica y a A.M. Rocha por el apoyo técnico recibido. Finalmente, agradecemos los atinados comentarios durante el proceso de arbitraje efectuados por Jorge Aranda y Edgardo Cañón.

BIBLIOGRAFÍA

Arreola, J.M., 1915. Catálogo de las erupciones antiguas del Volcán de Colima. *Memorias de la Soc. Antonio Alzate*, tomo, 32: 443-481.

- Bárcena, M., 1887. Informe sobre el estado actual del volcán de Colima. *Anales del Ministerio de fomento de México*. p. 328-365.
- BGVN, 1998a. *Bulletin of the Global Volcanism Network*, Smithsonian Institution, Washington D.C, 23 (9): 7-8.
- BGVN, 1998b. *Bulletin of the Global Volcanism Network*, Smithsonian Institution, Washington D.C, 23 (10): 9.
- BGVN, 1999. *Bulletin of the Global Volcanism Network*, Smithsonian Institution, Washington D.C., 24 (1): 3-5.
- Bretón *et al.*, 2002. Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, México 1519-2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V.117, p. 21-46.
- Cortés, A., Gavilanes, J.C., 1998. Evolución morfoestructural de la cima del volcán de Colima (1997-1998). *GEOS, Unión Geofísica Mexicana*, Puerto Vallarta, Jal., pp. 38-39.
- De La Cruz S., 1993. The historical eruptive activity of Colima Volcano, México. *Journal Volcanology and Geothermal Research*, v. 55, p. 51-68.
- Dolfus, A., Monserrat, E., 1867. *Arcive de la commission scientifique du Mexique Ministère de L'instruction Publique.*, tomo III: 7-55
- Galindo, I., Gavilanes, J.C., Cervantes, L., López J. P., Bricio E., and Zuazo N., 2006. Real-time remote sensing monitoring of lava flows of Volcán de Colima (México), 1996-2005. *EGU 2006 General Assembly*. Vienna, Austria.
- Gavilanes Ruiz J.C., 2004. Simulación de escenarios eruptivos del Volcán de Colima y aportaciones al plan de contingencias del estado de Colima. *Tesis de Maestría*. Programa de Posgrado en Geografía, UNAM, 136 páginas.
- Gavilanes-Ruiz J.C., Varley N., Cuevas A., Jones V., 2004. Modeling and probabilities of hazards at Volcán de Colima: implications for risk management. *2004 IAVCEI Meeting*, Pucón, Chile.
- Luhr, J.F. and Carmichael, I.S.E., 1990. Geology of Volcán de Colima Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto de Geología. Boletín 107*. México DF. 1-101 + plate.
- Martín Del Pozzo, A. L., Romero, V. H. Ruiz - Kitcher. R. E., 1987. Los flujos piroclásticos del Volcán de Colima. México, *Geofísica Internacional*, 26-2: 291-307.
- Martín Del Pozzo, A. L., Sheridan, M.F. and Barrera, D., Hubp, J.L. Vázquez, L., 1995. Mapa de peligros, Volcán de Colima. *Instituto de Geofísica, Universidad Nacional*



- Autónoma de México*, México DF.
- Medina-Martínez, F., 1983. Analysis of the eruptive history of the Volcán Colima, México, 156-1980. *Geofísica Internacional*, v. 22, p.157-178.
- Mooser F, 1961. Los volcanes de Colima. Instituto de Geología, UNAM; *Bol. No 61*, p. 49-71
- Navarro, C., A. Cortés, A., y A. Téllez, *Mapa de peligros del Volcán de Fuego de Colima*. Universidad de Colima, México, 2003.
- Orozco, M.N., 1869, Observaciones hechas en el mes de agosto de 1869 (por el ingeniero Miguel N. Orozco) de los fenómenos igneos del volcán de Colima: Colima, *Imprenta. del Gobierno del Estado* a cargo de L. Orozco, 12 p.
- Ortiz, S.G., 1994. La zona volcánica "Colima" del Estado de Jalisco. *Monografía del Instituto de Geografía de la Universidad de Guadalajara*, 44 p.
- Rodríguez-Elizarrarás, S.R., Siebe, C., Komorowski, J.C., Espindola, J.M., and Saucedo, R., 1991. Field observation of pristine block-and-ash-flow deposits emplaced April 16-17, 1991 at Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 48:399-412.
- Sartorius, C., 1869. Eruption of the volcano of Colima in June 1869. *Smithsonian Report*, pp. 423.
- Saucedo, G.R., 1997, Reconstrucción de la erupción de 1913 del volcán de Colima: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, *Tesis de Maestría*, 185p.
- Saucedo, R. 2001. Erupciones de 1991 y 1998-1999 del Volcán de Colima: Mecanismos de transporte y depositación de los flujos piroclásticos de bloques y ceniza. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, *Tesis de doctorado*.
- Saucedo, R. y Macías, J.L. (1999) La Historia del Volcán de Colima. *Tierra Adentro*, No. 98, pp. 8-14.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Bursik, M.I., Mora, J.C., Gavilanes, J.C., Cortés, A., 2002. Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 177, p. 129-153.
- Saucedo, G.R., Macías, J.L., Bursik, M.I., 2004, Merapi-type pyroclastic flows produced during the 1991 eruption of Colima Volcano: stratigraphy, sedimentology and emplacement mechanisms. *Bulletin of Volcanology*, 66(4), 291 – 306.
- Sheridan, M.F., Macías, J.L., 1995. Estimation of risk probability for gravity-driven pyroclastic flows at Volcán Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66, 251-256.
- Taran, Y., Gavilanes, J.C., Cortés, A., 2002, Chemical and isotopic composition of fumarolic gases and the SO₂ flux from Volcán de Colima, México, between the 1994 and 1998 eruptions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117(1-2), 105-119.
- Tello, F. A., 1651. Libro segundo de la Crónica Miscelánea en que se trata de la Conquista Espiritual y temporal de la Santa Provincia de Jalisco en el Nuevo Reino de la Galicia y Nueva Vizcaína y Descubrimiento del Nuevo México, *Imprenta de la Republica Literaria*, Guadalajara.
- Thorpe, R. S., Gibson, I. L., and Vizcaíno. J. S., 1977. Andesitic pyroclastic flows from Colima Volcán o: *Nature*, v. 265, p. 724-725.
- Waitz, P., 1915. El estado actual de los volcán es de México y la última erupción del Volcán de Colima (1913). *Revista Volcanológica*; 259-268.
- Waitz, P. 1935. *Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima Memorias de la Soc. Antonio Alzate*, tomo, 53: 349-383.
- Manuscrito recibido: 10 de marzo de 2006
 Recepción del manuscrito corregido: 7 de agosto de 2006
 Manuscrito aceptado: 11 de diciembre de 2006